ESTACON 2026|17th

ENGINEERING
SCIENCE
TECHNOLOGY
ARCHITECTURE
COLLABORATION
SUSTAINABILITY

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2569

The 17th Engineering, Science, Technology, and Architecture Conference 2026

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ

การประยุกต์นวัตกรรมและเทคโนโลยีรับมือสภาวะวิกฤตของโลก

Innovation & Technology Application for Global Crises



28 สิงหาคม 2569

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

คำนำ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2569 (Engineering Science Technology and Architecture Conference: ESTACON 2026) จัดขึ้นในวันศุกร์ที่ 28 สิงหาคม 2569 ณ อาคาร 38 อาคารปฏิบัติการรวม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ภายใต้หัวข้อ “การประยุกต์นวัตกรรมและเทคโนโลยีรับมือสภาวะวิกฤตของโลก” โดยมีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เป็นเจ้าภาพร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ และเครือข่ายสถาบันการศึกษาได้แก่

การประชุมครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ เผยแพร่ผลงานวิชาการและผลงานวิจัยของนักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ และผู้สนใจจากสถาบันการศึกษาและหน่วยงานต่าง ๆ ตลอดจนสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สถาปัตยกรรมศาสตร์ และสาขาที่เกี่ยวข้อง

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการฉบับนี้รวบรวมบทความวิจัยที่ผ่านกระบวนการพิจารณาคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับการตอบรับให้นำเสนอและเผยแพร่ในงาน ESTACON 2026 เพื่อใช้เป็นแหล่งอ้างอิงและต่อยอดองค์ความรู้ต่อไป

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ส่งบทความ หน่วยงานเครือข่าย คณะกรรมการดำเนินงาน และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ร่วมสนับสนุนให้การจัดประชุมวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17
28 สิงหาคม 2569

สารจากคณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา



ในนามของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติและยินดีเป็นอย่างยิ่งที่คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประจำปี พ.ศ. 2569 ซึ่งเป็นเวทีสำคัญในการนำเสนอผลงานวิจัย ผลงานวิชาการ และนวัตกรรมของคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และบุคลากรจากสถาบันเครือข่าย ตลอดจนหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

การประชุมวิชาการ ESTACON นับเป็นกลไกสำคัญในการส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวคิดทางวิชาการในหลากหลายสาขา ทั้งด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สถาปัตยกรรมศาสตร์ และศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง อันจะนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยที่มีคุณภาพ การต่อยอดองค์ความรู้สู่การใช้ประโยชน์ และการสร้างนวัตกรรมที่ตอบสนองต่อความต้องการของชุมชน สังคม และประเทศชาติ

การจัดงานในครั้งนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้หากปราศจากความร่วมมืออันเข้มแข็งของสถาบันเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ คณะกรรมการดำเนินงาน ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ คณะกรรมการตัดสินผลงานวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ร่วมแรงร่วมใจในการขับเคลื่อนการประชุมวิชาการครั้งนี้ให้เป็นพื้นที่แห่งการเรียนรู้ การสร้างสรรค์ และการเชื่อมโยงเครือข่ายทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง

ในโอกาสนี้ ข้าพเจ้าขออำนวยพรให้การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ขอให้ผลงานที่นำเสนอในการประชุมครั้งนี้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ที่เป็นประโยชน์ และนำไปสู่ความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัยที่เข้มแข็งยิ่งขึ้นต่อไป

ดร.สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



ในโอกาสที่คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพจัด การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ในวันที่ 28 สิงหาคม 2569 ณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ผมขอแสดงความยินดีและขอชื่นชมคณะผู้จัดงาน ตลอดจนทุกภาคส่วนที่มีส่วนร่วมในการจัดการประชุมวิชาการครั้งสำคัญนี้

การประชุมวิชาการดังกล่าวนับเป็นเวทีสำคัญในการเปิดโอกาสให้นักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ และบุคลากรจากสถาบันการศึกษาและหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ได้นำเสนอและเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย นวัตกรรม และองค์ความรู้ใหม่ ตลอดจนแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และแนวคิดทางวิชาการในศาสตร์ด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ อันจะนำไปสู่การต่อยอดองค์ความรู้และการประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศ

นอกจากนี้ การประชุมวิชาการยังมีบทบาทสำคัญในการสร้างและขยายเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัยระหว่างสถาบันการศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ นักศึกษา ตลอดจนภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง ซึ่งความร่วมมือดังกล่าวจะเป็นกลไกสำคัญในการยกระดับคุณภาพงานวิจัย การพัฒนานวัตกรรม และการผลิตผลงานวิชาการที่มีคุณภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ เชิงเศรษฐกิจ และเชิงสังคมได้อย่างเป็นรูปธรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ และพร้อมที่จะสนับสนุนการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ การสร้างความร่วมมือด้านการวิจัยและนวัตกรรม ตลอดจนการพัฒนาศักยภาพของนักศึกษาและบุคลากรร่วมกับสถาบันเครือข่ายอย่างต่อเนื่อง

ในโอกาสนี้ ผมขออำนวยพรให้ การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ทุกประการ และประสบความสำเร็จอย่างงดงาม ขอให้การแลกเปลี่ยนเรียนรู้และความร่วมมือที่เกิดขึ้นจากการประชุมครั้งนี้ เป็นพลังสำคัญในการสร้างสรรค์องค์ความรู้ งานวิจัย และนวัตกรรมที่มีคุณค่า และนำไปสู่การพัฒนาสังคมและประเทศชาติอย่างยั่งยืนต่อไป

(รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



การจัดประชุมวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2569 (ESTACON 2026) นับเป็นเวทีสำคัญในการเผยแพร่และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางวิชาการ ผลงานวิจัย และนวัตกรรม ตลอดจนเป็นกลไกในการสร้างเครือข่ายความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ และนักศึกษา ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการยกระดับคุณภาพงานวิจัยและการพัฒนากำลังคนให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสังคมและเทคโนโลยี เพื่อนำไปสู่การพัฒนาการเรียน การสอนและเสริมสร้างความเข้มแข็งที่มีศักยภาพในการแข่งขัน ตอบสนองความต้องการของสังคมที่แท้จริง นำไปสู่การพัฒนาประเทศชาติต่อไป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น มีความยินดีและเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของการประชุมวิชาการนี้ ในโอกาสนี้ กระผมขออวยพรให้การประชุมวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมครั้งนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของความร่วมมือทางวิชาการที่จะนำไป สู่การพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ยั่งยืนสำหรับประเทศไทยต่อไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

สารจากคณบดีคณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



ในนามผู้บริหาร คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ ขอแสดงความชื่นชม ยินดีกับนักวิชาการ นักวิจัย คณาจารย์ นิสิต นักศึกษา ทั้งในเครือข่ายและสถาบันอื่นๆ ที่ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี ตลอดจนงานวิจัยด้านการศึกษาและสังคมศาสตร์ เพื่อการเปลี่ยนแปลงโอกาสและความท้าทาย ผ่านการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 การประชุมวิชาการครั้งนี้ นับเป็นเวทีสำคัญในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ในงานวิจัยและนวัตกรรม รวมถึงแบ่งปันประสบการณ์ระหว่างนักวิจัยและนักวิชาการ ตลอดจนสะท้อนถึงความมุ่งมั่นในการส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาทางวิชาการ โดยมุ่งเน้นให้เกิดการบูรณาการองค์ความรู้สู่การประยุกต์ใช้ได้จริง

อันนำไปสู่การต่อยอดองค์ความรู้และสร้างสรรค์งานวิจัยที่มีคุณภาพตอบโจทย์ความต้องการของประเทศและสังคม ตลอดจนสร้างเครือข่ายความร่วมมือในการพัฒนางานวิจัยที่เข้มแข็ง ตอบสนองต่อความท้าทายของสังคมและการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

(ดร.อารีรัตน์ เชื้อบุญเกิด โนท)
คณบดีคณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล



ในนามของคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล รู้สึกเป็นเกียรติและยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้ร่วมเป็นส่วนหนึ่งในสถาบันเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ สำหรับการจัดงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 นี้

การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีและบริบทสังคมโลกในปัจจุบัน ทำให้การบูรณาการองค์ความรู้ข้ามสาขาวิชา ทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการออกแบบสถาปัตยกรรม มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน การประชุมวิชาการในครั้งนี้นับเป็นโอกาสอันดีที่นักวิชาการ นักวิจัย และนักศึกษา จะได้แลกเปลี่ยนองค์ความรู้ และสร้างความร่วมมือทางวิชาการให้เข้มแข็งยิ่งขึ้น

ในโอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณะผู้จัดงาน สถาบันเครือข่ายร่วม คณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ทุ่มเทแรงกายและแรงใจจนทำให้การจัดงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณนักวิจัยและผู้มีเกียรติทุกท่านที่นำผลงานมาร่วมแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ขออวยพรให้การประชุมวิชาการครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ และขอให้ทุกท่านประสบความสำเร็จในการนำองค์ความรู้ไปพัฒนาวิชาการและประเทศชาติต่อไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยนิกร กุลวงษ์)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ในนามของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติและยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้ร่วมเป็นส่วนหนึ่งของการประชุมวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ซึ่งเป็นเวทีสำคัญสำหรับการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และผลงานวิชาการ ระหว่างนักศึกษา คณาจารย์ นักวิจัย และเครือข่ายทางวิชาการ

การจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการสร้างพื้นที่แห่งการเรียนรู้และการเผยแพร่ผลงานวิจัย อันจะนำไปสู่การต่อยอดองค์ความรู้ การสร้างนวัตกรรม และการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ

ขอแสดงความชื่นชมและขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา คณะกรรมการดำเนินงาน ตลอดจนคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้เข้าร่วมการประชุมทุกท่าน ที่ได้ร่วมกันขับเคลื่อนและสร้างสรรค์เวทีทางวิชาการอันทรงคุณค่าในครั้งนี้ และขอให้การประชุมครั้งนี้ประสบความสำเร็จ เกิดองค์ความรู้ใหม่ ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ และเครือข่ายความร่วมมือที่เข้มแข็งต่อไป

(อาจารย์อนุชา ดีผาง)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รายละเอียดการประชุมและการดำเนินงาน

บทนำ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2569 หรือ ESTACON 2026 จัดขึ้นภายใต้หัวข้อ “การประยุกต์นวัตกรรมและเทคโนโลยีรับมือสภาวะวิกฤตของโลก” โดยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เป็นเจ้าภาพร่วมกับเครือข่าย ESTACON และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

การประชุมจัดขึ้นในวันศุกร์ที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2569 ณ อาคาร 38 อาคารปฏิบัติการรวม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีทางวิชาการสำหรับคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และบุคลากรจากสถาบันเครือข่ายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในการนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวคิดทางวิชาการ ตลอดจนสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิจัยและนวัตกรรมอย่างต่อเนื่อง

เครือข่ายความร่วมมือในการจัดการประชุม ESTACON ประกอบด้วยหน่วยงาน ดังนี้

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)
2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
3. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
4. คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
5. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
6. คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
7. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
8. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
9. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
10. คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

การประชุม ESTACON 2026 เปิดรับบทความในกลุ่มสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สถาปัตยกรรมศาสตร์ และสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยบทความที่ได้รับการตอบรับจะได้รับการเผยแพร่ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ Proceedings เพื่อเป็นแหล่งรวบรวมองค์ความรู้ ผลงานวิจัย และข้อเสนอเชิงวิชาการที่สามารถนำไปต่อยอดสู่การพัฒนาชุมชน สังคม และประเทศชาติ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเวทีทางวิชาการสำหรับเผยแพร่ผลงานวิจัย ผลงานวิชาการ และนวัตกรรมของคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และบุคลากรจากสถาบันเครือข่ายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวคิดทางวิชาการในด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สถาปัตยกรรมศาสตร์ และศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง
3. เพื่อสร้างและขยายเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัยระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานวิชาการ และภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง
4. เพื่อส่งเสริมการพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมที่มีคุณภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อชุมชน สังคม และประเทศชาติ

ขอบเขตของบทความ

การประชุมเปิดรับบทความวิจัยและบทความวิชาการในรูปแบบภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยครอบคลุมกลุ่มสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. กลุ่มวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมศาสตร์ (CAA)
2. กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (EAC)
3. กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล (ME)
4. กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์ (IML)
5. กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (SAT)
6. กลุ่มวิจัยสถาบัน วิจัยในชั้นเรียน และบริหารธุรกิจ (RAB)

บทความวิจัยและบทความวิชาการทุกเรื่องที่ได้รับการเผยแพร่ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการครั้งนี้ ได้ผ่านการตรวจสอบและประเมินผลจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน โดยใช้รูปแบบการประเมินแบบผู้นิพนธ์ไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Single-Blind Peer Review) ทั้งนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิเป็นผู้มีความเชี่ยวชาญในสาขาวิชาหรือสาขาที่เกี่ยวข้อง และมาจากเครือข่ายสถาบันการศึกษาและหน่วยงานทางวิชาการที่หลากหลาย เพื่อให้การพิจารณาบทความเป็นไปตามมาตรฐานทางวิชาการ จริยธรรมการตีพิมพ์ และหลักเกณฑ์การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

บทความที่ได้รับการตอบรับให้เผยแพร่ใน Proceedings เป็นบทความที่ผ่านกระบวนการพิจารณาคุณภาพ ได้รับข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ประพันธ์ได้ดำเนินการปรับแก้ไขตามข้อเสนอแนะภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการกำหนด ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการจัดทำรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ

การส่งบทความและกระบวนการพิจารณา

ผู้ประพันธ์ส่งบทความฉบับเต็มผ่านระบบออนไลน์ของการประชุม ESTACON 2026 ที่เว็บไซต์ https://estacon-fit.nrru.ac.th/ จากนั้นกองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบความครบถ้วนของบทความ จัดหมวดหมู่ตามกลุ่มสาขาวิชา และส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาตามสาขาที่เกี่ยวข้อง

เมื่อได้รับผลการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ กองบรรณาธิการแจ้งผลการพิจารณาและข้อเสนอแนะให้ผู้ประพันธ์ดำเนินการปรับแก้ไขตามระยะเวลาที่กำหนด บทความที่ผ่านการพิจารณาและส่งฉบับสมบูรณ์จะได้รับการบรรจุในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ Proceedings

รูปแบบการนำเสนอ

การนำเสนอผลงานในการประชุม ESTACON 2026 แบ่งเป็นรูปแบบหลักดังนี้

1. การนำเสนอผลงานภาคบรรยาย แบบ Onsite
2. การนำเสนอผลงานภาคบรรยาย แบบ Online
3. การนำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ แบบ Onsite

กำหนดการสำคัญในการส่งบทความ

กิจกรรม	กำหนดการ
เปิดรับบทความฉบับเต็ม	1 พฤษภาคม - 30 มิถุนายน 2569
แจ้งผลการพิจารณาบทความฉบับเต็ม	1 - 15 กรกฎาคม 2569
ผู้นำเสนอปรับแก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะ	1 - 15 กรกฎาคม 2569
ประกาศผลการพิจารณาบทความ	22 กรกฎาคม 2569
ลงทะเบียนและชำระเงิน	1 - 7 สิงหาคม 2569
วันประชุมวิชาการและนำเสนอผลงาน	28 สิงหาคม 2569

จริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ

1. ผู้ประพันธ์ต้องส่งบทความที่เป็นผลงานต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ในวารสาร รายงานสืบเนื่องจากการประชุม หรือสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน
2. ผู้ประพันธ์ต้องรับรองว่าผลงานที่ส่งเข้าร่วมการประชุมเป็นข้อมูลจริงจากการศึกษา วิจัย หรือการดำเนินงานทางวิชาการ และไม่มีการบิดเบือนข้อมูล
3. ผู้ประพันธ์ต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่นหรือนำผลงานของผู้อื่นมาใช้โดยไม่อ้างอิงอย่างถูกต้อง
4. ผู้ประพันธ์ต้องระบุชื่อผู้มีส่วนร่วมในผลงานให้ครบถ้วนและถูกต้องตามบทบาทจริง

5. ผู้ประพันธ์ต้องปรับแก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการภายในระยะเวลาที่กำหนด

6. ผู้ประพันธ์ต้องรับผิดชอบต่อความถูกต้องของเนื้อหา รูปแบบการอ้างอิง และข้อมูลทั้งหมดที่ปรากฏในบทความ

บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. กองบรรณาธิการมีหน้าที่ตรวจสอบความครบถ้วน รูปแบบ และความเหมาะสมเบื้องต้นของบทความก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมิน

2. กองบรรณาธิการดำเนินการจัดส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องพิจารณา

3. กองบรรณาธิการต้องรักษาความลับของข้อมูลผู้ประพันธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และผลการประเมินบทความ

4. กองบรรณาธิการพิจารณาผลการประเมินและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อประกอบการตัดสินใจรับ ปรับแก้ หรือไม่รับบทความ

5. กองบรรณาธิการต้องดำเนินงานด้วยความเป็นกลาง โปร่งใส และยึดถือมาตรฐานทางวิชาการเป็นสำคัญ

6. หากพบข้อสงสัยเกี่ยวกับการคัดลอกผลงานหรือการละเมิดจริยธรรมทางวิชาการ กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ระงับกระบวนการพิจารณาหรือปฏิเสธบทความตามความเหมาะสม

บทบาทหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

1. ผู้ประเมินบทความต้องพิจารณาบทความด้วยความเป็นธรรม รอบคอบ และอยู่บนพื้นฐานของหลักวิชาการ

2. ผู้ประเมินบทความต้องรักษาความลับของเนื้อหา ข้อมูล และเอกสารที่ได้รับระหว่างกระบวนการพิจารณา

3. ผู้ประเมินบทความควรให้ข้อเสนอแนะที่ชัดเจน สร้างสรรค์ และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาคุณภาพบทความ

4. หากผู้ประเมินเห็นว่าตนไม่มีความเชี่ยวชาญเพียงพอ หรือมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้ประพันธ์ ต้องแจ้งกองบรรณาธิการทันที

5. หากพบข้อสงสัยเกี่ยวกับการคัดลอกผลงาน การเผยแพร่ซ้ำ หรือการละเมิดจริยธรรมทางวิชาการ ผู้ประเมินควรแจ้งกองบรรณาธิการเพื่อดำเนินการตรวจสอบต่อไป

บทบาทของเครือข่ายความร่วมมือในการจัดงาน

เครือข่ายความร่วมมือในการจัดประชุม ESTACON มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนและขับเคลื่อนการดำเนินงานให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง มีมาตรฐาน และสะท้อนความร่วมมือทางวิชาการระหว่างสถาบัน โดยมีบทบาทสำคัญดังนี้

1. ร่วมกำหนดทิศทางและแนวทางการจัดประชุมวิชาการ ESTACON ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของเครือข่าย และตอบสนองต่อการพัฒนาทางวิชาการ วิจัย และนวัตกรรม
2. ร่วมประชุม วางแผน และกำหนดรูปแบบการดำเนินงาน เช่น รูปแบบการประชุม รูปแบบการนำเสนอผลงาน กำหนดการสำคัญ และแนวทางการบริหารจัดการงานประชุม
3. ร่วมพิจารณาและกำหนดเจ้าภาพในการจัดประชุมแต่ละปี เพื่อให้การดำเนินงานมีความต่อเนื่อง และเปิดโอกาสให้สถาบันเครือข่ายได้มีส่วนร่วมในการเป็นเจ้าภาพหมุนเวียน
4. ร่วมประชาสัมพันธ์การประชุม เชิญชวนคณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และบุคลากรในสังกัด ให้ส่งบทความ เข้าร่วมนำเสนอผลงาน และเข้าร่วมกิจกรรมทางวิชาการ
5. ร่วมเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิหรือผู้เชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำหน้าที่พิจารณาบทความวิจัยและบทความวิชาการตามกระบวนการประเมินคุณภาพ
6. ร่วมพิจารณา กลั่นกรอง และให้ข้อเสนอแนะต่อบทความตามความเชี่ยวชาญของแต่ละสาขา เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลงานให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และมีคุณค่าทางวิชาการ
7. ร่วมส่งผู้แทนเป็นคณะกรรมการดำเนินงาน คณะกรรมการประจำห้องนำเสนอ Chair, Co-chair หรือคณะกรรมการตัดสินผลงานวิจัย เพื่อกำกับ ดูแล และประเมินการนำเสนอผลงาน
8. ร่วมสนับสนุนงบประมาณ ทรัพยากร บุคลากร สถานที่ อุปกรณ์ หรือการดำเนินงานด้านต่าง ๆ ตามศักยภาพและบทบาทของแต่ละหน่วยงาน
9. ร่วมแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวปฏิบัติที่ดีในการจัดประชุมวิชาการ เพื่อยกระดับมาตรฐานของการจัดงาน ESTACON ให้มีคุณภาพและความต่อเนื่อง
10. ร่วมสร้างและขยายเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการ การวิจัย และนวัตกรรมระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานวิชาการ และภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง
11. ร่วมประเมินผลและให้ข้อเสนอแนะหลังการจัดงาน เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนารูปแบบการจัดประชุมในปีถัดไปให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

กลุ่มวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมศาสตร์ (CAA)

ผศ.ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.มาริสา หิรัญตียะกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.วุฒิพงศ์ แสนบุดดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ โพธิสาร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ดวงธิดา โคตรโยธา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.อาภา สธนเสาวภาคย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
รศ.ดร.ธนากร ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.จักษดา ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.สมพินิจ เหมืองทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.เกียรติสุดา สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ฉัตร พยุงวิวัฒนกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.วรวิทย์ โพธิ์จันทร์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.ทรงยศ มงคลพิศ	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ผศ.ดร.ชีวินทร์ ลิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.อนิรุทธิ์ สุขเสน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

EAC กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ผศ.ดร.กนกพร บุญจูบุตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ทศพร จันทร์เผือก	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
รศ.ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.คมเดช ภาพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ยุทธณา คงจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ถนอมศักดิ์ โสภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ธงชัย คล้ายคลึง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ธรรมกร ครองไตรภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

ผศ.ดร.นพณัฐ จิตกรียาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ปิยดนัย บุญไมตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.วัชรพล นาคทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.วิทยา ศรีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ศรันย์ คัมภีร์ภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.อภิญญา ดีค่ายคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.เอกลักษณ์ ฉิมจารย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ธัชชัย พุ่มพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.นุชนาฏ สันทาลุนัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ธีรยุทธ คุณะโคตร	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ผศ.เนติ ศรีหานู	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อาจารย์ธนัช เอกเกื้อกูล	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อาจารย์ วิชาญ ศรีสุวรรณ	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อาจารย์อนุชา ดีผาง	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ผศ.ดร.ชมพู ทรัพย์ปทุมสิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ชิตพงษ์ เกตุถนอม	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.พัชรินทร์ อาตมียะนันท์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.อานนท์ ศรีสว่าง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

IML กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์

ผศ.ดร.กนกพร บุญจูบุตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ปรัชญ์ บุญแซม	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.วรุทัย เดชตานนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.วุฒิพงศ์ แสนบุดดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อนุชิต คงฤทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ โพธิสาร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ดร.ดวงธิดา โคตรโยธา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.อังคาร คำเรือน	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
อาจารย์ณพิตร วัฒนวีรพงษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
รศ.ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ฉกาจ เชื่อดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ณัฐิญา วงละคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.นวลละออง สระแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.พีรวัส คงสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.รุ่งวสันต์ ไกรกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.วิลาสินี กีรกิตติสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ศุภรัชญา จงอุตส่าห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.สุรศักดิ์ มะธิโตปะนำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.พรรัตน์ ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.สวลี อุตรา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ดร.มารุต โคตรพันธ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.รุ่งทิวา เวทยะเวทิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.อานนท์ ศรีสว่าง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

ME กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล

ผศ.วุฒิพงศ์ แสนบุดดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อนุชิต คงฤทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ธนภรณ์ สกลภัทรศร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.อังคาร คำเรือน	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
อาจารย์ณพิตร วัฒนวีรพงษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
รศ.ดร.คณิต มานะธุระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.กันญา โกสุมภ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ณัฐพงษ์ ประภาการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.นิติศักดิ์ หนูมาน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ปฏิวัติ วรามิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

ผศ.ดร.ปิยะมาศ จานนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ภาณุศักดิ์ มูลศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.วารี ศรีสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.สัญชัย รำเพยพัด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.เพลงพิณ เพียรภูมิพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ติณกร ภูวดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.นิวัฒน์ เกตุชาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ศุกรินทร์ คำสุวรรณ	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ผศ.ดร.จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ชัยนิกร กุลวงษ์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ยุทธชัย เกี้ยวสันเทียะ	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

RAB กลุ่มวิจัยสถาบัน วิจัยในชั้นเรียน และบริหารธุรกิจ

ผศ.ดร.กนกพร บุญจูบุตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.วุฒิพงศ์ แสนบุดดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ โพธิสาร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ธนภรณ์ สกลภัทรศร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.สวลี อุตรา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

SAT กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผศ.ดร.ปรัชญ์ บุญแซม	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ธนภรณ์ สกลภัทรศร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
อาจารย์ณพิตร วัฒนวีรพงษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.กุณฑิกา บุญสุภาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผศ.ดร.ฉัตรชัชชญาน์ โชติชญาณ์พงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

ผศ.ดร.ชนิดา กุประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รศ.ดร.น้ำฝน สามสาลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.ลลิดา ศิริอนันต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ดร.พลวัชร์ จันทรมงคล	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ดร.จิตติมา กุลวงค์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.ณัฐสุรางค์ ยะสูงเนิน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ดร.ปิติภูมิ โพสาวัง	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

กำหนดการ

การประชุมวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ESTACON 2026 ครั้งที่ 17

วันศุกร์ที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2569 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

เวลา	รายละเอียด
08.00–08.30 น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุม
08.30–08.45 น.	กล่าวรายงานวัตถุประสงค์การจัดงาน โดย ดร.สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
08.45–09.00 น.	พิธีเปิดการประชุม โดย รศ.ดร.อดิศร เนาวนนท์ อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
09.00–09.15 น.	กล่าวต้อนรับและกล่าวปาฐกถา เรื่อง "การศึกษาและนวัตกรรมเพื่อรับมือวิกฤตโลก" โดย รศ.ดร.อดิศร เนาวนนท์ อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
09.15–09.30 น.	มอบของที่ระลึกให้เครือข่าย และพิธีมอบเจ้าภาพการจัดประชุมวิชาการฯ ครั้งที่ 18
09.30–10.30 น.	การบรรยายพิเศษ เรื่อง "มาตรฐานวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ: กุญแจสู่ความปลอดภัย ความมั่นคง และความยั่งยืนของโลกอนาคต" โดย ดร.เตชทัต บูรณะอิศวกุล ประธานสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
10.30–11.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
11.00–12.00 น.	นำเสนอผลงานภาคบรรยาย Oral Presentation ช่วงเช้า
12.00–13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00–14.15 น.	นำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ Poster Presentation และนำเสนอภาคบรรยาย Oral Presentation ช่วงบ่าย
14.15–14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45–16.00 น.	นำเสนอผลงานภาคบรรยาย Oral Presentation ช่วงบ่าย
16.00–16.30 น.	สรุปผลการนำเสนอและพิธีปิดการประชุม

กำหนดการนำเสนอบทความวิจัย

กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์: EAC นำเสนอ ณ Room 1

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ดร.ทศพร จันทร์เผือก Co-chair: อ.เสกสิทธิ์ กมลชัย		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	EAC-0001	ชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า แสดงผลและควบคุมระยะไกล ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ด้วย PLC Siemens S7-1200 (online)
11.15–11.30 น.	EAC-0003	เครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษา กรณีศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (online)
11.30–11.45 น.	EAC-0009	การออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดแนวราบ (online)
11.45–12.00 น.	EAC-0012	เครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (online)
Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: ผศ.ดร.อัจฉรา ชุมพล Co-chair: อ.สมิทธ์ ปรีชาญาณ		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	EAC-0031	หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ (online)
13.15–13.30 น.	EAC-0032	การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและตัวชี้วัดสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้เงื่อนไขวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐาน (online)
13.30–13.45 น.	EAC-0061	การออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซี เพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา (online)
13.45–14.00 น.	EAC-0034	การประเมินผลกระทบของการติดตั้งโซล่าเซลล์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำ
14.00–14.15 น.	EAC-0035	การควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สำหรับการชดเชยโหลดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ
14.15–14.30 น.	EAC-0036	การประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสของระบบจำหน่ายแรงต่ำ

Section 3 (14.45–16.00 น.) Chair: ผศ.ดร.เอกวิทย์ หวังกั้นกลาง Co-chair: อ. สันติ ชวนนอก		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
14.45–15.00 น.	EAC-0038	กรณีศึกษาการขับเคลื่อนไร้สายในระบบการจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ใช้การแปลงพลังงานเสมือนจริงในรถไฟ
15.00–15.15 น.	EAC-0039	การตรวจสอบหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำเพื่อรองรับรถยนต์ไฟฟ้า
15.15–15.30 น.	EAC-0040	ตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
15.30–15.45 น.	EAC-0041	การจัดวางและกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบรัศมี IEEE 33 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธี PSO เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงแรงดัน และเพิ่มความเชื่อถือได้ พร้อมการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วยมอนติคาร์โล
15.45–16.00 น.	EAC-0042	การออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเร็วตามมาตรฐาน PEA และ IEEE Std.80-2013: กรณีศึกษาศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์: EAC นำเสนอ ณ Room 2

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ชิตพงษ์ เกตุถนอม Co-chair: อ. สันติ ชวนนอก		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	EAC-0004	การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก
11.15–11.30 น.	EAC-0005	ชุดสาธิตระบบไฟฟ้าไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์
11.30–11.45 น.	EAC-0006	การศึกษาการสลับเฟสที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าของสายส่งขนาด 500 กิโลโวลต์ วงจรคู่
11.45–12.00 น.	EAC-0007	ระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: ผศ.ดร.ศุภพชรสุวรรณ อาตมียะนันท์ Co-chair: อ.แสงเพ็ชร งอนชัยภูมิ		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	EAC-0008	การออกแบบสายอากาศแพตช์ขนาดกะทัดรัดสำหรับการสื่อสารยานพาหนะกับทุกสิ่งสำหรับV2X
13.15–13.30 น.	EAC-0014	การควบคุมโดรนทิศทางแนวตั้ง 4 ใบพัด
13.30–13.45 น.	EAC-0021	สายอากาศโมโนโพลแถบความถี่คู่รูปสามเหลี่ยมเซาะร่องสำหรับประยุกต์ใช้งาน WLAN

เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.45–14.00 น.	EAC-0022	การพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติโดยใช้ PLC หุ่นยนต์อุตสาหกรรมและCC-Link
14.00–14.15 น.	EAC-0023	ระบบตรวจจับและระบุความผิดพลาดของแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก
14.15–14.30 น.	EAC-0024	ระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุสำหรับป้อมยาม
Section 3 (14.45–16.00 น.) Chair: ผศ.ธีรพันธุ์ สุทธิเทพ Co-chair: อ.แสงเพ็ชร งอนชัยภูมิ		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
14.45–15.00 น.	EAC-0025	การยกระดับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนสู่อุปกรณ์ IoT ด้วยอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนัง ที่ใช้ ESP32-C3 และโปรโตคอล MQTT บน Home Assistant
15.00–15.15 น.	EAC-0026	การออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสารทางเสียงและการมองเห็นทางสายตา
15.15–15.30 น.	EAC-0028	Mobility Testing of a Plant Protection Robot Under Payload Conditions for Outdoor Vegetable Plots
15.30–15.45 น.	EAC-0029	ระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์
15.45–16.00 น.	EAC-0033	ผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ

กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์: EAC นำเสนอ ณ Room 3

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย Co-chair: อ.สุวพัชร คัดจันทึก		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	EAC-0043	การพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะด้วยสื่อมัลติมีเดีย และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
11.15–11.30 น.	EAC-0044	การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอุณหภูมิและแรงดันของแบตเตอรี่โซลิดสเตตและลิเธียมไอออนด้วยแบบจำลองวงจรสมมูล
11.30–11.45 น.	EAC-0045	การพัฒนาระบบอ่านค่าเกจแบบเข็มสำหรับการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ
11.45–12.00 น.	EAC-0046	การประสานงานที่เหมาะสมที่สุดตามเมตาฮิวริสติกของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทางภายใต้ข้อจำกัด CTI ในระบบ IEEE 14-Bus
Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: ผศ.ดร.ชมพู ทรัพย์ปทุมสิน Co-chair: ผศ.นิทัศน์ สุริยะกาญจน์		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	EAC-0048	การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลที่มีการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว: กรณีศึกษาระบบ IEEE 33 บัส
13.15–13.30 น.	EAC-0049	การออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบกลไกหุ่นยนต์ควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ
13.30–13.45 น.	EAC-0050	การลดพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์
13.45–14.00 น.	EAC-0052	การพัฒนาสายอากาศแผ่นวงจรพิมพ์ให้อัตราขยายสูงโดยการเซาะร่องรูปตัวทีเพื่อใช้ภายในอาคารสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล
14.00–14.15 น.	EAC-0053	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้น สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย
14.15–14.30 น.	EAC-0054	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลในเทคโนโลยีซิกบีโดยใช้โครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูหลายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบฟาร์ม

Section 3 (14.45–15.45 น.) Chair: ผศ.นิทัศน์ สุริยะกาญจน์ Co-chair: ดร.รัฐศาสตร์ ลายกนก		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
14.45–15.00 น.	EAC-0056	ระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้นสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าบนแพลตฟอร์มประมวลผลฝังตัว
15.00–15.15 น.	EAC-0057	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมหลายขนาด 5 ชั้น
15.15–15.30 น.	EAC-0059	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับขดลวดทองแดงวงกลมหลายขนาด 13 ชั้น
15.30–15.45 น.	EAC-0060	ระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์: IML นำเสนอ ณ Room 4

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ดร.ปรัชญ์ บุญแซม Co-chair: อ.ฤทธิรงค์ แจ้งอิ่ม		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	IML-0004	การวิเคราะห์ผลกระทบจากราคาน้ำมันที่ผันผวนต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการไทย กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา (online)
11.15–11.30 น.	IML-0006	การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโรเตอร์เครื่องซักผ้า กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า (online)
11.30–11.45 น.	IML-0035	การปรับเหมาะระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Arena: กรณีศึกษาแยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี (online)
11.45–12.00 น.	IML-0038	Multi-Criteria ABC-Based Storage Layout Improvement for Outdoor Precast Concrete Yard (online)

Section 2 (13.00–14.15 น.) Chair: รศ.ดร.นรงค์ วิชาผา Co-chair: อ.ฤทธิรงค์ แจ้งอิ่ม		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	IML-0029	การพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสีและการตัดสินใจด้วยปัญญาประดิษฐ์
13.15–13.30 น.	IML-0030	การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม
13.30–13.45 น.	IML-0031	การประเมินสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
13.45–14.00 น.	IML-0032	การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้ กรณีศึกษาของเล่น
14.00–14.15 น.	IML-0033	การพัฒนาเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกล้วยฉาบ
Section 3 (14.45–15.45 น.) Chair: ผศ.ดร.วรุทัย เดชตานนท์ Co-chair: ผศ.ดร.กนกพร บุญจูบุตร		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
14.45–15.00 น.	IML-0021	การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่
15.00–15.15 น.	IML-0022	การศึกษาคุณภาพแนวเชื่อมและประสิทธิภาพการผลิตของเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติ สำหรับการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรม
15.15–15.30 น.	IML-0034	การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมเพื่อลดเวลาและจำนวนขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์
15.30–15.45 น.	IML-0037	การวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (กรณีศึกษาเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ บริษัทสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จำกัด อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว)
15.45–16.00 น.	IML-0026	แนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษ: กรณีศึกษาคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์: IML นำเสนอ ณ Room 5

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ดร.อานนท์ ศรีสว่าง Co-chair: อ.จิรวัฒน์ โลพันดุง		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	IML-0002	การปรับปรุงผังโรงงานผลิตเครื่องนอนหลายผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ: กรณีศึกษาโรงงานไพรจิตรเครื่องนอน
11.15–11.30 น.	IML-0003	การศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของใบอ้อยและเม็ดโฟมโพลีสไตรีนต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบา
11.30–11.45 น.	IML-0005	การวิเคราะห์ต้นทุนรวมและโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู กรณีศึกษาผู้ประกอบการในจังหวัดกาฬสินธุ์
11.45–12.00 น.	IML-0009	การศึกษาการเลือกรูปแบบการเดินทางเพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ
Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: ผศ. ปิยะณัฐ โตอ่อน Co-chair: ดร.ศุภกฤต พริ้วไธสง		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	IML-0011	การประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์
13.15–13.30 น.	IML-0012	การคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้วิธี AHP-WASPAS
13.30–13.45 น.	IML-0014	Optimization of Candied Bilimbi Drying Using a Solar-Powered Temperature-Controlled Parabolic-Dome Hot-Air Dryer
13.45–14.00 น.	IML-0018	การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิและประสิทธิภาพความร้อนของตู้อบฟลักซ์สำหรับการเชื่อมใต้ผงฟลั๊กซ์ด้วยท่อกระจายความร้อนแบบเจาะรู
14.00–14.15 น.	IML-0019	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป
14.15–14.30 น.	IML-0020	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันออกจากน้ำหล่อเย็นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสีมาตรฐาน (RGB)

กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล: ME นำเสนอ ณ Room 6

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ผศ.ดร.อนุชิต คงฤทธิ์ Co-chair: อ.รักพงษ์ ขันธวิธิ		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	ME-0006	การลดความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งลมร้อนด้วยการควบคุมความเร็วลมแบบแปรผัน (online)
11.15–11.30 น.	ME-0007	การออกแบบและสร้างเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ (online)
11.30–11.45 น.	ME-0022	การประเมินสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวสองชั้นและสามชั้นภายใต้การควบคุม อากาศปฐมภูมิสำหรับงานหุงต้ม (online)
11.45–12.00 น.	ME-0023	อิทธิพลของความพรุนเม็ดอะลูมินาต่อสมรรถนะหัวเผาเส้นใยโลหะ (online)
Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: ดร.อังคาร คำเรือน Co-chair: อาจารย์ปิยะพงษ์ สิงห์บัว		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	ME-0030	การออกแบบและการสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 (online)
13.15–13.30 น.	ME-0034	การปรับอุณหภูมิห้องอัตโนมัติเพื่อการประหยัดพลังงาน (online)
13.30–13.45 น.	ME-0033	การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขจัดคราบคาร์บอนบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์การออกแบบการทดลอง (online)
13.45–14.00 น.	ME-0020	การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบอินฟาเรด
14.00–14.15 น.	ME-0024	การศึกษาและพัฒนาหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากแผงโซลาร์พาเนล
14.15–14.30 น.	ME-0026	การจำลองการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวที่ใช้เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5
Section 3 (14.45–16.00 น.) Chair: อ.ปิยะพงษ์ สิงห์บัว Co-chair: ผศ.ดร.อนุชิต คงฤทธิ์		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
14.45–15.00 น.	ME-0027	การวิเคราะห์สมรรถนะของตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด
15.00–15.15 น.	ME-0017	เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพา
15.15–15.30 น.	ME-0018	การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอจาเพาะของเหล็กกล้าอุตสาหกรรมเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตใบมีดตีปุ้ยอินทรีย์
15.30–15.45 น.	ME-0028	การปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีตซิงก์ด้วยกระบวนการกัดไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมแรงดันในสภาวะการไหลปั่นป่วน: การศึกษาเชิงทดลอง
15.45–16.00 น.	ME-0029	การปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอริแฟกชันด้วยวิธีทากูชิ

กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล: ME นำเสนอ ณ Room 7

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ดร.อังคาร คำเรือน Co-chair: อาจารย์ธวัชชัย ชาญสูงเนิน		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	ME-0001	การพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี IoT โดยใช้ ESP32 และเซนเซอร์ MQ แบบคู่ร่วมกับการแจ้งเตือนผ่าน LINE แบบเรียลไทม์
11.15–11.30 น.	ME-0002	Comparative Modeling of Drying Kinetics of Mitragyna speciosa
11.30–11.45 น.	ME-0003	Development of an Intelligent Transportation Robot Prototype for Indoor Navigation Using LiDAR Integrated with ROS 2
11.45–12.00 น.	ME-0004	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก
Section 2 (13.00–14.30 น.) Chair: รศ.ดร.โกศล เรืองแสน Co-chair: อาจารย์ธวัชชัย ชาญสูงเนิน		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	ME-0005	การออกแบบและพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัจฉริยะ
13.15–13.30 น.	ME-0011	การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK
13.30–13.45 น.	ME-0012	การศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งของสีและพฤติกรรมการกระจายความร้อนในตู้อบถังโลหะระบบหมุนเวียนอากาศ
13.45–14.00 น.	ME-0013	การพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงเพื่อลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ
14.00–14.15 น.	ME-0014	การพัฒนาและหาประสิทธิภาพของเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติเพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารชุมชน
14.15–14.30 น.	ME-0015	การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองด้วยการสเปรย์น้ำ

กลุ่มวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมศาสตร์: CAA นำเสนอ ณ Room 8

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ดร.ดวงธิดา โคตรโยธา Co-chair: ผศ.ดร.มาริสา หิรัญตียะกุล		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	CAA-0003	การพัฒนามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกระจกเทมเปอร์บดสำหรับบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง
11.15–11.30 น.	CAA-0013	แนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ด้วยระบบระบายอากาศธรรมชาติ (online)
11.30–11.45 น.	CAA-0014	การปรับปรุงดินด,วยปูนขาวสำหรับงานชั้นรองพื้นทาง: อิทธิพลของพลาสติกซิตี้ของดินและปริมาณปูนขาวตEอการบดอัดและการพัฒนากำลังอัดระยะสั้น
11.45–12.00 น.	CAA-0015	อิทธิพลของวัสดุผงรีไซเคิลต่างชนิดต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง
Section 2 (13.00–14.45 น.) Chair: ดร.สวลี อุตรา Co-chair: ผศ.ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	CAA-0016	ผลของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลต่อพฤติกรรมภายใต้แรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป
13.15–13.30 น.	CAA-0017	การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมยางแอสฟัลต์รีไซเคิล: การวิเคราะห์การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยวิธี GRA TOPSIS และ WSM
13.30–13.45 น.	CAA-0018	การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย
13.45–14.00 น.	CAA-0019	พฤติกรรมการรับแรงดัดและการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน
14.00–14.15 น.	CAA-0020	การพัฒนาแผนปฏิบัติการการจัดการขยะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดเล็กที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย
14.15–14.30 น.	CAA-0021	การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงพื้นที่ภายในอาคารเทศบาลสูงเนินเพื่อจัดแสดงผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการค้า และการท่องเที่ยวด้วยภูมิปัญญาพื้นถิ่น
14.30–14.45 น.	CAA-0022	การหาก๊าซเรือนกระจกอาคารที่พักอาศัย 3 ชั้นก่อนและหลังการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์

กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: SAT และกลุ่มวิจัยสถาบัน วิจัยในชั้นเรียน และบริหารธุรกิจ: RAB
นำเสนอ ณ Room 9

Section 1 (11.00–12.00 น.) Chair: ดร.ณัฐสุรางค์ ยะสูงเนิน Co-chair: ดร. ธนภรณ์ สกลภัทรศร		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
11.00–11.15 น.	SAT-0002	การพัฒนาแอปพลิเคชันบนมือถือเพื่อการจำแนกประเภทขยะอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีรหัสแท่งและปัญญาประดิษฐ์ (online)
11.15–11.30 น.	SAT-0006	การวิเคราะห์โปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายภายใต้สภาวะการตกตะกอนในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันด้วยเทคนิค SDS-PAGE (online)
11.30–11.45 น.	SAT-0008	การศึกษานำร่องการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM เพื่อจำแนกกลุ่มพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ของผู้บริโภค: กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา (online)
11.45–12.00 น.	SAT-0017	แนวทางการจัดการโรงเรียนคาร์บอนต่ำ: กรณีศึกษาโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) (online)
Section 2 (13.00–14.15 น.) Chair: ดร.จิตติมา กุลวงค์ Co-chair: ดร. ธนภรณ์ สกลภัทรศร		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	SAT-0003	ระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลอัจฉริยะบนแอปพลิเคชัน LINE ด้วยปัญญาประดิษฐ์
13.15–13.30 น.	SAT-0004	การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง
13.30–13.45 น.	SAT-0010	การใช้งานระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ลิเธียม เพื่อประหยัดค่าไฟฟ้าในช่วง On-peak
13.45–14.00 น.	SAT-0011	การสร้างและประเมินการทำงานของชุดพื้นรองปฏิบัติงานอัตโนมัติกรณีเปลี่ยนแม่พิมพ์:สหกิจศึกษา
14.00–14.15 น.	SAT-0016	การคัดแยกกลุ่มแบคทีเรียเมทาโนโทรฟจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและพัฒนาต่อยอดสู่เซลล์โปรตีนสูง

Section 3 (14.45–16.00 น.)	Chair: ดร.ลักษมี โขมโนทัย Co-chair: ดร.จิระพงษ์ พนาวงศ์	
14.45–15.00 น.	RAB-0003	ระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการยอมรับเทคโนโลยี
15.00–15.15 น.	RAB-0007	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับอัตโนมัติผ่าน Google Workspace และ LINE เพื่อสนับสนุนการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
15.15–15.30 น.	RAB-0008	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเบิกจ่ายค่าตอบแทนการสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
15.30–15.45 น.	RAB-0009	การพัฒนาสมรรถนะบัณฑิตนักปฏิบัติด้านวิศวกรรมระบบควบคุมผ่านการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับการประเมินผลแบบสมรรถนะ
15.45–16.00 น.	RAB-0010	การจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานตามแนวคิด CDIO เพื่อพัฒนาสมรรถนะด้านจลนศาสตร์หุ่นยนต์ของนักศึกษาวิศวกรรม

กำหนดการนำเสนอแบบโปสเตอร์

CAA กลุ่มวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมศาสตร์ นำเสนอ ณ โซน CAA

Chair: ผศ.ดร.เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ โพธิสาร Co-chair: ผศ.ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

เวลา	รหัส	ชื่อบทความ
13.00–13.15 น.	CAA-0004	แนวทางการออกแบบห้องน้ำในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรม: กรณีศึกษาวัดหน้าพระธาตุ อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา
13.15–13.30 น.	CAA-0006	การบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการพัฒนาชุมชน กรณีศึกษาโครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา จังหวัดนครราชสีมา
13.30–13.45 น.	CAA-0007	ศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา
13.45–14.00 น.	CAA-0010	การศึกษาการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส จังหวัดนครราชสีมา
14.00–14.15 น.	CAA-0011	แนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ กรณีศึกษาเส้นทางจาก หอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

EAC กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ นำเสนอ ณ โซน EAC-I

Chair: ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย Co-chair: อ.เสกสิทธิ์ กมลชัย

เวลา	รหัส	ชื่อบทความ
13.00–13.15 น.	EAC-0020	การศึกษาการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอสำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบ WLAN
13.15–13.30 น.	EAC-0027	Electric vehicle training kit for CAN BUS network with Display
13.30–13.45 น.	EAC-0047	การพัฒนาระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้า (VCU) โดยใช้โปรแกรม CODESYS สำหรับชุดฝึกจำลอง การควบคุมมอเตอร์
13.45–14.00 น.	EAC-0051	เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กโตรพลาสมา ในโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ
14.00–14.15 น.	EAC-0055	การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

EAC กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ นำเสนอ ณ โซน EAC-II

Chair: ผศ.ดร.เอกวิทย์ หวังกั้นกลาง Co-chair: อ.สุวพัชร คัดจันทึก

เวลา	รหัส	ชื่อบทความ
13.00–13.15 น.	EAC-0016	ระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย
13.15–13.30 น.	EAC-0017	ระบบตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักรด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์
13.30–13.45 น.	EAC-0018	ระบบวัดปริมาณแอลกอฮอล์ร่วมกับ AI สำหรับติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์
13.45–14.00 น.	EAC-0019	การศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลปรับจูนร่วมกับยากิ-อูดะสำหรับประยุกต์ใช้งาน สองย่านความถี่ในระบบ 4G/5G
14.00–14.15 น.	EAC-0058	ระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar

IML กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์ นำเสนอ ณ โซน IML/ME

Chair: อ.ณพิตร วัฒนวีรพงษ์ Co-chair: อ.จิรวัฒน์ โลพันดุง

เวลา	รหัส	ชื่อบทความ
13.00–13.15 น.	IML-0028	การหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยและน้ำยางธรรมชาติ สำหรับสถานพยาบาล
13.15–13.30 น.	IML-0023	การยกระดับสมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์และทักษะนวัตกรผ่านโครงงานแผ่นมุ้งปิดช่องลม เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน
13.30–13.45 น.	IML-0017	แรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมา
13.45–14.00 น.	ME-0010	การสูญเสียพลังงานจากการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กันของเครื่องจักรและวัตถุดิบในกระบวนการสีข้าวเปลือก:กรณีศึกษา

RAB กลุ่มวิจัยสถาบัน วิจัยในชั้นเรียน และบริหารธุรกิจ นำเสนอ ณ โซน SAT/RAB

Chair: ผศ.ดร.วรุทัย เดชตานนท์ Co-chair: อ.ละอองดาว ขุนงิ้ว		
เวลา	**รหัส**	**ชื่อบทความ**
13.00–13.15 น.	SAT-0005	การวิเคราะห์ตำแหน่งและพลังงานการจับของโปรตีน Outer Membrane Protein N ต่อกลูโคสและมอลโทสโดยใช้เทคนิค Molecular Docking
13.15–13.30 น.	SAT-0009	The Construction of an LPG Gas Detector with Smartphone Notification
13.30–13.45 น.	SAT-0018	การสร้างสิ่งบ่งชี้เทียมในรอยเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลองสำหรับการตรวจสอบเทคนิควิธีการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม
13.45–14.00 น.	RAB-0006	รายงานผลการใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) ผ่านกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสานเพื่อสร้างทักษะนวัตกรและพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน
14.00–14.15 น.	RAB-0011	ประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด จังหวัดนครราชสีมา

สารบัญ

		หน้า
คำนำ		ก
สารจากคณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา		ข
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน		ค
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น		ง
สารจากคณบดีคณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น		จ
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล		ฉ
สารจากคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ช
รายละเอียดการประชุมและการดำเนินงาน		ซ
รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย		ฐ
กำหนดการประชุม		ต
กำหนดการนำเสนอบทความวิจัย		ถ
กำหนดการนำเสนอแบบโปสเตอร์		ย
บทความวิจัย กลุ่มวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมศาสตร์		
CAA-0003	การพัฒนามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกระจกเทมเปอร์บดสำหรับบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง	1
CAA-0004	แนวทางการออกแบบห้องน้ำในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรม: กรณีศึกษาวัดหน้าพระธาตุ อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา	11
CAA-0006	การบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการพัฒนาชุมชน กรณีศึกษาโครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา จังหวัดนครราชสีมา	20
CAA-0007	ศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา	31
CAA-0010	การศึกษาการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส จังหวัดนครราชสีมา	41
CAA-0011	แนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ กรณีศึกษา เส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	51
CAA-0013	แนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ ด้วยระบบระบายอากาศธรรมชาติ	62
CAA-0014	การปรับปรุงดินด,วยปูนขาวสำหรับงานชั้นรองพื้นทาง:อิทธิพลของพลาสติกซิตี้ของดินและปริมาณปูนขาวต่อการบดอัดและการพัฒนากำลังอัดระยะสั้น	73

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
CAA-0015	อิทธิพลของวัสดุผงรีไซเคิลต่างชนิดต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง	81
CAA-0016	ผลของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลต่อพฤติกรรมภายใต้แรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป	90
CAA-0017	การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมยางแอสฟัลต์รีไซเคิล: การวิเคราะห์การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยวิธี GRA TOPSIS และ WSM	99
CAA-0018	การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย	113
CAA-0019	พฤติกรรมการรับแรงดัดและการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน	121
CAA-0020	การพัฒนาแผนปฏิบัติการการจัดการขยะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดเล็กที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย	132
CAA-0021	การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงพื้นที่ภายในอาคารเทศบาลสูงเนิน เพื่อจัดแสดงผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการค้า และการท่องเที่ยวด้วยภูมิปัญญาพื้นถิ่น	144
CAA-0022	การหาก๊าซเรือนกระจกอาคารที่พักอาศัย 3 ชั้น ก่อนและหลังการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์	155
บทความวิจัย กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
EAC-0001	ชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า แสดงผลและควบคุมระยะไกล ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ด้วย PLC Siemens S7-1200	162
EAC-0003	เครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษา กรณีศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	170
EAC-0004	การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก	177
EAC-0005	ชุดสาธิตระบบไฟฟ้าไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์	185
EAC-0006	การศึกษาการสลับเฟสที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าของสายส่งขนาด 500 กิโลโวลต์ วงจรคู่	192
EAC-0007	ระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ	199
EAC-0008	การออกแบบสายอากาศแพตช์ขนาดกะทัดรัดสำหรับการสื่อสารยานพาหนะกับทุกสิ่งสำหรับV2X	207

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
EAC-0009	การออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดแนวราบ	215
EAC-0012	เครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	223
EAC-0014	การควบคุมโดรนทิศทางแนวตั้ง 4 ใบพัด	231
EAC-0016	ระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย	236
EAC-0017	ระบบตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักรด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์	243
EAC-0018	ระบบวัดปริมาณแอลกอฮอล์ร่วมกับ AI สำหรับติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์	250
EAC-0019	การศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลปรับจูนร่วมกับยากิ-อูดะ สำหรับประยุกต์ใช้งาน สองย่านความถี่ในระบบ 4G/5G	256
EAC-0020	การศึกษาการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอสำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบ WLAN	263
EAC-0021	สายอากาศโมโนโพลแถบความถี่คู่รูปสามเหลี่ยมเซาะร่องสำหรับประยุกต์ใช้งาน WLAN	270
EAC-0022	การพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติโดยใช้ PLC หุ่นยนต์อุตสาหกรรม และCC-Link	278
EAC-0023	ระบบตรวจจับและระบุความผิดพลาดของแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก	286
EAC-0024	ระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุสำหรับป้อมยาม	294
EAC-0025	การยกระดับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนสู่อุปกรณ์ IoT ด้วยอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนัง ที่ใช้ ESP32-C3 และโปรโตคอล MQTT บน Home Assistant	301
EAC-0026	การออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสาร ทางเสียงและการมองเห็นทางสายตา	310
EAC-0027	Electric vehicle training kit for CAN BUS network with Display	316
EAC-0028	Mobility Testing of a Plant Protection Robot Under Payload Conditions for Outdoor Vegetable Plots	324
EAC-0029	ระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์	332
EAC-0031	หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ	338
EAC-0032	การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและตัวชี้วัดสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้เงื่อนไขวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐาน	344

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
EAC-0033	ผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ	354
EAC-0034	การประเมินผลกระทบของการติดตั้งโซล่าเซลล์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำ	360
EAC-0035	การควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สำหรับการชดเชยโหลดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ	367
EAC-0036	การประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสของระบบจำหน่ายแรงต่ำ	376
EAC-0038	กรณีศึกษาการขับเคลื่อนไร้สายในระบบการจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ใช้การแปลงพลังงานเสมือนจริงในรถไฟ	383
EAC-0039	การตรวจสอบหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำเพื่อรองรับรถยนต์ไฟฟ้า	388
EAC-0040	ตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	395
EAC-0041	การจัดวางและกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบรัศมี IEEE 33 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธี PSO เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงแรงดัน และเพิ่มความเชื่อถือได้ พร้อมการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วยมอนติคาร์โล	406
EAC-0042	การออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเร็วตามมาตรฐาน PEA และ IEEE Std.80-2013: กรณีศึกษา ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา	412
EAC-0043	การพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะด้วยสื่อมัลติมีเดีย และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง	420
EAC-0044	การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอุณหภูมิและแรงดันของแบตเตอรี่โซลิดสเตตและลิเธียมไอออนด้วยแบบจำลองวงจรสมมูล	432
EAC-0045	การพัฒนาระบบอ่านค่าเกจแบบเข็มสำหรับการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ	442
EAC-0046	การประสานงานที่เหมาะสมที่สุดตามเมตาฮิวริสติกของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทางภายใต้ข้อจำกัด CTI ในระบบ IEEE 14-Bus	449
EAC-0047	การพัฒนาระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้า (VCU) โดยใช้โปรแกรม CODESYS สำหรับชุดฝึกจำลอง การควบคุมมอเตอร์	457
EAC-0048	การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลที่มีการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว: กรณีศึกษาระบบ IEEE 33 บัส	466

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
EAC-0049	การออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบกลไกหุ่นยนต์ควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ	474
EAC-0050	การลดพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์	485
EAC-0051	เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กโตรพลาสมา ในโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ	491
EAC-0052	การพัฒนาสายอากาศแผ่นวงจรพิมพ์ให้อัตราขยายสูงโดยการเซาะร่องรูปตัวทีเพื่อใช้ภายในอาคารสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล	504
EAC-0053	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้นสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย	513
EAC-0054	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลในเทคโนโลยีซิกบีโดยใช้โครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูหลายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบฟาร์ม	521
EAC-0055	การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk	530
EAC-0056	ระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้นสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าบนแพลตฟอร์มประมวลผลฝังตัว	544
EAC-0057	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมหลายขนาด 5 ชั้น	551
EAC-0058	ระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar	559
EAC-0059	การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับขดลวดทองแดงวงกลมหลายขนาด 13 ชั้น	572
EAC-0060	ระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม	581
EAC-0061	การออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซีเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา	588

บทความวิจัย กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล

ME-0001	การพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี IoT โดยใช้ ESP32 และเซนเซอร์ MQ แบบคู่ร่วมกับการแจ้งเตือนผ่าน LINE แบบเรียลไทม์	594
ME-0002	Comparative Modeling of Drying Kinetics of Mitragyna speciosa	603
ME-0003	Development of an Intelligent Transportation Robot Prototype for Indoor Navigation Using LiDAR Integrated with ROS 2	613

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ME-0004	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อออกแบบอุปกรณ์ ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก	621
ME-0005	การออกแบบและพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัจฉริยะ	627
ME-0006	การลดความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งลมร้อนด้วยการควบคุมความเร็วลมแบบแปรผัน	636
ME-0007	การออกแบบและสร้างเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ	644
ME-0010	การสูญเสียพลังงานจากการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กันของเครื่องจักรและวัตถุดิบในกระบวนการสีข้าวเปลือก:กรณีศึกษา	650
ME-0011	การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK	655
ME-0012	การศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งของสีและพฤติกรรมการกระจายความร้อนในตู้อบถังโลหะระบบหมุนเวียนอากาศ	666
ME-0013	การพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงเพื่อลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ	677
ME-0014	การพัฒนาและหาประสิทธิภาพของเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติเพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารชุมชน	688
ME-0015	การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองด้วยการสเปรย์น้ำ	699
ME-0017	เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพา	708
ME-0018	การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอจาเพาะของเหล็กกล้าอุตสาหกรรม เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์	715
ME-0020	การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบอินฟาเรด	725
ME-0022	การประเมินสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวสองชั้นและสามชั้นภายใต้การควบคุม อากาศปฐมภูมิสำหรับงานหุงต้ม	733
ME-0023	อิทธิพลของความพรุนเม็ดอะลูมินาต่อสมรรถนะหัวเผาเส้นใยโลหะ	746
ME-0024	การศึกษาและพัฒนาหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากแผงโซลาร์พาเนล	754
ME-0026	การจำลองการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวที่ใช้เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5	762
ME-0027	การวิเคราะห์สมรรถนะของตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด	772

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ME-0028	การปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีตซิงก์ด้วยกระบวนการกัดไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมแรงดันในสภาวะการไหลปั่นป่วน: การศึกษาเชิงทดลอง	779
ME-0029	การปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอริแฟกชันด้วยวิธีทากูชิ	794
ME-0030	การออกแบบและการสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110	804
ME-0033	การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขจัดคราบคาร์บอนบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์การออกแบบการทดลอง	816
ME-0034	การปรับอุณหภูมิห้องอัตโนมัติเพื่อการประหยัดพลังงาน	826
บทความวิจัย กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมการจัดการ และวิศวกรรมโลจิสติกส์		
IML-0002	การปรับปรุงผังโรงงานผลิตเครื่องนอนหลายผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ: กรณีศึกษาโรงงานไพรจิตรเครื่องนอน	834
IML-0003	การศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของใบอ้อยและเม็ดโฟมโพลีสไตรีนต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบา	846
IML-0004	การวิเคราะห์ผลกระทบจากราคาน้ำมันที่ผันผวนต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการไทย กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา	856
IML-0005	การวิเคราะห์ต้นทุนรวมและโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู กรณีศึกษาผู้ประกอบการในจังหวัดกาฬสินธุ์	868
IML-0006	การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโรเตอร์เครื่องซักผ้า กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า	877
IML-0009	การศึกษาการเลือกรูปแบบการเดินทางเพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ	887
IML-0011	การประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	905
IML-0012	การคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้วิธี AHP-WASPAS	920
IML-0014	Optimization of Candied Bilimbi Drying Using a Solar-Powered Temperature-Controlled Parabolic-Dome Hot-Air Dryer	929
IML-0017	แรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมา	943

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
IML-0018	การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิและประสิทธิภาพความร้อนของตู้อบฟลักซ์สำหรับการเชื่อมใต้ผงฟลั๊กซ์ด้วยท่อกระจายความร้อนแบบเจาะรู	951
IML-0019	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	960
IML-0020	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันออกจากน้ำหล่อเย็น ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสีมาตรฐาน (RGB)	972
IML-0021	การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่	983
IML-0022	การศึกษาคุณภาพแนวเชื่อมและประสิทธิภาพการผลิตของเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติ สำหรับการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรม	997
IML-0023	การยกระดับสมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์และทักษะนวัตกร ผ่านโครงงานแผ่นมุ้งปิดช่องลม เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน	1,006
IML-0026	แนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษ: กรณีศึกษาคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	1,017
IML-0028	การหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยและน้ำยางธรรมชาติ สำหรับสถานพยาบาล	1,025
IML-0029	การพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี และการตัดสินใจด้วยปัญญาประดิษฐ์	1,036
IML-0030	การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม	1,045
IML-0031	การประเมินสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล	1,060
IML-0032	การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้กรณีศึกษาของเล่น	1,070
IML-0033	การพัฒนาเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกล้วยฉาบ	1,078
IML-0034	การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมเพื่อลดเวลาและจำนวนขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์	1,084
IML-0035	การปรับเหมาะระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Arena: กรณีศึกษาแยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี	1,090

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
IML-0037	การวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (กรณีศึกษาเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ บริษัทสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จำกัด อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว)	1,100
IML-0038	Multi-Criteria ABC-Based Storage Layout Improvement for Outdoor Precast Concrete Yard	1,106
บทความวิจัย กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี		
SAT-0002	การพัฒนาแอปพลิเคชันบนมือถือเพื่อการจำแนกประเภทขยะอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีรหัสแท่งและปัญญาประดิษฐ์	1,116
SAT-0003	ระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลอัจฉริยะบนแอปพลิเคชัน LINE ด้วยปัญญาประดิษฐ์	1,123
SAT-0004	การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง	1,134
SAT-0005	การวิเคราะห์ตำแหน่งและพลังงานการจับของโปรตีน Outer Membrane Protein N ต่อกลูโคสและมอลโทสโดยใช้เทคนิค Molecular Docking	1,143
SAT-0006	การวิเคราะห์โปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายภายใต้สภาวะการตกตะกอนในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันด้วยเทคนิค SDS-PAGE	1,152
SAT-0008	การศึกษานำร่องการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM เพื่อจำแนกกลุ่มพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ของผู้บริโภค: กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา	1,158
SAT-0009	The Construction of an LPG Gas Detector with Smartphone Notification	1,167
SAT-0010	การใช้งานระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ลิเธียม เพื่อประหยัดค่าไฟฟ้าในช่วง On-peak	1,175
SAT-0011	การสร้างและประเมินการทำงานของชุดพื้นรองปฏิบัติงานอัตโนมัติกรณีเปลี่ยนแม่พิมพ์:สหกิจศึกษา	1,185
SAT-0016	การคัดแยกกลุ่มแบคทีเรียเมทาโนโทรฟจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและพัฒนาต่อยอดสู่เซลล์โปรตีนสูง	1,194
SAT-0017	แนวทางการจัดการโรงเรียนคาร์บอนต่ำ: กรณีศึกษาโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์ อุปถัมภ์)	1,210
SAT-0018	การสร้างสิ่งบ่งชี้เทียมในรอยเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลอง สำหรับการตรวจสอบเทคนิควิธีการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม	1,222
บทความวิจัย กลุ่มวิจัยสถาบัน วิจัยในชั้นเรียน และบริหารธุรกิจ		
RAB-0003	ระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการยอมรับเทคโนโลยี	1,230

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
RAB-0006	รายงานผลการใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) ผ่านกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน เพื่อสร้างทักษะนวัตกรและพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน	1,241
RAB-0007	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับอัตโนมัติผ่าน Google Workspace และ LINE เพื่อสนับสนุนการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	1,252
RAB-0008	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเบิกจ่ายค่าตอบแทนการสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	1,266
RAB-0009	การพัฒนาสมรรถนะบัณฑิตนักปฏิบัติด้านวิศวกรรมระบบควบคุมผ่านการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับการประเมินผลแบบสมรรถนะ	1,281
RAB-0010	การจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานตามแนวคิด CDIO เพื่อพัฒนาสมรรถนะด้านจลนศาสตร์หุ่นยนต์ของนักศึกษาวิศวกรรม	1,289
RAB-0011	ประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด จังหวัดนครราชสีมา	1,298

ภาคผนวก

คำสั่งแต่งตังคณะกรรมการดำเนินงาน การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 (Estacon 2026)

การพัฒนามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกระจกเทมเปอร์บดสำหรับบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง

Development of Cement Mortar Incorporating Crushed Tempered Glass for Tactile Paving Blocks

สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า[1*], รัฐพล เข็มทอง[2] และ สุภาวดี เสริมรัมย์[3],
วัชรนันท์ แปะกระโทก[4], เสนีย์ บินกลาง[5], จริพงศ์ จอมกระโทก[6]

[1* 2 3] สาขาวิศวกรรมการก่อสร้างขนส่งและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[4 5 6] สาขาอุตสาหกรรมศิลป์เอกโยธาและการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: sathitphong.w@nrru.ac.th, 044-009009 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้กระจกเทมเปอร์บดเป็นส่วนผสมของมวลรวมในอัตราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของมวลรวม สำหรับพัฒนาเป็นวัสดุบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง โดยกำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมเท่ากับ 1:2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน รวมถึงกำลังรับแรงดัด การดูดซึมน้ำและความต้านทานต่อการขัดสีที่อายุ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า การใช้กระจกเทมเปอร์บดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ได้อย่างชัดเจน โดยส่วนผสมร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันสูงสุดเท่ากับ 234.00 kg/cm² หรือ 22.95 MPa ขณะที่กำลังรับแรงดัดจากการทดสอบแบบ 4 จุดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 52.65 kg/cm² หรือ 5.16 MPa เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40.03 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม การดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 1.68–3.83 ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับวัสดุปูพื้นตามมาตรฐาน มอก. 378-2531 ขณะที่ค่าการสูญเสียมวลจากการขัดสีของส่วนผสมที่มีกระจกเทมเปอร์บดมีค่าต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนของผิวมอร์ตาร์

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้กระจกเทมเปอร์บดแทนที่มวลรวม ในอัตราร้อยละ 20 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในระดับต่ำแสดงให้เห็นถึงศักยภาพเบื้องต้นของการนำเศษกระจกเทมเปอร์กลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ซีเมนต์ สำหรับการพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทางและสนับสนุนแนวทางการใช้วัสดุรีไซเคิลในงานก่อสร้างอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: กระจกเทมเปอร์บด, มอร์ตาร์ซีเมนต์, มวลรวม, บล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง, วัสดุรีไซเคิล

Abstract

This study investigated the properties of cement mortar incorporating crushed tempered glass as a partial replacement for aggregate at replacement levels of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight of aggregate, with the aim of developing a material suitable for tactile guiding paving blocks. The cement-to-aggregate ratio was fixed at 1:2.75, while the water-to-cement ratio was maintained at 0.50. The mortar specimens were tested for compressive strength at curing ages of 7, 14, and 28 days. Flexural strength, water absorption, and abrasion resistance were also evaluated at 28 days.

The results showed that incorporating an appropriate proportion of crushed tempered glass significantly improved the mechanical properties of the cement mortar. Among the mixtures investigated, the mortar containing 20% crushed tempered glass achieved the highest 28-day compressive strength of 234.00 kg/cm² (22.95 MPa). This mixture also exhibited the highest four-point flexural strength of 52.65 kg/cm² (5.16 MPa), representing an increase of approximately 40.03% compared with the control mixture. The water absorption values ranged from 1.68% to 3.83%, all of which were below the permissible limit specified for paving materials under Thai Industrial Standard TIS 378-2531. Furthermore, the mortar mixtures containing crushed tempered glass exhibited lower abrasion-induced mass loss than the control mixture, indicating improved surface wear resistance.

It can therefore be concluded that replacing aggregate with 20% crushed tempered glass was the optimum proportion investigated in this study, as it provided the best overall mechanical performance while maintaining a low level of water absorption. These findings demonstrate the preliminary potential of recycling tempered glass waste as an alternative aggregate in cement mortar for the further development of tactile guiding paving blocks. This application may also contribute to the sustainable use of recycled materials in the construction industry.

Keywords: Crushed tempered glass, Cement mortar, Aggregate, tactile guiding paving block, Recycled material

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านทางเท้าและพื้นที่สาธารณะมีความสำคัญต่อการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน โดยเฉพาะการออกแบบทางเท้าให้มีความปลอดภัย แข็งแรง ทนทาน และสามารถรองรับการใช้งานของคนทุกกลุ่มได้อย่างเท่าเทียม บล็อกทางเท้าจึงเป็นวัสดุก่อสร้างสำเร็จรูปที่ถูกนำมาใช้เป็นชั้นผิวทางเดินในพื้นที่สาธารณะ ทางเดินภายในอาคาร ลานอเนกประสงค์ และพื้นที่ภายนอกอาคารอื่น ๆ โดยต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งด้านกำลังรับแรง ความทนทานต่อการสึกกร่อน และความปลอดภัยในการใช้สำหรับทางเท้าที่เกี่ยวข้องกับผู้พิการทางสายตา บล็อกปูพื้นมักถูกออกแบบให้มีลักษณะผิวสัมผัสพิเศษ เช่น แผ่นปุ่มนูนสำหรับเตือนอันตราย และแผ่นเส้นนูนสำหรับนำทางเดิน เพื่อช่วยให้ผู้พิการทางสายตาสามารถใช้ทางเท้าได้อย่างปลอดภัย [1] ดังแสดงในภาพที่ 1 บล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง

ในงานก่อสร้างทั่วไป มอร์ตาร์และคอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตบล็อกทางเท้า โดยมีปูนซีเมนต์ น้ำ

และมวลรวมธรรมชาติ เช่น ทรายหรือหิน เป็นส่วนประกอบสำคัญ ทรายธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตและมอร์ตาร์มาเป็นเวลานาน และมีความต้องการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม การใช้ทรัพยากรธรรมชาติในปริมาณมากอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนมวลรวม รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการขุดตักและการขนส่งวัสดุ ดังนั้น การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วนในงานก่อสร้างเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดปริมาณของเสีย และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งได้ [2]

กระจกเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอาคาร ยานยนต์ และผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะกระจกเทมเปอร์ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว จึงมีสภาวะความเค้นคงค้างและรูปแบบการแตกเป็นชิ้นขนาดเล็กต่างจากกระจกอบอ่อนทั่วไป รูปร่าง ขนาด ความเหลี่ยม และสภาพผิวหลังการบดอาจส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคและการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตาม เศษกระจกเทมเปอร์ที่เกิดจากกระบวนการผลิต การตัดแต่ง การรื้อถอน หรือการเปลี่ยนวัสดุอาคาร มักไม่สามารถนำกลับไปใช้งานในรูปแบบเดิมได้ และส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยการกองทิ้งหรือฝังกลบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว งานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีความสนใจในการนำเศษแก้วหรือเศษกระจกมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานคอนกรีตและมอร์ตาร์ [2-4]

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการใช้เศษแก้วบดแทนที่ทรายธรรมชาติในคอนกรีตและมอร์ตาร์สามารถให้สมบัติเชิงกลที่น่าสนใจ โดย Tamanna และคณะ [3] ศึกษาการใช้เศษแก้วจากขวดแก้วแทนที่ทรายธรรมชาติในคอนกรีต และรายงานว่าเศษแก้วสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของคอนกรีตได้ ขณะที่ Adesina และ Das [4] รายงานว่าการใช้เศษแก้วรีไซเคิลเป็นมวลรวมในวัสดุซีเมนต์ไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ นอกจากนี้ Sikora และคณะ [5] พบว่าการใช้เศษแก้วบดเป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์สามารถช่วยลดค่าการนำความร้อนของวัสดุได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษแก้วมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในวัสดุก่อสร้าง ทั้งในด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ [2]

ในประเทศไทย จักรพงษ์และคณะ [2] ได้ศึกษาการใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ โดยแทนที่ทรายธรรมชาติในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ผลการศึกษาพบว่าการใช้เศษกระจกรถยนต์แทนที่ทรายธรรมชาติไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัด ปริมาณโพรง การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ เนื่องจากเศษกระจกมีขนาดคละใกล้เคียงกับทรายธรรมชาติ งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเศษกระจกสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ได้ หากมีการควบคุมขนาดคละและสัดส่วนผสมอย่างเหมาะสม

สำหรับผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้น สมบัติที่สำคัญไม่ได้พิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงอัดเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงกำลังดัด การดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อการขัดสี เนื่องจากบล็อกทางเท้าต้องรับแรงจากการเดิน การกระแทกเฉพาะจุด สภาพรองรับที่ไม่สม่ำเสมอ ความชื้นจากสภาพแวดล้อม และแรงเสียดสีบริเวณผิวหน้าจากการใช้งานต่อเนื่อง งานวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้วัสดุเหลือทิ้ง เช่น เถ้าไม้ยางพารา แสดงให้เห็นว่าการประเมินวัสดุทดแทนควรพิจารณากำลังอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ร่วมกับการดูดซึมน้ำ และควรเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [6] นอกจากนี้ Wang และคณะ [7] ศึกษาบล็อกปูพื้นคอนกรีตรีไซเคิลที่มีวัสดุเหลือทิ้งหลายชนิด รวมถึง crushed glass และประเมินสมบัติด้านกำลัง การดูดซึมน้ำ ความต้านทานการลื่น และความ

ESTACON 2026 | 17th

ต้านทานการขัดสี ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับการพัฒนาบล็อกทางเท้าจากวัสดุรีไซเคิล

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้กระจกเทมเปอร์ เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วนในมอร์ตาร์ซีเมนต์สำหรับพัฒนาเป็นบล็อกทางเท้ายังมีข้อมูลจำกัด โดยเฉพาะการพิจารณาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานจริงร่วมกัน ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัด การดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อการขัดสี เนื่องจากกระจกมีลักษณะผิวเรียบและมีการดูดซึมน้ำต่ำ ดังนั้นการบดให้มีขนาดและกำหนดปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติสอดคล้องกับการใช้งานเป็นบล็อกทางเท้า

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของการใช้กระจกเทมเปอร์บดคัดขนาดเฉลี่ยโดยให้ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร หรือ 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 16 ขนาด 1.18 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วนในมอร์ตาร์ซีเมนต์ โดยกำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ทำการแทนที่มวลรวมด้วยกระจกเทมเปอร์บดในอัตราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 จากนั้นศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังอัดและกำลังดัด รวมถึงการดูดซึมน้ำและความต้านทานต่อการขัดสีที่ สำหรับเป็นแนวทางในการนำเศษกระจกเทมเปอร์กลับมาใช้ประโยชน์ในงานวัสดุก่อสร้าง ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดปริมาณของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และพัฒนาวัสดุบล็อกทางเท้าที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง



ภาพที่ 1 ตัวอย่างบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทาง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บล็อกปูพื้นทางเท้า

บล็อกปูพื้นทางเท้าเป็นวัสดุก่อสร้างสำเร็จรูปที่ใช้เป็นชั้นผิวสำหรับทางเดินเท้า พื้นที่สาธารณะ และบริเวณที่มีการสัญจรเบามาตรฐาน มอก. 378-2531 [9] กำหนดให้ค่าความต้านแรงดัดตามขวางของแผ่นปูพื้นมีค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 3.0 เมกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน ร้อยละ 10 และสำหรับมาตรฐาน ASTM C936 [10] กำหนดกำลังรับแรงอัดของบล็อกปูพื้นคอนกรีตชนิดประสานให้ไม่น้อยกว่า 50 เมกะปาสคาล และค่าการดูดซึ้าน้ำไม่เกินร้อยละ 5 และกำหนดการสูญเสียความหนาจากการขัดสีไม่เกิน 3 มม. และมาตรฐาน EN1338 [11] กำหนดสมบัติของบล็อกปูพื้นคอนกรีตสำหรับทางเดินเท้าใช้ค่ากำลังดึงแยกขั้นต่ำเชิงลักษณะเฉพาะ 3.6 เมกะปาสคาล ทั้งนี้ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุปูพื้นเพื่อประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ยังเป็นระดับมอร์ตาร์ทดลอง ไม่ใช้ผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นสำเร็จรูปเต็มรูปแบบ

2.2 การทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างทดลอง

2.2.1 ความหนาแน่น (Density)

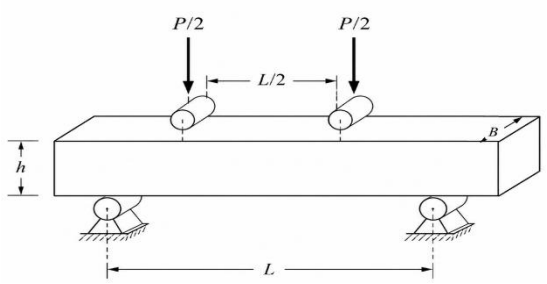
ก่อนการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์จะต้องคำนวณค่าความหนาแน่น จากสูตร $\mathrm{D} = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{V}}$ เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (kg/m^3) , M คือ มวลน้ำหนัก (kg) และ V คือ ปริมาตร (m^3)

2.2.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

เมื่อคอนกรีตครบอายุการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน จะต้องทดสอบหากำลังรับแรงอัด โดยใช้สูตรคำนวณกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ซีเมนต์ตามสมการ $f_c = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{A}}$ เมื่อ F คือ ความต้านทานแรงอัด (kg/cm^2), P คือ กำลังอัดจากเครื่องไฮดรอลิค (kg) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรง (cm^2)

2.2.3 กำลังรับแรงดัด (Bending strength)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความเค้นเทียบเท่าสูงสุดในขณะที่เกิดการแตกร้าวในแผ่นตัวอย่างทดสอบ โดยกำหนดให้แรงแบบ 4 จุด โดยระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ค่าเท่ากับ ¼ ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ดังแสงในภาพที่ 2 โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร $f_t = \frac{3PL}{4Bh^2}$ เมื่อ ft คือ ความเค้นดัดเทียบเท่า (kg/cm^2), P คือ น้ำหนักกดสูงสุด (kg), L คือ ความยาวของแผ่นตัวอย่าง (cm), B คือ ความกว้างของแผ่นตัวอย่าง (cm) และ h คือ ความหนาของแผ่น (cm)



ภาพที่ 2 การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้

รายละเอียดลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 วัสดุที่ใช้การทดลอง ได้แก่

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15

3.1.2 มวลรวมละเอียดใช้ทรายธรรมชาติ ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65

3.1.3 กระจกเทมเปอร์บดขนาดเฉลี่ย 1.18 - 9.5 มม. ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.50

3.1.4 น้ำใช้น้ำสะอาด



ภาพที่ 3 วัสดุที่ใช้การทดลอง

3.2 สัดส่วนผสม

ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.50 โดยการแทนที่มวลรวมด้วยกระจกเทมเปอร์บดหรือ Crushed Tempered Glass, CTG ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก กำหนดสัญลักษณ์ในการทดลองเป็น TG0, TG10, TG20 และ TG30 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้กระจกเทมเปอร์บดเป็นวัสดุทดแทนมวลรวม

Mix ID	CTG (%)	Cement	Sand	CTG	Water	W/C
		(kg/m^3)				
TG0	0	527.78	1451.39	0	263.89	0.50
TG10	10	527.78	1306.25	145.14	263.89	0.50
TG20	20	527.78	1161.11	290.28	263.89	0.50
TG30	30	527.78	1015.97	435.42	263.89	0.50

4. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดลอง

ในตารางที่ 2 แสดงจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกระจกเทมเปอร์บดแทนที่มวลรวมในอัตราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของมวลรวม ในแต่ละสัดส่วนผสมได้เตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบแต่ละประเภท ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การดูดซึมน้ำ

และความต้านทานต่อการขัดสี รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 72 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างการทดสอบ

Mix ID	Compressive strength Size 5 x 5 x 5 cm	Flexural strength Size 30 x 15 x 6 cm	Water absorption Size 5 x 5 x 5 cm	Abrasion resistance Size 5 x 5 x 5 cm	Number of specimens
TG0	9	3	3	3	18
TG10	9	3	3	3	18
TG20	9	3	3	3	18
TG30	9	3	3	3	18
	36	12	12	12	**72**

ในการผสมตัวอย่าง เริ่มต้นด้วยผสมปูนซีเมนต์และทรายจนเข้ากันเป็นสีเทา หลังจากนั้นผสมกระจกเทมเปอร์บดลงไปในส่วนผสม และตามด้วยน้ำสะอาดตามสัดส่วนที่กำหนด เมื่อผสมจนได้มอร์ตาร์ที่มีเนื้อสม่ำเสมอแล้ว จึงบรรจุลงในแบบหล่อ อัดแน่น ตัวอย่างถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบหล่อแล้วนำไปบ่มในน้ำจนครบอายุการทดสอบที่ 7 14 และ 28 วัน สำหรับการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัด แสดงตัวอย่างในการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังอัด7 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 5 การทดสอบกำลังดัด 28 วัน

5. วิธีการทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด การดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อการขัดสี โดยกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน โดยกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 × 5 × 5 เซนติเมตร ในการทดสอบซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างแรงกดสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดรับแรง และกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน ใช้ขนาดตัวอย่าง 30 x 15 x 6 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบ ส่วนการดูดซึมน้ำและการขัดสีทดสอบที่อายุ 28 วัน ทดสอบตามแนวทาง ASTM C642 โดยเปรียบเทียบน้ำหนักตัวอย่างในสภาพแห้งและสภาพอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีแสดงดังภาพที่ 6 ดำเนินการแบบประยุกต์โดยใช้สว่านเจาะตั้งโต๊ะและหัวเจาะขนาดคงที่สำหรับเปรียบเทียบในงานวิจัย ภายใต้น้ำหนักกดโดยเฉลี่ย 2.5 -3.0 กิโลกรัม เวลา 90 วินาที โดยใช้ความเร็วรอบที่ควบคุมให้เท่ากันทุกตัวอย่าง ตัวอย่างอายุ 28 วันถูกทดสอบบริเวณผิวหน้า จากนั้นวัดขนาดรอยเจาะเพื่อคำนวณปริมาตรเนื้อวัสดุที่สูญเสียไป จากสมการ $V_l = \frac{\pi d^2 h}{4}$ เมื่อ Vl คือ ปริมาตรเนื้อวัสดุที่สูญเสียไป, d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยเจาะ, h = ความลึกเฉลี่ยของรอยเจาะ โดยค่าปริมาตรสูญเสียที่ต่ำกว่าสะท้อนถึงความต้านทานต่อการขัดสีที่ดีกว่า



ภาพที่ 6 การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสี

5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ความหนาแน่น (Density)

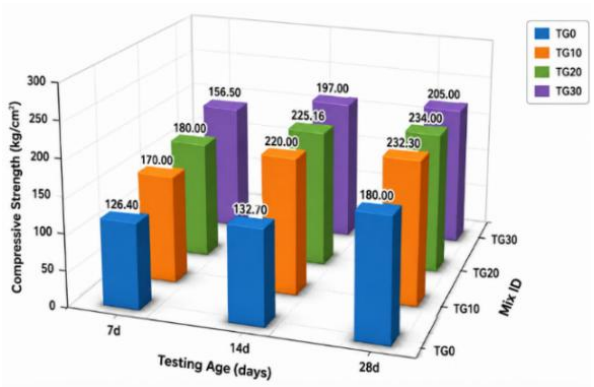
ในตารางที่ 3 แสดงความหนาแน่นโดยเฉลี่ยตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระจกเทมเปอร์บด โดยเพิ่มจาก 2,159.32 kg/m³ ในส่วนผสม TG0 เป็น 2,372.53 kg/m³ ในส่วนผสม TG30 หรือเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 9.88 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม การเพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจเกิดจากกระจกเทมเปอร์บดมีลักษณะผิวแข็งและการดูดซึมน้ำต่ำ ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในเนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นมากขึ้น ขณะที่ค่า CV อยู่ระหว่าง 0.92–3.88% แสดงว่าผลการทดสอบมีความแปรปรวนต่ำ แม้ค่า CV จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกระจกสูงขึ้น ซึ่งอาจสัมพันธ์กับความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวและการอัดแน่นของอนุภาคกระจกในตัวอย่าง

ตารางที่ 3 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกระจกเทมเปอร์บด

Mix ID	CTG (%)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ปริมาตรเฉลี่ย (cm³)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m³)	SD	CV (%)
TG0	0	286.67	132.77	2159.32	19.83	0.92
TG10	10	297.00	130.52	2275.78	36.40	1.60
TG20	20	296.67	128.00	2317.74	48.87	2.11
TG30	30	306.67	129.32	2372.53	92.09	3.88

5.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

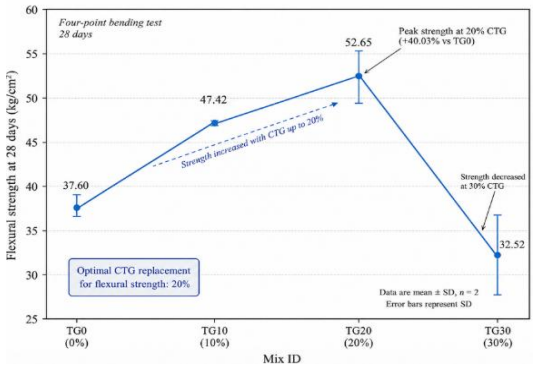
การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ของมอตาร์ที่มีเศษกระจกเทมเปอร์เป็นส่วนผสมแสดงในภาพที่ 7 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาไฮเดรชัน [8] โดยที่อายุ 28 วัน ส่วนผสม TG20 ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 234.00 kg/cm² รองลงมาคือ TG10, TG30 และ TG0 มีค่าเท่ากับ 232.30, 205.00 และ 180.00 kg/cm² ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้กระจกเทมเปอร์บดเป็นส่วนผสมแทนมวลรวมในช่วงร้อยละ 10–20 สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้อย่างชัดเจน โดยอนุภาคกระจกช่วยเพิ่มความแน่นตัวและทำหน้าที่เป็นมวลรวม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกระจกเป็นร้อยละ 30 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากผิวกระจกที่เรียบอาจลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากำลังอัดคือการแทนที่ในช่วงร้อยละ 10–20



ภาพที่ 7 กำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ของมอตาร์

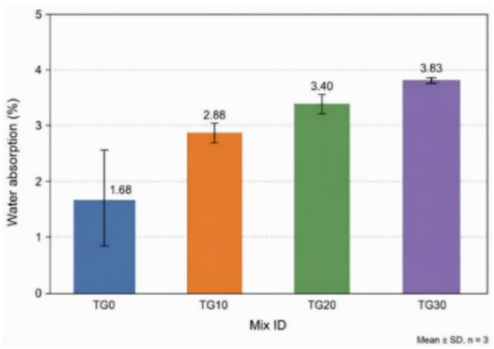
5.3 กำลังรับแรงดัด (Flexural strength)

ภาพที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังดัดของตัวอย่างแผ่นมอร์ตาร์ซีเมนต์ขนาด 30 x 15 x 6 ซม. มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระจกเทมเปอร์บดแทนที่ทรายธรรมชาติในช่วงร้อยละ 10–20 โดย TG20 ให้ค่ากำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 52.65 kg/cm² หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 40.03 เมื่อเทียบกับ TG0 ที่มีกำลังดัดเฉลี่ยเท่ากับ 37.60 kg/cm² การเพิ่มขึ้นของกำลังดัดในช่วง TG10–TG20 อาจเกิดจากกระจกเทมเปอร์บดช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในเนื้อมอร์ตาร์ ทำให้โครงสร้างภายในมีความแน่นขึ้น และสามารถถ่ายแรงดัดได้ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกระจกเป็นร้อยละ 30 กำลังดัดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการยึดเกาะระหว่างผิวกระจกกับซีเมนต์เพสต์และความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอนุภาคลดลง



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบกำลังดัดที่อายุ 28 วัน

5.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

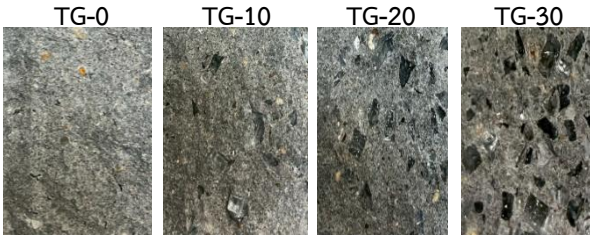


ภาพที่ 9 ร้อยละการดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำหาได้จาก Water absorption (%) = $\frac{W_s - W_d}{W_d}$ x100 เมื่อ W_d คือ น้ำหนักอบแห้ง และ W_s คือ น้ำหนักอิ่มตัวน้ำ โดยจากการทดลอง พบว่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระจกเทมเปอร์บดที่เพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 9 โดย TG0 มีค่าเฉลี่ยต่ำสุด 1.68% และ TG30 มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3.83% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกระจกเทมเปอร์บดอาจส่งผลให้เนื้อมอร์ตาร์มีช่องว่างหรือความพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

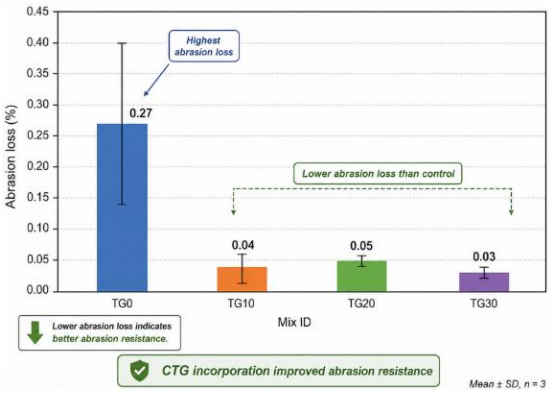
5.5 ความต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance)

ในภาพที่ 11 แสดงผลการสึกกร่อนของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งหาได้จากการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบโดยใช้สมการ Absorption loss (%) = $\frac{W_1 - W_2}{W_1}$ x100 เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ และ W_2 คือ น้ำหนักหลังทดสอบ ผลการทดสอบการขัดสีพบว่า ส่วนผสม TG0 มีค่าการขัดสีเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.27% ขณะที่ส่วนผสม TG10, TG20 และ TG30 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.04%, 0.05% และ 0.03% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้กระจกเทมเปอร์บดเป็นส่วนผสมแทนมวลรวมช่วยลดการสูญเสียมวลจากการขัดสีของมอร์ตาร์ได้อย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากการกระจายส่วนผสมของกระจกเทมเปอร์ในมอร์ตาร์ซีเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 10 ลักษณะพื้นผิวภายในมอร์ตาร์ซีเมนต์



ภาพที่ 10 ลักษณะพื้นผิวภายในมอร์ตาร์ซีเมนต์แทนที่ด้วยกระจกเทมเปอร์บดร้อยละ 0 10 20 และ 30

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระจกเทมเปอร์บดมีความแข็งสูงและช่วยเพิ่มความทนทานของผิวมอร์ตาร์ต่อการเสียดสี โดยค่าการขัดสีของ TG10–TG30 มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงอาจสรุปได้ว่าการใช้กระจกเทมเปอร์บดในช่วงร้อยละ 10–30 มีแนวโน้มเพิ่มความต้านทานต่อการขัดสีของมอร์ตาร์เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ไม่มีส่วนผสมของกระจกเทมเปอร์



ภาพที่ 11 การสึกกร่อนของตัวอย่างทดลอง

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

พบว่าการใช้กระจกเทมเปอร์บดแทนที่มวลรวมส่งผลต่อสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์อย่างชัดเจน โดยความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระจกเทมเปอร์บด ขณะที่กำลังอัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 โดย TG20 ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 234.00 kg/cm² (22.95MPa) และกำลังดัดเท่ากับ 52.65 kg/cm² (5.16MPa) การดูดซึมน้ำของทุกส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับวัสดุปูพื้น และการใช้กระจกเทมเปอร์บดช่วยลดการสึกกร่อนจากการขัดสีเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม โดยเมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก. 378-2531 พบว่าทุกส่วนผสมมีค่ากำลังดัดและการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยสูตร TG20 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุบล็อกปูพื้นผิวสัมผัสนำทางในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบยังอยู่ในระดับมอร์ตาร์ทดลอง ดังนั้นการศึกษาในอนาคตควรพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกปูพันสำเร็จรูปและทดลองสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยต่อไปควรปรับปรุงกำลังอัดของส่วนผสมโดยลดค่า W/C ใช้สารลดน้ำ หรือปรับขนาดคละของมวลรวมให้เหมาะสมมากขึ้น นอกจากนี้ควรทดสอบการขัดสีตามมาตรฐาน ASTM C418 หรือ EN 1338 [11] และเพิ่มการทดสอบความต้านทานการลื่นและการผลิตต้นแบบบล็อกปูพื้นจริง

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] สมาคมสถาปนิกผังเมืองไทย. ข้อแนะนำการออกแบบบาทวิถีและสิ่งแวดล้อมเพื่อทุกคน. กรุงเทพฯ: สมาคมสถาปนิกผังเมืองไทย, 2561.

[2] จักรพงษ์ เหล่าอัน, อำพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ, และปริญญา จินดาประเสริฐ. “การใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์,” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 47–57, 2565.

[3] N. Tamanna, R. Tuladhar, and N. Sivakugan, “Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 239, 117804, 2020.

[4] A. Adesina and S. Das, “Mechanical performance of engineered cementitious composite incorporating glass as aggregates,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, 121113, 2020.

[5] P. Sikora et al., “Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica,” *Procedia Engineering*, vol. 196, pp. 159–166, 2017.

[6] T. Klathae, “Utilization of parawood ash in concrete paving blocks,” *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 36–48, 2020.

[7] X. Wang, C. S. Chin, and J. Xia, “Study on the properties variation of recycled concrete paving block containing multiple waste materials,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, e01803, 2023.

[8] Wang, S., Peng, X., Tang, L., Cao, C. and Zeng, L. Contact-hardening behavior of calcium silicate hydrate powders. Materials, 2018, 11, PP. 1–17

[9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2531). *มอก. 378-2531 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น. กระทรวงอุตสาหกรรม.*

[10] ASTM International. (2024). *ASTM C936/C936M-24: Standard specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM International.

[11] European Committee for Standardization. (2003). *EN 1338:2003 Concrete paving blocks—Requirements and test methods*. European Committee for Standardization

แนวทางการออกแบบห้องน้ำในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรม: กรณีศึกษาวัดหน้าพระธาตุ อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา

Guidelines for Public Toilet Design in Heritage Conservation Areas: A Case Study of Wat Na Phra That, Pak Thong Chai District, Nakhon Ratchasima Province.

อานนท์ เหล่าลูกอินทร์[1], วชิรวรรณ อินช่วย [1] เกวลิน เสาร์ทอง [1] และ การุณย์ ศุภมิตรโยธิน[1,*]

[1] หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: karun.s@nrru.ac.th, 0839331996

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการออกแบบและปรับปรุงห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรม โดยใช้กรณีศึกษาวัดหน้าพระธาตุ อ. ปักธงชัย จ. นครราชสีมา ซึ่งเป็นโบราณสถานที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม และวัฒนธรรม วิธีการศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์คุณค่าทางสถาปัตยกรรมและบริบทพื้นที่ สำรวจสภาพปัญหาของอาคารเดิม สัมภาษณ์ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องจำนวน 5 คน ซึ่งคัดเลือกโดยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบที่ตอบสนองการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับมาตรฐานการเข้าถึง และกลมกลืนกับอัตลักษณ์ทางสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ผลการศึกษาพบว่า ห้องน้ำเดิมมีปัญหาหลัก ได้แก่ ความไม่กลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรม การออกแบบที่ไม่รองรับผู้ใช้งานทุกกลุ่มตามหลัก Universal Design จำนวนไม่เพียงพอต่อความต้องการ ปัญหาด้านสุขอนามัยและการบำรุงรักษา แนวทางการออกแบบปรับปรุงมีดังนี้ คือ 1) การออกแบบอาคารให้กลมกลืนกับภูมิทัศน์และโบราณสถานเดิมทั้งด้านการวางผัง การกำหนดรูปทรง การเลือกใช้วัสดุและโทนสี 2) การออกแบบตามหลัก Universal Design เพื่อรองรับผู้ใช้งานทุกกลุ่ม 3) การเพิ่มจำนวนห้องน้ำและแยกพื้นที่โถปัสสาวะ 4) การเลือกวัสดุที่ง่ายต่อการบำรุงรักษาเพื่อแก้ปัญหาด้านสุขอนามัย ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์อื่น

คำสำคัญ: การออกแบบห้องน้ำสาธารณะ พื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรม วัดหน้าพระธาตุ สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ การออกแบบเพื่อคนทุกกลุ่ม

Abstract

This study aims to present guidelines for the design and improvement of public restrooms in architectural conservation areas, using Wat Na Phra That, Pak Thong Chai District, Nakhon Ratchasima Province, as a case study - an ancient site of significant historical, architectural, and cultural value. The research methodology began with an analysis of the architectural values and spatial context, a survey of the existing building's conditions, and interviews with five relevant stakeholders selected through purposive sampling, with the goal of developing design guidelines that respond effectively to functional requirements, comply with accessibility standards, and harmonize with the identity of the local vernacular architecture. The findings revealed that the existing restrooms had several major issues, including a lack of visual harmony with the cultural landscape, a design that did not accommodate all user groups in accordance with Universal Design principles, an insufficient number of facilities to meet demand, and problems related to hygiene and maintenance. The proposed design improvement guidelines address these issues through four key strategies: 1) designing the building to harmonize with the landscape and

existing historic structures in terms of site planning, massing and form, and the selection of materials and color tones; 2) applying Universal Design principles to accommodate all user groups; 3) increasing the number of restroom units and creating a separate area for urinals; and 4) selecting materials that are easy to maintain in order to resolve hygiene-related problems. The findings of this study serve as a case study that can be applied to the development of public restrooms in other conservation areas.

Keywords: Public Toilet Design, Heritage Conservation, Wat Na Phra That, Applied Vernacular Architecture, Universal Design.

1. บทนำ

วัดหน้าพระธาตุ อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา เป็นโบราณสถานที่มีคุณค่าประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม และวัฒนธรรม ทั้งพระธาตุทรงบัวเหลี่ยมตามศิลปะล้านช้าง จิตรกรรมฝาผนังในอุโบสถ หอไตรกลางน้ำ และกุฏิเจ้าอาวาส ล้วนสะท้อนภูมิปัญญาและความศรัทธาของชุมชน ทำให้วัดแห่งนี้เป็นศูนย์รวมจิตใจและพื้นที่ทางวัฒนธรรมที่สำคัญ รวมถึงเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่ดึงดูดผู้คนจำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงงานประเพณีนมัสการพระธาตุ การหลั่งไหลของนักท่องเที่ยวจำนวนมากสร้างความท้าทายต่อการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐาน โดยเฉพาะห้องน้ำสาธารณะ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพการท่องเที่ยวและภาพลักษณ์ของพื้นที่ ปัญหาที่พบ ได้แก่ ห้องน้ำเดิมไม่กลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรม ขาดมาตรฐานการออกแบบเพื่อคนทุกกลุ่ม มีจำนวนไม่เพียงพอ และยังมีข้อจำกัดด้านสุขอนามัยและการบำรุงรักษา ปัญหาเหล่านี้ไม่เพียงกระทบต่อผู้ใช้งาน แต่ยังลดทอนคุณค่าของภูมิทัศน์ทางสถาปัตยกรรมและวัฒนธรรมที่วัดหน้าพระธาตุพยายามรักษาไว้

การพัฒนาแนวทางการออกแบบห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรักษาความกลมกลืนกับอัตลักษณ์สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นและคุณค่าทางวัฒนธรรม งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการออกแบบห้องน้ำสาธารณะในบริบทมรดกสถาปัตยกรรมในหลายมิติ เช่น Jaglarz (2020) ที่วิเคราะห์การออกแบบห้องน้ำให้กลมกลืนกับภูมิทัศน์ประวัติศาสตร์บริบทเมืองในยุโรป และ Boonjub (2009) ที่ศึกษาสถาปัตยกรรมไทยดั้งเดิมเพื่อประยุกต์ใช้กับงานออกแบบร่วมสมัย รวมถึงงานวิจัยด้าน Universal Design ในแหล่งมรดกวัฒนธรรม ที่ชี้ให้เห็นว่าการเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพการท่องเที่ยว (Lanzini & Khan, 2022) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านั้นพิจารณาแต่ละมิติแยกส่วน ขาดการศึกษาที่บูรณาการสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น การอนุรักษ์โบราณสถาน และ Universal Design ไว้ในกรอบเดียวกัน โดยเฉพาะในบริบทวัดพื้นถิ่นอีสาน การศึกษานี้จึงเป็นกรณีศึกษาด้านการออกแบบอาคารในพื้นที่ประวัติศาสตร์และโบราณสถาน การประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นให้สอดคล้องกับบริบทสมัยใหม่ ซึ่งแนวทางที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์อื่นได้

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

2.1 เพื่อศึกษา คุณค่าทางสถาปัตยกรรม ประวัติศาสตร์ และวัฒนธรรมของวัดหน้าพระธาตุ รวมถึงบริบทและข้อจำกัดของพื้นที่อนุรักษ์

2.2 เพื่อวิเคราะห์ ปัญหาของห้องน้ำเดิม ทั้งด้านสถาปัตยกรรม การใช้งาน สุขอนามัย และการเข้าถึงของผู้ใช้งานทุกกลุ่ม

2.3 เพื่อพัฒนา แนวทางการออกแบบและปรับปรุงห้องน้ำสาธารณะให้สอดคล้องกับอัตลักษณ์สถาปัตยกรรมพื้นถิ่น กลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรม และไม่ทำลายคุณค่าของโบราณสถาน

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเกิดขึ้นจากการสั่งสมภูมิปัญญาของชุมชนมาอย่างยาวนาน สะท้อนถึงความสัมพันธ์อันลึกซึ้งระหว่างมนุษย์กับธรรมชาติและวัฒนธรรม Paul Oliver (2006) อธิบายว่าสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเป็นองค์ความรู้ที่มีคุณค่าในการสร้างงานออกแบบที่ยั่งยืน เนื่องจากสามารถตอบสนองบริบทเฉพาะถิ่นได้อย่างแท้จริง ในบริบทร่วมสมัยได้มีการพัฒนาแนวคิด สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ขึ้นที่ไม่ใช่การลอกเลียนรูปแบบภายนอก แต่เป็นการทำความเข้าใจหลักการพื้นฐาน เช่น การระบายอากาศตามธรรมชาติ การใช้วัสดุท้องถิ่น การจัดพื้นที่ตามวิถีชีวิตและสัดส่วนที่สอดคล้องกับบริบทเฉพาะถิ่น เพื่อนำมาปรับใช้กับงานออกแบบร่วมสมัยให้เกิดความกลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรมและลดความเป็นสิ่งแปลกปลอมในพื้นที่อนุรักษ์ แนวคิดนี้จึงเป็นการสร้างภาษาสถาปัตยกรรมใหม่ที่มีทั้งความร่วมสมัยและรากเหง้าทางวัฒนธรรมในเวลาเดียวกัน

3.2 การออกแบบสถาปัตยกรรมให้สอดคล้องกับโบราณสถานและพื้นที่ประวัติศาสตร์ Kamali Tabrizi และ Abdelmonem (2024) ศึกษาปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างร่วมสมัยในพื้นที่โบราณสถาน โดยพบว่าองค์ประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ที่ตั้ง รูปทรง ขนาด วัสดุ แนวสายตา การเข้าถึง ทั้งนี้ สิ่งปลูกสร้างใหม่ควรยึดหลัก 5 ประการ ได้แก่ การออกแบบแบบบูรณาการ การออกแบบเชิงปริมาตร การออกแบบเชิงนิเวศ การออกแบบที่เข้ากันได้ และการออกแบบร่วมสมัย เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทโดยไม่ทำลายคุณค่าของพื้นที่ นอกจากนั้น Okoli et al. (2023) ชี้ให้เห็นว่ากลยุทธ์ทางสถาปัตยกรรมที่ดีต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอดีตและปัจจุบัน โดยเคารพทั้งรูปแบบสถาปัตยกรรมและความหมายทางวัฒนธรรมของพื้นที่ Kamali Tabrizi และ Abdelmonem (2024) เน้นว่าสิ่งปลูกสร้างใหม่ไม่ควรเปลี่ยนแปลงลักษณะสำคัญของพื้นที่ประวัติศาสตร์ แต่ควรออกแบบให้สะท้อนคุณลักษณะของพื้นที่ได้อย่างกลมกลืนและเสริมสร้างคุณค่าของพื้นที่นั้นได้

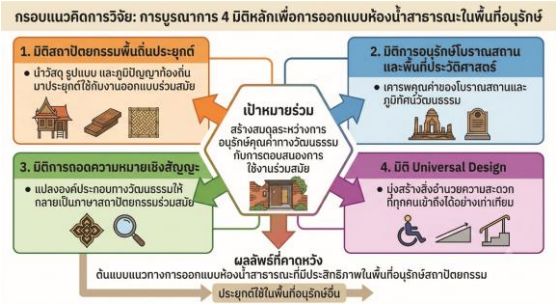
3.3 การถอดความหมายเชิงสัญญะ Gottdiener และ Lagopoulos (2018) ชี้ว่าความหมายของสิ่งปลูกสร้างไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบภายนอกเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ บริบทแวดล้อมและผู้ใช้งาน ทำให้สัญญะในงานสถาปัตยกรรมมีความหมายหลายชั้นซ้อนกันอยู่ในเวลาเดียวกัน แนวคิดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบในพื้นที่อนุรักษ์ เพราะองค์ประกอบสถาปัตยกรรมดั้งเดิมที่มีอยู่ในพื้นที่ทำหน้าที่เป็นเสมือนกรอบที่กำหนดทิศทางว่าสิ่งปลูกสร้างใหม่ควรมีรูปแบบและภาษาทางสถาปัตยกรรมอย่างไร จึงจะกลมกลืนและดูเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ได้อย่างเป็นธรรมชาติ Maudlin และ Vellinga (2016) เสนอกรอบ Semiotic Mapping เพื่อจำแนกสัญญะออกเป็นสัญญะเชิงรูปทรง วัสดุและพื้นที่ ช่วยให้นักออกแบบระบุองค์ประกอบที่มีคุณค่าเชิงสัญลักษณ์ที่ควรสืบทอดและองค์ประกอบที่ปรับเปลี่ยนได้โดยไม่สูญเสียความหมายของพื้นที่ กระบวนการถอดความหมายเชิงสัญญะจึงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การอ่านสัญญะ การตีความสัญญะ การสร้างสัญญะใหม่ เพื่อแปลงมรดกสถาปัตยกรรมให้เป็นภาษาร่วมสมัยโดยไม่ตัดขาดจากความหมายเดิม

3.5 หลักการ Universal Design Center for Universal Design (1997) กำหนดหลักการ 7 ประการ ได้แก่ ความเท่าเทียมในการใช้งาน ความยืดหยุ่นในการใช้งาน การใช้งานง่าย การสื่อสารที่ชัดเจน การลดความผิดพลาด การใช้แรงน้อย และขนาดพื้นที่ที่เหมาะสม Steinfeld และ Maisel (2017) ได้ขยายแนวคิดนี้สู่ Universal Design for Inclusion โดยเน้นว่าการออกแบบที่ดีต้องไม่เพียงแก้ปัญหาการเข้าถึงทางกายภาพ แต่ต้องสร้างประสบการณ์การใช้งานที่มีความเท่าเทียมกันสำหรับผู้ใช้ทุกกลุ่ม โดยเฉพาะในพื้นที่สาธารณะที่มีความหลากหลายของผู้ใช้งาน วิภาวี กฤษณะภูติ (2561) ชี้ว่าการนำหลัก Universal Design ไปใช้ในสถานที่

ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมยังขาดความต่อเนื่องในเชิงนโยบายและการปฏิบัติ โดยเฉพาะการรองรับผู้สูงอายุและผู้พิการในพื้นที่โบราณสถานซึ่งมีข้อจำกัดด้านการปรับปรุงทางกายภาพ สอดคล้องกับ Piechotka และ Grochulska-Salak (2020) ที่กล่าวว่าการบูรณาการ Universal Design เข้ากับการอนุรักษ์มรดกวัฒนธรรมต้องอาศัยการออกแบบที่ละเอียดอ่อน โดยใช้วัสดุและรูปแบบที่กลมกลืนกับพื้นที่ประวัติศาสตร์ควบคู่กับการตอบสนองมาตรฐานการเข้าถึง

4. กรอบแนวคิดการวิจัย

การวิจัยนี้บูรณาการองค์ความรู้จาก 4 มิติหลักเพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรมที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ 1) มิติสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ เน้นการนำวัสดุ รูปแบบและภูมิปัญญาท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้กับงานออกแบบร่วมสมัย โดยวัดผลจากความกลมกลืนของอาคารกับภูมิทัศน์วัฒนธรรมและความสามารถในการสื่ออัตลักษณ์ท้องถิ่นผ่านองค์ประกอบสถาปัตยกรรม 2) มิติการอนุรักษ์โบราณสถานและพื้นที่ประวัติศาสตร์ เน้นการเคารพคุณค่าของโบราณสถานและภูมิทัศน์วัฒนธรรม โดยวัดผลจากระดับความสอดคล้องกับหลักการอนุรักษ์สากล 3) มิติการถอดความหมายเชิงสัญญะแปลงองค์ประกอบทางวัฒนธรรมให้กลายเป็นภาษาสถาปัตยกรรมร่วมสมัย ซึ่งสามารถวัดผลได้จากการรับรู้ความหมายเชิงวัฒนธรรมของผู้ใช้งาน 4) มิติ Universal Design มุ่งสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกที่ทุกคนเข้าถึงได้อย่างเท่าเทียม โดยวัดผลจากคุณภาพการเข้าถึงทางกายภาพตามมาตรฐานสากลและความพึงพอใจของผู้ใช้งานกลุ่มเปราะบาง กรอบแนวคิดทั้ง 4 มิติเชื่อมโยงกันผ่านเป้าหมายร่วมคือการสร้างสมดุลระหว่างการอนุรักษ์คุณค่าทางวัฒนธรรมกับการตอบสนองการใช้งานร่วมสมัย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบในพื้นที่อนุรักษ์อื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

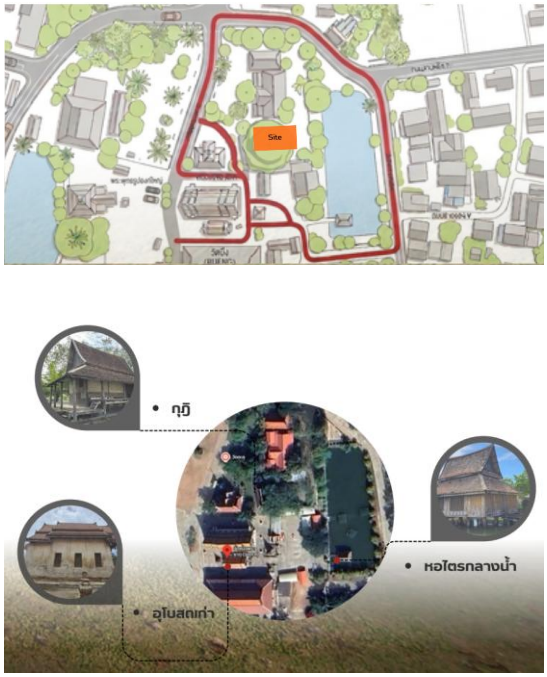
5. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงคุณภาพที่ใช้วัดหน้าพระธาตุ อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรมที่มีคุณค่าและกำลังเผชิญปัญหาด้านสิ่งอำนวยความสะดวก การเก็บข้อมูลดำเนินการผ่าน 3 ช่องทางหลัก ได้แก่ 1) การสำรวจภาคสนาม เพื่อบันทึกสภาพกายภาพของโบราณสถานและห้องน้ำเดิม พร้อมจัดทำแบบสำรวจพื้นที่ 2) การศึกษาเอกสารประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม รวมถึงมาตรฐานและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง 3) การสัมภาษณ์เชิงลึกผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจำนวน 5 คน ซึ่งคัดเลือกแบบเจาะจง ได้แก่ ผู้นำชุมชน พระสงฆ์ คณะกรรมการวัด และตัวแทนผู้ใช้งาน เกี่ยวกับปัญหาด้านการใช้งาน สุขอนามัย การบำรุงรักษา และความต้องการด้านอื่น ๆ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์แก่นสาระ (Thematic Analysis) จากข้อมูลสัมภาษณ์และบันทึกภาคสนามเพื่อค้นหาประเด็นร่วม พร้อมทั้งตรวจสอบข้อมูลแบบสามเส้า (Triangulation) ทั้งด้านแหล่งข้อมูลโดยเปรียบเทียบผู้ให้สัมภาษณ์ต่างกลุ่ม และด้านวิธีรวบรวมข้อมูลโดยตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างผลสัมภาษณ์กับการสำรวจกายภาพ 2) การวิเคราะห์เชิงตีความโดยบูรณาการกรอบทฤษฎี ได้แก่ แนวคิดสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ แนวคิด Critical Regionalism และหลักการ Universal Design เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลรอบด้าน ผลการวิเคราะห์นี้นำไปสู่การสังเคราะห์แนวทางการออกแบบที่ครอบคลุมมิติทางสถาปัตยกรรม ประวัติศาสตร์ สังคม

และการเข้าถึง เพื่อเป็นข้อเสนอแนะในการปรับปรุงห้องน้ำในพื้นที่โบราณสถานอย่างมีประสิทธิภาพ

6. ผลการวิจัย

6.1 คุณค่าทางสถาปัตยกรรม ประวัติศาสตร์และวัฒนธรรม วัดหน้าพระธาตุมีองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมที่มีคุณค่าโดดเด่นซึ่งสะท้อนภูมิปัญญาและความศรัทธาของชุมชนที่สืบทอดกันมายาวนาน ทำให้วัดแห่งนี้ดำรงสถานะเป็นทั้งแหล่งเรียนรู้ทางประวัติศาสตร์และพื้นที่ที่มีคุณค่าทางวัฒนธรรม บริบทดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อข้อจำกัดในการพัฒนาพื้นที่ กล่าวคือ สิ่งปลูกสร้างใหม่ทุกประเภทต้องไม่บดบังหรือลดทอนคุณค่าของโบราณสถานที่มีอยู่เดิม



รูปที่ 2 ผังบริเวณวัดหน้าพระธาตุ แสดงตำแหน่งที่ตั้งโบราณสถานและห้องน้ำ

6.2 ปัญหาห้องน้ำเดิมในพื้นที่วัดหน้าพระธาตุ ผลการวิเคราะห์จากการสำรวจและสัมภาษณ์ชี้ให้เห็นปัญหาของห้องน้ำเดิม 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านสถาปัตยกรรมและภูมิทัศน์ เนื่องจากใช้วัสดุและสีที่ไม่สอดคล้องกับบริบทของพื้นที่อนุรักษ์ ส่งผลให้เกิดความขัดแย้งทางสายตากับโบราณสถานโดยรอบ และทำลายความสมบูรณ์ของภูมิทัศน์วัฒนธรรมโดยรวม 2) ด้านการใช้งาน จำนวนห้องน้ำและอ่างล้างหน้าที่มีอยู่ไม่เพียงพอต่อปริมาณผู้ใช้งาน โดยเฉพาะช่วงงานประเพณีมัสการพระธาตุ อีกทั้งไม่มีการแบ่งโซนห้องน้ำชาย หญิง ผู้พิการ และไม่มีโถปัสสาวะชาย 3) ด้านสุขอนามัยและการบำรุงรักษาที่ยังขาดประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้งาน 4) ด้านการเข้าถึงสำหรับผู้ใช้งานทุกกลุ่ม โดยขาดมาตรฐาน Universal Design อย่างชัดเจน โดยเฉพาะทางลาดสำหรับผู้พิการที่ไม่ได้มาตรฐาน รวมถึงการขาดสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุและผู้บกพร่องทางการเคลื่อนไหว



รูปที่ 3 กุฏิโบราณและสภาพปัญหาห้องน้ำ

6.3 แนวทางการออกแบบและปรับปรุงห้องน้ำสาธารณะมีดังนี้

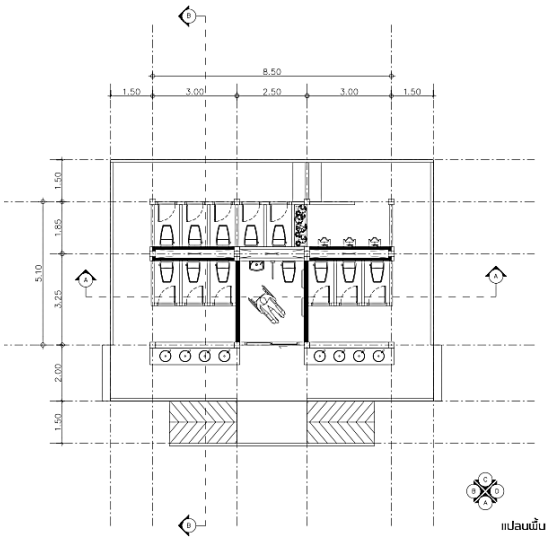
1) การออกแบบอาคารให้กลมกลืนกับภูมิทัศน์และโบราณสถานเดิม งานวิจัยเสนอแนวความคิดหลักภายใต้ชื่อ "แสงลอดลมไหล" ซึ่งสื่อถึงการสร้างพื้นที่ใช้งานที่โปร่ง สว่างและระบายอากาศได้ดี ควบคู่ไปกับการกลมกลืนกับบริบทของพื้นที่อนุรักษ์ แนวคิดนี้เกิดจากการถอดและตีความองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นผ่านกระบวนการออกแบบร่วมสมัย โดยนำองค์ประกอบสำคัญมาประยุกต์ใช้ เช่น การเข้าลิ่มไม้ของกุฏิโบราณและหอไตร การก่อผนังด้วยอิฐซึ่งเป็นวัสดุหลักของพระธาตุและอุโบสถ การบูรณาการองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้อาคารสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งในฐานะสิ่งอำนวยความสะดวกและสัญลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่สื่อถึงอัตลักษณ์ของชุมชน

การวางผังอาคารยึดหลักการสร้างอาคารใหม่ที่ไม่บดบังทัศนียภาพหลักของโบราณสถาน

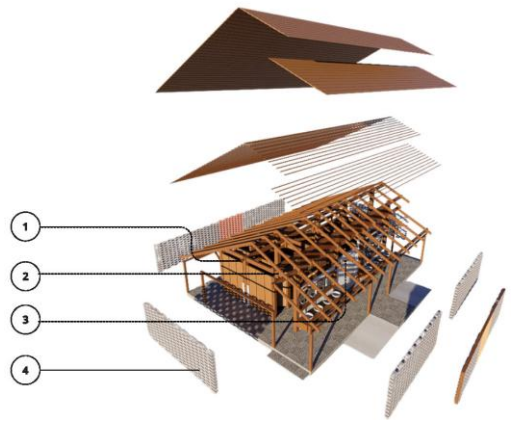
โดยพิจารณาแนวแกนสายตาและเส้นทางสัญจรของผู้เยี่ยมชมเป็นหลัก เพื่อให้ห้องน้ำอยู่ในตำแหน่งที่เข้าถึงได้สะดวกโดยไม่รบกวนประสบการณ์การรับรู้พื้นที่ทางวัฒนธรรม การกำหนดรูปทรงอาคาร อ้างอิงจากองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเป็นหลัก รูปทรงโดยรวมจึงโปร่งและเบาไม่แข่งขันกับโบราณสถานที่อยู่โดยรอบ อีกทั้งยังควบคุมความสูงและสัดส่วนให้อยู่ในระดับที่ถ่อมตัวเพื่อรักษาลำดับชั้นความสำคัญทางสถาปัตยกรรมของพื้นที่ การเลือกใช้วัสดุและโทนสี ตั้งอยู่บนหลักการสร้างความกลมกลืนกับบริบทควบคู่กับการตอบสนองการใช้งานในระยะยาว โดยใช้โครงสร้างหลักเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ผนังก่ออิฐฉาบปูน โครงหลังคาเหล็กแต่งสีให้มีลักษณะคล้ายไม้ ในขณะที่ใช้ไม้จริงในส่วนตกแต่งพื้นผิวที่เหมาะสม และนำอิฐมาประยุกต์ใช้ในส่วนผนัง โดยรวมเลือกใช้โทนสีอบอุ่นของดินและไม้ที่สอดคล้องกับสีสันของโบราณสถาน เพื่อให้อาคารมีความกลมกลืนและไม่สร้างความขัดแย้งทางสายตา

2) การออกแบบตามหลัก Universal Design โดยให้ความสำคัญกับการเข้าถึงของผู้ใช้งานทุกกลุ่ม ทั้งการจัดทำทางลาดที่ได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด การออกแบบห้องน้ำสำหรับผู้พิการที่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการหมุนรถเข็น ติดตั้งราวจับในตำแหน่งที่เหมาะสม การออกแบบพื้นผิวทางเดินและป้ายสัญลักษณ์เพื่อช่วยในการนำทางสำหรับผู้บกพร่องทางสายตา รวมถึงการกำหนดความสูงของอุปกรณ์สุขภัณฑ์ให้ผู้สูงอายุและผู้พิการสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและปลอดภัย

3) การออกแบบเพื่อรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการแบ่งโซนห้องน้ำชาย หญิง และผู้พิการอย่างชัดเจน เพิ่มจำนวนห้องน้ำและอ่างล้างหน้า รวมถึงแยกพื้นที่อ่างล้างหน้าและพื้นที่โถปัสสาวะออกมาต่างหาก เพื่อให้สะดวกและเพียงพอต่อการใช้งาน









รูปที่ 4 แนวทางการออกแบบและปรับปรุงห้องน้ำวัดหน้าพระธาตุ

4) การเลือกวัสดุที่ง่ายต่อการบำรุงรักษาเพื่อแก้ปัญหาด้านสุขอนามัย โครงสร้างที่โปร่งตามแนวคิด "แสงลอดลมไหล" ส่งเสริมการระบายอากาศตามธรรมชาติ ลดความชื้นสะสม ซึ่งสอดคล้องกับภูมิปัญญาสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นในการจัดการสภาพแวดล้อมเขตร้อนชื้น ส่วนวัสดุปูพื้นและตกแต่งผิวผนังภายในห้องน้ำเลือกใช้กระเบื้องที่สามารถทำความสะอาดได้ง่าย

7. อภิปรายผล

การอภิปรายผลนำเสนอการเชื่อมโยงระหว่างผลการวิจัยที่ได้กับแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) ความกลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรมผ่านสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ แนวทางการออกแบบที่เสนอภายใต้แนวคิด "แสงลอดลมไหล" เป็นการนำหลักการพื้นฐานของสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น เช่น การระบายอากาศตามธรรมชาติ การใช้อิฐ และการเข้าลิ่มไม้ มาประยุกต์ใช้อย่างร่วมสมัย ซึ่งตรงกับมิติสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นประยุกต์ในกรอบแนวคิดการวิจัยที่มุ่งวัดผลจากความกลมกลืนของอาคารกับภูมิทัศน์วัฒนธรรมและการสื่ออัตลักษณ์ท้องถิ่น สอดคล้องกับแนวคิดของ Paul Oliver (2006) ที่ว่าสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นมีคุณค่าในฐานะองค์ความรู้ที่ตอบสนองบริบทเฉพาะถิ่นได้อย่างแท้จริง

2) การเคารพคุณค่าโบราณสถานในการออกแบบสิ่งปลูกสร้างใหม่ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการวางผังอาคารต้องคำนึงถึงแนวแกนสายตาและไม่บดบังทัศนียภาพหลักของโบราณสถาน พร้อมควบคุมสัดส่วนความสูงให้อยู่ในระดับถ่อมตัว สอดคล้องกับแนวคิดของ Kamali Tabrizi และ Abdelmonem (2024) ที่เน้นว่าสิ่งปลูกสร้างใหม่ไม่ควรเปลี่ยนแปลงลักษณะสำคัญของพื้นที่ประวัติศาสตร์ แต่ควรออกแบบให้สะท้อนและเสริมสร้างคุณค่าของพื้นที่ ซึ่งสอดคล้องกับมิติการอนุรักษ์โบราณสถานในกรอบแนวคิดการวิจัยที่มุ่งวัดผลจากระดับความสอดคล้องกับหลักการอนุรักษ์สากล และสัมพันธ์กับแนวคิดของ Okoli et al. (2023) ที่กล่าวว่ากลยุทธ์การออกแบบสถาปัตยกรรมที่ดีต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอดีตและปัจจุบันโดยเคารพทั้งรูปแบบสถาปัตยกรรมและความหมายทางวัฒนธรรม

3) การถอดและสร้างสัญญะทางสถาปัตยกรรมใหม่ การนำองค์ประกอบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น เช่น การก่ออิฐ การเข้าลิ่มไม้ และโทนสีอบอุ่นของดินและไม้ มาแปลงเป็นภาษาสถาปัตยกรรมร่วมสมัยในการออกแบบห้องน้ำสะท้อนกระบวนการถอดความหมายเชิงสัญญะ 3 ขั้นตอนตามที่ Maudlin และ Vellinga (2016) เสนอ ได้แก่ การอ่านสัญญะ การตีความสัญญะ และการสร้างสัญญะใหม่ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Gottdiener และ Lagopoulos (2018) ที่ชี้ว่าความหมายของสิ่งปลูกสร้างเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ บริบทแวดล้อม และผู้ใช้งาน ไม่ใช่รูปแบบภายนอกเพียงอย่างเดียว กระบวนการดังกล่าวสอดคล้องกับมิติการถอดความหมายเชิงสัญญะในกรอบแนวคิดการวิจัยที่ตั้งเป้าวัดผลจากการรับรู้ความหมายเชิงวัฒนธรรมของผู้ใช้งาน และสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบห้องน้ำในพื้นที่อนุรักษ์ไม่ได้เป็นเพียงสาธารณูปโภคแต่ยังทำหน้าที่เป็นสัญลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่สื่อถึงอัตลักษณ์ชุมชนด้วย

4) การบูรณาการ Universal Design ในพื้นที่อนุรักษ์ ผลการวิจัยพบข้อบกพร่องชัดเจนด้านการเข้าถึง ได้แก่ ทางลาดที่ไม่ได้มาตรฐาน การขาดสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ ซึ่งสอดคล้องกับที่ วิภาวี กฤษณะภูติ (2561) ชี้ว่าการนำหลัก Universal Design ไปใช้ในสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมยังขาดความต่อเนื่องในเชิงนโยบายและการปฏิบัติ แนวทางการออกแบบที่เสนอจึงบูรณาการหลักการ 7 ประการของ Center for Universal Design (1997) ควบคู่กับแนวคิด Universal Design for Inclusion ของ Steinfeld และ Maisel (2017) ที่เน้นสร้างประสบการณ์การใช้งานที่เท่าเทียมสำหรับผู้ใช้ทุกกลุ่ม โดยใช้วัสดุและรูปแบบที่กลมกลืนกับพื้นที่ประวัติศาสตร์ไปพร้อมกัน ซึ่งตรงกับข้อเสนอของ Piechotka และ Grochulska-Salak (2020) ที่ระบุว่าการบูรณาการ Universal Design เข้ากับ

การอนุรักษ์มรดกวัฒนธรรมต้องอาศัยการออกแบบที่ละเอียดอ่อน

8. สรุปผล

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์สถาปัตยกรรมจำเป็นต้องบูรณาการองค์ความรู้อย่างน้อย 4 มิติไปพร้อมกัน ได้แก่ การประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเพื่อสร้างความกลมกลืนกับภูมิทัศน์วัฒนธรรม การเคารพหลักการอนุรักษ์โบราณสถานสากลในการวางผังและกำหนดสัดส่วนอาคาร การถอดและสร้างสัญญะทางสถาปัตยกรรมใหม่เพื่อให้สิ่งปลูกสร้างสามารถสื่ออัตลักษณ์ชุมชนได้อย่างมีความหมาย และการบูรณาการหลัก Universal Design เพื่อให้ผู้ใช้ทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงได้อย่างเท่าเทียม โดยแนวคิด "แสงลอดลมไหล" ที่นำเสนอในการวิจัยนี้เป็นตัวอย่างของการสร้างสมดุลระหว่างการอนุรักษ์คุณค่าทางวัฒนธรรมกับการตอบสนองการใช้งานร่วมสมัย ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาห้องน้ำสาธารณะในพื้นที่อนุรักษ์อื่นที่มีบริบทใกล้เคียงกัน

9. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผลการออกแบบในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้รับการประเมินผลการใช้งานจริง จึงควรดำเนินการก่อสร้างนำร่อง จัดทำกลไกการมีส่วนร่วมของผู้เกี่ยวข้องทุกภาคส่วน และประเมินผลภายหลังการใช้งานอย่างเป็นระบบ เพื่อพัฒนาแนวทางให้สมบูรณ์

11. เอกสารอ้างอิง

[1] วิภาวี กฤษณะภูติ. (2561). “การออกแบบเพื่อคนทุกกลุ่มในแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม: กรณีศึกษาโบราณสถานในประเทศไทย.” วารสารสถาปัตยกรรมศาสตร์ 15, 1 (มกราคม-มิถุนายน): 22–38.

[2] Boonjub, W. (2009). The Study of Thai Traditional Architecture as a Resource for Contemporary Building Design in Thailand. Doctoral Dissertation, Silpakorn University.

[3] Gottdiener, M., & Lagopoulos, A. Ph. (Eds.). (2018). The city and the sign: An introduction to urban semiotics. New York: Columbia University Press.

[4] Jaglarz, A. (2020). "Designing Public Toilets in the Historic Urban Landscape." In Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 966. Cham: Springer. pp. 88–95.

[5] Kamali Tabrizi, S., & M. G. Abdelmonem. (2024). "Contemporary construction in historical sites: The missing factors." Frontiers of Architectural Research 13, 3 (June): 613–624.

[6] Lanzini, P., & S. S. Khan. (2022). "Public Toilets from the Perspective of Users: A Case Study in a Public Place, Brazil." Journal of Water and Health 20, 1 (January): 41–52.

[7] Maudlin, D., & M. Vellinga, eds. (2016). Consuming architecture: On the occupation, appropriation and interpretation of buildings. London: Routledge.

[8] Okoli, C. J., J. Barnaby, & K. D. Agwu. (2023). "Historical heritage preservation: The role of architectural strategies." International Journal of Innovative Environmental Studies Research 11, 3 (July-September): 36–41.

[9] Oliver, Paul. (2006). Built to meet needs: Cultural issues in vernacular architecture. Oxford: Routledge.

[10] Piechotka, A., & Grochulska-Salak, M. (2020). Universal Design Accessibility Criteria for the Sustainability of the Historical Urban Sites. In Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 966, pp. 115–123). Springer, Cham.

[11] Steinfeld, E., & Maisel, J. (2017). Universal design: Creating inclusive environments. NJ: John Wiley & Sons.

[12] Center for Universal Design. (1997). The principles of universal design. Raleigh, NC: North Carolina State University.

การบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการพัฒนาชุมชน กรณีศึกษาโครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ ตำบลพุดซา จังหวัดนครราชสีมา

Integration of experiential learning with community development A case study of organic farming learning center project in Phutsa subdistrict, Nakhon Ratchasima province

มาริสา หิรัญตียะกุล[1]

[1]หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000

* E-mail: marisa.h@nrru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 080-6154459

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่บูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชน ในรายวิชาภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณ ดำเนินการวิจัยโดยใช้วิธีการวิจัยเชิงปฏิบัติการในชั้นเรียนแบบผสมผสาน กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยนักศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต จำนวน 9 คน และผู้แทนวิสาหกิจชุมชนตำบลพุดซา จำนวน 8 คน ระยะเวลาดำเนินการ 16 สัปดาห์ รูปแบบการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 6 ขั้นตอนที่เชื่อมโยงเป็นวงจรการออกแบบที่สมบูรณ์ ได้แก่ การเตรียมความพร้อม การศึกษาบริบทและการมีส่วนร่วม การวิเคราะห์และสะท้อนคิด การพัฒนาแนวคิดและการออกแบบ การนำเสนอและปรับปรุง และการนำเสนอผลงานสุดท้ายและการประเมิน ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการเรียนรู้ดังกล่าวส่งผลให้นักศึกษามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยคะแนนความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 48.9 และคะแนนทักษะการออกแบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 65.8 นอกจากนี้ นักศึกษายังมีความพึงพอใจต่อกระบวนการเรียนรู้ในระดับมากที่สุด ในส่วนของคุณภาพผลงานการออกแบบ พบว่าอยู่ในระดับดีมาก ($\overline{x}$ = 4.28, SD = 0.37) และชุมชนมีความพึงพอใจต่อโครงการในระดับมากที่สุด ($\overline{x}$ = 4.67, SD = 0.43) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการพัฒนาชุมชนผ่านการปฏิบัติจริง ช่วยพัฒนาทักษะการออกแบบที่ตอบสนองบริบทและสร้างคุณค่าให้กับสังคมได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเรียนรู้เชิงประสบการณ์ การออกแบบแบบมีส่วนร่วม ภูมิสถาปัตยกรรม การพัฒนาชุมชน การศึกษาสถาปัตยกรรม

Abstract

This research aimed to develop and investigate the effectiveness of a learning model integrating experiential learning with academic service for community development in the Landscape Architecture and Site Planning course. The study employed a mixed-methods classroom action research approach involving 9 undergraduate architecture students and 8 community representatives from the Phutsa Subdistrict Community Enterprise over a 16-week period. The developed learning model comprised six interconnected stages forming a complete

design cycle preparation, context study and participation, analysis and reflection, concept development and design, presentation and refinement, and final presentation and evaluation. The results demonstrated a significant enhancement in student outcomes, with knowledge scores increasing by 48.9% and design skill scores by 65.8%. Students reported the highest level of satisfaction with the learning process. Furthermore, the design quality was rated as very good (mean = 4.28, SD = 0.37), and community satisfaction reached the highest level (mean = 4.67, SD = 0.43). These findings suggest that integrating experiential learning with community development through real-world projects effectively fosters design skills responsive to local contexts while generating sustainable value for the community.

Keywords: Experiential Learning, Participatory Design, Landscape Architecture, Community Development, Architectural Education

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

การออกแบบภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณถือเป็นศาสตร์ที่มีความซับซ้อนและละเอียดอ่อน เนื่องจากมิใช่เพียงการจัดวางองค์ประกอบทางกายภาพให้เกิดความงามเท่านั้น แต่ยังต้องบูรณาการความเข้าใจในมิติที่หลากหลาย ทั้งลักษณะทางนิเวศวิทยาของพื้นที่ บริบททางสังคมวัฒนธรรม พฤติกรรมมนุษย์ รวมถึงข้อจำกัดทางเทคนิคและงบประมาณเข้าด้วยกัน จากการสำรวจแนวโน้มการวิจัยและการศึกษาทางสถาปัตยกรรมในประเทศไทยระยะหลัง พบว่ามีความตื่นตัวในการศึกษาประเด็นสถาปัตยกรรมที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและการออกแบบที่เน้นกระบวนการมีส่วนร่วมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาสถาปัตยกรรมในศตวรรษที่ 21 จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนผ่านไปสู่การเรียนรู้ที่เชื่อมโยงกับโลกจริงและชุมชนอย่างแท้จริง แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยร่วมสมัย [1] เสนอว่าการเรียนรู้เชิงประสบการณ์ซึ่งผสานการทำงานร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและการแก้ปัญหาในสถานการณ์จริงสามารถเสริมสร้างทักษะการออกแบบและความรับผิดชอบต่อสังคมของนักศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันงานทบทวนอย่างเป็นระบบ [2] เกี่ยวกับ Live Projects ในการศึกษาสถาปัตยกรรม พบว่าการเรียนรู้ผ่านโครงการที่ดำเนินงานร่วมกับชุมชนไม่เพียงช่วยพัฒนาสมรรถนะทางวิชาชีพ แต่ยังเสริมสร้างการมีส่วนร่วมทางสังคมและความสามารถในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านของการศึกษาสถาปัตยกรรมไปสู่การเรียนรู้ที่มีความยั่งยืนและตอบโจทย์สังคมร่วมสมัย

อย่างไรก็ตาม การจัดการเรียนการสอนในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่ยังคงประสบปัญหาในการจำลองความซับซ้อนของโลกความเป็นจริงมาไว้ในห้องเรียนปฏิบัติการ (Studio) ส่งผลให้นักศึกษามีโอกาสจำกัดในการเผชิญกับบริบททางสังคมและผู้ใช้งานจริง การจัดการเรียนรู้ที่เปิดโอกาสให้นักศึกษาลงพื้นที่ปฏิบัติงานร่วมกับชุมชนจึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาทักษะวิชาชีพควบคู่กับการสร้างจิตสำนึกสาธารณะ สอดคล้องกับแนวคิดของ Schön [3] ที่เสนอว่าการศึกษาสถาปัตยกรรมควรเป็นการฝึกปฏิบัติที่เน้นการสะท้อนคิด (Reflective Practicum) กล่าวคือ เป็นพื้นที่ที่ผู้เรียนได้เรียนรู้ผ่านการลงมือทำและขบคิดทบทวนกับปัญหาที่เกิดขึ้นจริง มิใช่เพียงการรับถ่ายทอดทฤษฎีทางเดียว ดังนั้น การนำทฤษฎีการเรียนรู้เชิงประสบการณ์ (Experiential Learning) [4] มาบูรณาการเข้ากับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชน จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเติมเต็มช่องว่างทางการศึกษานี้ เพื่อให้นักศึกษาได้ก้าวออกจากห้องเรียนไปสู่การเรียนรู้ท่ามกลางบริบทของสังคมจริง งานวิจัยในช่วงหลังยังรายงานว่า การเรียนรู้ผ่านโครงการที่ดำเนินงานร่วมกับชุมชนช่วยเพิ่มความสามารถในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน การทำงานแบบสหวิชาชีพ และการออกแบบที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการเรียนรู้ในสตูดิโอแบบดั้งเดิม

จากความสำคัญดังกล่าว การวิจัยครั้งนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา ที่มีความประสงค์อย่างแน่วแน่ที่จะพัฒนาพื้นที่เพื่อจัดตั้งเป็น ศูนย์แหล่งเรียนรู้เชิงเกษตรอินทรีย์อย่างยั่งยืน (รูปที่ 1) แต่ยังขาดองค์ความรู้ด้านการออกแบบวางผังที่เหมาะสม การวิจัยนี้จึงใช้โอกาสดังกล่าวเป็นกรณีศึกษาในการพัฒนารูปแบบการเรียนรู้ที่บูรณาการทฤษฎีสู่การปฏิบัติ โดยให้นักศึกษาได้เรียนรู้ร่วมกับชุมชน ในสถานการณ์จริง ซึ่งมีวัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อ 1) พัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่บูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชนในรายวิชาภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณ 2) ศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาทั้งในด้านความรู้ ทักษะการออกแบบ และเจตคติต่อการทำงานกับชุมชน 3) ประเมินคุณภาพของผลงานการออกแบบที่นักศึกษาพัฒนาขึ้นตามเกณฑ์ทางวิชาชีพ และ 4) ศึกษาความ

พึงพอใจของชุมชนที่มีต่อกระบวนการมีส่วนร่วมและผลงานการออกแบบ เพื่อนำไปสู่ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการเรียนการสอนสถาปัตยกรรมที่ตอบโจทย์สังคมอย่างยั่งยืนต่อไป



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา จังหวัดนครราชสีมา

2. วิธีการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการในชั้นเรียนที่ใช้วิธีการวิจัยแบบผสมผสาน [5] โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพไปพร้อมกัน เพื่อพัฒนารูปแบบการเรียนรู้และศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง พื้นที่ศึกษาคือ ตำบลพุดซา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นชุมชนที่มีความต้องการพัฒนาพื้นที่ศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ต้นแบบ สภาพปัจจุบันของพื้นที่โครงการมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มสลับกับที่ดอน มีแหล่งน้ำธรรมชาติเดิมกักเก็บน้ำได้ตลอดทั้งปี สภาพดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ พืชพรรณเดิมในพื้นที่ประกอบด้วยไม้ยืนต้นท้องถิ่นบางส่วน เช่น มะค่าโมงและประดู่ นอกจากนี้ พื้นที่ดังกล่าวยังประสบปัญหาเรื่องการเข้าถึง เนื่องจากขาดเส้นทางสัญจรภายในที่ชัดเจน และไม่มีพื้นที่สำหรับทำกิจกรรมกลุ่ม สภาพปัญหาทางกายภาพเหล่านี้ถือเป็นโจทย์ที่ท้าทายสำหรับนักศึกษาที่ต้องออกแบบเพื่อฟื้นฟูระบบนิเวศควบคู่ไปกับการจัดสรรพื้นที่ใช้สอยให้สอดคล้องกับกิจกรรมการเรียนรู้เกษตรอินทรีย์ โดยกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ประกอบด้วย

1.1 กลุ่มนักศึกษา นักศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณ ภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 9 คน

1.2 กลุ่มชุมชน ผู้แทนวิสาหกิจชุมชนตำบลพุดซาและปราชญ์ชาวบ้าน จำนวน 8 คน ทั้งนี้ แม้กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยจะมีขนาดเล็กตามธรรมชาติของการจัดการเรียนการสอนในระบบสตูดิโอทางสถาปัตยกรรม แต่การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกผ่านกระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการที่ครอบคลุมระยะเวลา 16 สัปดาห์ โดยติดตามพัฒนาการของผู้เรียนเป็นรายบุคคลอย่างละเอียดผ่านการบันทึกสะท้อนคิด การสังเกตพฤติกรรม และการปฏิสัมพันธ์กับชุมชนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Smith และ Brown [6] ที่ให้ความสำคัญกับในการพัฒนาการเรียนการสอนสถาปัตยกรรม โดยเน้นการแก้ปัญหาและปรับปรุงการปฏิบัติจริง

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล แบ่งออกเป็น 4 ชุด ซึ่งผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา โดยผู้เชี่ยวชาญประกอบด้วยอาจารย์สถาปัตยกรรม 2 คน ร่วมกับผู้แทนชุมชนจำนวน 8 คน เพื่อประเมินความเหมาะสมของผลงานทั้งในด้านวิชาการ ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ และความสอดคล้องกับความต้องการของชุมชน ได้แก่

2.1 เครื่องมือเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ ประกอบด้วย 1) แบบทดสอบวัดความรู้และแบบประเมินทักษะการออกแบบทางภูมิสถาปัตยกรรม (ประเมินก่อนและหลังเรียน) 2) แบบสอบถามความคิดเห็นของนักศึกษา และ 3) แบบสอบถามความพึงพอใจของชุมชน

2.2 เครื่องมือเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพ ประกอบด้วย 1) แบบบันทึกการสังเกตพฤติกรรมการเรียนรู้และการทำงานร่วมกัน 2) แบบบันทึกการสะท้อนคิดของ

นักศึกษาในแต่ละขั้นตอน และ 3) แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างสำหรับตัวแทนชุมชน

แบบประเมินคุณภาพผลงานออกแบบเป็นแบบประเมินมาตรประมาณค่า 5 ระดับ (5-point Rating Scale) ประกอบด้วย 5 ด้าน ได้แก่ (1) ความสอดคล้องกับบริบทพื้นที่และความต้องการของชุมชน (2) ความเหมาะสมของการวางผังและองค์ประกอบภูมิสถาปัตยกรรม (3) ความคิดสร้างสรรค์และความงามทางการออกแบบ (4) ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้หรือก่อสร้างจริง และ (5) ความยั่งยืนของแนวคิดการออกแบบ โดยผู้เชี่ยวชาญและผู้แทนชุมชนเป็นผู้ประเมินคุณภาพของผลงานออกแบบ

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2567 รวมระยะเวลา 16 สัปดาห์ โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการเรียนรู้เชิงประสบการณ์ [5] ร่วมกับแนวคิดการพัฒนาชุมชนแบบมีส่วนร่วม แบ่งกระบวนการออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมความพร้อม (สัปดาห์ที่ 1-2) สร้างความเข้าใจทฤษฎีภูมิสถาปัตยกรรมและการออกแบบแบบมีส่วนร่วม ประสานงานชุมชนเพื่อชี้แจงวัตถุประสงค์โครงการ

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาบริบทและการมีส่วนร่วม (สัปดาห์ที่ 3-4) นักศึกษาลงพื้นที่สำรวจกายภาพและจัดประชุมกลุ่มย่อยกับชุมชน (Focus Group) เพื่อวิเคราะห์ความต้องการและข้อจำกัดของพื้นที่ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 บรรยากาศการลงพื้นที่สำรวจ เก็บข้อมูล และสัมภาษณ์ผู้แทนชุมชน

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์และสะท้อนคิด (สัปดาห์ที่ 5-7) วิเคราะห์ข้อมูลด้วย SWOT และ Site Analysis นักศึกษาบันทึกการสะท้อนคิดเพื่อเชื่อมโยงประสบการณ์จริงกับทฤษฎี

ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาแนวคิดและการออกแบบ (สัปดาห์ที่ 8-10) พัฒนาแบบร่าง (Conceptual Design) จนถึงผังแม่บท (Master Plan) และรายละเอียดภูมิทัศน์ โดยคำนึงถึงบริบทชุมชน

ขั้นตอนที่ 5 การนำเสนอและปรับปรุง (สัปดาห์ที่ 11-14) นำเสนอผลงานต่อชุมชน (Public Hearing) เพื่อรับฟังข้อเสนอแนะและนำมาปรับปรุงแบบให้สมบูรณ์ (ดังรูปที่ 3 และ 4)



รูปที่ 3 บรรยากาศการประชุมกลุ่มย่อยและการนำเสนอผลงานต่อตัวแทนชุมชน



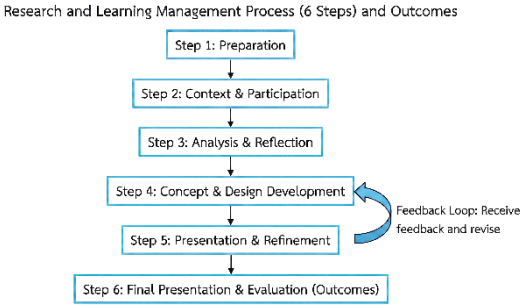
รูปที่ 4 บรรยากาศการนำเสนอผลงานออกแบบให้แก่ตัวแทนชุมชน

ขั้นตอนที่ 6 การนำเสนอผลงานสุดท้ายและการประเมิน (สัปดาห์ที่ 15-16) ส่งมอบผลงานออกแบบคู่มือดูแลรักษา และทำการประเมินผลสัมฤทธิ์รอบด้าน

4. การวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยได้ดำเนินการแยกวิเคราะห์ข้อมูลตามประเภทของเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวม โดยนำหลักการตรวจสอบข้อมูลแบบสามเส้า (Data Triangulation) มาใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องและความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณและข้อมูลเชิงคุณภาพ ซึ่งช่วยให้ผลการวิจัยมีความน่าเชื่อถือและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการจัดการเรียนรู้เชิงประสบการณ์และการทำงานร่วมกับชุมชนได้อย่างลุ่มลึก โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ข้อมูลเชิงปริมาณ วิเคราะห์ข้อมูลจากแบบทดสอบและแบบสอบถามโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าร้อยละ (Percentage) เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเรียนรู้

4.2 ข้อมูลเชิงคุณภาพ วิเคราะห์ข้อมูลจากการสังเกตการสัมภาษณ์ และการสะท้อนคิด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เนื้อหา ตามแนวทางของ Braun และ Clarke [7] โดยการจัดหมวดหมู่ประเด็นสำคัญ เพื่ออธิบายพัฒนาการของผู้เรียนและกระบวนการมีส่วนร่วมอย่างลุ่มลึก



รูปที่ 5 แผนภาพกระบวนการวิจัยและกระบวนการจัดการเรียนรู้ 6 ขั้นตอน

3. ผลการศึกษา

จากการวิจัยเชิงปฏิบัติการในชั้นเรียนเพื่อพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่บูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชนในกระบวนการนำเสนอและปรับปรุงแบบ (Public Hearing) ชุมชนได้ให้ข้อเสนอแนะหลายประเด็นที่ถูกนำมาปรับปรุงผลงานออกแบบก่อนจัดทำแบบสมบูรณ์ ได้แก่ การปรับตำแหน่งพื้นที่กิจกรรมให้สอดคล้องกับรูปแบบการใช้งานจริงของชุมชน การเพิ่มพื้นที่สำหรับการเรียนรู้และการสาธิตทางการเกษตร การปรับเส้นทางสัญจรให้สะดวกและปลอดภัยมากขึ้น รวมถึงการคัดเลือกพันธุ์พืชและวัสดุภูมิสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมกับบริบทพื้นที่และสามารถดูแลรักษาได้โดยชุมชน ข้อเสนอแนะดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงผังแม่บทและรายละเอียดการออกแบบก่อนการประเมินคุณภาพผลงานขั้นสุดท้าย ส่งผลให้ผลงานมีความสอดคล้องกับความต้องการของชุมชนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอนำเสนอผลการวิจัยแบ่งตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. รูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้น ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่เหมาะสมสำหรับการบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการพัฒนาชุมชนในบริบทของ

รายวิชาภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณ ประกอบด้วยกระบวนการเรียนรู้ 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การเตรียมความพร้อม 2) การศึกษาบริบทและการมีส่วนร่วม 3) การวิเคราะห์และสะท้อนคิด 4) การพัฒนาแนวคิดและการออกแบบ 5) การนำเสนอและปรับปรุง และ 6) การนำเสนอผลงานสุดท้ายและการประเมิน จุดเด่นของรูปแบบที่พัฒนาขึ้นคือการเชื่อมโยงกระบวนการทำงานที่เป็นวงจรต่อเนื่อง (Continuous Cycle) ทำให้นักศึกษาได้สัมผัสกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมที่สมบูรณ์ (Design Cycle) ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการ โดยแต่ละขั้นตอนได้สอดแทรกกิจกรรมที่ส่งเสริมปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียนกับชุมชนอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้นักศึกษาไม่ได้เรียนรู้เพียงทฤษฎีในห้องเรียน แต่เกิดการเรียนรู้ผ่านการเผชิญหน้ากับสถานการณ์จริงและผู้ใช้งานจริง ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการเรียนรู้เชิงประสบการณ์

2. ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณจากการทดสอบและประเมินทักษะ เปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสะท้อนคิดของนักศึกษา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ด้านความรู้และทักษะการออกแบบ เมื่อพิจารณาคะแนนประเมินก่อนและหลังการเรียนรู้ (ดังแสดงในตารางที่ 1) พบว่านักศึกษามีพัฒนาการสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทั้งสองด้าน โดยคะแนนด้านความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 48.9 ซึ่งสะท้อนถึงความเข้าใจในหลักการออกแบบและการวิเคราะห์พื้นที่ที่แม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจคือ คะแนนด้านทักษะการออกแบบมีอัตราการพัฒนาที่สูงกว่าด้านความรู้มาก โดยเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 65.8 ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการเรียนรู้แบบลงมือปฏิบัติในพื้นที่จริง ช่วยกระตุ้นให้นักศึกษาพัฒนาทักษะวิชาชีพได้ดีกว่าการท่องจำทฤษฎี โดยเฉพาะทักษะในด้านความสมบูรณ์ของรายละเอียดการออกแบบและความคิดสร้างสรรค์ที่มีคะแนนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากการสังเกตที่พบว่า การทำงานภายใต้ข้อจำกัดจริงของชุมชนทำให้นักศึกษาต้องคิดแก้ปัญหาอย่างรอบด้านและสร้างสรรค์เพื่อให้ผลงานสามารถนำไปก่อสร้างได้จริง

นอกจากผลการประเมินเชิงปริมาณ การติดตามพัฒนาการของนักศึกษาเป็นรายบุคคลจากบันทึกการสะท้อนคิด การสังเกตพฤติกรรม และการปฏิสัมพันธ์ระหว่างการทำงานร่วมกับชุมชนตลอดระยะเวลา 16 สัปดาห์ พบพัฒนาการอย่างต่อเนื่องในสามด้าน ได้แก่ (1) ความสามารถในการวิเคราะห์บริบทพื้นที่และเชื่อมโยงข้อมูลจากชุมชนเข้าสู่กระบวนการออกแบบ (2) การตัดสินใจเชิงออกแบบภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่ งบประมาณ และความต้องการของผู้ใช้งานจริง และ (3) ทักษะการสื่อสารและการทำงานร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งนักศึกษามีความมั่นใจและสามารถอธิบายเหตุผลของแนวคิดการออกแบบได้อย่างเป็นระบบมากขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเรียนรู้

ตารางที่ 1 Results of student knowledge and skill development (n=9)

Assessment Aspect	Pre-test $\bar{x}$	Post-test $\bar{x}$	Increase (Score)	Increase (%)
Knowledge (Full score 10)	5.67	8.44	2.77	48.9
Skills (Full score 10)	4.89	8.11	3.22	65.8

2.2 ด้านเจตคติและการสะท้อนคิด จากการวิเคราะห์เนื้อหาของบันทึกการสะท้อนคิดและแบบสอบถาม พบว่านักศึกษามีความเห็นต่อการจัดการเรียนรู้ในระดับ มากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.69 จาก 5.00 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.38) โดยประเด็นสำคัญที่นักศึกษาสะท้อนออกมาสอดคล้องกันคือ การเกิดความตระหนักรู้ในคุณค่าของวิชาชีพ นักศึกษาหลายคนระบุว่าการได้เห็นชุมชนนำแบบร่างไปใช้ประโยชน์จริงทำให้รู้สึกว่าวิชาชีพสถาปนิกมีความหมายต่อ

สังคม นอกจากนี้ ยังพบพัฒนาการด้านทักษะทางสังคม โดยเฉพาะความสามารถในการสื่อสารข้ามวัฒนธรรมและการสร้างความเข้าอกเข้าใจ (Empathy) ต่อผู้ใช้งานที่มีบริบทชีวิตแตกต่างจากตนเอง ซึ่งเป็นทักษะที่ยากจะเกิดขึ้นจากการทำโครงการจำลองในห้องเรียน

3. คุณภาพของผลงานการออกแบบ ผลการประเมินคุณภาพผลงานการออกแบบโครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ โดยคณะผู้เชี่ยวชาญและตัวแทนชุมชน พบว่าผลงานโดยภาพรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$ = 4.28 จาก 5.00 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.37) (ดังภาพที่ 3) เมื่อวิเคราะห์ลงลึกในรายละเอียด พบประเด็นที่น่าสนใจคือ ตัวแทนชุมชนให้คะแนนประเมินสูงกว่าผู้เชี่ยวชาญเล็กน้อย (4.33 เทียบกับ 4.22) โดยจุดเด่นที่ได้รับคะแนนสูงสุดคือ ความสอดคล้องกับความต้องการของชุมชน ($\bar{x}$ = 4.50) รองลงมาคือ ความเป็นไปได้ในการดำเนินการ ($\bar{x}$ = 4.33) ผลการประเมินนี้สะท้อนให้เห็นความสำเร็จของกระบวนการออกแบบแบบมีส่วนร่วมที่เปิดโอกาสให้ชุมชนเข้ามาเป็นผู้ร่วมออกแบบ (Co-designer) ตั้งแต่ต้น นอกจากนี้ ผลงานการออกแบบยังแสดงออกถึงความใส่ใจในมิติของความยั่งยืน (Sustainability) อย่างเป็นรูปธรรม อาทิ การเลือกใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่ายเพื่อลดต้นทุน การออกแบบระบบระบายน้ำหมุนเวียนเพื่อการเกษตร และการวางผังพืชพรรณที่สอดคล้องกับระบบนิเวศเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่านักศึกษาสามารถบูรณาการความรู้ทางภูมิสถาปัตยกรรมเข้ากับภูมิปัญญาท้องถิ่นได้อย่างกลมกลืน



รูปที่ 6 การส่งมอบงานออกแบบและเอกสารให้แก่ตัวแทนชุมชน



รูปที่ 7 ผลงานการออกแบบผังบริเวณศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา จังหวัดนครราชสีมา

4. ความพึงพอใจและผลกระทบต่อชุมชน

ผลการศึกษาความพึงพอใจของชุมชนที่มีต่อโครงการ (ดังตารางที่ 2) พบว่าอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.67, SD = 0.43) ในทุกด้าน โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ความพึงพอใจโดยรวมและผลกระทบที่ได้รับ ($\bar{x}$= 4.75) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับตัวแทนชุมชนช่วยขยายความตัวเลขดังกล่าวให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยชุมชนระบุว่าโครงการนี้ไม่เพียงแต่ให้ผลผลิตเป็นแบบแปลนที่สวยงาม แต่ยังก่อให้เกิดทุนทางสังคมที่สำคัญ คือการที่สมาชิกในชุมชนได้มาร่วมคิดร่วมทำจนเกิดเป็นแผนแม่บทที่ชัดเจน ซึ่งชุมชนสามารถนำไปใช้เป็นหลักฐานประกอบการขอสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยงาน

ภาครัฐได้จริง นอกจากนี้ กระบวนการทำงานร่วมกับนักศึกษายังช่วยสร้างความรู้สึกเป็นเจ้าของให้กับสมาชิกชุมชน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้โครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์นี้ได้รับการดูแลรักษาและพัฒนาต่อไปอย่างยั่งยืนในอนาคต

ตารางที่ 2 Satisfaction levels of students and community toward the learning process and project outcomes

Evaluator Group	n	Satisfaction $\bar{x}$	SD	Level
Students	9	4.69	0.38	Highest
Community	8	4.67	0.43	Highest

Note: Full score is 5.00.

4. อภิปรายผล

จากการศึกษาผลการพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่บูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชน กรณีศึกษาโครงการศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา ผู้วิจัยขออภิปรายผลตามวัตถุประสงค์การวิจัย ดังนี้

1. ประเด็นด้านรูปแบบการจัดการเรียนรู้และกระบวนการออกแบบ ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการเรียนรู้ 6 ขั้นตอนที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเรียนรู้ทางสถาปัตยกรรม ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการดังกล่าวถูกออกแบบให้เป็นวงจรที่ครบถ้วนสมบูรณ์ ตั้งแต่การสำรวจไปจนถึงการส่งมอบงานจริง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ[4] ที่เสนอว่าการศึกษาสถาปัตยกรรมควรมีลักษณะเป็นการฝึกปฏิบัติที่เน้นการสะท้อนคิด (Reflective Practicum) กล่าวคือ การที่นักศึกษาได้ลงมือปฏิบัติจริงและได้รับข้อมูลป้อนกลับ (Feedback) จากชุมชนในทุกขั้นตอน ทำให้นักศึกษาเกิดการไตร่ตรองและปรับปรุงแบบอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผู้เรียนตระหนักว่าการออกแบบเป็นกระบวนการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนและต้องอาศัยการคิดอย่างเป็นระบบ มิใช่เพียงการสร้างสรรค์ความงามทางศิลปะเพียงอย่างเดียว

2. ประเด็นด้านผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะวิชาชีพ ประเด็นที่น่าสนใจจากการวิจัยคือ นักศึกษามีพัฒนาการด้านทักษะ (Skills) สูงกว่าด้านความรู้ (Knowledge) (ร้อยละ 65.8 เทียบกับ 48.9) ผลการวิจัยที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเรียนรู้เชิงประสบการณ์ (Experiential Learning) ที่เน้นการเรียนรู้จากการลงมือทำ นอกจากนี้ การทำงานร่วมกับชุมชนยังส่งผลให้นักศึกษาเกิดความเห็นอกเห็นใจ (Empathy) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของสถาปนิกในศตวรรษที่ 21

3. ประเด็นด้านคุณภาพผลงานและความพึงพอใจของชุมชน ผลการประเมินคุณภาพผลงานที่อยู่ในระดับดีมาก โดยเฉพาะคะแนนจากตัวแทนชุมชนที่สูงกว่าผู้เชี่ยวชาญ สะท้อนให้เห็นถึงความสำเร็จของกระบวนการออกแบบแบบมีส่วนร่วม (Participatory Design) ตามแนวคิดของSanoff [8] การที่ผลงานออกมาตรงใจชุมชน มิใช่เรื่องบังเอิญ แต่เกิดจากการที่ชุมชนได้เข้ามาเป็นผู้ร่วมสร้างสรรค์ ตั้งแต่ต้นจนจบ กระบวนการนี้สร้างผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับหลักการของ Vitruvius [9] ที่ว่าสถาปัตยกรรมที่ดีต้องครบองค์ประกอบทั้งความแข็งแรง ประโยชน์ใช้สอยและความงาม โดยในบริบทนี้ ความงาม ไม่ได้หมายถึงเพียงรูปลักษณ์ภายนอก แต่หมายถึงความงามที่สอดคล้องกับวิถีชีวิตและวัฒนธรรมของชุมชน

4. ประเด็นด้านผลกระทบต่อชุมชนและความยั่งยืน ความพึงพอใจของชุมชนในระดับมากที่สุดแสดงให้เห็นว่าโครงการนี้บรรลุเป้าหมายตามแนวคิดการเรียนรู้แบบบริการสังคม (Service Learning) ของ Jacoby [10] และ Eyler & Giles [11] ที่เน้นหลักการได้ประโยชน์ร่วมกัน กล่าวคือ มหาวิทยาลัยได้บัณฑิตที่มีคุณภาพ ในขณะที่ชุมชนได้ผลงานออกแบบที่นำไปใช้ได้จริง นอกจากนี้ การนำหลักการพัฒนาชุมชนของ Chambers [12] มาใช้ ยังช่วยสร้างความรู้สึกเป็นเจ้าของ (Sense of Ownership) ให้กับชุมชน ซึ่งเป็นปัจจัยชี้ขาดความยั่งยืนของโครงการ เพราะเมื่อชุมชนรู้สึกว่าตนเองเป็นเจ้าของผลงาน พวก

เขาจะดูแลรักษาและพัฒนาพื้นที่นี้ต่อไปด้วยตนเอง แม้ว่าโครงการวิจัยจะสิ้นสุดลงแล้วก็ตาม

นอกจากนี้ ความสำเร็จของโครงการยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏเพื่อการพัฒนาท้องถิ่น ที่มุ่งเน้นให้มหาวิทยาลัยเป็นปัญญาของแผ่นดิน โดยใช้องค์ความรู้เข้าไปยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชน การที่นักศึกษาสามารถทำงานร่วมกับปราชญ์ชาวบ้านในลักษณะสหวิทยาการ ไม่เพียงแต่ช่วยลดช่องว่างระหว่างวัย แต่ยังเป็นการสืบสานและต่อยอดภูมิปัญญาท้องถิ่นไม่ให้สูญหาย กระบวนการแลกเปลี่ยนเรียนรู้นี้เปรียบเสมือนการสร้างห้องเรียนสังคม ที่ผู้เรียนและชุมชนต่างเป็นครูซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นทักษะชีวิตที่สำคัญยิ่งสำหรับการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21

โดยสรุป ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การศึกษาสถาปัตยกรรมที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้เข้าไปสัมผัสและเรียนรู้ร่วมกับชุมชนในบริบทจริง เป็นกลไกสำคัญที่ช่วยเติมเต็มทักษะทางวิชาชีพที่ห้องเรียนไม่สามารถมอบให้ได้ โดยเฉพาะการเรียนรู้ที่จะทำความเข้าใจความต้องการของผู้ใช้งานและการแก้ปัญหาภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่จริง การให้ความสำคัญกับกระบวนการมีส่วนร่วมและการแลกเปลี่ยนเรียนรู้กับปราชญ์ชาวบ้าน ไม่เพียงแต่ช่วยให้นักศึกษาได้ผลงานออกแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงเท่านั้น แต่ยังเป็นการสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ที่มีความหมาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการบูรณาการการเรียนการสอนกับการบริการวิชาการที่ก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันอย่างเป็นรูปธรรม

5. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่บูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชนในรายวิชาภูมิสถาปัตยกรรมและการวางผังบริเวณ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สามารถพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่ประกอบด้วยกระบวนการ 6 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมความพร้อม การศึกษาบริบทและการมีส่วนร่วม การวิเคราะห์และสะท้อนคิด การพัฒนาแนวคิดและการออกแบบ การนำเสนอและปรับปรุง และการนำเสนอผลงานพร้อมประเมินผล ซึ่งส่งเสริมการเรียนรู้ผ่านการปฏิบัติจริงร่วมกับชุมชนอย่างเป็นระบบ

2) นักศึกษามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นทั้งด้านความรู้และทักษะการออกแบบ โดยคะแนนด้านความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 48.9 และคะแนนด้านทักษะการออกแบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 65.8 รวมทั้งมีพัฒนาการด้านการคิดวิเคราะห์ การสื่อสาร และการทำงานร่วมกับชุมชนจากการเรียนรู้ในสถานการณ์จริง

3) ผลงานการออกแบบได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญและผู้แทนชุมชนอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$= 4.28, SD = 0.37) สะท้อนว่าผลงานมีความเหมาะสมทั้งในด้านการออกแบบ ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ และความสอดคล้องกับบริบทและความต้องการของชุมชน

4) ชุมชนมีความพึงพอใจต่อกระบวนการดำเนินโครงการและผลงานการออกแบบในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$= 4.67, SD = 0.43) โดยข้อเสนอแนะจากชุมชนถูกนำมาปรับปรุงแบบออกแบบในแต่ละช่วงของโครงการ ส่งผลให้ผลงานมีความสอดคล้องกับการใช้งานจริงและสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ของชุมชนได้

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการการเรียนรู้เชิงประสบการณ์กับการบริการวิชาการเพื่อพัฒนาชุมชนสามารถยกระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน พัฒนาสมรรถนะด้านการออกแบบ และสร้างผลงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม อันเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนด้านสถาปัตยกรรมศาสตร์ที่เชื่อมโยงกับการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัย

วงษ์ชวลิตกุล ที่กรุณาเป็นสื่อกลางประสานงานและให้ข้อมูลความต้องการของชุมชน ขอขอบพระคุณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ตำบลพุดซา ผู้นำชุมชน และปราชญ์ชาวบ้าน ที่ให้ความร่วมมือแลกเปลี่ยนเรียนรู้และแบ่งปันข้อมูลอย่างดียิ่ง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Antonini, A., et al. (2021). "Collaborative learning experiences in a changing climate." *Sustainability* 13(12): 6789–6802.

[2] Ragheb, G., et al. (2025). "Tracing live projects in architectural education: A systematic review." *Journal of Architectural Education* 79(2): 145–162.

[3] Schön, D. A. (1985). *The design studio: An exploration of its traditions and potentials*. London: RIBA Publications.

[4] Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

[5] Creswell, J. W., and Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research*. 3rd ed. Thousand Oaks: SAGE Publications.

[6] Smith, J., & Brown, L. (2021). "Architecture live projects: learning from a 2-year action research study." *International Journal of Technology and Design Education* 31(4): 789–805.

[7] Braun, V., and Clarke, V. (2006). "Using thematic analysis in psychology." *Qualitative Research in Psychology* 3, 2: 77-101.

[8] Sanoff, H. (2000). *Community participation methods in design and planning*. New York: John Wiley & Sons.

[9] Vitruvius. (1914). *The ten books on architecture*. Translated by M. H. Morgan. Cambridge: Harvard University Press.

[10] Jacoby, B. (1996). "Service-learning in today's higher education." In B. Jacoby (Ed.), *Service-learning in higher education: Concepts and practices* (pp. 3-25). San Francisco: Jossey-Bass.

[11] Eyler, J., and Giles, D. E. (1999). *Where's the learning in service-learning?* San Francisco: Jossey-Bass.

[12] Chambers, R. (1994). "The origins and practice of participatory rural appraisal." *World Development* 22, 7: 953-969.

ศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา

Learning Center for Mental Well-being of Children and Youth, Nakhon Ratchasima

ปริยฉัตร เพียรการ[1], และ ศราวุฒิ ใจอดทน[2]

[1,2] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: E-mail mee625679@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 061-1459708

บทคัดย่อ

ปัญหาสุขภาพจิตในประเทศไทยนับเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล ครอบครัว และสังคม โดยเฉพาะในกลุ่มเด็กและเยาวชน ซึ่งเป็นวัยที่มีความเปราะบางต่อความเครียด ความวิตกกังวล และภาวะซึมเศร้า อันเกิดจากปัจจัยด้านความรุนแรง การถูกกลั่นแกล้ง และความโดดเดี่ยวทางสังคม และนำไปสู่ปัญหาสุขภาพจิต โดยกลุ่มอายุ 18–24 ปี เป็นกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูงที่สุดในเขตสุขภาพจิตที่ 9 ซึ่งครอบคลุมจังหวัดชัยภูมิ นครราชสีมา บุรีรัมย์ และสุรินทร์ เป็นพื้นที่ที่มีจำนวนผู้พยายามฆ่าตัวตายสูงที่สุดของประเทศ อันมีผลมาจากปัญหาสุขภาพจิต โดยจังหวัดนครราชสีมามีสถิติสูงที่สุด และยังปรากฏเหตุการณ์การฆ่าตัวตายในกลุ่มเด็กและเยาวชนอย่างต่อเนื่อง สำหรับการศึกษาครั้งนี้ จึงต้องการนำเสนอผลการออกแบบสถาปัตยกรรมโครงการศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา โดยองค์ประกอบหลักของโครงการประกอบด้วย ส่วนอบรมและให้ความรู้ ส่วนนันทนาการ ส่วนที่พัก ส่วนกิจกรรมกลางแจ้ง และส่วนสนับสนุนโครงการต่าง ๆ เพื่อเป็นพื้นที่ให้ความรู้ด้านสุขภาพจิต ป้องกันปัญหาทางจิตใจ และการเสริมสร้างทักษะชีวิต อันจะนำไปสู่การยกระดับคุณภาพชีวิตของเยาวชนและการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ของประเทศ

คำสำคัญ: ศูนย์การเรียน สุขภาวะจิต เด็กและเยาวชน

Abstract

Mental health issues in Thailand have emerged as a critical concern, profoundly impacting individuals, families, and society as a whole. This crisis is particularly pronounced among children and youth, a demographic highly vulnerable to stress, anxiety, and depression induced by violence, bullying, and social isolation. Notably, individuals aged 18–24 represent the highest-risk cohort. Within Thailand's Mental Health Region 9—which encompasses Chaiyaphum, Nakhon Ratchasima, Buriram, and Surin provinces—the incidence of suicide attempts is the highest nationwide, a phenomenon primarily driven by underlying mental health disorders. Among these provinces, Nakhon Ratchasima records the highest statistical prevalence, with suicide fatalities among children and youth continuing to persist. The center is designed to serve as a dedicated sanctuary for mental health education, psychological intervention and prevention, and life skills development. Ultimately, this project aims to enhance the quality of life for the youth population and contribute to the sustainable development of the nation's human capital.

Keywords: Learning Center, Mental Well-being, Children and Youth

1. บทนำ

สถานการณ์สุขภาพจิตในประเทศไทยพบว่าปัญหาสุขภาพจิตเป็นเรื่องสำคัญ ส่งผลกระทบต่อคนไทยจำนวนมาก ทั้งในด้านสุขภาพ การดำเนินชีวิตและเศรษฐกิจ ไม่ว่าจะเป็นค่าใช้จ่าย ในการรักษาพยาบาลที่เกิดขึ้นทั้งทางตรง และทางอ้อม และยังมีค่าใช้จ่ายแฝงตามมา เช่น การสูญเสียรายได้เพราะต้องลางาน หรือประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ปัจจุบันเด็กและเยาวชนกำลังได้รับผลกระทบจากปัญหาสุขภาพจิต ทั้งโรคเครียด โรควิตกกังวล และโรคซึมเศร้า ที่เกิดจากปัจจัยมากมาย เช่น ความรุนแรง การถูกกลั่นแกล้ง ความโดดเดี่ยว

ในปี 2564 การฆ่าตัวตายกลายเป็นสาเหตุอันดับ 3 ของการเสียชีวิตของเด็กและเยาวชน ที่มีปัญหาสุขภาพจิตซึ่งอยู่ในช่วงอายุ 15-19 ปี และพบว่าร้อยละ 17.6 ของเด็กอายุ 13-17 ปี คิดที่จะฆ่าตัวตายอย่างจริงจัง อีกทั้งจากข้อมูลล่าสุดปี 2566 พบว่า มีคนไทยกว่า 4.4 ล้านคน เผชิญปัญหาสุขภาพจิต และกลุ่มอายุที่น่ากังวลที่สุด คือ เยาวชนอายุ 18–24 ปี ซึ่งมีอัตราเป็นโรคจิตเวชและปัญหาสุขภาพจิตสูงที่สุดถึง ร้อยละ 13.7 และโรคที่พบบ่อยในกลุ่มเยาวชน ได้แก่ โรควิตกกังวล โรคซึมเศร้า และโรคจิตเภท ซึ่งมีผลกระทบต่อการดำเนินชีวิต การเรียน การเข้าสังคม และอนาคตของเยาวชนโดยตรง [1]

ศูนย์สุขภาพจิตที่ 9 ครอบคลุม 4 จังหวัดในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดสุรินทร์ ซึ่งมีข้อมูลสถิติจำนวนคนพยายามฆ่าตัวตาย ปี 2565 มีจำนวน 3,351 ราย และในปี 2566 จำนวน 3,919 ราย ซึ่งมีจำนวนสูงขึ้น และยังเป็นเขตที่มีจำนวนคนพยายามฆ่าตัวตายที่มากที่สุดของศูนย์สุขภาพจิตทั้ง 13 เขตในประเทศไทย [2] ในช่วง ปี 2565 – 2567 มีข่าวการฆ่าตัวตายของเด็กและเยาวชนในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งในปี 2565 มีข่าวเด็กฆ่าตัวตายถึง 3 คนในปีเดียวกัน จะเห็นว่ากลุ่มเด็กและเยาวชน เป็นกลุ่มที่ได้รับผลกระทบสูงจากปัญหาสุขภาพจิต ช่วงวัยนี้เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกาย จิตใจ อารมณ์และสังคม จึงมีความเปราะบางต่อความเครียด ความกังวล หากไม่ได้รับการดูแล ปัญหาเหล่านี้อาจพัฒนาเป็นโรคเรื้อรัง เช่น โรคซึมเศร้า โรควิตกกังวล หรือการใช้สารเสพติด และการทำร้ายตนเอง

ปัจจุบันในเขตพื้นที่ของศูนย์สุขภาพจิตที่ 9 ยังขาดแคลนพื้นที่ให้ความรู้ด้านสุขภาพจิตสำหรับเด็กและเยาวชน เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาสุขภาพจิตในเด็กและเยาวชน จึงจำเป็นต้องมีพื้นที่ให้ความรู้ ฝึกทักษะเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาสุขภาพจิตในตนเอง ดังนั้น การจัดตั้งศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา เพื่อมุ่งเน้นให้ความรู้เกี่ยวกับปัญหาทางสุขภาพจิต และการป้องกันตนเองจากปัญหาสุขภาพจิต ในเขตพื้นที่รับผิดชอบของศูนย์สุขภาพจิต ที่ 9 ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมและพัฒนาสุขภาพจิตของเด็กและเยาวชนให้ดีขึ้น สู่การเป็นทรัพยากรบุคคลที่มีคุณภาพของประเทศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับปัญหาสุขภาพจิตและการฝึกทักษะการป้องกันปัญหาสุขภาพจิตสำหรับเด็กและเยาวชน รวมถึงการออกแบบพื้นที่สำหรับการเรียนรู้ และพัฒนาสุขภาพจิต

2) เพื่อนำเสนอผลการออกแบบสถาปัตยกรรมศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การออกแบบพื้นที่การเรียนรู้โดยเน้นมนุษย์หรือผู้ใช้เป็นสำคัญ

เป็นการออกแบบพื้นที่การเรียนรู้โดยคำนึงถึงความต้องการของผู้ใช้เป็นหลัก การออกแบบพื้นที่การเรียนรู้ควรมีความยืดหยุ่นและตอบสนองความต้องการที่หลากหลายของผู้ใช้ [3] ดังนี้

1) สะดวกสบายปลอดภัยถูกสุขอนามัย เช่น มีแสงสว่างเพียงพอ มีการจัดพื้นที่ และอุปกรณ์ให้มีความสะดวกสบาย เช่น มีโต๊ะเก้าอี้ขนาดพอเหมาะกับผู้ใช้ สามารถปรับและเคลื่อนย้ายได้

2) ดึงดูดความสนใจ จูงใจผู้เรียนและผู้สอนให้อยากมีส่วนร่วม โดยการจัดพื้นที่สำหรับกิจกรรมที่ไม่ได้วางแผนไว้ เช่น จัดพื้นที่สำหรับการพูดคุยทำงานต่อหลังเลิกเรียนในบริเวณใกล้กับห้องเรียน การจัดพื้นที่ให้โปร่ง สามารถมองเห็นได้ทั่ว

3) รักษาสมดุลระหว่างความเป็นชุมชนกับการอยู่คนเดียว เช่น ห้องสมุดที่มีทั้งห้องประชุมกลุ่ม และห้องประชุมย่อยที่มีความเป็นส่วนตัวสำหรับการศึกษา

4) ใช้งานได้ง่าย ตามเป้าหมาย ปรับเปลี่ยนได้ โดยจัดพื้นที่การเรียนรู้ให้มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามกิจกรรมการเรียนรู้และสไตล์การสอนที่หลากหลายและความต้องการของผู้ใช้

3.2 ทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model

จิตวิทยาเชิงบวก (Positive Psychology) มุ่งเน้นการศึกษาและส่งเสริม ปัจจัยที่ทำให้บุคคลและชุมชนเจริญงอกงามและมีความสุข แนวคิดนี้ได้ริเริ่มและพัฒนาโดย Martin Seligman เป็นทฤษฎีความเจริญงอกงามทางจิตใจ (Well - being Theory) ที่มีชื่อว่า PERMA Model ประกอบด้วยองค์ประกอบ 5 ประการ [4] ดังนี้

1) อารมณ์เชิงบวก (Positive Emotions) คือ ความสุข ความหวัง และความรู้สึกขอบคุณ ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นทางจิตใจและประสิทธิภาพการทำงาน พัฒนาได้จากการฝึกสติและมองโลกในแง่ดี

2) ความผูกพัน (Engagement) คือ การจดจ่อในกิจกรรมที่ชอบจนเกิดภาวะ Flow ช่วยลดความเครียดและพัฒนาทักษะ สร้างได้จากการตั้งเป้าหมายที่ท้าทายและจัดสมดุลชีวิต

3) ความสัมพันธ์ (Relationships) คือ การมีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับผู้อื่น ช่วยส่งเสริมสุขภาพกาย และใจ สร้างคุณค่าในชีวิต พัฒนาด้วยความเมตตา การให้อภัย และการทำกิจกรรมร่วมกัน

4) ความหมาย (Meaning) คือ การรู้เป้าหมายชีวิตและทำประโยชน์เพื่อสิ่งที่ยิ่งใหญ่กว่าตนเอง ช่วยสร้างแรงจูงใจและความเข้มแข็งทางใจ พัฒนาโดยการค้นหาคุณค่าตนเองและช่วยเหลือผู้อื่น

5) ความสำเร็จ (Accomplishment) คือ การบรรลุเป้าหมายและภาคภูมิใจในตนเอง ช่วยเสริมความมั่นใจและแรงจูงใจ ส่งเสริมได้ด้วยความเพียร การใช้จุดแข็ง และเรียนรู้จากความล้มเหลว

3.3 ทฤษฎีพฤติกรรมเว้นที่ว่างส่วนบุคคลกับการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพ

คือ การกำหนดอาณาเขตส่วนตัวตามสถานการณ์และปฏิสัมพันธ์ทางสังคม สามารถนำไปใช้ในการวางผัง และจัดพื้นที่สาธารณะให้มีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้ เพิ่มความสะดวกสบาย ส่งเสริมประสิทธิภาพในการใช้งาน รวมถึงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างบุคคลภายในอาคาร

การออกแบบพื้นที่เพื่อส่งเสริมให้บุคคลมีการกระทำต่อกัน อาจใช้วิธีการจัดที่นั่งให้บุคคลหันหน้าเข้าหากัน ออกแบบพื้นที่ หรือออกแบบอาคารให้มี

ลักษณะโอบล้อมลานกิจกรรม เลือกใช้เฟอร์นิเจอร์ให้บุคคลนั่งล้อมวงกัน อย่างไรก็ตามควรจัดที่นั่งให้มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของการจัดที่นั่งได้ตามสภาพการณ์หรือตามกิจกรรม [5]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้ใช้กระบวนการศึกษาตามระเบียบวิธีการออกแบบสถาปัตยกรรมในการออกแบบศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน จังหวัดนครราชสีมา มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการกำหนดรายละเอียดโครงการ ได้แก่ ข้อมูลผู้ใช้โครงการ ข้อมูลองค์ประกอบโครงการ ข้อมูลขนาดพื้นที่ใช้สอยของโครงการ และข้อมูลพื้นที่ตั้งโครงการ

โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่เป็นอาจารย์ และวิทยากรในการส่งเสริมสุขภาพจิตเด็กและเยาวชน รวมถึงเป็นผู้เชี่ยวชาญของศูนย์คนข้างใจ ที่เป็นศูนย์บริการการปรึกษาเชิงจิตวิทยาของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เพื่อให้ได้ข้อมูลหลักสูตรการอบรมตามทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model และข้อมูลพฤติกรรมผู้ใช้โครงการ และได้สำรวจกิจกรรมการอบรมที่ใกล้เคียงกับหลักสูตร เพื่อใช้อ้างอิงจำนวนผู้เข้าอบรม สำหรับนำไปกำหนดโปรแกรมในการออกแบบของโครงการ

2) การศึกษาทบทวนเอกสารแนวคิด ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การออกแบบพื้นที่การเรียนรู้โดยเน้นมนุษย์หรือผู้ใช้เป็นสำคัญ ทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model ทฤษฎีพฤติกรรมเว้นที่ว่างส่วนบุคคลกับการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพ และกฎหมายควบคุมอาคาร

3) การลงพื้นที่เก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลก่อนกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม ได้แก่ ข้อมูลอาคารกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลบริบทสภาพแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ตั้งโครงการ

4) กระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม

4.1) การวิเคราะห์ข้อมูลกฎหมายควบคุมอาคาร ความต้องการและพฤติกรรมของผู้ใช้โครงการ การวิเคราะห์กำหนดองค์ประกอบโครงการ และการวิเคราะห์กำหนดพื้นที่ใช้สอยของโครงการ

4.2) การวิเคราะห์ข้อมูลจากบริบทสภาพแวดล้อมของที่ตั้งโครงการ วัตถุประสงค์ของโครงการ และกิจกรรมของโครงการ นำมาสู่การกำหนดแนวคิดการออกแบบสถาปัตยกรรมของโครงการ

4.3) การพัฒนาแบบร่างทางสถาปัตยกรรม โดยการพัฒนาแบบร่าง โดยผ่านการตรวจแบบจากอาจารย์ที่ปรึกษา และมีการตรวจแบบร่างโดยคณะผู้ทรงคุณวุฒิ ทั้งจากสายวิชาการ และสายวิชาชีพทางสถาปัตยกรรม ระหว่างการพัฒนาแบบร่าง จำนวน 3 ครั้ง

4.4) การจัดทำแบบทางสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์ เช่น แนวคิดการออกแบบ แบบแปลนพื้นอาคาร รูปด้าน รูปตัด ทัศนียภาพภายในและภายนอกอาคาร และหุ่นจำลอง เป็นต้น

4.5) การนำเสนอแบบทางสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์ เป็นการนำเสนอเพื่อตรวจประเมินผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์โดยคณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากสายวิชาการและสายวิชาชีพทางสถาปัตยกรรม

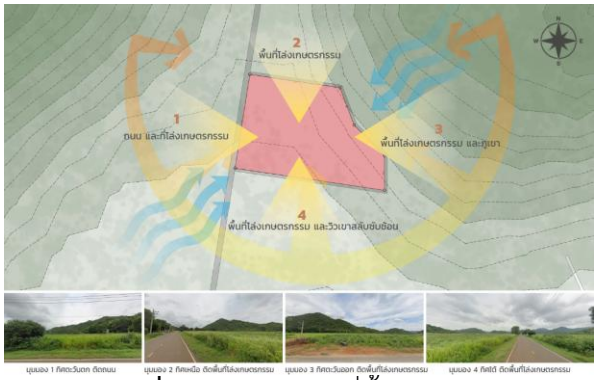
5) การสรุปผลการออกแบบศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน

5. ผลการศึกษา

การออกแบบศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน สามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1 การศึกษาข้อมูลโครงการ

1) การวิเคราะห์ที่ตั้งโครงการ สภาพแวดล้อมโดยรอบอยู่ในแหล่งที่อยู่อาศัยหรือสิ่งปลูกสร้างน้อย ทิศเหนือติดกับแปลงที่ดินเกษตรกรรมไร่สุวรรณ และโรงเก็บอุปกรณ์ทางการเกษตร ทิศตะวันออกติดกับภูเขา และทิศตะวันตกกับทิศใต้ติดกับแปลงที่ดินเกษตรกรรมไร่สุวรรณ (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 การวิเคราะห์ที่ตั้งโครงการ

2) วิเคราะห์ผู้ใช้โครงการ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมผู้ใช้งาน สามารถแบ่งผู้ใช้โครงการได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

2.1) กลุ่มนักเรียนนักศึกษา คือ กลุ่มที่มารับการอบรม และเรียนรู้ ในช่วงอายุตั้งแต่ 13-24 ปี ซึ่งในโครงการจะรับ ผู้เข้าอบรมได้สูงสุดจำนวน 200 คน/ครั้ง

2.2) กลุ่มครูและอาจารย์ คือ ผู้ที่ดูแล และนำนักเรียนนักศึกษามาเข้าการอบรม และเรียนรู้ โดยสามารถรับ ได้สูงสุดจำนวน 10 คน/ครั้ง

2.3) กลุ่มวิทยากร คือ ผู้ที่อบรม และให้ความรู้แก่นักเรียน นักศึกษา ที่เข้ามารับการอบรม จะมีวิทยากรหลักจำนวน 6 คน และเจ้าหน้าที่ฝึกอบรมจำนวน 20 คน

2.4) กลุ่มพนักงานและเจ้าหน้าที่โครงการ คือ บุคลากรที่ทำงานในฝ่ายต่าง ๆ ของโครงการ จำนวน 53 คน

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบโครงการ และขนาดพื้นที่ใช้สอยโครงการ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบโครงการ และขนาดพื้นที่ใช้สอยโครงการ

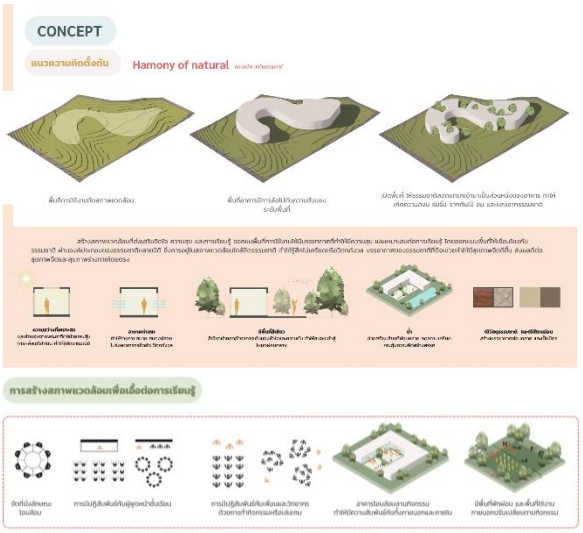
องค์ประกอบ	รายละเอียด	พื้นที่ (ตร.ม.)
1. ส่วนต้อนรับ	พื้นที่ต้อนรับประชาสัมพันธ์	59.98
2. ส่วนอบรม และให้ความรู้	พื้นที่อบรมและให้ความรู้ในลักษณะการบรรยาย และทำกิจกรรม	1,478.23
3. ส่วนนันทนาการ	พื้นที่ผ่อนคลายจากกิจกรรมการเรียน และจัดกิจกรรมทำศิลปะ	451.49
4. ส่วนนิทรรศการ	พื้นที่จัดแสดงเกี่ยวกับปัญหาด้านสุขภาวะจิต	771.7
5. ส่วนที่พัก	พื้นที่ห้องพัก สำหรับผู้ที่เข้าอบรมของโครงการ	2,023.76
6. ส่วนทานอาหาร	พื้นที่ให้บริการอาหาร และเครื่องดื่ม	715.73
7. ส่วนสำนักงาน	พื้นที่สำนักงานในการทำงานของบุคลากรโครงการ	130.56
8. ส่วนสนับสนุนโครงการ	พื้นที่ส่วนงาน และงานซ่อมบำรุงของโครงการ	219.66
9. ส่วนจอดรถ	พื้นที่จอดรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และรถบัสของโครงการ	1,526.8
10. พื้นที่กิจกรรมกลางแจ้ง	พื้นที่เล่น ออกกำลังกายและผ่อนคลายจากกิจกรรมการเรียนภายนอกอาคาร	2,925.55
รวมพื้นที่ใช้สอยภายในโครงการ ทั้งหมด		**10,303.46**

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปพื้นที่ใช้สอยโครงการได้ดังนี้ คือ 1) พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารคิดเป็น

5,851.11 ตารางเมตร 2) พื้นที่ใช้สอยภายนอกอาคาร คิดเป็น 4,452.35 ตารางเมตร โดยการคำนวณพื้นที่ใช้สอยของโครงการได้ทำการศึกษาข้อมูลมาตรฐานขนาดพื้นที่ใช้สอยจาก Architect Data [6]

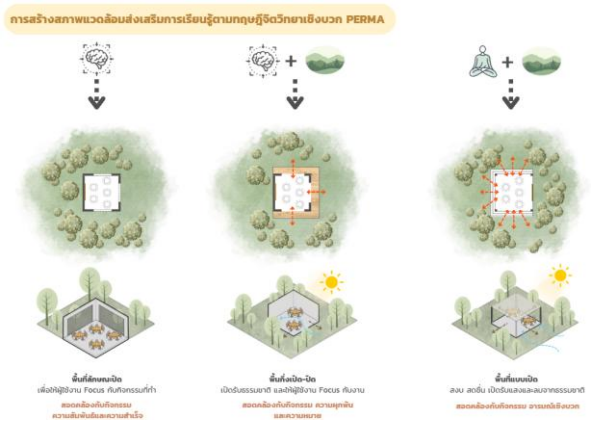
5.2 การออกแบบสถาปัตยกรรม

1) แนวคิดในการออกแบบ จากการศึกษาสภาพแวดล้อมที่ตั้งโครงการ และสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเรียนรู้ นำมาสู่การกำหนดแนวความคิดการออกแบบ ด้วยการสร้างอาคารให้กลมกลืนไปกับธรรมชาติ และสภาพแวดล้อม โดยเปิดพื้นที่ให้ธรรมชาติสอดแทรกเข้ามาในอาคาร สร้างสภาพแวดล้อมที่ส่งเสริมจิตใจ ความสุข และการเรียนรู้ ผ่านองค์ประกอบของธรรมชาติหลายมิติ และการสร้างสภาพแวดล้อม เพื่อเอื้อต่อการเรียนรู้ด้วยการใช้ทฤษฎีต่าง ๆ (ดังรูปที่ 2,3)



รูปที่ 2 การพัฒนาแนวความคิดในการออกแบบ

การสร้างสภาพแวดล้อมส่งเสริมการเรียนรู้ตามทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model สามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) พื้นที่ลักษณะปิด เพื่อให้ผู้ใช้งาน Focus กับกิจกรรมที่ทำ สอดคล้องกับกิจกรรมความสัมพันธ์และความสำเร็จ 2) พื้นที่กึ่งเปิด-ปิดเพื่อเปิดรับธรรมชาติ และยังสามารถให้ผู้ใช้งาน Focus กับกิจกรรมได้ สอดคล้องกับกิจกรรมความผูกพันและความหมาย 3) พื้นที่แบบเปิด ทำให้รู้สึกสงบ สดชื่น ด้วยการเปิดรับแสง และลมจากธรรมชาติ สอดคล้องกับกิจกรรมอารมณ์เชิงบวก (ดังรูปที่ 3)

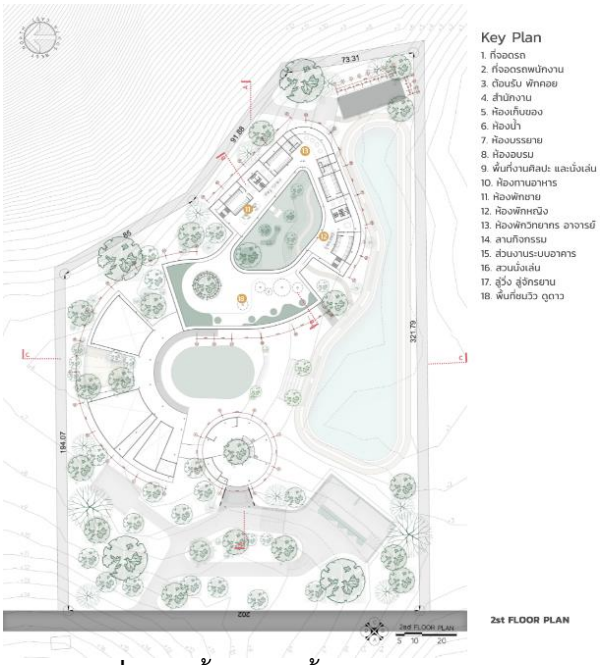


รูปที่ 3 แนวทางการสร้างสภาพแวดล้อมส่งเสริมการเรียนรู้ตามทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model

2) ผลการออกแบบสถาปัตยกรรม จากการศึกษาข้อมูลโครงการในด้านต่างๆ และแนวคิดในการออกแบบ นำมาสู่การวางพื้นที่ใช้สอยต่างๆ ตามความสัมพันธ์ทั้งการใช้งาน บริบทสภาพแวดล้อมของที่ตั้งโครงการ และแนวคิดในการออกแบบ เพื่อให้ผู้ใช้โครงการได้เข้ามาอบรม เรียนรู้ ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยมีการวางผังพื้นอาคารทั้งหมด 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 เป็นส่วนพื้นที่ภายนอก และกึ่งภายนอกอาคาร ประกอบด้วย ลานจอดรถ ลานกิจกรรม ลู่วิ่ง ลู่จักรยาน พื้นที่อบรมภายนอกอาคาร พื้นที่พักผ่อนและนันทนาการ และงานระบบอาคาร ชั้นที่ 2 ประกอบด้วย พื้นที่ต้อนรับ สำนักงาน ห้องบรรยาย ห้องอบรม พื้นที่นันทนาการ ห้องรับประทานอาหาร ห้องพัก ชั้นที่ 3 ประกอบด้วย ห้องพัก และพื้นที่ชมวิว (ดังรูปที่ 3,4,5,6)



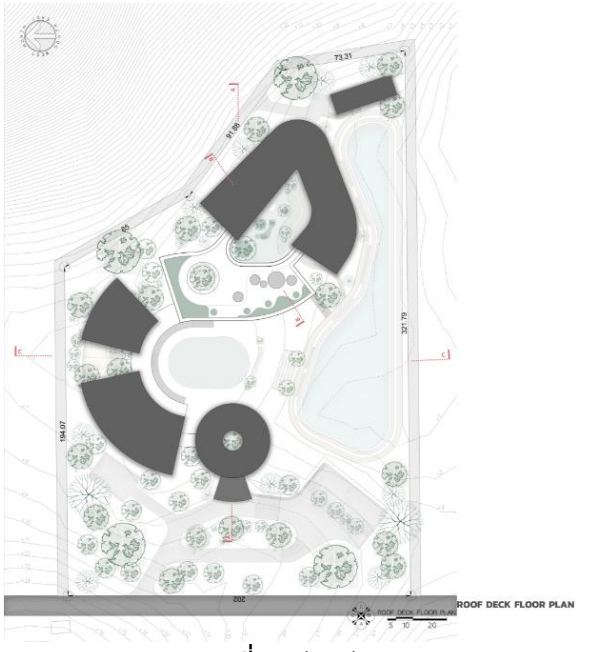
รูปที่ 4 ผังพื้นอาคารชั้น Ground Floor Plan



รูปที่ 6 ผังพื้นอาคารชั้น 2st Floor Plan



รูปที่ 5 ผังพื้นอาคารชั้น 1st Floor Plan



รูปที่ 7 ผังหลังคา

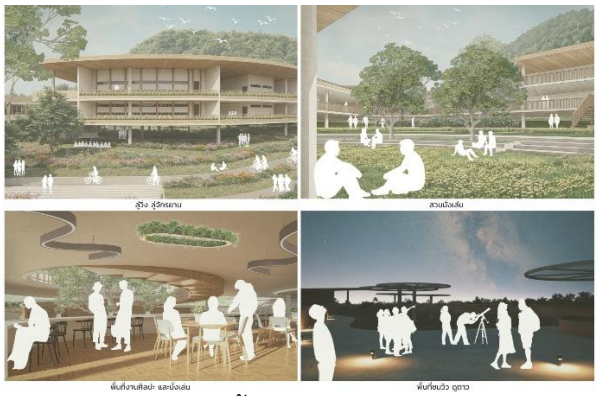
สำหรับพื้นที่การอบรม และเรียนรู้ของโครงการ ได้นำแนวคิดการออกแบบพื้นที่โดยเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ ด้วยการนำเอาหลักทฤษฎีมาออกแบบ ได้แก่ ทฤษฎีการออกแบบพื้นที่การเรียนรู้

โดยเน้นมนุษย์หรือผู้ใช้เป็นสำคัญ โดยออกแบบให้โต๊ะเก้าอี้เหมาะสมกับผู้ใช้ สามารถปรับและเคลื่อนย้ายได้ ทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model ออกแบบให้พื้นที่สามารถรองรับกิจกรรมการอบรมตามเนื้อหาในทฤษฎี โดยออกแบบให้ห้องเรียนมีลักษณะกึ่งเปิด-ปิด ด้วยการออกแบบให้มีประตูบานเฟี้ยมขนาดใหญ่ที่สามารถเปิด-ปิดพื้นที่ได้กว้าง ซึ่งจะสอดคล้องกับกิจกรรมในการอบรม คือ เมื่อต้องการสอนบทเรียนที่ผู้เรียนต้อง Focus กับกิจกรรมที่ทำอยู่ (กิจกรรมความสัมพันธ์และความสำเร็จ) ก็สามารถปิดประตูบานเฟี้ยมเพื่อกั้นพื้นที่ได้ หากต้องการสอนบทเรียนที่ต้องให้ผู้เรียนมีความผ่อนคลาย และ Focus กับกิจกรรมไปด้วย (กิจกรรมความผูกพันและความหมาย) ก็สามารถเปิดประตูบานเฟี้ยมเพื่อให้อากาศถ่ายเท เปิดรับธรรมชาติ และยังออกแบบให้ห้องเรียนสามารถเชื่อมไปยังพื้นที่ด้านอก ที่เปิดรับธรรมชาติอย่างเต็มรูปแบบ เพื่อส่งเสริมให้ผู้เรียนมีความผ่อนคลาย และสร้างบรรยากาศให้ลื่นไหลไปกับกิจกรรม (กิจกรรมอารมณ์เชิงบวก) และทฤษฎีพฤติกรรมเว้นที่ว่างส่วนบุคคลกับการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพ ซึ่งออกแบบพื้นที่เพื่อส่งเสริมให้บุคคลมีการกระทำต่อกัน ด้วยการจัดที่นั่งให้มีลักษณะล้อมวงเพื่อส่งเสริมการปฏิสัมพันธ์ แต่ให้มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของการจัดที่นั่งได้ตามกิจกรรมการเรียน รวมถึงสร้างพื้นที่ให้เชื่อมโยงกับธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการเรียนรู้และส่งเสริมสุขภาพจิตใจให้ดีขึ้น (ดังรูปที่ 8)



รูปที่ 8 ห้องอบรม

พื้นที่นันทนาการ ได้ออกแบบตามทฤษฎีการออกแบบพื้นที่การเรียนรู้โดยเน้นมนุษย์หรือผู้ใช้เป็นสำคัญ โดยออกแบบให้มีพื้นที่สำหรับการพูดคุยหลังเลิกเรียนหรือพักเบลค จัดพื้นที่ให้โปร่ง สามารถมองเห็นได้ทั่ว และทฤษฎีพฤติกรรมเว้นที่ว่างส่วนบุคคลกับการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพ โดยออกแบบพื้นที่เพื่อส่งเสริมให้บุคคลมีการกระทำต่อกัน ซึ่งก็คือ ลานกิจกรรม พื้นที่เล่นกีฬา พื้นที่สำหรับนั่งเล่น หรือพูดคุย ออกแบบพื้นที่ให้มีลักษณะโอบล้อม เลือกใช้เฟอร์นิเจอร์ในรูปแบบที่ให้บุคคลนั่งล้อมวงกัน เพื่อทำให้บุคคลมีแนวโน้มที่จะเข้าหากันมากขึ้น และลดขนาดของพื้นที่เว้นว่างส่วนบุคคลลง (ดังรูปที่ 9)



รูปที่ 9 พื้นที่ส่วนนันทนาการ

พื้นที่ห้องพัก ออกแบบให้มีพื้นส่วนกลางระหว่างทางเดินและห้องนอน เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับนั่งเล่นพูดคุย ช่วยส่งเสริมให้มีบุคคลมีการกระทำต่อกันทางสังคม มีการจัดรูปแบบเฟอร์นิเจอร์ให้มีทั้งแบบเดี่ยวและแบบกลุ่ม เพื่อเป็นทางเลือกให้บุคคลสามารถเลือกที่นั่งตามความพอใจของตนเองได้ (ดังรูปที่ 10)



รูปที่ 10 ห้องพักและพื้นที่นั่งเล่น

การออกแบบรูปลักษณ์และรูปทรงอาคารมุ่งเน้นสถาปัตยกรรมให้กลมกลืนกับบริบทสภาพแวดล้อม โดยเปิดพื้นที่ว่าง ให้ธรรมชาติสอดแทรกเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร ตัวอาคารเน้นความโปร่งโล่งเพื่อเปิดรับแสงและลมธรรมชาติ ซึ่งช่วยสร้างสภาวะน่าสบายและความสงบร่มรื่น การจัดวางผังอาคารในลักษณะโอบล้อมพื้นที่กิจกรรม ยังช่วยเชื่อมโยงพื้นที่ใช้สอยภายในและภายนอก เอื้อให้เกิดปฏิสัมพันธ์เชิงพื้นที่อย่างเป็นรูปธรรม การเลือกใช้วัสดุ ได้เลือกใช้สัจจะวัสดุ สีโทนสว่างอ่อน เพื่อสร้างบรรยากาศที่ผ่อนคลาย ปลอดโปร่ง และเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน (ดังรูปที่ 11,12)



รูปที่ 11 รูปด้านอาคารที่แสดงลักษณะรูปทรงอาคาร



รูปที่ 12 รูปด้านอาคารที่แสดงลักษณะรูปทรงอาคาร

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการออกแบบศูนย์การเรียนรู้เชิงสุขภาวะจิตสำหรับเด็กและเยาวชน เป็นการศึกษากระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม โดยการศึกษาครั้งนี้มีกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมที่สอดคล้องกับขั้นตอนกระบวนการออกแบบตามมาตรฐานงานสถาปัตยกรรม 4 ขั้นตอน รายละเอียดดังนี้ 1. ขั้นตอนกำหนดปัญหา ที่มาจาก การศึกษาที่ตั้งโครงการ การศึกษาผู้ใช้โครงการ และ การออกแบบพื้นที่การเรียนรู้ที่เหมาะสม 2. ขั้นตอน การออกแบบ เป็นกระบวนการพัฒนาออกแบบทางสถาปัตยกรรมของโครงการ ตั้งแต่การพัฒนาแบบร่าง การจัดทำแบบเพื่อขั้นสมบูรณ์เพื่อนำเสนอแบบทาง

สถาปัตยกรรมที่ประกอบด้วย แบบทางสถาปัตยกรรม 2 มิติ และ 3 มิติ และหุ่นจำลอง 4. ขั้นตอนการประเมินผล ซึ่งการศึกษาครั้งนี้เป็นการตรวจประเมินผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมโดยคณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากสายวิชาการและสายวิชาชีพทางสถาปัตยกรรม ส่วนการสร้างพื้นที่การอบรม และเรียนรู้ของโครงการได้ศึกษาและนำทฤษฎีมาใช้ดังนี้ แนวคิดการออกแบบพื้นที่การเรียนรู้โดยเน้นมนุษย์หรือผู้ใช้เป็นสำคัญ [3] โดยออกแบบพื้นที่ให้สะดวกสบาย ปลอดภัย และมีความเหมาะสมต่อการเรียนรู้ ทฤษฎีจิตวิทยาเชิงบวก PERMA Model ของ Seligman [4] ซึ่งในโครงการได้นำรูปแบบการเรียนรู้ที่หลากหลาย ทั้งรูปแบบการเรียนรู้โดยใช้การบรรยาย และรูปแบบการเรียนรู้ผ่านกิจกรรม และทฤษฎีพฤติกรรมเว้นที่ว่างส่วนบุคคลกับการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพ [5] ด้วยการสร้างบรรยากาศให้ส่งเสริมการเรียนรู้ โดยออกแบบอาคาร ให้เชื่อมโยงกับธรรมชาติ ผ่านองค์ประกอบของธรรมชาติหลายมิติ คือ ความสงบ ร่มรื่นจากต้นไม้ ลม และแสงจากธรรมชาติ ซึ่งการอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้ชิดธรรมชาติ จะช่วยส่งเสริมการเรียนรู้ และทำให้รู้สึกไม่เครียดหรือวิตกกังวล บรรยากาศของธรรมชาติที่ดีจะช่วยทำให้มีสุขภาพจิตดีขึ้น ส่งผลดีต่อสุขภาพจิตและสุขภาพร่างกายโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับกรณีศึกษาโครงการศูนย์การเรียนรู้สรรค์สาระ ที่มีแนวคิดในการออกแบบให้มีพื้นที่หลากหลายที่สามารถปรับให้เข้ากับสภาพแวดล้อม โดยออกแบให้โครงการรายล้อมด้วยธรรมชาติ จัดสรรพื้นที่ให้มีความโปร่งโล่งสบาย ให้รู้สึกถึงธรรมชาติที่โอบล้อมอยู่ ให้รู้สึกผ่อนคลายจากธรรมชาติ ที่ทำให้การเรียนรู้และฝึกอบรมเหมือนกับว่าได้พักผ่อนไปด้วย [7]

7. อ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยประชากรและสังคม มหาวิทยาลัยมหิดล. (2568). สุขภาพคนไทย 2568 เกิดน้อยกู่ไม่กลับ ต้องปรับและรับมืออย่างไร. เข้าถึงเมื่อ 5 สิงหาค. เข้าถึงได้จาก https://ipsr.mahidol.ac.th

[2] โรงพยาบาลจิตเวชขอนแก่นราชนครินทร์. (2565). สถานการณ์ฆ่าตัวตายของประเทศไทยปีงบประมาณ 2566. เข้าถึงเมื่อ 5 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.krph.go.th

[3] Brown, M. (2005). Learning spaces. In EDUCAUSE (Educating the net generation). Accessed August 15. Available from https://net.educause.edu/ir/library/pdf/pub7101.pdf

[4] ดร.วีร์ เมฆวิลัยและคณะ. (2567). คู่มือการจัดกิจกรรมสร้างสุขด้วยจิตวิทยาเชิงบวก. เข้าถึงเมื่อ 18 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://dmh-elibrary.org/items/show/1999

[5] วิมลสิทธิ์ หรยางกูร และคณะ. (2554). จิตวิทยาสภาพแวดล้อม มูลฐานการสร้างสรรค์และจัดการสภาพแวดล้อมน่าอยู่อาศัย. กรุงเทพฯ: จี.บี.พี เซ็นเตอร์

[6] Ernst Neufert. (1994). Architects' Data. เข้าถึงเมื่อ 5 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.uceb.eu/DATA/CivBook/03.%20Architect_s%20Data.pdf

[7] ArchDaily. (2021). Sarnsara Learning Center. เข้าถึงเมื่อ 25 ตุลาคม. จาก https://architizer.com/blog/practice/details/zhejiang-jiande-aviation-training-base/

การศึกษาการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส จังหวัดนครราชสีมา

A Study of the Design of a Multisensory Art Museum, Nakhon Ratchasima

สหรัฐ ช่วยนา[1], และ นิธิ ลิศนันท์[2]

1,2 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 *ผู้ติดต่อ: E-mail ponpobpy@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 065-4757882

บทคัดย่อ

ศิลปะเป็นสื่อสำคัญที่สะท้อนวัฒนธรรมอัตลักษณ์ และความคิดสร้างสรรค์ของมนุษย์ แต่พิพิธภัณฑ์และพื้นที่จัดแสดงศิลปะส่วนใหญ่ยังคงเน้นการรับรู้ผ่านการมองเห็นเป็นหลัก ส่งผลให้ผู้พิการทางสายตาไม่สามารถเข้าถึงประสบการณ์ทางศิลปะได้อย่างเท่าเทียม แม้ว่าปัจจุบันจะมีการส่งเสริมสิทธิและการเข้าถึงพื้นที่สาธารณะของผู้พิการมากขึ้น แต่พื้นที่ทางศิลปะที่ออกแบบมาเพื่อรองรับผู้พิการทางสายตาโดยเฉพาะยังมีอยู่อย่างจำกัด สำหรับการศึกษาครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาการออกแบบสถาปัตยกรรม โครงการพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส จังหวัดนครราชสีมา โดยมุ่งศึกษาการออกแบบพื้นที่จัดแสดงศิลปะและพื้นที่การเรียนรู้ที่รองรับผู้พิการทางสายตา ภายใต้แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) การออกแบบผ่านประสาทสัมผัส (Multi-sensory Design) เพื่อสร้างพื้นที่ที่ผู้พิการทางสายตาสามารถเข้าถึงและรับรู้ศิลปะผ่านประสาทสัมผัสอื่นแทนการมองเห็น โดยองค์ประกอบหลักของโครงการประกอบด้วย ส่วนจัดแสดงถาวร ส่วนจัดแสดงหมุนเวียน ส่วนพื้นที่สร้างสรรค์ โดยมีเป้าหมายเพื่อเป็นพื้นที่เรียนรู้ทางศิลปะที่ส่งเสริมการมีส่วนร่วมระหว่างผู้พิการทางสายตาและบุคคลทั่วไป ช่วยลดความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงศิลปะ สร้างความตระหนักรู้เกี่ยวกับความหลากหลายของผู้ใช้งาน และส่งเสริมการพัฒนาพื้นที่ทางวัฒนธรรมที่ตอบสนองต่อคนทุกกลุ่มในสังคม

คำสำคัญ: ศิลปะสัมผัส, ผู้พิการทางสายตา, ศิลปะ

Abstract

Art is an important medium that reflects cultural identity and human creativity. However, most museums and art exhibition spaces primarily rely on visual perception, limiting equal access to artistic experiences for people with visual impairments. Although increasing attention has been given to promoting accessibility and the rights of persons with disabilities, art spaces specifically designed to accommodate visitors with visual impairments remain limited. This study focuses on the architectural design of the Multisensory Art Museum in Nakhon Ratchasima Province. The scope of the study emphasizes the design of exhibition and learning spaces for people with visual impairments through the application of Universal Design and Multi-sensory Design principles. The project aims to create an environment in which visitors with visual impairments can experience and perceive art through senses other than vision. The main components of the project include permanent exhibition spaces, temporary exhibition spaces, and creative activity spaces. The proposed museum is intended to serve as an inclusive learning environment that promotes interaction between visitors with visual impairments and the general public, reduces inequalities in access to art, raises awareness of user diversity, and contributes to the development of cultural spaces that are accessible and inclusive for all.

Keywords: Multisensory Art, Visual Impairment, Art

1. บทนำ

ศิลปะเป็นสื่อสำคัญที่สะท้อนวัฒนธรรมอัตลักษณ์และความคิดสร้างสรรค์ของมนุษย์ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือในการเรียนรู้ สร้างแรงบันดาลใจ และพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้คนในสังคม อย่างไรก็ตาม พิพิธภัณฑ์และพื้นที่จัดแสดงศิลปะส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการรับรู้ผ่านการมองเห็นเป็นหลัก ส่งผลให้ผู้พิการทางสายตาไม่สามารถเข้าถึงเนื้อหาและประสบการณ์ทางศิลปะได้อย่างเท่าเทียม แม้ว่าปัจจุบันจะมีการส่งเสริมสิทธิของผู้พิการและการออกแบบสิ่งอำนวยความสะดวกเพื่อรองรับการใช้งานของคนทุกกลุ่มมากขึ้น แต่พื้นที่ทางศิลปะที่ออกแบบมาเพื่อผู้พิการทางสายตาโดยเฉพาะยังมีอยู่อย่างจำกัด

ปัจจุบันปัญหาผู้พิการทางสายตาเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในระดับสากล โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ระบุว่ามีผู้ที่มีปัญหาทางการมองเห็นทั่วโลกมากกว่า 2.2 พันล้านคน ขณะที่ประเทศไทยมีผู้พิการทางสายตามากกว่า 170,000 คน [1] ทั้งผู้ที่ตาบอดแต่กำเนิดและผู้ที่สูญเสียการมองเห็นภายหลัง อย่างไรก็ตาม พื้นที่ด้านศิลปะและวัฒนธรรมที่รองรับผู้พิการทางสายตายังมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากการจัดแสดงงานศิลปะส่วนใหญ่ใช้การมองเห็นเป็นช่องทางหลักในการสื่อสาร ส่งผลให้ผู้พิการทางสายตาไม่สามารถรับรู้คุณค่า ความหมาย และประสบการณ์ของงานศิลปะได้อย่างสมบูรณ์ รวมถึงขาดโอกาสในการมีส่วนร่วมกับกิจกรรมทางศิลปะเช่นเดียวกับบุคคลทั่วไป

ปัจจุบันแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) และการออกแบบผ่านประสาทสัมผัส (Multi-sensory Design) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาพื้นที่สาธารณะและพื้นที่ทางวัฒนธรรม โดยมุ่งเน้นการสร้างสภาพแวดล้อมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้อย่างเท่าเทียม และส่งเสริมการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสที่หลากหลาย เช่น การสัมผัส การฟังเสียง และการดมกลิ่น ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถช่วยให้ผู้พิการทางสายตาเข้าถึงและเข้าใจงานศิลปะได้มากยิ่งขึ้น

ดังนั้น จึงนำมาสู่การศึกษาการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส จังหวัดนครราชสีมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างพื้นที่การเรียนรู้ทางศิลปะที่เปิดโอกาสให้ผู้พิการทางสายตาและบุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงและมีส่วนร่วมกับงานศิลปะได้อย่างเท่าเทียม ภายในโครงการประกอบด้วยส่วนจัดแสดงถาวร ส่วนจัดแสดงหมุนเวียน และส่วนพื้นที่สร้างสรรค์ ซึ่งมุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์ผ่านประสาทสัมผัสที่หลากหลาย อันจะช่วยส่งเสริมการเรียนรู้ ลดความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงศิลปะ และพัฒนาพื้นที่ทางวัฒนธรรมที่ตอบสนองต่อผู้ใช้งานทุกกลุ่มในสังคม

2. วัตถุประสงค์

โครงการพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัสมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสถาปัตยกรรมและพื้นที่ทางศิลปะที่สามารถรองรับส่งเสริมการเข้าถึงของผู้พิการทางสายตาผ่านประสาทสัมผัสอื่น โดยมุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์ทางศิลปะผ่านการสัมผัสพื้นที่จัดแสดง ควบคู่ไปกับการประยุกต์ใช้แนวคิด Universal Design และ Multi-sensory Design ในการออกแบบสถาปัตยกรรม เพื่อให้ผู้ใช้งานทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงและใช้งานพื้นที่ร่วมกันได้อย่างเท่าเทียม

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design)

แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) [2] เป็นการออกแบบที่มุ่งให้ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานได้อย่างเท่าเทียม โดยคำนึงถึงความยืดหยุ่น ความเรียบง่ายในการใช้งาน การสื่อสารข้อมูลที่ชัดเจน ความปลอดภัย การใช้แรงน้อย และการจัดพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานทุกกลุ่ม โดยไม่ถูกจำกัดจากอายุ สภาพร่างกาย หรือข้อบกพร่องทางการมองเห็น แนวคิดดังกล่าวให้ความสำคัญกับการออกแบบพื้นที่ที่ปลอดภัย สะดวกต่อการใช้งาน โดยภายในโครงการพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส ได้นำแนวคิด Universal Design มาใช้ในการออกแบบ

เส้นทางสัญจร การจัดพื้นที่ใช้งาน และองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในอาคาร เพื่อให้ผู้พิการทางสายตาและบุคคลทั่วไปสามารถใช้งานพื้นที่ร่วมกันได้อย่างเหมาะสมและเท่าเทียม

3.2 การออกแบบหลายประสาทสัมผัส

Multi-sensory Design [3] เป็นแนวคิดการออกแบบที่มุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์ผ่านประสาทสัมผัสที่หลากหลาย ได้แก่ การสัมผัส การฟังเสียง การดมกลิ่น และการรับรู้บรรยากาศของพื้นที่ แทนการพึ่งพาการมองเห็นเพียงอย่างเดียว แนวคิดดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบพื้นที่สำหรับผู้พิการทางสายตา เพราะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ เข้าใจ และมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นที่และงานศิลปะได้มากขึ้น

ภายในโครงการพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส ได้มีการนำแนวคิดดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบพื้นที่จัดแสดงงานศิลปะและกิจกรรมต่าง ๆ ผ่านการใช้เสียง พื้นผิววัสดุ กลิ่น และองค์ประกอบทางบรรยากาศ เพื่อกระตุ้นการรับรู้และสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ร่วมกันระหว่างผู้ใช้งานกับพื้นที่จัดแสดงงานศิลปะ

3.3 การออกแบบพิพิธภัณฑ์และศูนย์การเรียนรู้เพื่อคนพิการทางการมองเห็น

เป็นแนวคิดการออกแบบที่มุ่งสร้างพื้นที่การเรียนรู้และการจัดแสดงที่ผู้พิการทางการมองเห็นสามารถเข้าถึงได้ผ่านการสัมผัส เสียง และสื่อประสาทสัมผัสอื่น ๆ ร่วมกับระบบนำทางและสื่อข้อมูลที่เหมาะสม เช่น อักษรเบรลล์ พื้นผิวสัมผัส และสื่อเสียง เพื่อให้เกิดการเรียนรู้และรับรู้เนื้อหาได้อย่างเท่าเทียมกับบุคคลทั่วไป ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัสให้รองรับผู้ใช้งานทุกกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

3.4 การออกแบบพื้นที่เพื่อการนำทางและการเข้าถึงข้อมูล

เพื่อให้ผู้พิการทางสายตาสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างปลอดภัยและเป็นอิสระ การออกแบบพื้นที่สำหรับผู้พิการทางสายตาจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลภายในอาคาร โดยเฉพาะการออกแบบระบบนำทางและสื่อสารข้อมูลที่เหมาะสมกับผู้ใช้งานการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลัก 3 ด้าน [5] ได้แก่

1) ความต่าง การใช้สีและแสงที่มีความเปรียบต่างสูงเพื่อช่วยผู้ที่มีสายตาเลือนราง

2) พื้นผิวสัมผัส การติดตั้งพื้นผิวต่างสัมผัสชนิดนำทางและชนิดเตือนตามมาตรฐานสากล การใช้วัสดุที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

3) สัญญาณเสียงและสื่อประสม การใช้ระบบ การบรรยายด้วยเสียง และแผนผังต่างสัมผัส เพื่อให้เข้าถึงข้อมูลนิทรรศการได้อย่างเท่าเทียมกับบุคคลทั่วไป

4.1 วิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้กระบวนการศึกษาตามระเบียบวิธีการออกแบบสถาปัตยกรรมในการพัฒนาโครงการพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส โดยมีขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับกำหนดรายละเอียดโครงการ ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับผู้พิการทางสายตา พฤติกรรมการรับรู้พื้นที่และงานศิลปะ ข้อมูลผู้ใช้งานโครงการ องค์ประกอบของโครงการ พื้นที่ใช้สอย และข้อมูลพื้นที่ตั้งโครงการ

2) การศึกษาทบทวนเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) แนวคิดการออกแบบผ่านประสาทสัมผัส (Multi-sensory Design) ทฤษฎีการรับรู้พื้นที่ แนวคิดการออกแบบพิพิธภัณฑ์และพื้นที่เรียนรู้ รวมถึงกฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารสำหรับผู้พิการ

3) การลงพื้นที่สำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลก่อนกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม โดยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ประกอบด้วย ผู้อำนวยการที่เป็นผู้พิการทางสายตา และบุคลากรที่มีความรู้และประสบการณ์ด้านการดูแลผู้พิการทางสายตา ณ โรงเรียนการศึกษาคนตาบอดนครราชสีมา โดยดำเนินการสัมภาษณ์เชิงลึก และการสังเกตพฤติกรรมการใช้งานพื้นที่ เพื่อศึกษาลักษณะการรับรู้พื้นที่ การสัญจร ความต้องการ และข้อจำกัดในการใช้งาน

อาคารของผู้พิการทางสายตา นอกจากนี้ ยังได้ศึกษากรณีตัวอย่างของพิพิธภัณฑ์และพื้นที่ศิลปะที่เกี่ยวข้อง สำรวจบริบทพื้นที่ตั้งโครงการ และวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่ใช้สอย เพื่อนำข้อมูลมาสังเคราะห์เป็นแนวทางในการออกแบบสถาปัตยกรรม

4) กระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม

4.1) การวิเคราะห์ข้อมูลด้านกฎหมายควบคุมอาคาร ความต้องการและพฤติกรรมของผู้ใช้งาน รวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบโครงการและพื้นที่ใช้สอย

4.2) การวิเคราะห์ข้อมูลจากบริบทสภาพแวดล้อม แนวคิดของโครงการ กิจกรรมภายในอาคาร และรูปแบบการรับรู้พื้นที่ของผู้พิการทางสายตา เพื่อนำไปสู่การกำหนดแนวคิดในการออกแบบสถาปัตยกรรม

4.3) การพัฒนาแบบร่างทางสถาปัตยกรรมโดยผ่านกระบวนการตรวจสอบและให้คำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ทรงคุณวุฒิด้านสถาปัตยกรรม เพื่อปรับปรุงและพัฒนาแบบร่างให้สมบูรณ์

4.4) การจัดทำแบบสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์ ได้แก่ แนวคิดการออกแบบ แบบแปลนพื้น รูปด้าน รูปตัด ภาพทัศนียภาพภายในและภายนอกอาคาร รวมถึงหุ่นจำลองโครงการ

4.5) การนำเสนอแบบทางสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์ เป็นการนำเสนอเพื่อตรวจประเมินผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมขั้นสมบูรณ์ โดยคณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากสายวิชาการและสายวิชาชีพทางสถาปัตยกรรม

5) การสรุปผลการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส

5.ผลการศึกษา

การออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัส สามารถอธิบายได้ ดังนี้

5.1 การศึกษาข้อมูลโครงการ

1) การวิเคราะห์ที่ตั้งโครงการ โครงการได้คัดเลือกจังหวัดนครราชสีมาเป็นที่ตั้ง เนื่องจากมีจำนวนผู้พิการทางการมองเห็นสูงถึง 11,505 คนโดยได้ข้อมูลจากกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ และจังหวัดนครราชสีมายังเป็นศูนย์กลางคมนาคมของภาคอีสาน โดยเลือกพื้นที่บริเวณ ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา ซึ่งมีความสะดวกในการเข้าถึง รายล้อมด้วยสถานศึกษาและหน่วยงานบริการคนพิการ พื้นที่โครงการเปนที่ดินของรัฐบาล ที่ดินของกรมธนารักษ ที่ราชพัสดุ เป็นที่ดินในเขตผังสีชมพู ประเภทชุมชน ที่ดินมีพื้นที่ขนาดใหญ่ ด้านหน่าที่ดินที่ติดถนนหลักมีขนาดกว้าง ทำให้โดดเด่นและเข้าถึงง่าย อย่างไรก็ตาม พื้นที่มีข้อจำกัดด้านเสียงรบกวนจากการจราจร ความเสี่ยงน้ำท่วมเนื่องจากเป็นพื้นที่ต่ำ และรูปแปลงที่ดินทรงสามเหลี่ยม ซึ่งส่งผลต่อการวางผังอาคาร (ดังรูปที่ 1,2)



รูปที่ 1 การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมที่ตั้งโครงการ



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ที่ตั้งโครงการ

2) การวิเคราะห์ผู้ใช้โครงการเพื่อศึกษาพฤติกรรมความต้องการ และรูปแบบการใช้งานของผู้ใช้โครงการ สามารถแบ่งกลุ่มผู้ใช้งานได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

2.1) กลุ่มผู้พิการทางสายตา เป็นกลุ่มผู้ใช้งานหลักของโครงการประกอบด้วยผู้พิการทางสายตาทั้งตาบอดสนิทและผู้มีสายตาเลือนราง ที่เข้ามาเพื่อเรียนรู้และสัมผัสประสบการณ์ทางศิลปะผ่านการสัมผัส การฟังเสียง การดมกลิ่น และกิจกรรมสร้างสรรค์ต่าง ๆ ภายในโครงการ

2.2) กลุ่มนักเรียน นักศึกษา เป็นกลุ่มที่เข้ามาเรียนรู้เกี่ยวกับศิลปะ การออกแบบ และการอยู่ร่วมกันในสังคมผ่านกิจกรรมภายในพิพิธภัณฑ์ โดยมุ่งเน้นการสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการรับรู้ทางประสาทสัมผัสและการเข้าถึงศิลปะของผู้พิการทางสายตา

2.3) กลุ่มนักท่องเที่ยวและบุคคลทั่วไป เป็นกลุ่มผู้ใช้งานที่เข้ามาเพื่อเยี่ยมชมและเรียนรู้ประสบการณ์ทางศิลปะรูปแบบใหม่ ผ่านพื้นที่จัดแสดงและกิจกรรมเชิงปฏิสัมพันธ์ ซึ่งช่วยสร้างความเข้าใจและตระหนักถึงความเท่าเทียมในการเข้าถึงศิลปะและวัฒนธรรม

2.4) กลุ่มเจ้าหน้าที่และผู้ดูแลโครงการ เป็นบุคลากรที่ทำหน้าที่ดูแล บริหาร และให้บริการภายในโครงการ รวมถึงการจัดกิจกรรม การให้ข้อมูล และการอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งานทุกกลุ่ม เพื่อให้การใช้งานพื้นที่เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบโครงการ และขนาดพื้นที่ใช้สอยโครงการ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบโครงการ และขนาดพื้นที่ใช้สอยโครงการ

องค์ประกอบ	**รายละเอียด**	**พื้นที่ (ตร.ม.)**
ส่วนจัดแสดงนิทรรศการถาวร	มีหน้าที่ จัดแสดงผลงานศิลปะ ของศิลปินต่างๆ เพื่อให้ผู้เข้าชมสามารถเรียนรู้ทำความเข้าใจ และสัมผัสถึงคุณค่าของศิลปะได้ตลอดเวลา	1,451.63
ส่วนจัดแสดงนิทรรศการชั่วคราว	เป็นพื้นที่จัดแสดงเนื้อหาเพื่อรองรับผลงานหรือหัวข้อเฉพาะในช่วงเวลาจำกัด เช่น 1–3 เดือน เพื่อสร้างความหลากหลายในการเรียนรู้	580.652
ส่วนพื้นที่สร้างสรรค์	โซนนี้เป็นพื้นที่ให้ทุกคนที่มีความสนใจในศิลปะไม่ว่าจะเป็นคนทั่งไปหรือผู้พิการทางสายตา ได้เข้าร่วมกันทำกิจกรรมเชิงสร้างสรรค์	328.49
ส่วนบริการ	ส่วนการรองรับและแก้ไขปัญหาจากการขายของและขายอาหารของกลุ่ม พ่อค้าแม่ค้าแผงลอย	546.35
ส่วนบริหารโครงการ	ส่วนงานด้านการบริหาร และสำนักงานโครงการ	150.45
ส่วนซ่อมบำรุงและงานระบบ	ส่วนงานด้านการดูแล และซ่อม บำรุงงานระบบต่างๆ ของอาคาร	195
ส่วนจอดรถ	ส่วนจอดรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และรถบัสของโครงการ	1,074.72
	รวมพื้นที่โครงการ	4,327.292

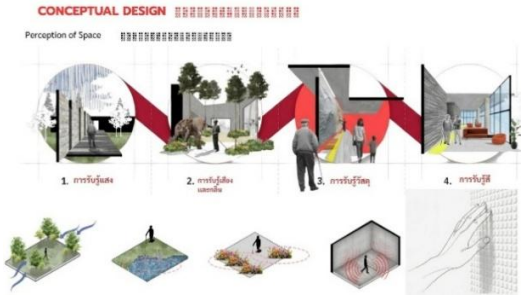
5.2 การออกแบบสถาปัตยกรรม

1) จากการศึกษาพฤติกรรมการรับรู้ของผู้พิการทางสายตาและ แนวคิดการออกแบบต่างๆ ที่มุ่งเน้นการสร้างพื้นที่การเรียนรู้และประสบการณ์ทางศิลปะที่เปิดกว้างสำหรับทุกคน โดยเฉพาะผู้พิการทางสายตา ผ่านการออกแบบการรับรู้ด้วยประสาทสัมผัสที่หลากหลายการออกแบบได้นำแนวคิด

Perception of Space มาใช้ในการออกแบบซึ่งหมายถึง กระบวนการที่มนุษย์รับรู้และทำความเข้าใจพื้นที่ผ่านประสาทสัมผัสและประสบการณ์การใช้งานโดยไม่จำกัดอยู่เพียงการมองเห็น แต่รวมถึงการได้ยิน

การสัมผัส การเคลื่อนไหวของร่างกาย ตลอดจนความทรงจำและอารมณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอยู่ในพื้นที่นั้น การรับรู้พื้นที่จึงมิได้พิจารณาเพียงรูปทรงทางกายภาพของสถาปัตยกรรม แต่เป็นประสบการณ์เชิงองค์รวมที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวและปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะในกรณีผู้พิการทางสายตา ซึ่งอาศัยประสาทสัมผัสอื่นในการสร้างความเข้าใจและจินตภาพของพื้นที่

ดังนั้น การออกแบบสถาปัตยกรรมภายใต้แนวคิดนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างลำดับของประสบการณ์ ผ่านองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น การจัดลำดับการสัญจร การเปลี่ยนแปลงของสเกล แสง เสียง พื้นผิว และบรรยากาศ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้และเข้าใจพื้นที่ได้อย่างชัดเจน แนวคิดดังกล่าวนำไปสู่การเปลี่ยนมุมมองของการออกแบบจาก “การออกแบบเพื่อการมองเห็น” ไปสู่ “การออกแบบเพื่อการรับรู้” (ดังรูปที่ 3)



รูปที่ 3 ภาพภายนอกอาคาร

2) ผลการออกแบบสถาปัตยกรรม จากการศึกษาข้อมูลโครงการในด้านต่าง ๆ ร่วมกับแนวคิดในการออกแบบ ได้นำมาสู่การกำหนดพื้นที่ใช้สอยและการวางผังอาคารตามความสัมพันธ์ของการใช้งาน บริบทสภาพแวดล้อมของพื้นที่ตั้งโครงการ และแนวคิดการออกแบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึง เรียนรู้ และรับประสบการณ์ทางศิลปะได้อย่างสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการประกอบด้วยอาคารจำนวน 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นพื้นที่ต้อนรับและเตรียมความพร้อมก่อนเข้าสู่พื้นที่จัดแสดง ภายนอกอาคารจัดให้มีพื้นที่จอดรถสำหรับผู้มาเยี่ยมชม พื้นที่จอดรถรับส่งชั่วคราว และพื้นที่ภูมิทัศน์โดยรอบโครงการ ด้านหน้าอาคารออกแบบให้มีแหล่งน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งองค์ประกอบภูมิทัศน์และพื้นที่รับน้ำของโครงการ นอกจากนี้ ยังออกแบบเส้นทางสัญจรสำหรับผู้พิการทางสายตาให้สามารถเข้าถึงอาคารได้ด้วยตนเอง โดยอาศัยการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสต่าง ๆ เช่น เสียงน้ำกลิ่นของพรรณไม้ และร่มเงาของต้นไม้ ซึ่งช่วยสร้างประสบการณ์การนำทางและนำผู้ใช้งานเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคาร (ดังรูปที่ 4)



รูปที่ 4 ภาพภายนอกอาคาร

พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารชั้นที่ 1 ประกอบด้วย พื้นที่ต้อนรับและพักคอย พื้นที่รับประทานอาหาร ส่วนบริหารโครงการ พื้นที่งานระบบอาคาร ห้องสมุด พื้นที่กิจกรรมเวิร์กช็อป พื้นที่จัดแสดงนิทรรศการหมุนเวียน และนิทรรศการถาวร “ก้าวสู่โลกสัมผัส” ซึ่งเป็นพื้นที่เตรียมความพร้อมและสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสก่อนเข้าสู่พื้นที่จัดแสดงหลัก (ดังรูปที่ 5)



รูปที่ 5 ผังพื้นอาคารชั้นที่ 1

พื้นที่ชั้นที่ 2 เป็นชั้นของการจัดแสดงนิทรรศการถาวร ซึ่งเน้นจัดแสดงงานศิลปะที่มีความหลากหลายทางประสาทสัมผัส (ดังรูปที่ 6) ประกอบด้วย



รูปที่ 6 ผังพื้นอาคารชั้นที่ 2

พื้นที่จัดแสดงนิทรรศการถาวร ประกอบด้วย

2.1) ส่วนจัดแสดงผลงานของ Henry Moore ศิลปินชาวอังกฤษ ซึ่งนำเสนอประติมากรรมรูปทรงนามธรรมที่สามารถรับรู้ผ่านการสัมผัส ช่วยให้ผู้ชมเข้าใจรูปทรง มิติ และองค์ประกอบของผลงานผ่านการสำรวจด้วยร่างกาย

2.2) ส่วนจัดแสดงผลงานของ Sissel Tolaas ศิลปินและนักวิจัยชาวนอร์เวย์ ซึ่งใช้ “กลิ่น” เป็นสื่อหลักในการสร้างประสบการณ์ทางศิลปะ โดยมุ่งเน้นการสร้างความทรงจำและการรับรู้พื้นที่ผ่านประสาทสัมผัสด้านการดมกลิ่น

2.3) ส่วนจัดแสดงผลงาน “บ้านแห่งความหวัง” ของ มณเฑียร บุญมา ศิลปินร่วมสมัยชาวไทย ซึ่งใช้วัสดุธรรมชาติและสมุนไพรไทยในการสร้างบรรยากาศเชิงจิตวิญญาณ โดยเน้นการรับรู้ผ่านกลิ่น การสัมผัส และความรู้สึกที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่

2.4) ส่วนจัดแสดงผลงานของ Ernesto Neto ศิลปินร่วมสมัยชาวบราซิล ซึ่งเป็นงานศิลปะจัดวางขนาดใหญ่ที่ใช้ผ้า เส้นใย และวัสดุธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมุ่งเน้นการรับรู้ผ่านการสัมผัส กลิ่น และการเคลื่อนไหวของร่างกายภายในพื้นที่

2.5) ส่วนจัดแสดงผลงานของ Olafur Eliasson ศิลปินเชื้อสายไอซ์แลนด์–เดนมาร์ก มุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์เชิงพื้นที่ เพื่อให้ผู้ชมรับรู้สภาพแวดล้อมด้วยร่างกาย ไม่ใช่เพียงการมองเห็น การรับรู้แสงผ่านประสบการณ์ของร่างกาย

2.6) ส่วนจัดแสดงผลงานของ Esref Armagan เป็นศิลปินชาวตุรกีที่ตาบอดแต่กำเนิด โดยสร้างผลงานจิตรกรรมผ่าน การสัมผัสและความเข้าใจเชิงพื้นที่ แทนการมองเห็นการจัดแสดงผลงาน ในรูปแบบ interactive มุ่งเน้นให้ผู้ชมมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์ผลงานผ่านการสัมผัสและการรับรู้เชิงพื้นที่ โดยผู้ชมจะค่อย ๆ รับรู้องค์ประกอบของภาพจากรายละเอียดทีละส่วนจนเกิดเป็นภาพรวม

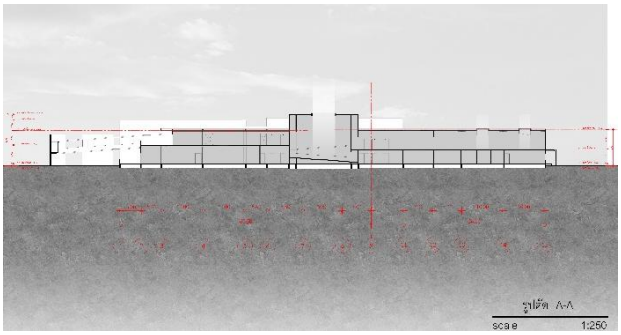
โดยแทนที่จะเน้นเพียงรูปทรงที่มองเห็น โครงการได้เลือกชิ้นงานที่ผู้พิการทางสายตาสามารถรับรู้ได้โดยไม่ใช้การมองเห็น และประยุกต์หลัก Universal Design ผ่านการสร้างประสบการณ์พหุประสาทสัมผัส (Multi-Sensory Experience) ใช้การเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ แสงสว่าง และอุณหภูมิในแต่ละจุด เป็นเครื่องมือในการบอกเล่าขอบเขตของพื้นที่แทนการมองเห็น และการให้ผู้เข้าชมสามารถสัมผัสผลงานศิลปะจริง และรับรู้รูปทรงผ่านมือสัมผัส ซึ่งเป็นการมอบประสบการณ์ที่เท่าเทียมกันทั้งคนปกติและผู้พิการทางสายตา(ดังรูปที่ 7)



รูปที่ 7 ห้องแสดงนิทรรศการชั้น 2

นอกจากนี้พื้นที่การจัดแสดงของโครงการได้นำแนวคิด การออกแบบพื้นที่ผ่านการรับรู้ด้วยประสาทสัมผัส โดยเน้นผู้พิการทางสายตา เป็นสำคัญ ผ่านการเลือกใช้ระบบนำทางที่กระตุ้นประสาทสัมผัสอื่นเพื่อสร้างความปลอดภัยและอิสระในการเคลื่อนที่ การเลือกใช้ลวดลายและพื้นผิวที่แตกต่างกันบนพื้นเพื่อระบุพื้นที่และบอกขอบเขต การตัดสินใจใช้ "เสียง" เป็นเข็มทิศนำทาง เช่น การใช้เสียงน้ำในส่วนทางเข้าอาคาร เละเสียงจากงานศิลปะตรงโถงกลาง หรือการออกแบบห้องให้เสียงก้องในจุดต่างๆ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานระบุตำแหน่งและทิศทางได้ด้วยตนเองได้ และการกำหนดรูปแบบกิจกรรมและชิ้นงานจัดแสดงที่รองรับการรับรู้ที่หลากหลาย ทั้งการสัมผัส การรับฟัง การมีส่วนร่วมในกิจกรรมเชิงปฏิบัติการ และการเรียนรู้ผ่านประสบการณ์ตรง ภายในพื้นที่พิพิธภัณฑ์มีการออกแบบนิทรรศการให้เข้าถึงได้ง่ายและสะดวกต่อผู้พิการทางสายตา โดยใช้เทคนิคการจัดแสดงที่กระตุ้นประสาทสัมผัส เช่น การใช้เสียง กลิ่น วัสดุที่มีพื้นผิวแตกต่างกัน ตลอดจนการจำลองบรรยากาศของผลงานศิลปะ เพื่อสร้างประสบการณ์เสมือนผู้ใช้งานได้เข้าไปอยู่ภายในงานศิลปะจริง รวมถึงมีการใช้วัตถุจริงและวัตถุจำลองเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้ผ่านการสัมผัส

การออกแบบเส้นทางสัญจรภายในอาคารเพื่อแก้ปัญหาภาวะหลงทิศทาง การออกแบบเชิงสถาปัตยกรรมจึงเน้นความชัดเจนของพื้นที่ การวางผังแบบทางเดินหลักเส้นเดียวที่เรียบง่ายแต่ชัดเจน ช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าใจลำดับของพื้นที่ ระบบแกนหลักเพียงแกนเดียว ให้เข้าใจง่ายและลดความสับสนในการใช้งาน ร่วมกับการใช้แสง สี และเสียงเป็นองค์ประกอบช่วยนำทาง ทำให้ผู้พิการทางสายตาสามารถสร้างการรับรู้และจดจำเส้นทางภายในอาคารได้ด้วยตนเอง นอกจากนี้ ยังออกแบบให้พื้นที่จัดแสดงแต่ละส่วนมีบรรยากาศและลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างการรับรู้ถึงการเปลี่ยนผ่านของพื้นที่และช่วยให้จดจำตำแหน่งต่าง ๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (ดังรูปที่ 8)



รูปที่ 8 รูปตัดอาคารที่แสดงทางเดินและช่องแสง

ในส่วนของการออกแบบอาคาร ได้คำนึงถึงการเข้าถึงและการใช้งานของผู้พิการทางสายตาเป็นสำคัญ โดยจัดวางเส้นทางสัญจรจากภายนอกสู่ภายในอาคารให้สามารถรับรู้ได้ผ่านประสาทสัมผัสต่าง ๆ เช่น การจัดวางทางเดินขนานกับแหล่งน้ำเพื่อให้ผู้ใช้งานรับรู้ทิศทางจากเสียงและอุณหภูมิของน้ำ การร่นอาคารจากแนวถนนและการออกแบบเนินดินร่วมกับบ่อน้ำโดยรอบอาคาร เพื่อช่วยรองรับปัญหาน้ำท่วมและลดเสียงรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก

บริเวณทางเข้าอาคารได้รับการออกแบบให้เป็นพื้นที่เปลี่ยนผ่านระหว่างภายนอกและภายในอาคาร โดยใช้ซุ้มทางเข้าและองค์ประกอบน้ำเพื่อสร้างสภาวะร่มเย็นและเป็นจุดสังเกตสำหรับผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังเลือกใช้สีแดงบริเวณทางเข้าอาคารตัดกับผิววัสดุปูนเปลือยของอาคาร เพื่อช่วยให้ผู้ที่มีสายตาเลือนรางสามารถสังเกตเห็นตำแหน่งทางเข้าได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ด้านรูปแบบสถาปัตยกรรม อาคารถูกออกแบบให้มีลักษณะเรียบง่ายและชัดเจน โดยใช้เส้นทางสัญจรหลักเป็นแกนกลางของอาคาร พร้อมเปิดช่องแสงตามแนวทางเดินเพื่อช่วยในการนำทาง ก่อนเชื่อมต่อเข้าสู่พื้นที่จัดแสดงและพื้นที่ใช้งานต่าง ๆ ซึ่งทุกห้องจะเชื่อมกลับเข้าสู่ทางเดินหลักเพื่อลดความซับซ้อนในการใช้งาน รูปทรงของห้องจัดแสดงเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมเพื่อให้เข้าใจทิศทางและจดจำพื้นที่ได้ง่าย ขณะที่ขนาดและสัดส่วนของแต่ละห้องถูกออกแบบให้แตกต่างกัน เพื่อสร้างเอกลักษณ์เฉพาะและประสบการณ์การรับรู้ที่หลากหลายในแต่ละพื้นที่ ส่งผลให้เกิดรูปแบบสถาปัตยกรรมที่เรียบง่าย แต่

สามารถสื่อสารและรับรู้ได้ผ่านประสบการณ์ของผู้ใช้งาน(ดังรูปที่ 9,10)



รูปที่ 9 รูปด้านอาคารที่แสดงลักษณะรูปทรงอาคาร



รูปที่ 10 รูปแสดง Model ของอาคาร

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการออกแบบพิพิธภัณฑ์ศิลปะสัมผัสจังหวัดนครราชสีมา เพื่อออกแบบสถาปัตยกรรมและพื้นที่ทางศิลปะที่ส่งเสริมการเข้าถึงของผู้พิการทางสายตาผ่านการใช้ประสาทสัมผัสอื่นทดแทนการมองเห็น โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน และการออกแบบผ่านประสาทสัมผัส เพื่อให้ผู้ใช้งานทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงและใช้งานพื้นที่ร่วมกันได้อย่างเท่าเทียม พร้อมทั้งสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ทางศิลปะที่หลากหลายและครอบคลุม การศึกษาครั้งนี้มีกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมที่สอดคล้องกับขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐานวิชาชีพสถาปัตยกรรม 4 ขั้นตอน รายละเอียดดังนี้ 1. ขั้นตอนกำหนดปัญหา ที่มาจากการศึกษาที่ตั้งโครงการในเขตตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา การศึกษาพฤติกรรม ข้อจำกัดของผู้ใช้โครงการ โดยเฉพาะกลุ่มผู้พิการทางสายตา และการออกแบบพื้นที่รองรับความหลากหลายทางประสาทสัมผัสที่เหมาะสม 2. ขั้นตอนการออกแบบ เป็นกระบวนการพัฒนาออกแบบทางสถาปัตยกรรมของโครงการ ตั้งแต่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ การพัฒนาแบบร่างร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา จนถึงแบบสมบูรณ์ 3. ขั้นตอนดำเนินการ เป็นขั้นตอนการจัดทำแบบเพื่อขั้นสมบูรณ์เพื่อนำเสนอแบบทางสถาปัตยกรรมที่ประกอบด้วย แบบทางสถาปัตยกรรม 2 มิติ และ 3 มิติ ของพื้นที่โครงการ และ 4. ขั้นตอนการประเมินผล ซึ่งการศึกษาครั้งนี้เป็นการตรวจประเมินผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมโดยคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างไรก็ตาม ทั้งนี้การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ดำเนินการประเมินผลโดยกลุ่มเป้าหมายโดยตรง เนื่องจากข้อจำกัดด้านระยะเวลา

จากผลการประเมินของคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ พบว่าแนวคิดและกระบวนการออกแบบสามารถนำหลักการออกแบบเพื่อทุกคนมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาพื้นที่ที่เอื้อต่อการเข้าถึงของผู้ใช้งานทุกกลุ่ม โดยเฉพาะผู้พิการทางสายตา ผ่านการออกแบบระบบสัญจร พื้นผิว วัสดุ และองค์ประกอบต่าง ๆ ที่สนับสนุนการรับรู้พื้นที่ด้วยประสาทสัมผัสหลายด้าน ขณะเดียวกัน การประยุกต์ใช้แนวคิดการออกแบบผ่านประสาทสัมผัสช่วยสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ทางศิลปะผ่านการสัมผัส เสียง กลิ่น และการเคลื่อนไหว ทำให้ผู้ใช้งานสามารถมีส่วนร่วมกับพื้นที่จัดแสดงได้อย่างมีความหมายมากกว่าการรับรู้ผ่านการมองเห็นเพียงอย่างเดียว

ส่วนการออกแบบพื้นที่จัดแสดงและการเรียนรู้ของโครงการ ได้นำแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) [2] มาใช้เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่ผู้ใช้งานทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงได้อย่างเท่าเทียม ผ่านการออกแบบพื้นที่ให้มีความ

ปลอดภัย สะดวกต่อการใช้งาน และสามารถรับรู้ข้อมูลได้ด้วยตนเอง

และได้นำแนวคิดการออกแบบผ่านประสาทสัมผัส (Multi-sensory Design) [3] มาใช้ในการสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ทางศิลปะผ่านการสัมผัส เสียง กลิ่น และการเคลื่อนไหวของร่างกาย ควบคู่ไปกับการใช้สื่อและกิจกรรมที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานมีส่วนร่วมและเรียนรู้จากประสบการณ์จริง

นอกจากนี้ การนำแนวคิดการรับรู้พื้นที่ (Perception of Space) มาใช้ในการออกแบบ ยังช่วยกำหนดลำดับประสบการณ์ของผู้ใช้งานผ่านความแตกต่างของแสง เสียง วัสดุ และบรรยากาศของพื้นที่ ส่งผลให้ผู้พิการทางสายตาสามารถรับรู้ทิศทาง จดจำพื้นที่ และสร้างความเข้าใจต่อสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการที่มุ่งพัฒนาพื้นที่ทางศิลปะที่ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานร่วมกันได้อย่างเท่าเทียม

อย่างไรก็ตาม จากข้อเสนอแนะของคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ พบว่ายังมีประเด็นที่ควรพัฒนาต่อ ได้แก่ การออกแบบรายละเอียดของระบบสัญจรให้มีความต่อเนื่องและชัดเจนยิ่งขึ้น รวมถึงการพิจารณาระบบโครงสร้างและรูปแบบหลังคาเพื่อเพิ่มช่วงเสา ลดจำนวนเสาภายในอาคาร และเพิ่มความยืดหยุ่นของพื้นที่จัดแสดง ทั้งนี้ หากมีการศึกษาต่อยอด ควรดำเนินการประเมินผลการใช้งานจริงกับกลุ่มผู้พิการทางสายตาและผู้ใช้งานกลุ่มอื่น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของพื้นที่และนำผลที่ได้ไปพัฒนาการออกแบบให้ตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

7. อ้างอิง

[1] กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ. (2566). สถิติคนพิการในประเทศไทย.เข้าถึงเมื่อ 7 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.dep.go.th/th/homepage

[2] ไตรรัตน์ จารุทัศน์. (2558). คู่มือการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design Guide Book). เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://phdb.moph.go.th/

[3] frezza. (2564). multisensory-design. เข้าถึงเมื่อ 17 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.frezza.com/en/multisensory-design/

[4] ไตรรัตน์ จารุทัศน์ และ สุจิตรา จิระวาณิชย์กุล. (2563). แนวทางการออกแบบพิพิธภัณฑ์และศูนย์การเรียนรู้เพื่อคนพิการทางการเห็น. เข้าถึงเมื่อ 4 พฤศจิกายน. เข้าถึงได้จาก https://doi.nrct.go.th/admin/doc/doc_586539

[5] BigRentz. (2562.). The ultimate guide to designing and navigating spaces for people with vision impairment. เข้าถึงเมื่อ 6 กันยายน. เข้าถึงได้จาก https://www.bigrentz.com/blog/ultimate-guide-designing-navigating-spaces-people-vision-impairment

แนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ กรณีศึกษา เส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

Guidelines for Improving Pedestrian Walkways for Students with Disabilities: A Case Study of the Route from Student Dormitories and Gate 1 to the Special Education Center, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

จิรศักดิ์ ทัศมี[1], ศิวกร การบรรจง[1] และ ศราวุฒิ ใจอดทน[2,*]

[1-2] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: E-mail sarawut_ex@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 086-8654578

บทคัดย่อ

ปัจจุบันคนพิการสามารถเข้าถึงการศึกษาได้อย่างกว้างขวาง โดยสามารถเข้าศึกษาในระดับต่าง ๆ ได้ แต่เมื่อเข้าไปเรียนในสถาบันการศึกษาแล้วพบว่ามีความเหลื่อมล้ำที่ส่งผลต่อผู้เรียนที่เป็นกลุ่มคนพิการอยู่ และปัญหาสำคัญหนึ่งที่ส่งผลต่อผู้เรียนที่มีความพิการคือปัญหาในด้านสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการเข้าถึงอาคารสถานที่เรียนนับว่าเป็นความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงการศึกษา การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้งานและสำรวจสภาพเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการ และเสนอแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ โดยใช้วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ พื้นที่ศึกษา คือ เส้นทางจากหอพักนักศึกษาและประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา กลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำคัญเป็นนักศึกษาพิการทางการมองเห็น จำนวน 4 คน คัดเลือกแบบเจาะจง เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึก และการสำรวจภาคสนาม วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา ผลการศึกษาพบว่า นักศึกษาพิการใช้การเดินเท้าในการสัญจรไปยังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ และมีปัญหาในการใช้งานทางเดินเท้า ได้แก่ พื้นผิวทางเดินไม่เรียบ ขรุขระ ขนาดทางเดินเท้าไม่เหมาะสม มีสิ่งกีดขวาง เช่น รถจักรยานยนต์จอดบนทางเท้า ต้นไม้ และป้ายที่ติดตั้งในระดับต่ำ รวมทั้งขาดผิวต่างสัมผัสสำหรับการนำทางและการเตือนจุดข้ามถนน และแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้า ได้แก่ ผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางและจุดเตือนก่อนข้ามถนน การจัดทำทางข้ามถนนที่ปลอดภัย ควรจัดทำทางเดินเท้าให้มีความต่อเนื่อง ขยายความกว้างทางเดินในจุดที่คับแคบ และการจัดการอุปสรรคบนทางเดินเท้า ซึ่งจากผลการศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงทางเดินเท้าของมหาวิทยาลัย เพื่อส่งเสริมการเข้าถึงและความเท่าเทียมทางการศึกษาสำหรับนักศึกษาพิการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แนวทางการปรับปรุง ทางเดินเท้า นักศึกษาพิการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

Abstract

At present, persons with disabilities have greater access to education and can pursue studies at various educational levels. However, inequalities still exist in educational institutions and continue to affect students with disabilities. One significant issue is the physical environment, which does not adequately support access to educational facilities and constitutes a form of inequality in educational access. This study aimed to investigate the use of pedestrian pathways by students with disabilities, examine the physical conditions of the pathways, and propose guidelines for improving pedestrian accessibility. A qualitative research approach was employed. The study area encompassed the pedestrian routes connecting the student dormitories and Gate 1 to the Special Education Center Building at Nakhon Ratchasima Rajabhat University. The key informants consisted of four visually impaired students selected through purposive sampling. Data were collected through in-depth interviews and field surveys and were analyzed using content analysis. The findings revealed that students with disabilities primarily relied on walking to travel to the Special Education Center Building. Several problems affecting pedestrian accessibility were identified, including uneven and deteriorated pavement surfaces, inadequate sidewalk widths, and various obstacles such as motorcycles parked on sidewalks, trees, and low-hanging signboards. In addition, directional tactile and warning tactile at road crossings were insufficient or absent. The proposed improvement guidelines included the installation of directional tactile paving and warning tactile surfaces at crossings, the provision of safer pedestrian crossings, the development of continuous pedestrian pathways, the widening of narrow sidewalk sections, and the removal or management of obstacles along pedestrian routes. The findings may be used by Nakhon Ratchasima Rajabhat University to improve campus pedestrian facilities and promote accessibility, inclusion, and educational equity for students with disabilities.

Keywords: Guidelines for Improving, Pedestrian Pathways, Students with Disabilities, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

1. บทนำ

คนพิการในประเทศไทย ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2568 มีคนพิการจำนวน 2,261,201 คน คิดเป็นร้อยละ 3.42 ของประชากรไทย และมีคนพิการที่สามารถเข้าถึงการศึกษา จำนวน 1,807,124 คน คิดเป็นประมาณร้อยละ 79.92 ของคนพิการทั้งหมด [1] แต่เมื่อเข้าไปเรียนในสถาบันการศึกษาแล้วก็ยังพบว่ามีความเหลื่อมล้ำที่ส่งผลต่อผู้เรียนที่เป็นกลุ่มคนพิการ ซึ่งแบ่งเป็น 3 ประเด็น คือ 1. คนพิการยังไม่สามารถเข้าถึงหลักสูตรที่ส่งเสริมคนพิการให้เรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2. ปัจจัยด้านทุนทรัพย์ที่จะส่งผลคนพิการสามารถเข้าถึงการศึกษาที่มีคุณภาพ และ 3. ผู้สอนที่ไม่มีความเข้าใจรูปแบบการเรียนรู้ของกลุ่มคนพิการ [2] และปัญหาสำคัญอีกเรื่องหนึ่งที่ส่งผลต่อผู้เรียนที่มีความพิการคือปัญหาในด้านสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการเข้าถึงอาคารสถานที่เรียน นับว่าเป็นความเหลื่อมล้ำที่สร้างความไม่เท่าเทียมในการเข้าถึงการศึกษาเช่นกัน

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา มีการเปิดสอนนักศึกษาทั้งในระดับปริญญาตรี จนถึงระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต และนอกจากรับนักศึกษาปกติทั่วไปเข้าศึกษาต่อนั้น ทางมหาวิทยาลัยยังเปิดรับนักศึกษาที่มีความพิการเข้าศึกษาต่อ ซึ่งในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567 มีนักศึกษาพิการที่ศึกษาทั้งหมด จำนวน 38 คน แบ่งตามประเภทความพิการ คือ พิการทางการเคลื่อนไหว จำนวน 8 คน พิการทางการได้ยิน จำนวน 16 คน พิการทางการมองเห็น จำนวน 9 คน พิการทางการเรียนรู้ จำนวน 1 คน ออทิสติก จำนวน 2 คน และ พิการทางสติปัญญา จำนวน 2 คน [3] โดยมีศูนย์การศึกษาพิเศษ เป็นหน่วยงานที่ให้บริการช่วยเหลือ และคอยอำนวยความสะดวกทางการศึกษาสำหรับนักศึกษาพิการเรียนร่วมในมหาวิทยาลัยในด้านต่างๆ แต่ปัญหาหนึ่งที่พบคือปัญหาทางด้านกายภาพของสภาพแวดล้อมของมหาวิทยาลัยที่ยังไม่เอื้ออำนวยต่อการใช้งาน โดยเฉพาะเส้นทางการสัญจร หรือ “ทางเดินเท้า” ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาถือว่าเป็นเรื่องหนึ่งที่มีผลต่อนักศึกษาพิการอย่างยิ่ง ซึ่งนักศึกษาที่พิการทางการมองเห็นเป็นกลุ่มนักศึกษาพิการส่วนใหญ่ที่มีการเดินทางสัญจรจากหอพักที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัย หรือหอพักที่อยู่ภายนอกมหาวิทยาลัยเดินทางมายังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ และได้รับผลกระทบจากการใช้งานเส้นทางเดินต่างจากคนพิการกลุ่มอื่น ๆ ที่ยังสามารถมองเห็นเส้นทางได้ชัดเจน หรือเดินทางด้วยรถยนต์มายังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ ด้วยทางเดินเท้าในมหาวิทยาลัยมีสภาพไม่เหมาะสม ชำรุด มีขนาดทางเดินเท้าที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ทางเดินเท้ามีความขาดช่วงไม่ต่อเนื่อง และไม่มีสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับคนพิการ ซึ่งนับว่าเป็นอุปสรรคในการสัญจรต่อนักศึกษาพิการ

จากที่กล่าวมาจึงนำมาสู่การศึกษาแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาที่พิการ กรณีศึกษา เส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เพื่อศึกษาข้อมูลการใช้เส้นทางสัญจรของนักศึกษาพิการ และสำรวจสภาพทางกายภาพเส้นทางสัญจร รวมถึงนำเสนอแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาที่พิการ กรณีศึกษาเส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เพื่อนำไปสู่การเสนอมหาวิทยาลัยราช

ภัฏนครราชสีมาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาการใช้งานเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการ และสำรวจสภาพเส้นทางเดินเท้าจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

2.2 เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดการออกแบบเพื่อคนทั้งมวล

การออกแบบผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมที่มุ่งเน้นให้ทุกคนสามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกคน โดยไม่มีข้อจำกัดด้านอายุและสภาพร่างกาย มี 7 ประการ [4] ดังนี้

1) ทุกคนใช้ได้อย่างเท่าเทียมกัน (Equitable Use) การออกแบบให้สามารถใช้งานตามความต้องการของคนทุกกลุ่ม

2) มีความยืดหยุ่น ปรับเปลี่ยนการใช้งานได้ (Flexible Use) การออกแบบให้มีความยืดหยุ่นรองรับความสามารถที่หลากหลายของแต่ละบุคคล

3) เรียบง่ายและเข้าใจง่าย (Simple and Intuitive Use) การออกแบบที่สามารถทำให้แต่ละบุคคลเข้าใจและใช้งานได้ง่าย

4) การให้ข้อมูลที่ชัดเจน (Perceptible Information) การออกแบบที่สามารถสื่อสารข้อมูลที่จำเป็นให้แต่ละบุคคลเข้าใจ โดยไม่มีข้อจำกัดของบุคคลที่มีความบกพร่องในด้านต่าง ๆ

5) ทนทานต่อการใช้งานที่ผิดพลาดและการเกิดอันตราย (Tolerance for Error) การออกแบบที่มีระบบป้องกันการผิดพลาดหรืออันตรายในการใช้งาน

6) มีความสะดวก และทุ่นแรงกายในการออกกำลัง (Low Physical Effort) การออกแบบที่สะดวกและเอื้อต่อการทุ่นแรง ไม่ต้องออกแรงมากเกินไปในการใช้งานได้

7) ขนาด พื้นที่ที่เหมาะสมในการเข้าถึงและการใช้งาน (Size and space for approach and use) การออกแบบที่คำนึงถึงขนาดและพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการเข้าถึง และการใช้งานของคนทุกกลุ่ม

3.2 ข้อคำนึงถึงในการออกแบบทางเท้าและทางข้ามสำหรับคนทุกคน

การออกแบบทางเดินเท้าจำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้งานของคนทุกกลุ่มที่มีลักษณะความสามารถทางร่างกายที่หลากหลาย และข้อคำนึงถึงต่าง ๆ [5] ดังนี้

1) ขนาดทางเดินเท้าต้องมีความกว้างเพียงพอรองรับการใช้งาน

2) ทางเดินเท้าควรมีความเชื่อมต่อกัน ไม่ขาดช่วง เพื่อให้ใช้งานได้ราบรื่น และสะดวก

3) ทางเดินเท้าต้องมีความปลอดภัย ไม่มีอุปสรรคที่อาจจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุ

4) ทางเดินเท้าต้องแยกออกจากทางสัญจรของยานพาหนะ โดยอาจใช้องค์ประกอบทางภูมิทัศน์ช่วยแยกและสามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัย

5) องค์ประกอบทางภูมิทัศน์ เช่น ต้นไม้ ซุ้มทางเดิน เป็นต้น สามารถช่วยสร้างร่มเงา และจัดให้มีที่นั่งพักเป็นระยะช่วยอำนวยความสะดวกสบาย

รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ช่วยในการจดจำเส้นทาง เช่น ประติมากรรม

6) กรณีมีพื้นที่ทำกิจกรรมอื่น ๆ ควรแยกออกจากเส้นทางการเดินให้ชัดเจน

7) จัดเตรียมและติดตั้งสัญญาณและป้ายบอกทางให้ชัดเจน เข้าใจง่าย อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

8) จัดให้มีไฟฟ้าแสงสว่างอย่างเพียงพอเพื่อความปลอดภัยในการเดิน

4. วิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยพื้นที่การศึกษา คือ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยทำศึกษาเฉพาะเส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ ซึ่งเป็นเส้นทางสัญจรของนักศึกษาพิการ และวิธีการดำเนินการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.1 กลุ่มเป้าหมายการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ใช้การคัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) และมีเกณฑ์ในการเลือกผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants) คือ 1) เป็นนักศึกษาที่กำลังศึกษาอยู่และมีความพิการ 2) เป็นผู้ที่ใช้เส้นทางเดินเท้าจากหอพักนักศึกษา หรือประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ 3) อาศัยกายอุปกรณ์ หรือมีบุคคลช่วยในการเดินทาง และ 4) มีความยินดีในการให้ข้อมูล

โดยผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants) จำนวน 4 คน เป็นผู้พิการทางการมองเห็น ให้ข้อมูลในประเด็นการใช้งานเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการและปัญหาอุปสรรคในการสัญจร รวมถึงความต้องการในการปรับปรุงทางเดินเท้า ซึ่งสามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ครบถ้วนและข้อมูลมีความอิ่มตัว (Data Saturation)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1) การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) สำหรับเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการ ได้แก่ เส้นทางที่ใช้สัญจรไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ ปัญหาอุปสรรคในการสัญจร และความต้องการในการปรับปรุงทางเดินเท้า

2) สำรวจภาคสนาม (fieldwork survey) สำหรับเก็บข้อมูลสภาพทางกายภาพของเส้นทางเดินเท้า จากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก และการสำรวจภาคสนาม โดยใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) เพื่อนำไปสู่การเสนอแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาตามวัตถุประสงค์การศึกษา และผ่านการตรวจแก้ไขแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าฯ จากอาจารย์ที่ปรึกษาในรายวิชาให้เป็นไปตามแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการออกแบบทางเดินเท้าเพื่อคนทุกคน

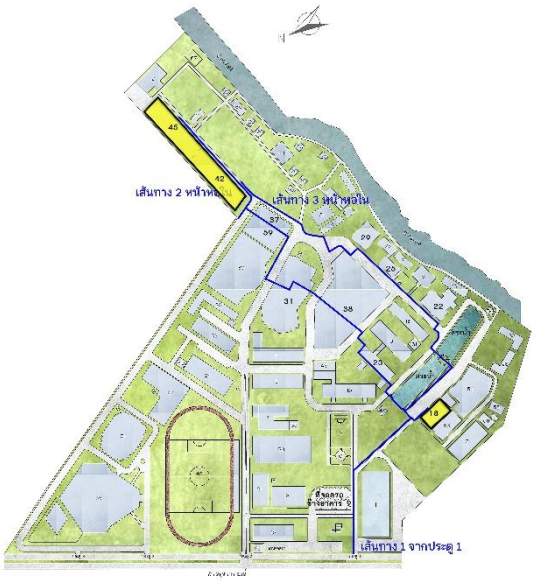
5. ผลการศึกษา

5.1 ข้อมูลการใช้งานเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษาพิการ

ข้อมูลทั่วไปผู้ตอบแบบสัมภาษณ์ พบว่า นักศึกษาพิการที่ตอบแบบสัมภาษณ์ จำนวน 4 คน เป็นเพศหญิง 3 คน และเป็นเพศชาย 1 คน อายุระหว่าง 19 – 25 ปี ทุกคนศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 1 ส่วนลักษณะความพิการแบ่งเป็น พิการทางการมองเห็นสาย (ตาเลือนราง) จำนวน 3 คน และพิการทางการมองเห็น (ตาบอดสนิท) จำนวน 1 คน และลักษณะการสัญจรไปอาคารศูนย์การศึกษา

พิเศษ ส่วนใหญ่ใช้ไม้เท้าในการเดิน และพึ่งพาคนนำทาง หรือถามคนให้ช่วยบอกทาง แต่นักศึกษาตาเลือนรางบางครั้งสามารถเดินไปเองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาคนนำทาง

ข้อมูลเส้นทางสัญจรไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ พบว่า นักศึกษาที่พักหอนอกมหาวิทยาลัย จำนวน 2 คน ใช้เส้นทางที่ 1 คือ เส้นทางจากประตู 1 เดินผ่านด้านข้างพื้นที่จอดรถข้างอาคาร 9 ไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ โดยเดินบนถนนและทางเดินเท้า และนักศึกษาที่พักหอในมหาวิทยาลัย จำนวน 2 คน ใช้เส้นทางจากหอพักเดินไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ แบ่งเป็น 2 เส้นทาง คือ เส้นทางที่ 2 เดินผ่านด้านข้างอาคาร 59 กับ อาคาร 37 ลอดใต้อาคาร 31 ลอดใต้อาคาร 38 ด้านหลังอาคาร 23 และผ่านริมสระน้ำไปยังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ โดยเดินบนถนนและทางเดินเท้า และเส้นทางที่ 3 เดินผ่านด้านหน้าอาคาร 29 ด้านหน้าอาคาร 25 ด้านข้างอาคาร 22 และข้ามผ่านสระน้ำไปยังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ โดยเดินบนถนนและทางเดินเท้า (ดังรูปที่ 1)

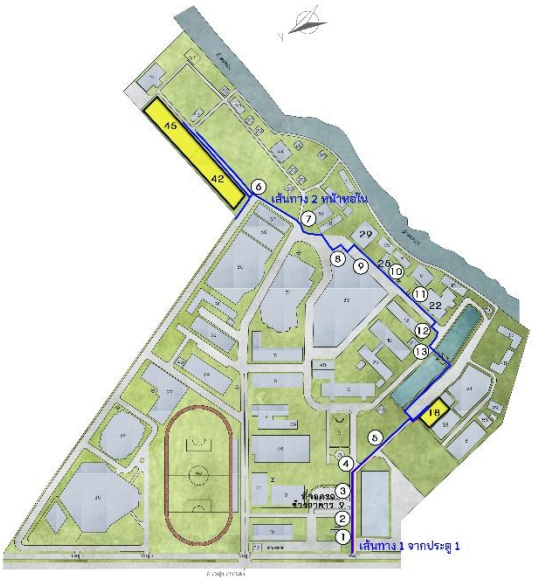


รูปที่ 1 เส้นทางสัญจรไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษของนักศึกษาพิการ
(ที่มา: ปรับปรุงจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, ม.ป.ป.)

ส่วนข้อมูลการใช้งานเส้นทางของนักศึกษาพิการสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ 1. ด้านสภาพพื้นผิวทางเดิน พบว่า บางจุดมีพื้นผิวไม่เรียบ ขรุขระ เป็นหลุมบ่อ มีฝาท่อระบายน้ำที่ไม่เสมอกับพื้นทำให้เดินสะดุด กรณีหลังฝนตกมักจะมีน้ำท่วมขังในส่วนที่เป็นหลุม ทำให้ผิวพื้นทางเดินลื่น 2. ด้านขนาดความกว้างทางเดินเท้า พบว่า ส่วนใหญ่มีความเหมาะสมสำหรับเดินคนเดียว ความกว้างระหว่าง 1.80 – 2.28 ม. แต่มีบางเส้นทางมีความกว้างไม่เหมาะสมหากเดินคู่กัน ความกว้างระหว่าง 0.88 – 1.25 ม. 3. ด้านอุปสรรคในการเดิน พบว่า มีรถจักยานยนต์จอดบนทางเท้าเดินไม่สะดวก วันฝนตกน้ำขังเดินแล้วเปียก แต่ตำแหน่งป้ายบางจุดต่ำเกินไปส่งผลให้เดินชน มีต้นไม้ขวางทางเดิน 4. ด้านทางลาด พบว่า ทางลาดสามารถใช้งานได้เหมาะสม ซึ่งความลาดชันของทางลาด ขึ้น-ลง ทางเดินทางส่วนใหญ่ มีอัตราส่วนเกินกว่า 1:12 5. ด้านผิวต่างสัมผัส พบว่า มีไม่ครบทุกเส้นทาง ไม่สามารถใช้งานได้ เวลาจะข้ามถนนอันตราย 6. ด้านป้ายบอกทาง พบว่า ไม่ได้ใช้งานเพราะมองไม่เห็น สำหรับนักศึกษาที่ตามองเห็นบางจะเห็นป้ายสามารถใช้งานได้ แต่ตำแหน่งป้ายบางจุดต่ำเกินไปส่งผลให้เดินชน ซึ่งพบว่า ป้ายมีความสูงจากพื้นทางเดินเท้าถึงขอบล่างของป้าย 1.45 ม. และ 7. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม พบว่า ควรปรับให้ทางเท้ามีสภาพที่ดี ไม่ให้มีน้ำท่วมขัง ไม่ให้มีรถจักยานยนต์จอดบนทางเท้าเดิน ควรมีสัญญาณเตือนที่ทางแยกข้ามถนน

5.2 แนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ

จากข้อมูลการใช้งานเส้นทางของนักศึกษาพิการ การสำรวจสภาพเส้นทางเดินเท้า และแนวคิดที่ทำการศึกษา นำมาสู่การออกแบบแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ (ดังรูปที่ 2) โดยมีรายละเอียดแนวทางการปรับปรุงเส้นทางเดินเท้า และภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม โดยภาพจำลองการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้าอาศัย Gemini AI ในการสร้างภาพจำลอง (ดังตารางที่ 1 – ตารางที่ 2)



รูปที่ 2 เส้นทางสัญจรไปอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษของนักศึกษาพิการที่เสนอแนวทางปรับปรุง (ที่มา: ปรับปรุงจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 1 ภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม (เส้นทาง 1 จากประตู 1)

สภาพการสำรวจก่อนปรับปรุง	แนวทางการออกแบบปรับปรุง
	
(1) ทางเดินเท้าจากประตู 1 มีรถจักยานยนต์จอดขวาง และไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดินสำหรับคนพิการทางสายตา	(1) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน และควบคุมไม่ให้รถจักยานยนต์จอดบนทางเดินเท้า
	
(2) ไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(2) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน และควรให้มีทางม้าลายข้ามถนน
	
(3) ทางเดินเท้าไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน	(3) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน

ตารางที่ 1 ภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม (เส้นทาง 1 จากประตู 1) (ต่อ)

สภาพการสำรวจก่อนปรับปรุง	แนวทางการออกแบบปรับปรุง
	
(4) ไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(4) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน และควรให้มีทางม้าลายข้ามถนน
	
(5) ขนาดความกว้างทางเดินเท้าไม่เหมาะสม มีต้นไม้ขวางทางเดิน และไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน	(5) ควรขยายขนาดความกว้างทางเดินเท้า จัดให้มีผิวต่างสัมผัสเตือนจุดปลูกต้นไม้ และผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน

ตารางที่ 2 ภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม (เส้นทาง 2 จากหอพักภายใน)

สภาพการสำรวจก่อนปรับปรุง	แนวทางการออกแบบปรับปรุง
	
(6) บริเวณแยกหอพักนักศึกษาไม่มีทางเดินเท้า และไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(6) ควรจัดให้มีทางเดินเท้า ผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน และควรให้มีเส้นทางทางม้าลายข้ามถนน

ตารางที่ 2 ภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม (เส้นทาง 2 จากหอพักภายใน) (ต่อ)

สภาพการสำรวจก่อนปรับปรุง	แนวทางการออกแบบปรับปรุง
	
	
(7-8) ทางแยกถนนไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(7-8) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน และควรให้มีทางม้าลายข้ามถนน
	
(9) จุดข้ามถนนจากอาคารถึงอาคารอีกฝั่งไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(9) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน จัดทำทางลาด และควรให้มีทางม้าลายข้ามถนน
	
(10) หน้าอาคาร 25 ไม่มีทางเดินเท้า ต้องเดินบนถนนเสี่ยงให้เกิดอันตราย	(10) จัดทำทางเดินเท้า และจัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน

ตารางที่ 2 ภาพเปรียบเทียบแนวทางการออกแบบปรับปรุงเส้นทางเดินเท้ากับเส้นทางเดินเท้าเดิม (เส้นทาง 2 จากหอพักภายใน) (ต่อ)

สภาพการสำรวจก่อนปรับปรุง	แนวทางการออกแบบปรับปรุง
	
(11) ทางเดินเท้าไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน	(11) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน
	
(12) ทางแยกถนนไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(12) จัดทำทางเดินเท้า และผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน รวมทั้งให้มีทางม้าลายข้ามถนน
	
(13) จุดข้ามถนนจากอาคารถึงอาคารอีกฝั่งไม่มีพื้นผิวต่างสัมผัสบอกบอกเตือนจุดข้ามถนน	(13) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนน และควรให้มีทางม้าลายข้ามถนน

สำหรับปัญหาและอุปสรรคของทางเดินเท้าให้ด้านอื่น ๆ ได้แก่

- สภาพพื้นผิวทางเดินที่มีพื้นผิวไม่เรียบ ขรุขระเป็นหลุมบ่อ แนวทางการออกแบบปรับปรุงผิวพื้นทางเดินเท้าควรปรับปรุงผิวพื้นให้ราบเรียบไม่ขรุขระ

- ตำแหน่งป้ายบอกทางบางจุดความสูงน้อยเกินไปส่งผลให้เดินชน ควรปรับปรุงความสูงป้ายให้สูงอย่างน้อย 2.00 ม. จากระดับพื้นถึงขอบล่างของป้าย

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ กรณีศึกษา เส้นทางจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา พบว่า การใช้งานเส้นทางเดินเท้าของนักศึกษากลุ่มเป้าหมายส่วนใหญ่เป็นคนพิการทางการมองเห็น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ไม้เท้าในการเดิน และพึ่งพาคนนำทาง หรือถามคนให้ช่วยบอกทาง แต่นักศึกษาตาเลือนรางบางครั้งสามารถเดินไปเองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาคนนำทาง และลักษณะปัญหาสภาพเส้นทางเดินเท้าจากหอพักนักศึกษา และประตู 1 ถึงอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ ได้แก่ สภาพพื้นผิวทางเดินไม่เรียบ ขรุขระ ขนาดทางเดินเท้าแคบไม่เหมาะสม มีอุปสรรคในการเดิน เช่น มีรถจักยานยนต์จอดบนทางเท้า ป้ายบางจุดต่ำเกินไปส่งผลให้เดินชน มีต้นไม้ขวางทางเดิน ผิวต่างสัมผัสมีไม่ครบทุกเส้นทาง และป้ายบอกทางไม่สามารถใช้งานได้ตามความสามารถของแต่ละคน สอดคล้องกับการศึกษาของ นิธิวดี ทองป้อง และคณะ [6] ที่สรุปปัญหาที่พบของทางเดินเท้า ส่วนผลการเสนอแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการ สามารถแบ่งได้เป็น 2 เส้นทาง คือ เส้นทางทางที่ 1 จากประตู 1 ไปยังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ และเส้นทางทางที่ 2 จากหอพักในมหาวิทยาลัยไปยังอาคารศูนย์การศึกษาพิเศษ โดยมีแนวทางการปรับปรุงทางเดินเท้า คือ 1) ผิวพื้นทางเดินเท้าควรปรับปรุงผิวพื้นให้ราบเรียบไม่ขรุขระ 2) ควบคุมไม่ให้รถจักยานยนต์

จอดบนทางเดินเท้า 3) จัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกทิศทางการเดิน ผิวต่างสัมผัสบอกเตือนจุดข้ามถนนที่เป็นทางลาด 4) จัดทำทางม้าลายข้ามถนน 5) จัดทำทางลาดข้ามถนนเพิ่มในจุดที่ไม่มีทางลาด 6) ขยายขนาดความกว้างทางเดินเท้าในจุดที่ทางเดินเท้ามีความกว้างไม่เหมาะสม 7) ควรจัดให้มีผิวต่างสัมผัสบอกเตือนก่อนถึงต้นไม้ที่อยู่บนทางเดินเท้า และ 8) ควรปรับปรุงความสูงป้ายให้สูงอย่างน้อย 2.00 ม. จากระดับพื้นถึงขอบล่างของป้าย ในกรณีที่ป้ายที่มีความสูงน้อย ซึ่งแนวทางออกแบบทางเดินเท้าได้อาศัยแนวคิดการออกแบบทางเท้าและทางเข้าสำหรับคนทุกคน [7] และข้อแนะนำการออกแบบบาทวิถีและสิ่งแวดล้อมเพื่อทุกคน [8] จากผลการออกแบบทางเดินเท้าสำหรับนักศึกษาพิการมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ นิธิวดี ทองป้อง และคณะ [9] เกี่ยวกับแนวทางปรับปรุงและออกแบบทางเดิน ทั้งเรื่องการซ่อมแซมผิวพื้นทางเดินเท้า และจัดทำสิ่งอำนวยความสะดวกให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และสำหรับการศึกษาครั้งนี้จะสามารถนำไปสู่การนำเสนอผลเพื่อการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงทางเดินเท้าสำหรับคนพิการของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เพื่อให้คนทุกกลุ่มสามารถใช้งานทางเดินเท้าได้อย่างสะดวก และปลอดภัย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษาพิการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศราวุฒิ ใจอดทน อาจารย์ที่ปรึกษาในรายวิชาที่ให้คำปรึกษา และข้อแนะนำสำหรับการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเรียนในรายวิชา การออกแบบเพื่อคนทั้งมวล ปีการศึกษา 2568 จนการศึกษาสำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. อ้างอิง

[1] กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ. (2569). สถานการณ์คนพิการในประเทศไทย. เข้าถึงเมื่อ 20 พฤษภาคม 2569 . เข้าถึงได้จาก https://dep.go.th/th/law-academic/knowledgebase/disabled-person-situation/สถานการณ์คนพิการ-31-ธันวาคม-2568

[2] เจษฎา จงสิริจตุพร. (2566). พิการ (ไม่) พิเศษ : สำรวจปัญหาความเหลื่อมล้ำของผู้พิการกับการศึกษาในสังคมไทย. เข้าถึงเมื่อ 20 พฤษภาคม 2569. เข้าถึงได้จาก https://hand.co.th/blog/Seethinkcen_202312_educationanddisability

[3] หน่วยบริการสนับสนุนนักศึกษาพิการ ศูนย์การศึกษาพิเศษ. (ม.ป.ป.). รายงานผลการดำเนินงานหน่วยบริการสนับสนุนนักศึกษาพิการ 2567. เข้าถึงเมื่อ เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2569. เข้าถึงได้จาก. เข้าถึงได้จาก drive.google.com/file/d/XqbVkDue0sw6Z3xLELCK2zs4FdmLtARh/view

[4] ไตรรัตน์ จารุทัศน์. (2558). คู่มือการออกแบบเพื่อทุกคน Universal Design Guide Book. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เทพเพ็ญวานิสย์.

[5,7] ธนาศรี สัมพันธารักษ์ เพ็ชรยิ้ม. (2560). Age-friendly Built Environments สุขตามวัย : สิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างที่เป็นมิตรกับผู้สูงอายุ. กรุงเทพฯ: บริษัท อี.ที. พับลิชชิง จำกัด

[6,9] นิธิวดี ทองป้อง, สัญชัย สันติเวส, ผกาสวรรค์ ปรัชญคุปต์, ภูวเรศ อรรคอุดม, ธีรพัฒน์ หนองหาร พิทักษ์, วรุตม์ พฤฒิธรรมกูล, บุษบามินตรา ตั้งอยู่,

และอนุสิทธิ์ นันทพรม. (2564) การศึกษาแนวทางการปรับปรุงและจัดระเบียบทางเดินเท้ารวมถึงสภาพภูมิทัศน์เพื่อคนทั้งมวล กรณีศึกษา ย่านสถานศึกษาโดยรอบบริเวณศูนย์ราชการจังหวัดขอนแก่น. วารสารวิชาการ พลังงานและสิ่งแวดล้อมในอาคาร, 5 (มกราคม), 46-55.

[8] สมาคมสถาปนิกผังเมืองไทย. (2561). ข้อแนะนำการออกแบบบาทวิถีและสิ่งแวดล้อมเพื่อทุกคน. กรุงเทพฯ: สมาคมสถาปนิกผังเมืองไทย.

แนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ด้วยระบบระบายอากาศธรรมชาติ

Sustainable Architectural Design of Modern Automotive Technology Training Facilities Through Natural Ventilation and Passive Cooling Techniques

กรรณิกา ถุนาพรรณ์[1], สุรสิทธิ์ พ่อค้า[2], มัณฑนา ทองสุพล[3], หัสยา สิงห์ศรี[4] และธันยนันท์ พิมพะสาลี[5]

[1-5] มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ 62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

*กรรณิกา ถุนาพรรณ์: Kannika.tu@ksu.ac.th, 081-8015036

บทคัดย่อ

การพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ส่งผลให้สถาบันการศึกษาจำเป็นต้องมีอาคารปฏิบัติการที่รองรับการเรียนรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติควบคู่กัน บทความนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ตามหลักสถาปัตยกรรมยั่งยืน โดยประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศธรรมชาติและเทคนิคการลดความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Cooling Techniques) กรณีศึกษาอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งมีพื้นที่ใช้สอยรวมไม่เกิน 1,000 ตารางเมตร อาคารได้รับการออกแบบด้วยโครงสร้างช่วงกว้าง (Wide-Span Structure) เพื่อรองรับพื้นที่ปฏิบัติการแบบเปิดโล่ง (Open Workshop) และจัดวางพื้นที่การเรียนรู้แบบผสมผสาน โดยกำหนดให้ชั้นล่างเป็นพื้นที่ปฏิบัติการยานยนต์ไฟฟ้าและชั้นลอยเป็นห้องเรียนที่สามารถมองเห็นกิจกรรมการฝึกปฏิบัติได้โดยตรง (Visual Connectivity)

การศึกษามุ่งเน้นการวางผังอาคารให้สอดคล้องกับทิศทางของลมประจำถิ่น โดยวางแนวอาคารตามแกนเหนือ–ใต้เพื่อลดผลกระทบจากรังสีความร้อนด้านทิศตะวันออกและตะวันตก พร้อมออกแบบผนังชั้นบนด้วยระบบช่องเปิดแบบ Z-Louver ตลอดแนวอาคารทั้งสองด้าน เพื่อส่งเสริมการระบายอากาศแบบไหลผ่าน (Cross Ventilation) และการระบายความร้อนสะสมภายในอาคาร พื้นที่กันสาดต่อเนื่องด้านหน้าอาคารทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์บังแดด (Shading Device) และป้องกันฝนสาด ช่วยให้สามารถเปิดใช้งานช่องระบายอากาศได้ตลอดเวลา ขณะที่ปริมาตรภายในอาคารที่มีความสูงโปร่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนตัวของอากาศและเสริมสภาวะน่าสบายทางความร้อน (Thermal Comfort)

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การวางผังอาคารร่วมกับระบบระบายอากาศธรรมชาติช่วยลดการพึ่งพาระบบปรับอากาศ และเพิ่มคุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคาร นอกจากนี้ แนวทางดังกล่าวยังสนับสนุนการเรียนรู้ด้านยานยนต์ไฟฟ้า และสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบอาคารฝึกอบรมในภูมิอากาศร้อนชื้นได้

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า, สถาปัตยกรรมยั่งยืน, การระบายอากาศธรรมชาติ, Z-Louver, Passive Cooling, Climate-Responsive Design

Abstract

The rapid transition toward electric mobility has created an increasing demand for specialized educational facilities that effectively integrate theoretical instruction with hands-on technical training. This study presents a sustainable architectural design approach for an Electric Vehicle (EV) Training Center through the application of natural ventilation and passive cooling strategies. The proposed facility, located at Kalasin University, Thailand, comprises a total usable area of less than 1,000 m² and is conceived as a climate-responsive learning environment that supports both academic and practical activities within a unified architectural framework.

The spatial configuration incorporates a high-volume workshop space at the ground level for EV maintenance, charging, and technical operations, while a mezzanine level accommodates classrooms and observation areas that maintain visual connectivity with the workshop below. The building form and orientation are strategically aligned along the north–south axis to minimize solar heat gain from the east and west facades and to maximize prevailing wind exposure. Operable Z-louver systems integrated into the upper building envelope on both longitudinal facades facilitate effective cross ventilation, enhancing indoor air movement and promoting passive heat dissipation. In addition, a continuous external canopy functions as a shading device and rain screen, enabling year-round operation of the ventilation openings.

The findings demonstrate that the integration of climate-responsive building orientation and natural ventilation strategies effectively reduces dependence on mechanical cooling systems while enhancing indoor environmental quality. Furthermore, the proposed design supports electric vehicle (EV) education and training and provides a practical prototype for sustainable training facilities in hot-humid climates.

***Keywords**:* Electric Vehicle Training Center, Sustainable Architecture, Climate-Responsive Design, Natural Ventilation, Passive Cooling, Thermal Comfort, Building Envelope

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

การเปลี่ยนผ่านสู่เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ส่งผลให้สถาบันอุดมศึกษาต้องพัฒนาพื้นที่การเรียนรู้และฝึกปฏิบัติที่สามารถรองรับการผลิตกำลังคนด้านเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาคารปฏิบัติการยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญในฐานะโครงสร้างพื้นฐานทางการศึกษาที่สนับสนุนการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการ การวิจัย และการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรมและชุมชน

อาคารประเภทดังกล่าวมีข้อกำหนดเฉพาะด้านความปลอดภัยจากระบบไฟฟ้าแรงดันสูง แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงาน ดังนั้น การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพการใช้งาน ความปลอดภัย และคุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคารควบคู่กันไป โดยเฉพาะในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย ซึ่งมีผลต่อการใช้พลังงานและสภาวะน่าสบายของผู้ใช้งาน แนวคิดการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-Responsive Design) โดยใช้ระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Ventilation) และเทคนิคการลดความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Cooling) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของอาคาร

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์มีพันธกิจในการผลิตบัณฑิตนวัตกร พัฒนางานวิจัยและนวัตกรรม และถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน การพัฒนาอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่จึงเป็นกลไกสำคัญในการสนับสนุนการเรียนการสอน การวิจัย และการบริการวิชาการด้านยานยนต์ไฟฟ้า ตลอดจนเป็นต้นแบบอาคารการศึกษาที่ส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ โดยประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศธรรมชาติร่วมกับการวางผังอาคารที่สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศ เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ที่ปลอดภัย ประหยัดพลังงาน และยั่งยืนสำหรับสถาบันการศึกษาในอนาคต [1], [6]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาและนำเสนอแนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ที่รองรับการเรียนการสอน การวิจัย และการฝึกปฏิบัติด้านยานยนต์ไฟฟ้า

2. เพื่อประยุกต์ใช้ระบบระบายอากาศธรรมชาติและแนวทางลดความร้อนของอาคารในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสภาวะน่าสบายภายในอาคาร

3. เพื่อพัฒนาต้นแบบอาคารปฏิบัติการยานยนต์ไฟฟ้าที่มีความปลอดภัย ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

2.1 ขอบเขตของการศึกษา

ใช้แนวคิดสถาปัตยกรรมยั่งยืนและการระบายอากาศธรรมชาติ มีกระบวนการดำเนินงานตั้งแต่การศึกษาความต้องการใช้งาน การวิเคราะห์พื้นที่ตั้งโครงการ การวางผังและออกแบบสถาปัตยกรรม การออกแบบระบบระบายอากาศธรรมชาติและองค์ประกอบลดความร้อนของอาคาร การคัดเลือกวัสดุก่อสร้างและวัสดุตกแต่ง งานอาคารปฏิบัติการ การจัดทำแบบก่อสร้างและประมาณราคางานก่อสร้าง แบ่งงวดงาน ตลอดจนการควบคุมและตรวจสอบงานก่อสร้างให้เป็นไปตามแบบและมาตรฐานแบบรูปรายการที่กำหนด ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมพื้นที่ใช้สอยรวมไม่เกิน 1,000 ตร.ม. ประกอบด้วยพื้นที่ปฏิบัติการยานยนต์ไฟฟ้า ห้องเรียน พื้นที่สนับสนุนการเรียนรู้ และพื้นที่บริการที่เกี่ยวข้อง มุ่งศึกษาประสิทธิภาพการจัดพื้นที่ใช้งาน การระบายอากาศธรรมชาติ ความเหมาะสมของวัสดุ และแนวทางการพัฒนาอาคารต้นแบบสำหรับสถาบันการศึกษาในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

3.แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

(Literature Review) 5 ประเด็นหลัก

3.1 สถาปัตยกรรมยั่งยืน (Sustainable Architecture)

เป็นแนวคิดการออกแบบอาคารที่มุ่งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรตลอดระยะเวลาการใช้งานอาคาร โดยคำนึงถึงการใช้พลังงาน การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การจัดการทรัพยากร กำหนดคุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการใช้งาน เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม [1], [5], [6]

3.2 การออกแบบที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-Responsive Design)

เป็นการออกแบบที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศเป็นการนำปัจจัยด้านการรับแสงแดด ลม อุณหภูมิ และความชื้นมาใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรูปแบบอาคาร การวางผังอาคาร ทิศทางอาคาร และองค์ประกอบอาคาร เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ ช่วยลดภาระการใช้พลังงานและเพิ่มสภาวะน่าสบายของผู้ใช้อาคาร [7], [8]

3.3 ระบบระบายอากาศธรรมชาติ (Natural Ventilation Systems)

เป็นการใช้แรงลมและความแตกต่างของอุณหภูมิในการถ่ายเทอากาศภายในอาคาร โดยไม่พึ่งพาเครื่องจักรกล หลักการสำคัญประกอบด้วยการระบายอากาศแบบไหลผ่าน (Cross Ventilation) และการระบายอากาศแบบปล่องความร้อน (Stack Ventilation) ซึ่งช่วยลดความร้อนสะสม เพิ่มคุณภาพอากาศภายในอาคาร และลดการใช้พลังงานจากระบบปรับอากาศ [4], [7]

3.4 เทคนิคการลดความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Cooling Techniques)

เป็นการออกแบบอาคารเพื่อลดการรับและสะสมความร้อนโดยใช้วิธีการทางสถาปัตยกรรม เช่น การวางแนวอาคารที่เหมาะสม การใช้กันสาดและอุปกรณ์บังแดด การเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติลดการถ่ายเทความร้อน รวมถึงการออกแบบช่องเปิดเพื่อส่งเสริมการระบายอากาศธรรมชาติ ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาระบบปรับอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร [1], [6], [8]

3.5 การออกแบบพื้นที่เรียนรู้และปฏิบัติการ (Educational Workshop Design)

เป็นการออกแบบพื้นที่เรียนรู้และปฏิบัติการมุ่งสร้างสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเรียนรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ให้ความสำคัญกับความยืดหยุ่นในการใช้งาน ความปลอดภัย การมองเห็นกิจกรรมการเรียนรู้ร่วมกัน และการเชื่อมโยงระหว่างผู้สอน ผู้เรียน และพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อสนับสนุนการเรียนรู้แบบลงมือปฏิบัติ (Experiential Learning) และการพัฒนาทักษะวิชาชีพในอนาคต [3]

4.วิธีดำเนินการศึกษา (Methodology) 5 ข้อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงกรณีศึกษา (Design-Based Case Study) เป็นการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่โดยมีการดำเนินการ มี 5 ดังนี้ 1.การศึกษาความต้องการและกำหนดขอบเขตโครงการ (Programming),2.วิเคราะห์พื้นที่ตั้งและสภาพภูมิอากาศ (Site & Climate Analysis,3.ออกแบบสถาปัตยกรรมและระบบระบายอากาศธรรมชาติ (Architectural Design Development), 4.คัดเลือกวัสดุและจัดทำประมาณราคา (Material Selection & BOQ) และ 5.จัดทำแบบก่อสร้าง ควบคุม และติดตามงานก่อสร้าง (Construction Supervision)

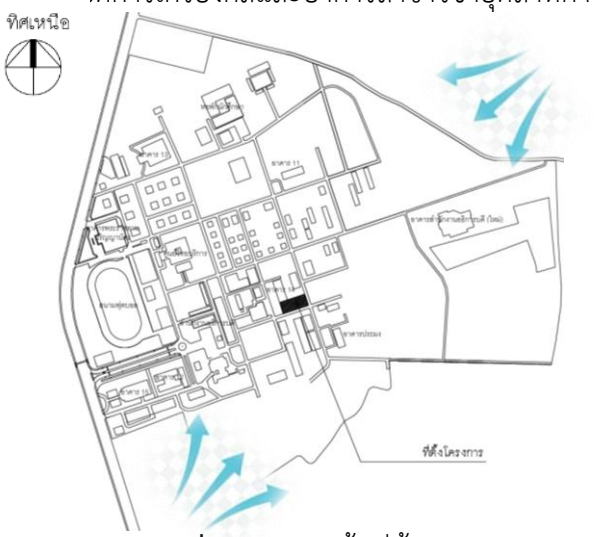
4.1 การศึกษาความต้องการและกำหนดขอบเขตโครงการ (Programming)

มีผู้ใช้อาคารประกอบด้วย อาจารย์สาขาวิชาเครื่องกล และสาขาวิชาแมคคาทรอนิค จำนวน 4-8 คน, เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการห้องเครื่องมือ จำนวน 1 คน, นักศึกษา จำนวน ประมาณ 60-70 คน ทั้งในระดับปริญญาตรี 4 ชั้นปี และในระดับ ปวส. ทั้ง 2 ชั้นปี และมีเครื่องจักรติดตั้งในอาคาร ดังนี้ แม่แรงตะเข่,แท่นอัดไฮดรอลิกส์, เครื่องเติมลมไนโตรเจน, เครื่องอัดอากาศและเครื่องทำลมแห้ง, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่, ลิฟต์ยกรถ 2 เสา คานบน, ลิฟต์กรรไกรสำหรับตั้งศูนย์ล้อ, เครื่องตั้งศูนย์ล้อ, เครื่องถ่วงล้อ

รถยนต์ เครื่องถอดยางรถยนต์, เครื่องมือตรวจสอบอาการเสีย และเครื่องไดนาโมเทส และเป็นอาคารประเภทอาคารสาธารณะ ขนาดไม่เกิน 1,000 ตรม. ขนาด 2 ชั้น

4.2 วิเคราะห์พื้นที่ตั้งและสภาพภูมิอากาศ (Site & Climate Analysis) [7]

ด้านพื้นที่ มีพื้นที่ประมาณ 1,200 ตร.ม. ชั้นที่ 1 ประกอบด้วยพื้นที่ ดังนี้ ลานฝึกภาคปฏิบัติ,ทดสอบสรรถนะยานยนต์ห้องปฏิบัติการ,ห้องเรียน ห้องเครื่องมือ และห้องน้ำ และชั้นที่ 2 ห้องพักอาจารย์ ห้องปฏิบัติการเรียน และห้องน้ำ ตั้งอยู่ระหว่างอาคารปฏิบัติการเครื่องกลและอาคารสาขาวิชาอุตสาหการ



รูปที่ 1 ตำแหน่งพื้นที่ตั้งโครงการภายในมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ (ลมตะวันตกเฉียงใต้ ในช่วงฤดูฝน และลมตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูหนาว)

พื้นที่โครงการได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมหลักของประเทศไทย ได้แก่ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในช่วงฤดูฝน และ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูหนาว ดังนั้น การวางผังอาคารจึงคำนึงถึงทิศทางลมทั้งสองฤดู เพื่อส่งเสริมการระบายอากาศตามธรรมชาติ (Natural Ventilation) และการระบายอากาศแบบไหลผ่าน (Cross Ventilation) ซึ่งช่วยลดความร้อนสะสมภายในอาคารและลดการพึ่งพาระบบปรับอากาศ

4.3 ออกแบบสถาปัตยกรรมและระบบระบายอากาศธรรมชาติ (Architectural Design Development),

การออกแบบอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ ภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมยั่งยืนและการออกแบบที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศ โดยวางอาคารตามแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ–ตะวันออกเฉียงใต้ เพื่อรับลมประจำและส่งเสริมการระบายอากาศแบบไหลผ่าน (Cross Ventilation) [4] ภายในอาคาร ด้านยาวของอาคารติดตั้งช่องเปิดระบายอากาศแบบ Z-Louver เพื่อเพิ่มการรับลมธรรมชาติ ลดฝนสาด และควบคุมความร้อนจากแสงอาทิตย์ ขณะที่พื้นที่ปฏิบัติการได้รับการออกแบบให้มีความสูงโปร่งและมีปริมาตรอากาศมาก เพื่อลดการสะสมความร้อนภายในอาคาร นอกจากนี้ ยังติดตั้งพัดลมระบายอากาศแบบลูกหมุนบนหลังคาจำนวน 6 ตัว เพื่อเสริมการระบายอากาศในแนวดิ่งตามหลักการลอยตัวของอากาศร้อน (Stack Effect) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศ ลดความร้อนสะสม และลดการพึ่งพาระบบปรับอากาศเชิงกล ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

4.4 คัดเลือกวัสดุและจัดทำประมาณราคา (Material Selection & BOQ)

อาคารอยู่ในงบประมาณก่อสร้าง โดยประมาณ 16,880,000.00 บาท เป็นค่างานก่อสร้าง 10,180,700.0 บาท ค่าครุภัณฑ์และการติดตั้ง 6,699,357.00 บาท คิดราคาโดยรวมค่า Factor F ดังนี้ หมวดงานวิศวกรรมโครงสร้าง 2,833,271.0 บาท, หมวดงานสถาปัตยกรรม 5,165,803.0 บาท, หมวดงานระบบไฟฟ้า 1,493,052.0 บาท, หมวดงานระบบสุขาภิบาล 439,784.0 บาท, หมวดงานอื่นๆ 210,467.0 บาท

4.5 จัดทำแบบก่อสร้าง ควบคุมและติดตามงานก่อสร้าง (Construction Supervision)

โครงการก่อสร้างแบ่งงวดงาน ออกเป็น 8 งวดงาน เพื่อให้สามารถติดตามคุณภาพ ระยะเวลา และ

งบประมาณได้อย่างเป็นระบบ มีระยะเวลาการดำเนินงานก่อสร้างแล้วเสร็จจำนวน 255 วัน ดังนี้

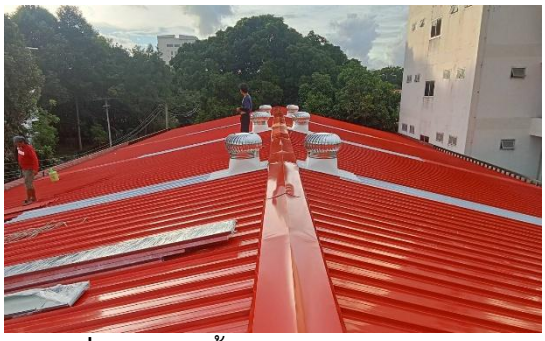
ตารางที่ 1 ปริมาณการแบ่งงวดงานก่อสร้างของโครงการ

งวดงาน	รายละเอียดงานหลัก
งวดที่ 1	เตรียมพื้นที่ก่อสร้าง งานสำรวจ วางผังอาคาร งานเสาเข็ม ฐานราก เสาตอม่อ และงานรื้อย้ายสิ่งกีดขวาง
งวดที่ 2	งานโครงสร้างชั้น 1 ได้แก่ ถมดิน บดอัด งานคาน พื้นสำเร็จรูป พื้นคอนกรีต และระบบสุขาภิบาลชั้น 1
งวดที่ 3	งานโครงสร้างชั้น 2 ได้แก่ คาน พื้น เสารับคานหลังคา และระบบสุขาภิบาลชั้น 2
งวดที่ 4	งานโครงสร้างหลังคา งานมุงหลังคา ก่อผนัง บันได และติดตั้งพัดลมลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา
งวดที่ 5	งานระบบไฟฟ้าและเครือข่าย งานฉาบผนัง ติดตั้งวงกบประตู-หน้าต่าง และฝ้าเพดาน
งวดที่ 6	งานตกแต่งผิวพื้น ผนัง ระบบระบายน้ำฝน ระบบไฟฟ้า ระบบท่อลม และติดตั้งระแนงด้านหน้าอาคาร
งวดที่ 7	งานสุขภัณฑ์ ราวกันตก สีอาคาร บานประตู-หน้าต่าง เกล็ดระบายอากาศ ระบบบำบัดน้ำเสีย และติดตั้งครุภัณฑ์
งวดที่ 8	งานครุภัณฑ์ส่วนที่เหลือ ระบบควบคุมไฟฟ้า งานภูมิทัศน์ ลานจอดรถ ระบบระบายน้ำ และส่งมอบงาน

ในช่วงงวดงานที่ 4 และงวดงานที่ 7 ได้มีการติดตั้งองค์ประกอบสำคัญของระบบระบายอากาศธรรมชาติ ได้แก่ พัดลมลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา (Roof Turbine Ventilator) และแผงเกล็ดระบายอากาศ (Z-Louver) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการส่งเสริมการระบายอากาศแบบผสมผสานระหว่าง Cross Ventilation [4]และ Stack Effect[4], [6] ตามแนวคิดการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น



รูปที่ 2 งานติดตั้งบานเกล็ดระบายอากาศ



รูปที่ 3 งานติดตั้งพัดลมลูกหมุนธรรมชาติ

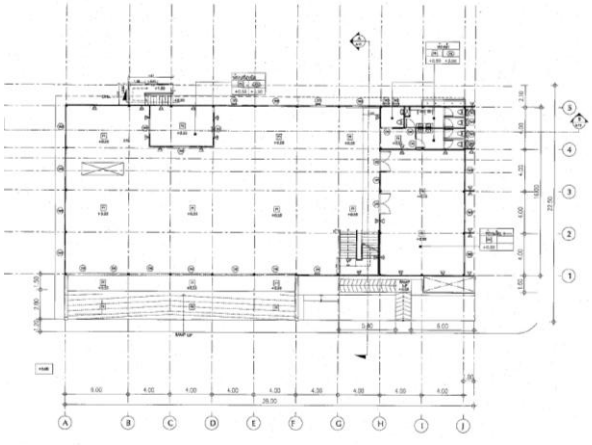
4.6 การออกแบบและการนำเสนอ



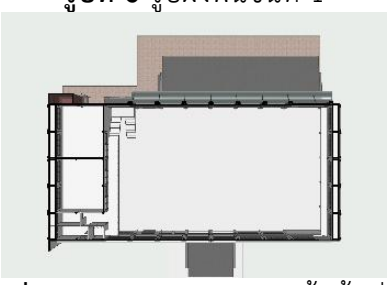
รูปที่ 4 มุมมอง Perspective ด้านหน้าอาคาร



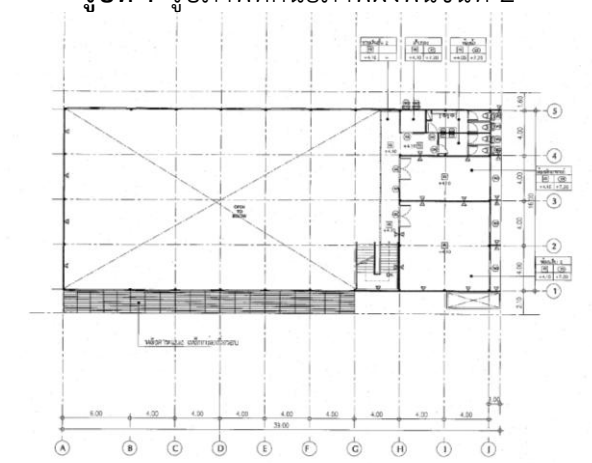
รูปที่ 5 รูปภาพทัศนียภาพผังพื้นชั้นที่ 1



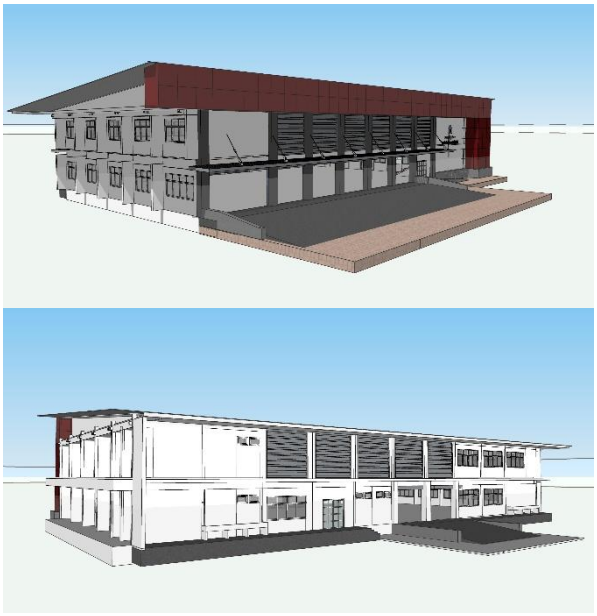
รูปที่ 6 รูปผังพื้นชั้นที่ 1



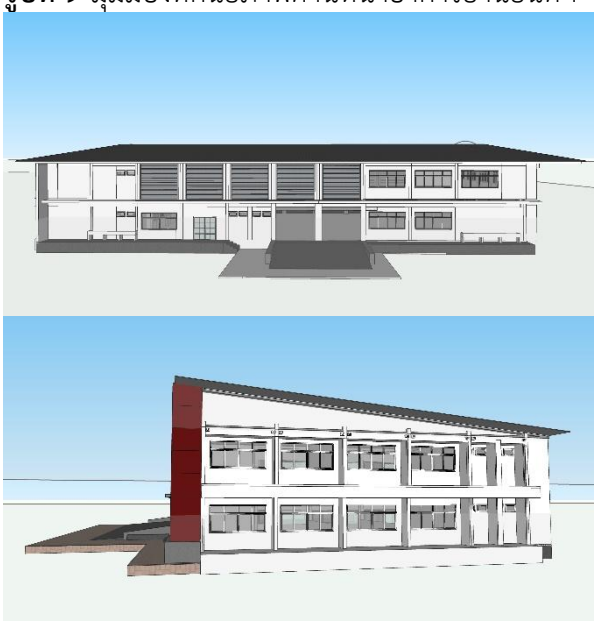
รูปที่ 7 รูปภาพทัศนียภาพผังพื้นชั้นที่ 2



รูปที่ 8 รูปผังพื้นชั้นที่ 2



รูปที่ 9 มุมมองทัศนียภาพด้านหน้าอาคารยานยนต์ฯ



รูปที่ 10 มุมมองทัศนียภาพด้านข้างอาคารยานยนต์ฯ

ประสิทธิภาพของแนวทางการออกแบบประเมินจากความสอดคล้องกับหลักการ Climate-Responsive Design ประสิทธิภาพการระบายอากาศแบบ Cross Ventilation และ Stack Effect รวมทั้งการวิเคราะห์การลดการรับความร้อนของอาคารในเชิงแนวคิดเป็นเพียง ผลลัพธ์เชิงทัศนะและการออกแบบ

โดยออกแบบส่วนหน้าและส่วนหลังอาคารบริเวณชั้น 2 เป็นงานติดตั้งบานเกล็ดระบายอากาศยาวถึง 30 เมตร (ส่วนหน้าและหลังรวมคิดเป็น 180 ตร.ม) และชั้นล่างส่วนด้านหน้าเป็นประตูเหล็กม้วนตลอดแผง เวลาใช้งานเปิดขึ้นทุกบานด้วยระบบรอกอัตโนมัติ และมีระแนงด้านหน้ายาวตลอดหน้าอาคาร มีพัดลมลูกหมุนธรรมชาติ ขนาด 24 นิ้ว จำนวน 6 ตัว เพื่อเสริม Stack Effect ซึ่งถือเป็นการ“ออกแบบ

เบื้องต้น” และเมื่อคำนวณ สมรรถนะของพัดลมลูกหมุน ต่อปริมาตรอากาศของโถงปฏิบัติการ ได้ดังนี้

- ปริมาตรอากาศของโถงปฏิบัติการ $V \approx 550 \times 8 = 4{,}400\ m^3$
- ใช้ค่ากลาง 1,500 m^3/h ต่อเครื่อง จากความเร็วลมภายนอก ต่ออัตราระบายต่อเครื่อง
- $Q_{total} \approx 6 \times 1{,}500 = 9{,}000\ m^3/h$
- $ACH = \frac{Q}{V} = \frac{7{,}800}{4{,}400} \approx 2.05$ ครั้ง/ชั่วโมง

เมื่อคำนวนอัตราการหมุนเวียนอากาศ (ACH) ค่าACH ที่แนะนำตามประเภทของพื้นที่ มีดังนี้ คือ

ตารางที่ 2 ค่าACH แนะนำที่เหมาะสม ในประเภทพื้นที่อาคารต่างๆ

ประเภทพื้นที่	ACH แนะนำที่เหมาะสม
ห้องเรียนธรรมชาติ	3-6
โรงฝึกงานทั่วไป	6-10
EV Workshop / Battery Area	8-12+

เมื่อ ต้องการ ACH ≈ 8 ครั้ง/ชั่วโมง

$Q_{required} = 8 \times 4{,}400 = 35{,}200\ m^3/h$

จำนวนพัดลมที่ต้องการให้เหมาะสม

$$N = \frac{35{,}200}{1{,}500} \approx 23 \text{ ตัว}$$

ซึ่งมากเกินไปสำหรับการใช้พัดลมลูกหมุนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นแนวทางที่เหมาะสมคือ ใช้ “ระบบผสม” (Hybrid Ventilation) พัดลมลูกหมุน 6 ตัว (ช่วยระบายอากาศระดับสูง) ช่องเปิด Z-Louver ขนาดใหญ่ ประตูม้วนเปิดเต็มแนว และมีพัดลมดูดอากาศเชิงกลเฉพาะจุด (Exhaust Fan) บริเวณชาร์จแบตเตอรี่หรือพื้นที่ซ่อม

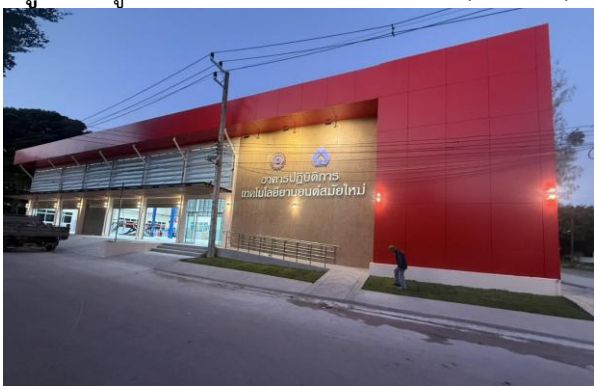
และตลอดแนวเสาในอาคารชั้น 1 ตำแหน่งระยะ 1.20 เมตร. จากพื้นอาคาร จะมีการติดถังดับเพลิงขนาด 10 ปอนด์ (Dry Chemical ABC) บริเวณเสา เว้นทุกๆ 1 ต้น เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น แบตเตอรี่เกิดความร้อนสูงจนเกิดการลุกไหม้ หรือมีแก๊สพิษรั่วไหล สามารถจัดการปัญหา หรือช่วยลดความรุนแรงของเพลิงไหม้ได้ และมี ถังชนิด CO_2 ขนาด 10 ปอนด์ อย่างน้อย 2 ถัง ใกล้พื้นที่ซ่อมระบบไฟฟ้า ตู้ MDB และบริเวณเครื่องชาร์จ EV เพราะเมื่อใช้งานจะไม่ทิ้งคราบและเหมาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 8 รูปภาพขณะดำเนินงานงวดที่ 6 (บางส่วน)



รูปที่ 9 รูปภาพขณะดำเนินงานงวดที่ 7 (บางส่วน)



รูปที่ 10 อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ แล้วเสร็จ

5.ผลการออกแบบและอภิปรายผล

(Results and Discussion) [4], [6] ตามหลักวิเคราะห์ 5 ด้าน ดังนี้ Architectural Concept, Site Analysis, Space Planning Functions, Natural



รูปที่ 11 ติดตั้งและสาธิตการใช้ครุภัณฑ์ประกอบ

Ventilation Strategy และ Passive Cooling Techniques

การวางอาคารและกลยุทธ์การระบายอากาศธรรมชาติ เป็นการวางอาคารตามแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ–ตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้ด้านยาวของอาคารสามารถรับอิทธิพลจากทิศทางลมประจำฤดูของภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูฝนและลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว ซึ่งเอื้อต่อการเกิดการระบายอากาศแบบไหลผ่าน (Cross Ventilation) ภายในพื้นที่ปฏิบัติการอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี

การออกแบบช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วยแผงระบายอากาศแบบ Z-Louver ตลอดแนวด้านยาวของอาคาร ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับลมธรรมชาติ ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่อาคาร และลดผลกระทบจากฝนสาดและรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ขณะเดียวกัน และพัดลมลูกหมุนบนหลังคา ช่วยส่งเสริมการระบายอากาศตามธรรมชาติและการพาความร้อนออกจากอาคารตามหลัก Stack Effect ส่งผลให้พื้นที่ปฏิบัติการมีการถ่ายเทอากาศอย่างต่อเนื่องและลดการสะสมความร้อนภายในอาคาร

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ นพพร [3] ที่เสนอว่า การออกแบบอาคารในภูมิอากาศร้อนชื้นควรให้ความสำคัญกับการวางผังอาคารตามทิศทางลมประจำ การออกแบบช่องเปิด และการใช้ระบบระบายอากาศธรรมชาติ เพื่อเพิ่มการไหลเวียนของอากาศและลดการใช้พลังงานจากระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับ ปริญญา [4] ที่อธิบายว่า การผสมผสานมาตรการ Passive Design หลายรูปแบบ เช่น การบังแดด การระบายอากาศ และการลดการรับรังสีความร้อนจากหลังคา สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านสภาวะน่าสบายภายในอาคารได้ดีกว่าการใช้มาตรการเพียงวิธีเดียว

พื้นที่ภายในอาคารได้รับการออกแบบให้มีความสูงและปริมาตรอากาศมากกว่าพื้นที่เรียนทั่วไป ส่งเสริมการสะสมตัวของอากาศร้อนในระดับสูงและลดผลกระทบต่อพื้นที่ใช้งานหลัก เนื่องจากอาคารออกแบบให้ชั้นล่างเป็นพื้นที่ปฏิบัติการแบบเปิดโล่งและชั้นลอยเป็นห้องเรียน จึงได้นำหลักการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Stack Effect) มาใช้ประกอบการออกแบบ โดยจัดให้มีช่องระบายอากาศระดับสูงร่วมกับพัดลมลูกหมุนบริเวณหลังคา เพื่อระบายอากาศร้อนและควันที่สะสมเหนือพื้นที่ปฏิบัติการออกสู่ภายนอกก่อนแพร่กระจายเข้าสู่ห้องเรียน นอกจากนี้ ห้องเรียนได้รับการออกแบบให้แยกจากพื้นที่ปฏิบัติการด้วยผนังและประตูปิด รวมทั้งจัดให้มีช่องเปิดรับอากาศภายนอกและระบบปรับอากาศที่รักษาความดันอากาศภายในห้องเรียนให้สูงกว่าพื้นที่ปฏิบัติการเล็กน้อย (Positive Pressure) เพื่อป้องกันการไหลย้อนของความร้อน กลิ่น และควันที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงาน ยังติดตั้งพัดลมระบายอากาศแบบลูกหมุนบนหลังคา (Roof Turbine Ventilator) จำนวน 6 ตัว เพื่อเสริมการระบายอากาศในแนวดิ่ง โดยอาศัยหลักการลอยตัวของอากาศร้อน (Stack Effect) ร่วมกับแรงลมธรรมชาติในการระบายความร้อนสะสมบริเวณใต้หลังคา การทำงานร่วมกันของระบบระบายอากาศแบบไหลผ่าน ช่องเปิด Z-Louver และพัดลมระบายอากาศบนหลังคา ช่วยเพิ่ม

อัตราการหมุนเวียนอากาศภายในอาคาร ลดความร้อนสะสม ปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารตามที่มีการคำนวณเสนอไว้ และลดการพึ่งพาระบบปรับอากาศ ส่งผลให้ผู้เรียนมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อการเรียนการสอน

เป็นการประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวกับอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (EV Workshop) ซึ่งมีลักษณะการใช้งานเฉพาะ ได้แก่ การซ่อมบำรุงและทดสอบระบบไฟฟ้า รวมทั้งมีความเสี่ยงจากความร้อนและก๊าซที่อาจเกิดจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การออกแบบจึงไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการลดภาระการใช้พลังงาน แต่ยังคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งาน โดยใช้ระบบระบายอากาศธรรมชาติร่วมกับการเตรียมแนวทางสำหรับระบบระบายอากาศแบบผสม (Hybrid Ventilation) และมาตรการควบคุมควันในกรณีฉุกเฉิน

ซึ่งสอดคล้องกับหลักการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-Responsive Design) และเทคนิคการลดความร้อนแบบพาสซีฟ (Passive Cooling Techniques) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน ลดความความร้อน และองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือ การเสนอแนวทางการออกแบบอาคารปฏิบัติการด้านยานยนต์ไฟฟ้าที่บูรณาการหลักการ Climate-Responsive Design,Natural Ventilation และ Passive Cooling เข้ากับข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของอาคารปฏิบัติการสมัยใหม่ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบอาคารฝึกอบรมและอาคารการศึกษาในเขตร้อนชื้นของประเทศไทยได้

6. ข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา

การออกแบบควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการระบายอากาศภายหลังการใช้งานจริง โดยการตรวจวัดความเร็วลม อุณหภูมิ และความสบายทางความร้อนภายในอาคาร รวมถึงการเลือกใช้วัสดุในด้านที่รองรับกับเทคโนโลยีอาคารเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบอาคารในอนาคต

ควรประยุกต์ใช้แนวทางการวางอาคารตามทิศทางลม การใช้ช่องเปิดระบายอากาศ และการระบายอากาศผ่านหลังคาในอาคารสาธารณะประเภทอื่น เช่น อาคารเรียน โรงฝึกงาน ศูนย์นวัตกรรม หรืออาคารบริการชุมชน เพื่อลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ควรบูรณาการเทคโนโลยีอาคารประหยัดพลังงานเพิ่มเติม เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศ และระบบบริหารจัดการอาคารอัจฉริยะ เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยและหน่วยงานภาครัฐ [5], [8]

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์และทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ฯที่ได้ให้โอกาสในการแต่งตั้งเป็นคณะกรรมการจัดทำขอบเขตของงาน (TOR) โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ เป็นผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานก่อสร้างอาคารปฏิบัติการการยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ และขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด ชัยมงคลมหานครก่อสร้าง (สำนักงานใหญ่) ที่ดำเนินการรับเหมาก่อสร้างตามสัญญาจนแล้วเสร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

บทความจากวารสาร (Journal)

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2566). มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

[2] เดชา บุญค้ำ. (2554). ภูมิสถาปัตยกรรมกับการออกแบบสภาพแวดล้อมที่ยั่งยืน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3] นพพร ชื่นกลิ่น. (2561). ความสบายทางความร้อนในอาคารการศึกษาเขตร้อนชื้น.

วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 67(2), 89-103.

[4] ปริญญา ตันติสุข. (2560). การระบายอากาศธรรมชาติในอาคารเขตร้อนชื้น. วารสารหน้าจั่ว, 14(1), 45-60.

[5] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2565). แนวทางการออกแบบอาคารประสิทธิภาพพลังงานสูงสำหรับประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

[6] อมร จาตุรนต์รัศมี. (2555). การออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น. กรุงเทพฯ: สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์.

บทความเว็บไซต์

[7] สภาสถาปนิก. (2566). แนวทางการออกแบบอาคารที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้น. สืบค้นเมื่อ 7 มิถุนายน 2569, จากhttps:// www.act.or.th

[8] สถาบันอาคารเขียวไทย. (2567). เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวไทย TREES. สืบค้นเมื่อ 7 มิถุนายน 2569, จาก https://www.tgbi.or.th site.unc.edu/wrn/about/

การปรับปรุงดินด้วยปูนขาวสำหรับงานชั้นรองพื้นทาง: อิทธิพลของพลาสติกซิตี้ของดินและปริมาณปูนขาวต่อการบดอัดและการพัฒนากำลังอัดระยะสั้น

Soil Stabilization Using Lime for Road Subgrade: Influence of Soil Plasticity and Lime Content on Compaction and Early Strength Development

ทินภัทร ปลื้มชัยภูมิ[1] จิระยุทธ สืบสุข[1] รัฐพล สมนา[1] และเกียรติสุดา สมนา[1*]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: Kiatsuda.so@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของปูนขาว (quicklime) ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินสังเคราะห์ 5 ชนิด (Soil A–E) ที่เตรียมจากดินลูกรัง (Lateritic Soil : LS) ดินทรายปนตะกอน (Silty Sand: SS) และดินเบนโทไนต์ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อจำลองสภาพดินภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การทดสอบครอบคลุมคุณสมบัติทางกายภาพ การบดอัด และกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test :UCS) ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐาน DOH โดยมีการปรับปรุงด้วยซีเมนต์เป็นตัวเปรียบเทียบ ผลการทดสอบ พบว่า การเพิ่มปริมาณส่วนละเอียดทำให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมสูงขึ้นและหน่วยน้ำหนักสูงสุดลดลง การเติมปูนขาวร้อยละ 1–3 สามารถเพิ่มค่า UCS ของดินทุกชนิดให้สูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำสำหรับชั้นรองพื้นทาง (0.689 MPa) สำหรับดิน Soil A B และ C ค่า UCS สูงสุดอยู่ที่ปูนขาวร้อยละ 2–3 (1.75–2.14 MPa) และลดลงเมื่อปริมาณปูนขาวเกินร้อยละ 3 ขณะที่ดิน Soil D และ E ให้ค่า UCS ค่อนข้างคงที่ (1.32–2.06 MPa) ตลอดช่วงปริมาณปูนขาวที่ศึกษา ซีเมนต์ให้ค่า UCS สูงกว่าแต่ไม่มีกำลังที่ 1% สำหรับดิน D และ E ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปูนขาวสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าสำหรับงานชั้นรองพื้นทางได้

คำสำคัญ: ปูนขาว, การปรับปรุงดิน, กำลังอัด, ดินลูกรัง, ดินทรายปนตะกอน

Abstract

This research investigates the effectiveness of quicklime in improving the engineering properties of five artificial soil mixtures (Soils A–E) prepared from lateritic soil (LS), silty sand (SS), and sodium bentonite in varying proportions to represent soil conditions in Thailand's central and northeastern regions. Laboratory testing encompassing physical characterization, compaction behavior, and unconfined compressive strength (UCS) at 7-day curing was conducted in accordance with DOH, ASTM, and AASHTO standards, with cement stabilization as a benchmark. Results show that increasing fines content raises the optimum moisture content (OMC) and reduces maximum dry density (MDD). Lime

addition of 1–3% elevates UCS above the 0.689 MPa subbase requirement for all soil types. Soils A, B, and C attained peak UCS at 2–3% lime (1.75–2.14 MPa), declining at higher dosages, whereas Soils D and E maintained relatively stable UCS (1.32–2.06 MPa) across all dosages. Cement yielded higher UCS overall but failed to develop any strength at 1% for high-plasticity Soils D and E. The findings demonstrate that quicklime is an effective and cost-efficient stabilizer for road subbase construction.

Keywords: Quicklime, Soil stabilization, Unconfined compressive strength, Lateritic soil, Silty sand.

1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การก่อสร้างทางในภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยต้องเผชิญกับปัญหาคุณภาพของดินในพื้นที่ โดยดินลูกรัง (lateritic soil) และดินทรายปนตะกอน (silty sand) ซึ่งก่อตัวมาจากตะกอนแม่น้ำและตะพักลำน้ำ มักมีกำลังรับแรงต่ำและไวต่อความชื้น ส่งผลให้เกิดความล้มเหลวของผิวทางก่อนกำหนด การทรุดตัว และค่าบำรุงรักษาที่สูง นอกจากนี้ การขนส่งวัสดุถมทางจากแหล่งดินยังเพิ่มต้นทุนโครงการและก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซ CO_2 [1–3]

การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว (lime stabilization) เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและคุ้มค่าที่สุด [4] เมื่อนำปูนขาวดิบ (CaO) มาผสมกับดินละเอียด จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสองขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (cation exchange) และการรวมตัวของอนุภาค (flocculation–agglomeration) ในทันที ตามด้วยปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ในระยะยาว ที่ก่อให้เกิดสารประกอบซีเมนต์ เช่น calcium silicate hydrate (CSH) และ calcium aluminate hydrate (CAH) ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของโครงสร้างดิน [5]

ปัญหาคุณภาพของชั้นดิน โดยเฉพาะดินเหนียวหรือดินอ่อนที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง การยืดหดตัว และกำลังรับแรงต่ำ เป็นข้อจำกัดสำคัญในงานวิศวกรรมฐานรากและงานทาง ทำให้เกิดการทรุดตัวและความเสียหายต่อโครงสร้างได้ การปรับปรุงคุณภาพดิน (soil stabilization) จึงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการเพิ่มสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมต่อการใช้งาน [1]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ปูนขาวในการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน เพื่อเพิ่มสมบัติทางวิศวกรรมและเสถียรภาพของดินให้เหมาะสมต่อการใช้งานในงานก่อสร้างอย่างยั่งยืน โดยมุ่งประเมินประสิทธิภาพของปูนขาวดิบที่ปริมาณร้อยละ 1–5 ในการปรับปรุงดินผสม 5 ชนิดที่แสดงถึงลักษณะที่ต่างกันของสภาพดินในสนาม เปรียบเทียบกับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุ

ดินลูกรังธรรมชาติ (LS) และดินทรายปนตะกอน (SS) ถูกเก็บตัวอย่างจากแหล่งดินเดียวกัน ณ อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดนครราชสีมา LS เป็นวัสดุมวลรวมหลักในงานก่อสร้างทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จัดอยู่ในกลุ่ม SC (USCS) และ A-2-4 (AASHTO) ส่วน SS มีโครงสร้างหลวม ปริมาณดินเหนียวต่ำ และมี

ESTACON 2026 | 17th

ความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ จัดอยู่ในกลุ่ม SM (USCS) ดินเบนโทไนต์ชนิดโซเดียมเกรดเชิงพาณิชย์ถูกใช้เป็นส่วนประกอบปรับค่าพลาสติกซิตีของดินผสม (LL = 387%, PI = 326%) สารปรับปรุงที่ใช้ ได้แก่ ปูนขาวดิบ (CaO) จากบริษัท Golden Lime Public Company Limited และซีเมนต์ไฮดรอลิก (INSEE Petch) เป็นตัวเปรียบเทียบ

เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนดินต่อประสิทธิภาพการปรับปรุง ได้เตรียมดินผสม 5 ชนิดโดยปรับสัดส่วนตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของดินสังเคราะห์

ตัวอย่าง	Percentage by weight		
	Lateritic soils	Silty sand	Bentonite
Soil A	100	0	0
Soil B	75	21.25	3.75
Soil C	50	42.5	7.5
Soil D	25	63.75	11.25
Soil E	0	85	15

2.2. การทดสอบ

การทดสอบทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (ASTM D854 [6]) การกระจายขนาดเม็ดดิน (ASTM D422 [7]) และขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (ASTM D4318 [8]) เพื่อจำแนกประเภทดินตามระบบ USCS (ASTM D2487 [9]) และ AASHTO M145 [10] การทดสอบ pH ตามวิธีของ Eades and Grim (ASTM D6276 [11]) ถูกใช้กำหนดปริมาณปูนขาวขั้นต่ำ การบดอัดทดสอบตาม ASTM D1557 (Modified Proctor [12]) โดยผสมปูนขาวร้อยละ 1, 3 และ 5 ก่อนเติมน้ำ การทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ตาม ASTM D2166 [13] โดยบดอัดตัวอย่างที่ OMC ของการบดอัดผสมปูนขาว 5 % ในแม่พิมพ์ Modified Proctor บ่มในสภาวะ 30±2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 85% และแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบตามมาตรฐาน DH-S 206/2021 [14] ปริมาณปูนขาวหรือซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบคือร้อยละ 1, 2, 3, 4, และ 5 โดยน้ำหนักดินแห้ง โดยทดสอบกำลังอัด 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม

3. ผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินธรรมชาติ

ดินลูกรัง (LS) และดินทรายปนตะกอน (SS) มีค่าความเป็นพลาสติกต่ำ โดย LS มี LL = 20.0% และ PI = 8.3% ส่วน SS ไม่มีความเป็นพลาสติก (NP) ทั้งสองชนิดจัดอยู่ในกลุ่ม A-2-4 (AASHTO) และมีค่า activity ต่ำ (inactive) เบนโทไนต์มีค่า LL = 387.0% และ PI = 326.2% แสดงถึงศักยภาพการพองตัวสูงมากและจัดอยู่ในกลุ่ม CH การบดอัด Modified Proctor ของ LS ให้ OMC = 6.5% และ MDD = 2.15 g/cm³ ขณะที่ SS ให้ OMC = 9.9% และ MDD = 1.80 g/cm³ ซึ่งต่ำกว่า LS เนื่องจากการกระจายขนาดเม็ดดินแบบ gap-graded ส่งผลให้การอัดตัวของอนุภาคมีประสิทธิภาพต่ำกว่า

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินสังเคราะห์

คุณสมบัติทางกายภาพของดินสังเคราะห์ (Soil A–E) แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งถูกออกแบบให้มีองค์ประกอบของดินละเอียดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดินผสม Soil A–E มีปริมาณดินละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 26.3% เป็น 38.9% ตามลำดับ ส่วน LL และ PI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 20.0% และ 8.3% ใน Soil A เป็น 57.8% และ 33.1% ใน Soil E ในขณะที่

activity index เพิ่มจาก 0.69 (inactive) เป็น 5.05 (active) การจำแนกตาม AASHTO เปลี่ยนจาก A-2-4 (Soil A, B) เป็น A-7-6 (Soil E) แสดงถึงคุณภาพที่ลดลงของวัสดุชั้นทาง แม้ว่า USCS จะจัดทุกชนิดเป็น SC เนื่องจากมี % fines ต่ำกว่า 50% Soil A และ B ผ่านเกณฑ์วัสดุรองพื้นทางโดยไม่ต้องปรับปรุง ขณะที่ Soil C–E มีค่า LL > 35% หรือ PI > 11% ซึ่งเกินเกณฑ์การใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินธรรมชาติ

Properties	Lateritic soils	Silty sand	Bentonite
Specific gravity	2.67	2.66	2.50
Natural water content (W_n,%)	6.7	10	-
Liquid limit (LL, %)	20.0	16.7	387.0
Plastic limit (PL, %)	11.7	NP	60.8
Plasticity index (PI, %)	8.3	NP	326.2
Soil classification by USCS	SC	SM	CH

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของดินสังเคราะห์

Properties	Soil A	Soil B	Soil C	Soil D	Soil E
Specific gravity	2.67	2.66	2.65	2.64	2.64
Natural water content (W_n,%)	6.7	7.9	9.6	10	10.4
Liquid limit (LL, %)	20.0	26.0	33.4	46.4	57.8
Plastic limit (PL, %)	11.7	16.8	18.0	20.5	24.7
Plasticity index (PI, %)	8.3	9.2	15.4	25.9	33.1
Soil classification by USCS	SC	SC	SC	SC	SC

ตารางที่ 4 ค่า OMC (%) และ MDD (g/cm³) ของดินผสมที่ผสมปูนขาว

Lime	Soil A		Soil B		Soil C		Soil D		Soil E	
	OMC%	MDD	OMC%	MDD	OMC%	MDD	OMC%	MDD	OMC%	MDD
0%	6.5	2.15	7.9	2.11	9.6	2.03	10.0	1.94	10.4	1.87
1%	7.2	2.13	7.8	2.07	8.9	2.02	10.0	1.93	12.3	1.86
3%	7.1	2.11	7.8	2.07	8.5	2.01	10.3	1.96	11.2	1.88
5%	7.6	2.07	7.6	2.06	9.6	1.99	9.8	1.96	11.8	1.87

3.3 พฤติกรรมการบดอัดดินผสมที่ผสมปูนขาว

จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณดินละเอียดเพิ่มขึ้น ค่า OMC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและ MDD ลดลง ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและดูดซับน้ำได้มาก ทำให้ต้องใช้น้ำมากขึ้นในการหล่อลื่นอนุภาค และลดความหนาแน่นสูงสุดที่ทำได้ การเติมปูนขาวร้อยละ 1–5 มีผลต่อ OMC และ MDD น้อยมาก (OMC เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±1% และ MDD ลดลงไม่เกิน 0.08 g/cm³) เนื่องจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนและการรวมตัวของอนุภาคเปลี่ยนโครงสร้างดินจากแบบกระจายตัวเป็นแบบรวมกลุ่ม ส่งผลต่อการจัดเรียงอนุภาคเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับรายงานของ Hussain and Dash [15] และ Gruchot et al. [16] ผลการทดสอบสรุปในตารางที่ 4

3.4 กำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว

ตารางที่5 แสดงค่า UCS เฉลี่ยของดินผสม 5 ชนิดที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวดิบในปริมาณต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 7 วัน (soaked 2 h) โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำ 0.689 MPa สำหรับชั้นรองพื้นทาง (DH-S 206/2021 [6])

ตารางที่ 5 กำลังอัดของดินสังเคราะห์ที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน (MPa)

ปูนขาว (%)	Soil A	Soil B	Soil C	Soil D	Soil E
1%	1.635	1.478	1.634	1.318	1.502
2%	1.667	1.882	1.546	1.015	2.056
3%	1.752	1.483	2.135	1.439	1.666
4%	1.592	0.967	1.463	1.219	1.794
5%	0.853	0.564	1.440	1.598	1.892
เกณฑ์ขั้นต่ำ	**0.689 MPa**	**0.689 MPa**	**0.689 MPa**	**0.689 MPa**	**0.689 MPa**

ผลที่ได้แสดงว่าปูนขาวดิบที่ปริมาณเพียงร้อยละ 1 สามารถเพิ่มค่า UCS ของดินผสมทุกชนิดให้สูงกว่า 0.689 MPa ได้ภายใน 7 วัน สำหรับดิน Soil A, B และ C ซึ่งมีปริมาณดินละเอียดปานกลาง ค่า UCS สูงสุดอยู่ที่ปูนขาวร้อยละ 2–3 (Soil A = 1.75 MPa

ESTACON 2026 | 17th

ที่ 3%, Soil B = 1.88 MPa ที่ 2%, Soil C = 2.14 MPa ที่ 3%) การเพิ่มปูนขาวเกินร้อยละ 3 ส่งผลให้ UCS ลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากปูนขาวส่วนเกินที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งที่ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรง และอาจเพิ่มความพรุนของโครงสร้างดิน ในทางตรงกันข้าม ดิน Soil D และ E ที่มีปริมาณดินละเอียดสูงและค่า PI สูง (25.9–33.1%) ให้ค่า UCS ค่อนข้างคงที่ (1.02–2.06 MPa) ตลอดช่วงปูนขาวร้อยละ 1–5 เนื่องจากปริมาณแร่ดินเหนียวสูงทำให้มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานตลอดช่วงปริมาณปูนขาวที่ศึกษา

3.5 การเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างปูนขาวและปูนซีเมนต์

ตารางที่ 6 แสดงค่า UCS ของดินผสมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ปริมาณเดียวกัน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างสารปรับปรุงทั้งสองชนิด โดยซีเมนต์ที่ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 2 ขึ้นไปให้ค่า UCS สูงกว่าปูนขาวในกลุ่มดินที่มีพลาสติกซิตีต่ำถึงปานกลาง (Soil A–C) โดยเฉพาะที่ร้อยละ 3–4 ที่ให้ค่า UCS สูงกว่า 2.3–4.0 MPa อย่างไรก็ตาม ซีเมนต์ที่ร้อยละ 1 ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดได้เลยในดิน Soil D และ E (UCS = 0.000 MPa) เนื่องจากปริมาณดินละเอียดและแร่มอนต์มอริลโลไนต์สูงขัดขวางการเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์ ขณะที่ปูนขาวที่ปริมาณเดียวกัน (ร้อยละ 1) ให้ค่า UCS ถึง 1.32 และ 1.50 MPa สำหรับ Soil D และ E ตามลำดับ คุณสมบัตินี้แสดงให้เห็นว่าปูนขาวมีความเหมาะสมกว่าสำหรับการปรับปรุงดินที่มีพลาสติกซิตีสูง เพราะปูนขาวเพิ่ม pH ของดินอย่างรวดเร็วซึ่งทำให้แร่ซิลิกาและอะลูมินาละลายออกจากโครงสร้างดินเหนียวและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มกำลังรับแรงแม้ในดินที่มีแร่ดินเหนียวปริมาณสูง

ตารางที่ 6 กำลังอัดของดินผสมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อายุบ่ม 7 วัน (MPa)

ซีเมนต์ (%)	Soil A	Soil B	Soil C	Soil D	Soil E
1%	1.202	1.042	0.836	0.000	0.000
2%	2.852	2.052	1.170	1.368	0.849
3%	3.559	2.718	2.977	1.538	1.927
4%	4.047	3.715	2.320	3.004	1.747
5%	3.027	3.509	3.699	2.609	3.000

4. บทสรุป

จากการศึกษาการปรับปรุงดินผสม 5 ชนิดด้วยปูนขาวดิบในช่วงปริมาณร้อยละ 1–5 และเปรียบเทียบกับซีเมนต์ สรุปผลได้ดังนี้

1) การเพิ่มปริมาณดินละเอียดในดินผสมส่งผลให้ OMC เพิ่มขึ้นและ MDD ลดลง โดย OMC เพิ่มจาก 6.5% (Soil A) เป็น 10.4% (Soil E) และ MDD ลดลงจาก 2.15 เป็น 1.87 g/cm³ การเติมปูนขาวในช่วงร้อยละ 1–5 ส่งผลต่อค่าดังกล่าวน้อยมาก (OMC เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±1.3%) แสดงว่าการปรับปรุงด้วยปูนขาวคงสมบัติการบดอัดที่ดีของดินเดิมไว้ได้

2) ปูนขาวดิบที่ปริมาณเพียงร้อยละ 1 สามารถเพิ่มค่า UCS ของดินผสมทุกชนิดให้สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำสำหรับชั้นรองพื้นทาง (0.689 MPa) ได้อย่างชัดเจนที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของ

ปูนขาวดิบในการกระตุ้นกำลังรับแรงตั้งแต่ระยะเริ่มต้น

3) สำหรับดินที่มีพลาสติกซิตีต่ำถึงปานกลาง (Soil A–C, PI = 8.3–15.4%) ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 2–3 ให้ค่า UCS สูงสุด 1.75–2.14 MPa การเพิ่มปูนขาวเกินร้อยละ 3 ทำให้กำลังอัดลดลง

4) สำหรับดินที่มีพลาสติกซิตีสูง (Soil D–E, PI = 25.9–33.1%) ค่า UCS ค่อนข้างคงที่ (1.02–2.06 MPa) ตลอดช่วงปูนขาวร้อยละ 1–5 ทั้งนี้ปริมาณแร่ดินเหนียวที่สูงทำให้มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแม้ที่ปริมาณปูนขาวสูง

5) เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ ปูนขาวมีข้อได้เปรียบสำคัญในดินพลาสติกซิตีสูง กล่าวคือ ที่ร้อยละ 1 ซีเมนต์ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดได้เลยใน Soil D และ E ในขณะที่ปูนขาวให้ค่า UCS 1.32–1.50 MPa ซีเมนต์จึงเหมาะสมกว่าสำหรับดินที่ต้องการ UCS สูงมาก ขณะที่ปูนขาวมีความน่าเชื่อถือและคุ้มค่ากว่าสำหรับดินที่มีแร่ดินเหนียวสูง

ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานก่อสร้างทาง เช่น กรมทางหลวงและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในการกำหนดปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมตามประเภทดินในสนาม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนวัสดุและเพิ่มความยั่งยืนในงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน งานวิจัยในระยะต่อไปจะทดสอบ UCS ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วันเพื่อประเมินการพัฒนากำลังระยะยาว และทดสอบ CBR เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบผิวทาง

กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณ บริษัท Golen Lime Public Company Limitedที่ให้ความอนุเคราะห์ปูนขาวในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Vallerga, P. A., & Rananandana, N. (1969). Characteristics of lateritic soils used in Thailand road construction. Highway Research Record, (284).

[2] Thapanont, P., Santi, C., & Pruethipong, X. (2018). Causes of delay on highway construction projects in Thailand. MATEC Web of Conferences, 192, 02014.

[3] Kokkaew, N., & Rudjanakanoknad, J. (2017). Green assessment of Thailand's highway infrastructure. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(7), 2526–2537.

[4] Supakij, N., & Santi, K. (1995). Stabilization of dispersive soil using hydrated lime. Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok.

[5] Yangsukkasem, N., Suebsuk, J. et al. (2024). Durability against cyclic wetting-drying of cement-stabilized loess subgrade. Construction and Building Materials, 455, 139123.

[6] ASTM D854-23, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the

Water Displacement Method, ASTM International, West Conshohocken.

[7] ASTM D422-63(2007), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken.

[8] ASTM D4318-05, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken.

[9] ASTM D2487-17e1, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken.

[10]AASHTO M 145: Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes.

[11]ASTM D6276-19, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM International, West Conshohocken.

[12]ASTM D1557-12(2021), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics. ASTM International.

[13]ASTM D2166-06, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International.

[14]DH-S 206/2021, Soil Cement Subbase, Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)

[15]Hussain, M., & Dash, S. K. (2016). The influence of lime on the compaction behaviour of soils. Environmental Geotechnics, 3(5), 346–352.

[16]Gruchot, A., Kamiński, K., & Woś, A. (2025). Effects of Lime and Cement Addition on the Compaction and Shear Strength Parameters of Silty Soils. Materials, 18(5), 974.

ESTACON 2026 | 17th

อิทธิพลของวัสดุผงรีไซเคิลต่างชนิดต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

Influence of Different Recycled Powder Materials on the Properties of Geopolymer Mortar from High-Calcium Fly Ash

สุธิวัฒน์ แว่นประชา[1] ไพฑูรย์ นาแซง[1,*] และ อนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
เลขที่ 199/19 หมู่ 17 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: phaithun.nas@neu.ac.th, 065-354-5350

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวัสดุผงรีไซเคิลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (HFA) โดยใช้เศษคอนกรีตบดละเอียด (GRC) เศษอิฐมอญบดละเอียด (GCB) และหินพัมมิสบดละเอียด (GPM) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ บ่มที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ผลพบว่าวัสดุผงทุกชนิดลดค่าการไหลแผ่จากร้อยละ 126 เหลือร้อยละ 107-115 ส่วนผสมควบคุม 100HFA ให้กำลังอัดสูงสุด 66.7 เมกะปาสกาล ที่ 90 วัน การแทนที่ร้อยละ 50 ยังให้กำลังในระดับใช้งานเชิงโครงสร้างได้ คือ 64.0, 55.0 และ 40.8 เมกะปาสกาล สำหรับ 50GCB, 50GRC และ 50GPM ขณะที่การแทนที่ร้อยละ 100 กำลังลดลงมากเหลือ 14.8, 3.9 และ 3.1 เมกะปาสกาล สำหรับ 100GRC, 100GCB และ 100GPM เนื่องจากขาดแคลเซียมที่ว่องไวที่อุณหภูมิบ่มดังกล่าว การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ลดความหนาแน่นและเพิ่มความพรุน โดยพัมมิสให้มอร์ต้าร์เบาที่สุด 1,924 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนำความร้อนต่ำสุด 1.35 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 36 สรุปว่าวัสดุผงทั้งสามใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมได้ในระดับไม่เกินร้อยละ 50 โดยเฉพาะเศษอิฐมอญและเศษคอนกรีต ช่วยลดของเสียและส่งเสริมวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์, เถ้าลอยแคลเซียมสูง, เศษคอนกรีตบดละเอียด, เศษอิฐมอญบดละเอียด, หินพัมมิส

Abstract

This study examined the effect of recycled powders on geopolymer mortar from high-calcium fly ash (HFA). Ground recycled concrete (GRC), ground clay brick (GCB), and ground pumice (GPM) replaced fly ash at 0, 50, and 100% by weight. Mixtures were activated with sodium silicate and 10 M sodium hydroxide and cured at 60 °C for 48 h. All powders lowered flow from 126% to 107-115%. The control, 100HFA, reached the highest strength of 66.7 MPa at 90 days. At 50% replacement, strength stayed structurally usable: 64.0, 55.0, and 40.8 MPa for 50GCB, 50GRC, and 50GPM. At 100% replacement, strength collapsed to 14.8, 3.9, and 3.1 MPa for 100GRC, 100GCB, and 100GPM due to insufficient reactive calcium at this curing temperature. Higher replacement reduced density and raised porosity; pumice gave the lightest mortar, 1,924 kg/m³, and the lowest thermal conductivity, 1.35 W/m·K, 36% below the control. The powders are viable co-precursors up to 50% replacement, especially GCB and GRC, supporting waste reduction and sustainable construction.

Keywords: Geopolymer mortar, High-calcium fly ash, Ground recycled concrete, ground clay brick, Pumice

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบันยังคงพึ่งพาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก ทว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ถึง 8 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งหมด [1] ด้วยเหตุนี้ วัสดุประสานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยด่างของวัสดุที่อุดมด้วยซิลิกาและอะลูมินา โดยไม่ต้องผ่านการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงเหมือนปูนซีเมนต์ จึงช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีนัยสำคัญ [2]

เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า เป็นสารตั้งต้นที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ เช่น เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ [3] การมีแคลเซียมในระบบส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทั้งเจลโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และเจลแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ควบคู่กัน ทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถพัฒนากำลังและก่อตัวได้ดีแม้บ่มที่อุณหภูมิไม่สูงนัก [4] อย่างไรก็ตาม ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในงานก่อสร้างยังต่ำกว่าปริมาณที่ผลิตได้ในแต่ละปีมาก จึงมีความจำเป็นต้องแสวงหาวัสดุสารตั้งต้นชนิดอื่นมาใช้ร่วม เพื่อลดการพึ่งพาเถ้าลอยเพียงแหล่งเดียวและเพิ่มความยืดหยุ่นในการผลิต

ในขณะเดียวกัน เศษวัสดุจากการก่อสร้างและรื้อถอนมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและส่วนใหญ่ถูกนำไปฝังกลบ โดยเฉพาะเศษคอนกรีตและเศษอิฐมอญ ซึ่งล้วนมีองค์ประกอบทางเคมีที่อุดมด้วยซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมบางส่วน [5-6] นอกจากนี้ หินพัมมิสซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่เกิดจากหินภูเขาไฟ ยังมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในรูปอสัณฐานสูง และหาได้ในหลายพื้นที่ [7] การนำวัสดุเหล่านี้มาบดละเอียดเพื่อใช้แทนที่เถ้าลอยบางส่วนหรือทั้งหมดจึงเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน ช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติไปพร้อมกัน

วัสดุผงแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของจีโอโพลิเมอร์แตกต่างกัน เศษคอนกรีตบดละเอียดมักมีวัสดุธาตุปูนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเดิมหลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นแหล่งแคลเซียมเพิ่มเติมในระบบ เศษอิฐมอญบดละเอียดที่ผ่านการเผาแล้วอาจมีเฟสอสัณฐานที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาในสภาวะด่าง ส่วนหินพัมมิสมีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูงและความสามารถในการดูดซึมน้ำมาก จึงคาดว่าจะส่งผลต่อค่าการไหล ความหนาแน่น ความพรุนตลอดจนสมบัติด้านการนำความร้อนของมอร์ต้าร์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งศึกษาเฉพาะกำลังอัด และพิจารณาวัสดุผงทีละชนิด ยังขาดการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุผงรีไซเคิลหลายชนิดในระบบเดียวกันควบคู่กับการประเมินสมบัติเชิงกายภาพและการส่งผ่านอย่างครบถ้วน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุผงรีไซเคิลต่างชนิดต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยใช้เศษคอนกรีตบดละเอียด เศษอิฐมอญบดละเอียด และหินพัมมิสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงในอัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายด่างอัลคาไล และการบ่มด้วยความร้อนประเมินสมบัติของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ค่าการไหล กำลังอัด การนำความร้อน ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวอย่าง ความพรุน และการดูดซึมน้ำ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุผงรีไซเคิลเหล่านี้เป็นวัสดุสารตั้งต้นร่วมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ยั่งยืน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

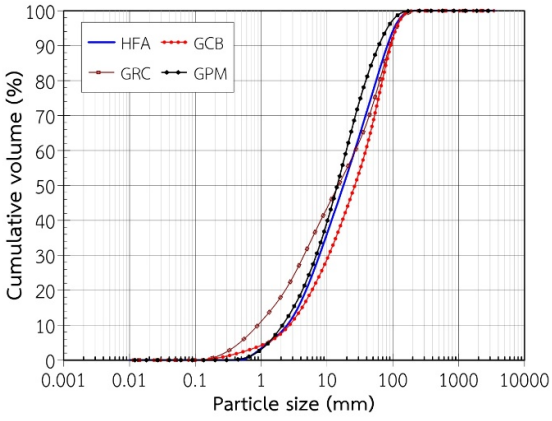
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (HFA) อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เศษคอนกรีตบดละเอียด (GRC)

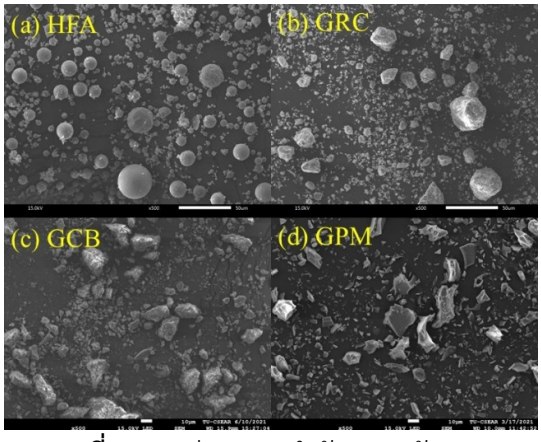
จากตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่มีกำลังอัดอายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง 240 ถึง 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทิ้งเศษตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 วัน จากนั้นนำมาบดด้วยลูกบอลเหล็กจนเป็นผงละเอียด เศษอิฐมอญบดละเอียด (GCB) จากขยะอิฐมอญที่เกิดจากการก่อสร้างในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น หินพัมมิสบดละเอียด (GPM) จากหินพัมมิสที่มีขายในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผงแสดงดังตารางที่ 1 โดยการกระจายตัวของอนุภาค ภาพถ่ายขยายกำลังสูง และรูปแบบวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแสดงดังรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ระดับห้องปฏิบัติการประกอบด้วยโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับร้อยละ 12.58 ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับร้อยละ 30.24 และน้ำ (H_2O) เท่ากับร้อยละ 57.23 ทรายแม่น้ำมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับร้อยละ 1.07

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผง

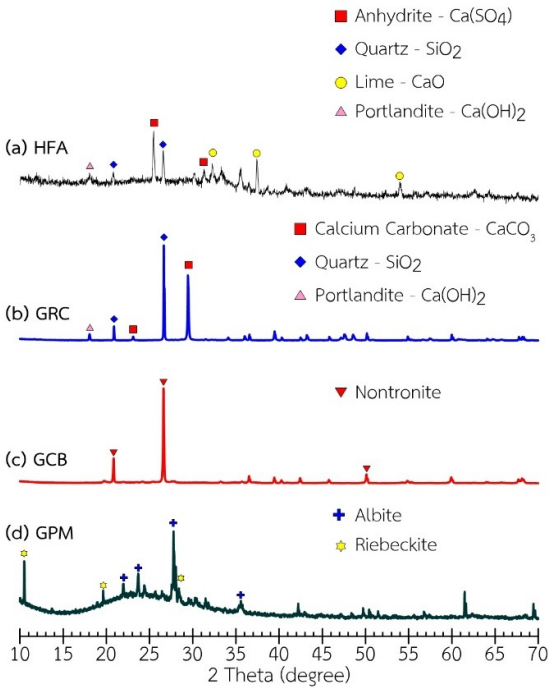
คุณสมบัติ	HFA	GRC	GCB	GPM
SiO_2	27.50	31.24	67.90	60.40
CaO	25.50	61.75	0.60	2.40
Al_2O_3	14.30	2.18	15.20	16.70
Fe_2O_3	13.60	2.27	5.10	4.00
SO_3	6.33	1.15	-	-
MgO	2.47	0.67	1.20	0.90
Na_2O	2.04	0.10	0.80	4.0
K_2O	1.85	0.23	1.50	3.40
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.58	2.55	2.32
ร้อยละค้างตะแกรงเบอร์ 325	25.0	26.0	29.7	25.0
พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm^2/g)	2,719	5,237	4,807	4,230
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (micron)	20.17	14.90	30.6	16.3



รูปที่ 1 การกระจายอนุภาคของวัสดุผง



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุผง



รูปที่ 3 รูปแบบ XRD ของวัสดุผง

2.2 การออกแบบส่วนผสม

การผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นใช้วัสดุผง 3 ชนิด ได้แก่ เศษคอนกรีตบดละเอียด เศษอิฐมอญบดละเอียด และหินพัมมิสบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) เป็นของเหลวอัลคาไล กำหนดสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุสารตั้งต้นเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนวัสดุผงต่อมวลรวมละเอียดที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ทำการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซียลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 2 รวมทั้งหมด 7 สัดส่วนผสม โดยมีสัญลักษณ์ของสัดส่วนผสมควบคุม คือ 100HFA คือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 100 สำหรับตัวอย่างที่ใช้วัสดุผง 3 ชนิดแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ใช้สัญลักษณ์ 50GRC, 50GCB และ 50GPM และตัวอย่างที่ใช้วัสดุผง 3 ชนิดล้วนใช้สัญลักษณ์ 100GRC, 100GCB และ 100GPM

2.3 การเตรียมตัวอย่าง

นำเถ้าลอยผสมเข้ากับวัสดุผงแต่ละชนิดตามอัตราส่วนที่กำหนดในภาชนะแบบปิดแล้วทำการเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที นำเถ้าลอยและวัสดุที่เตรียมไว้เทลงในเครื่องผสมมอร์ต้าร์แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที เททรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งลงในส่วนผสม ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในส่วนผสมเป็นลำดับสุดท้ายทำการผสมต่ออีก 5 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้เทลงแบบหล่อขนาดต่าง ๆ และแบบหล่อมาตรฐาน ASTM C109 [8] ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วห่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น ปล่อยให้ตัวอย่างก่อตัวในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าตู้อบควบคุมอุณหภูมิภายในไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำการแกะแบบแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกและบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

2.4 การทดสอบ

1. ทดสอบหาค่าไหลแผ่ (Flow table) ด้วยโต๊ะทดสอบการไหลแผ่โดยใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ยังไม่แข็งตัวทดสอบทันทีหลังจากผสมตัวอย่างเสร็จทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1437 [9]

2. ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [8] ทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ชื่อส่วนผสม	วัสดุผงตั้งต้น (กรัม)				สารละลาย (กรัม)		ทราย (กรัม)
	HFA	GRC	GCB	GPM	NH	NS	
100HFA	100	-	-	-	30	30	275
50GRC	50	50	-	-	30	30	275
100GRC	-	100	-	-	30	30	275
50GCB	50	-	50	-	30	30	275
100GCB	-	-	100	-	30	30	275
50GPM	50	-	-	50	30	30	275
100GPM	-	-	-	100	30	30	275

3. ทดสอบการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยใช้เครื่องมือ ISOMET 2114 (Applied Precision Ltd. Slovakai) ทดสอบโดยการนำหัววัดแบบสัมผัสผิวของเครื่องมือวางบนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอกัน โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. ทดสอบความเร็วของคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง (Ultra pulse velocity, UPV) เป็นวิธีการทดสอบความสมบูรณ์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยการส่งคลื่นความถี่สูงขนาด 50 กิโลเฮิร์ตผ่านตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน แล้ววัดเวลาที่คลื่นความถี่สูงใช้ในการเคลื่อนที่จากหัวสัญญาณผ่านตัวอย่างไปยังหัวรับทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด 50 มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าที่อ่านได้จากเครื่องมาคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นแสดงดังสมการที่ 1

$$V = \frac{L}{T \times 10^4} \qquad (1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของคลื่น (m/s)
L คือ ระยะทางระหว่างหัวส่งและหัวรับ (cm)
T คือ เวลาที่คลื่นใช้ในการวิ่งผ่านตัวอย่าง (μs)

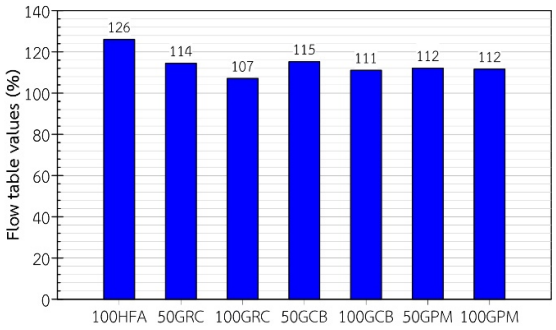
5. ทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 [10]

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ค่าไหลแผ่

รูปที่ 4 แสดงค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ พบว่าส่วนผสม 100HFA ให้ค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 126 ขณะที่การแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยวัสดุผงทุกชนิดและทุกระดับทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 107 ถึง 115 โดยที่การแทนที่ร้อยละ 50 ค่าการไหลแผ่ของ 50GRC, 50GCB และ 50GPM เท่ากับร้อยละ 114, 115 และ 112 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มระดับการแทนที่เป็นร้อยละ 100 ค่าการไหลแผ่ของ 100GRC และ 100GCB ลดลงเหลือร้อยละ 107 และ 111 ตามลำดับ ในขณะที่ 100GPM คงที่ที่ร้อยละ 112 เท่ากับที่ระดับร้อยละ 50 แนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้ด้วยลักษณะรูปร่างของอนุภาควัสดุประสานเป็นหลัก อนุภาคเถ้าลอยมีรูปทรงกลมและผิวเรียบ จึงทำหน้าที่คล้ายลูกปืนขนาดเล็ก (Ball-bearing effect) ที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและเพิ่มความสามารถในการไหลของมอร์ต้าร์ [11] ในทางกลับกัน วัสดุผงทั้งสามชนิดได้จากการบดย่อย จึงมี

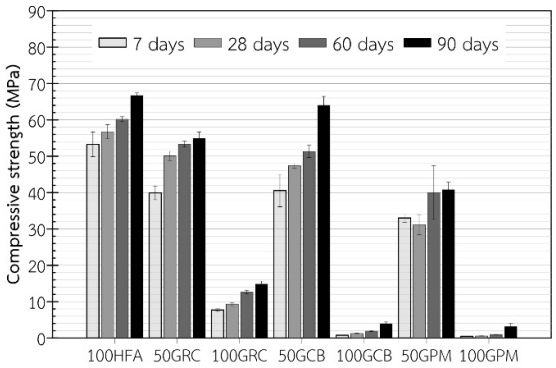
รูปร่างเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ และพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า ทำให้ต้องการของเหลวมากขึ้นในการเคลือบผิวอนุภาคและเพิ่มแรงเสียดทานภายในระบบ [12] ค่าการไหลแผ่จึงลดลงเมื่อแทนที่เถ้าลอย



รูปที่ 4 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

3.2 กำลังอัด

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน พบว่า กำลังอัดของทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนผสม 100HFA ให้กำลังอัดสูงสุดในทุกอายุ โดยมีกำลังในช่วงต้นสูงถึง 53.3 เมกะปาสคาล ที่ 7 วัน และเพิ่มเป็น 66.7 เมกะปาสคาล ที่ 90 วัน เนื่องจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีอนุภาคที่ว่องไวและให้แคลเซียมที่ทำให้เกิดเจล C-A-S-H ควบคู่กับเจล N-A-S-H [4] จึงพัฒนากำลังได้ดีแม้บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

การแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยวัสดุผงทั้ง 3 ชนิดในอัตราร้อยละ 50 กำลังอัดลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับที่ใช้งานเชิงโครงสร้างได้ โดยที่อายุ 90 วัน 50GCB, 50GRC และ 50GPM ให้กำลังอัดเท่ากับ 64.0, 55.0 และ 40.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ทั้งนี้การแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยวัสดุผงแต่ละชนิดพฤติกรรมการพัฒนากำลังต่างกันตามองค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 1 ส่วนผสม 50GRC พัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงต้นจาก 39.9 เป็น 50.1 เมกะปาสคาล ระหว่าง 7 ถึง 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเศษคอนกรีตมี CaO สูงถึงร้อยละ 61.75 ที่ช่วยเร่งการเกิด C-A-S-H ในช่วงต้น แต่มี Al_2O_3 เพียงร้อยละ 2.18 ซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อการพัฒนากำลังในระยะยาว ในทางตรงข้าม ตัวอย่าง 50GCB สามารถพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นมากในช่วงปลาย จาก 51.3 เป็น 64.0 เมกะปาสคาล ระหว่าง 60 ถึง 90 วัน จนใกล้เคียงกับส่วนผสม 100HFA เนื่องจากเศษอิฐมอญมี SiO_2 และ Al_2O_3 สูง ซึ่งเป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตที่ดีซึ่งอาจจะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ ร่วมกับแคลเซียมจากเถ้าลอยที่เหลืออยู่สอดคล้องกับผลวิจัยของไพฑูรย์ และคณะ [13] ในส่วนของส่วนผสม 50GPM ให้กำลังต่ำที่สุดเท่ากับ 40.8 เมกะปาสคาล อาจจะเกิดจากหินพัมมิสมีความถ่วงจำเพาะต่ำบ่งชี้ถึงวัสดุที่มีรูพรุนสูง ส่งผลให้เนื้อมอร์ต้าร์มีช่องว่างมากขึ้น สำหรับส่วนผสม 100GRC, 100GCB และ 100GPM ให้กำลังอัดที่ 90 วัน เพียง 14.8, 3.9 และ 3.1 MPa ตามลำดับ โดยเศษอิฐและพัมมิสแทบไม่สามารถก่อตัวและพัฒนากำลังได้ สาเหตุอธิบายได้ว่า เมื่อไม่มีเถ้าลอยแคลเซียมสูงในระบบ จึงขาดแคลเซียมที่ว่องไวซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนากำลังที่อุณหภูมิบ่มเพียง 60 องศาเซลเซียส

3.3 ความหนาแน่นแห้ง ความพรุน และการดูดซับน้ำ

ผลทดสอบความหนาแน่นแห้ง ความพรุน และการดูดซับน้ำของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน แสดง

ESTACON 2026 | 17th

ดังตารางที่ 3 ความหนาแน่นแห้งของมอร์ต้าร์ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยวัสดุผงทุกชนิด โดยส่วนผสม 100HFA มีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 2,150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และส่วนผสม 100GPM มีความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ 1,924 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แนวโน้มนี้สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผงในตารางที่ 1 โดยหินพัมมิสที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำสุดและโครงสร้างที่มีรูพรุนสูงทำให้ได้มอร์ต้าร์ที่เบาที่สุด ในทางเดียวกัน ความพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ โดยส่วนผสมควบคุมมีความพรุนต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 6.12 และการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 2.20 เนื่องจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปริมาณมากที่เติมเต็มช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าร์ ขณะที่ส่วนผสมที่มีพัมมิส คือ 50GPM และ 100GPM มีความพรุนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 17.41 และ 16.93 ตามลำดับ และการดูดซึมน้ำสูงสุดถึงร้อยละ 7.48 จากทั้งความพรุนในตัวของพัมมิสและปริมาณผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ลดลงเมื่อไม่มีเถ้าลอยแคลเซียมสูง

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความเร็วของคลื่นผ่านตัวอย่างที่อายุ 28 วัน

ชื่อส่วนผสม	Dry density (kg/m^3)	Porosity (%)	Water absorption (%)	Thermal conductivity coefficient (W/m K)	UPV (m/s)
100HFA	2,150	6.12	2.20	2.12	3254
50GRC	2,137	11.80	4.99	1.74	3387
100GRC	2,072	12.30	5.24	1.60	1772
50GCB	2,105	12.40	4.38	1.71	2577
100GCB	2,071	12.35	4.43	1.60	1598
50GPM	2,058	17.41	7.09	1.55	2612
100GPM	1,924	16.93	7.48	1.35	1563

3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความเร็วของคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลงและความพรุนที่เพิ่มขึ้น ส่วนผสมควบคุม 100HFA มีค่าการนำความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.12 W/m.K เนื่องจากเป็นเนื้อมอร์ต้าร์ที่แน่นและมีช่องว่างน้อย ในขณะที่ส่วนผสม 100GPM มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.35 W/m.K คิดเป็นการลดลงประมาณร้อยละ 36 จากส่วนผสมควบคุม เนื่องจากอากาศที่บรรจุอยู่ในรูพรุนเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี การเพิ่มความพรุนจึงขัดขวางเส้นทางการถ่ายเทความร้อนและลดการนำความร้อนลง ผลการศึกษานี้แสดงว่าแม้การแทนที่เถ้าลอยด้วยวัสดุผงในอัตราสูงจะลดกำลังอัด แต่ก็ให้ประโยชน์ด้านการเป็นฉนวนความร้อน โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีพัมมิส ทั้งนี้ส่วนผสม 50GPM ให้ผลการศึกษาที่น่าสนใจ คือมีค่าการนำความร้อนต่ำเท่ากับ 1.55 W/m.K และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 31.2 เมกะปาสคาล ซึ่งอาจจะนำไปใช้ในงานวัสดุโครงสร้างน้ำหนักเบาหรือฉนวนความร้อน

ค่า UPV สะท้อนความต่อเนื่องและความสมบูรณ์ของเนื้อมอร์ต้าร์ และมีความสัมพันธ์ที่ดีกับกำลังอัด [14] ส่วนผสมควบคุมมีค่า UPV สูงสุดเท่ากับ 3,254 m/s ขณะที่ส่วนผสม 100GRC, 100GCB และ 100GPM มีค่าต่ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าต่ำ และยืนยันว่าเนื้อมอร์ต้าร์มีความต่อเนื่องต่ำและมีช่องว่างมาก [14] อย่างไร

ESTACON 2026 | 17th

ก็ตาม ส่วนผสม 50GRC มีค่า UPV สูงที่สุดเท่ากับ 3,387 m/s แม้จะมีความพรุนสูงกว่าส่วนผสมควบคุม ซึ่งอธิบายได้ว่า UPV ขึ้นกับความแข็งเกร็งและความต่อเนื่องของโครงสร้างของแข็งมากกว่าปริมาตรรูพรุนรวมเพียงอย่างเดียว เศษคอนกรีตที่มีมวลรวมเดิมและผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่แข็งเกร็ง ประกอบกับแคลเซียมสูงที่ส่งเสริมการเกิดเจล C-A-S-H ที่ต่อเนื่อง [15] จึงทำให้คลื่นเดินทางผ่านได้เร็วแม้มีรูพรุน

5. สรุป

1. การแทนที่เถ้าลอยด้วยวัสดุผงทุกชนิดทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากวัสดุผงที่ได้จากการบดย่อยมีรูปร่างเหลี่ยมมุมและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าอนุภาคทรงกลมของเถ้าลอย โดยเศษคอนกรีตลดค่าการไหลแผ่มากที่สุด มอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมยังคงเทได้ในทางปฏิบัติ

2. ส่วนผสมควบคุม 100HFA ให้กำลังอัดสูงสุด 66.7 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน และกำลังอัดของทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม การแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ยังคงให้กำลังอัดในระดับที่ใช้งานเชิงโครงสร้างได้ โดยส่วนผสม 50GCB, 50GRC และ 50GPM ให้กำลังอัดเท่ากับ 64.0, 55.0 และ 40.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งเศษอิฐมอญมีประสิทธิภาพสูงสุดจากการเป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตที่ดี

3. การแทนที่เถ้าลอยด้วยวัสดุผงชนิดต่าง ๆ ร้อยละ 100 ทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก เนื่องจากระบบขาดแคลเซียมที่ว่องไวซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนากำลังที่อุณหภูมิบ่มเพียง 60 องศาเซลเซียส

4. ความหนาแน่นแห้งลดลง ขณะที่ความพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่โดยพัมมิสให้มอร์ต้าร์ที่เบาที่สุด ค่าการนำความร้อนลดลงตามความพรุนที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 100GPM ต่ำสุด แสดงศักยภาพเป็นวัสดุน้ำหนักเบาเชิงฉนวนความร้อน ส่วนค่า UPV สอดคล้องกับกำลังอัด โดยส่วนผสมที่แทนที่ร้อยละ 100 มีค่าต่ำสุด

5. โดยภาพรวม วัสดุผงทั้งสามชนิดสามารถใช้เป็นวัสดุสารตั้งต้นร่วมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงได้ในระดับการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 50 โดยเฉพาะเศษอิฐมอญและเศษคอนกรีตที่ให้กำลังอัดสูง ส่วนหินพัมมิสเหมาะกับงานที่ต้องการน้ำหนักเบาและการเป็นฉนวนความร้อนมากกว่ากำลังสูง เป็นแนวทางที่ช่วยลดของเสียจากการก่อสร้างและส่งเสริมวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนทุนวิจัยในการจัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบ และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Supriya, Chaudhury, R., Sharma, U., Thapliyal, P. C., & Singh, L. P. (2023). “Low-CO_2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector.” Journal of Cleaner Production, 417, 137466.

[2] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). “Geopolymer technology: The current state of the art.” Journal of Materials Science, 42(9), 2917–2933.

[3] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites, 29(3), 224–229.

[4] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). “Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems.” Journal of Materials

Science, 47(12), 4876–4883.
[5] Nasaeng, P., Wongsa, A., Cheerarot, R., & Sata, V. (2022). “Strength enhancement of pumice-based geopolymer paste by incorporating recycled concrete and calcined oyster shell powders.” Case Studies in Construction Materials, 17(June), e01307.
[6] Wong, C. L., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Yap, S. P. (2020). “Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder.” Journal of Building Engineering, 32(June), 101655.
[7] Namchiengtai, C., Nasaeng, P., & Sata, V. (2025). “Effect of Ground Pumice on the Properties of Fly Ash Geopolymer Paste.” Thai Science and Technology Journal, 33(1), 87–105.
[8] ASTM C109/C109M-20b. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), in *Book of Standards*, West Conshohocken, PA: ASTM International.
[9] ASTM C1437-20. (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, in *Book of Standards*, p. 2.
[10] ASTM C642-21 (2022). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, in *Book of Standards*, p. 3.
[11] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., & Cao, T. (2011). “High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash.” Journal of Materials in Civil Engineering, 23(3), 264–270.
[12] Hwang, C. L., Damtie Yehualaw, M., Vo, D. H., & Huynh, T. P. (2019). “Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders.” Construction and Building Materials, 218, 519–529.
[13] Nasaeng, P., Wongsa, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2022). “Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Paste Mixed with Ground Clay Brick.” JOURNAL Science and Technology, 3(3).
[14] Naenudon, S., Vilaivong, A., Zaetang, Y., Tangchirapat, W., Wongsa, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2022). “High flexural strength lightweight fly ash geopolymer mortar containing waste fiber cement.” Case Studies in Construction Materials, 16(May).
[15] Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). “Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash.” Construction and Building Materials, 35, 718–729.

ผลของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลต่อพฤติกรรมภายใต้แรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

Effects of Recycled Annealing Wires on Flexural Behavior of Precast Reinforced Concrete Beams

ภูริภัทร บัวกลาง[1], จักษดา ธำรงวุฒิ[1,*], จีรศักดิ์ สุพรมวัน[1], ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี[1], พรรัตน์ ธำรงวุฒิ[2] และ หวังแก้ว บุญสวน[3]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
[3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
84 ถนนมิตรภาพ-หนองคาย อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: jaksada.th@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ลวดผูกเหล็กรีไซเคิลเพื่อพัฒนาสมรรถนะของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยระเบียบวิธีการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุและการทดสอบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัด ในส่วนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงผ่าซีก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต โดยแปรเปลี่ยนปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร และกำหนดกำลังรับแรงอัดเป้าหมายของคอนกรีตอ้างอิงเท่ากับ 30 MPa ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตในทุกสัดส่วนที่ทำการศึกษา โดยการแทนที่ด้วยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในสัดส่วนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงผ่าซีก และกำลังรับแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิล จากผลการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการตอบสนองเชิงโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคานดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงภายใต้สภาวะขีดจำกัดการใช้งาน นอกจากนี้ คานที่เสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลยังมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแอ่นตัวได้ดีกว่าคานอ้างอิงอย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของลวดผูกเหล็กภายในเนื้อคอนกรีต ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวภายในและชะลอการขยายตัวของรอยแตกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานสำเร็จรูป ลวดผูกเหล็กรีไซเคิล เสริมกำลัง

Abstract

This study presents the application of recycled annealing wires to enhance the performance of reinforced concrete (RC) beams. The experimental program was divided into two parts: material mechanical property testing and the flexural behavior testing of RC beams. In the first part, the effects

of recycled annealing wires on the compressive, splitting tensile, and flexural strengths of concrete were investigated by varying the wire contents at 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.0% by volume, with a target compressive strength of 30 MPa at a 28-day curing age. The experimental results revealed that the incorporation of recycled annealing wires improved the mechanical properties of concrete across all investigated proportions; specifically, the addition of 1.0% by volume significantly increased the compressive, splitting tensile, and flexural strengths. In the second part, the load- behavior and failure modes of RC beams strengthened with recycled annealing wires were evaluated. The results indicated that the load response and failure characteristics of these beams were comparable to those of the reference RC beams under serviceability limit states. Furthermore, the recycled annealing wires-strengthened beams exhibited a distinctively higher deflection resistance than the reference beams, owing to the uniform distribution of the wires within the concrete matrix, which enhanced internal bonding and effectively arrested crack propagation.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Precast Beam, Recycled Annealing Wire, Strengthening

1. บทนำ

ในปัจจุบัน คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านความรวดเร็วในการผลิต การควบคุมคุณภาพที่สม่ำเสมอจากโรงงาน และการลดระยะเวลาการทำงานหน้างาน [1], [2] อย่างไรก็ตาม คอนกรีตทั่วไปยังคงมีข้อจำกัดหลักในด้านความเปราะและความต้านทานแรงดึงที่ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่ต้องเผชิญกับแรงกระแทกหรือแรงสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่งและการติดตั้ง รวมถึงการเกิดความเค้นหนาแน่นสูง บริเวณจุดยกและรอยต่อโครงสร้าง ซึ่งการแตกร้าวในบริเวณเหล่านี้จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความคงทนของโครงสร้างโดยรวม [3] การเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการควบคุมรอยแตกร้าวด้วยเส้นใยเหล็ก (steel fiber) จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการยกระดับสมรรถนะเชิงโครงสร้างของคอนกรีต [4] โดยเส้นใยเหล็กจะทำหน้าที่ถ่ายโอนแรงผ่านรอยแตกขนาดเล็กและช่วยชะลอการขยายตัวของรอยร้าว ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะหลังการแตกร้าว และความปลอดภัยของชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [5] อย่างไรก็ตาม การใช้เส้นใยเหล็กเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีราคาสูง ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนค่าวัสดุต่อหน่วยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

นอกเหนือจากความต้องการทางวิศวกรรมแล้ว ความยั่งยืนตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้กลายเป็นประเด็นสำคัญในอุตสาหกรรม การใช้ลวดผูกเหล็ก (annealing wire) ปริมาณมหาศาลในงานโครงสร้างก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก การแปรสภาพขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้ให้กลายเป็นลวดผูกเหล็กรีไซเคิล (recycled annealing wire) เพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมในคอนกรีต จึงเป็นนวัตกรรมที่มี

ESTACON 2026 | 17th

ศักยภาพสูง ไม่เพียงแต่ช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการกำจัดขยะ แต่ยังช่วยลดการพึ่งพาเส้นใยเหล็กเชิงพาณิชย์ ซึ่งส่งผลดีต่อความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการในระยะยาว

แม้ว่าจะมีการศึกษาอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก แต่งานวิจัยที่มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความซับซ้อนยังมีข้อมูลจำกัด งานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตมักเน้นทดสอบสมบัติเชิงกลระดับวัสดุ เช่น กำลังอัดหรือกำลังดึง แต่ยังขาดการศึกษาพฤติกรรมระดับชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งรูปทรงเรขาคณิต ความยาว และลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการยึดเกาะหน่วงเหนี่ยวและกลไกการรับแรงที่แตกต่างออกไป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยลวดผูกเหล็กรีไซเคิล เพื่อเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการและเป็นฐานข้อมูลสำคัญในการพัฒนามาตรฐานหรือแนวทางปฏิบัติ สำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุรีไซเคิลในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้คอนกรีตอ้างอิงที่มีกำลังรับแรงอัดเป้าหมายเท่ากับ 30 MPa โดยจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร ซึ่งผ่านการบ่มตามมาตรฐานที่อายุ 28 วัน สำหรับวัสดุมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบได้รับการจัดหาจากแหล่งในจังหวัดนครราชสีมา และใช้น้ำประปาสะอาดในการผสม คอนกรีตดังกล่าวทำการเสริมกำลังด้วยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลเบอร์ 18 จากไซต์งานก่อสร้างในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา (มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 มิลลิเมตร และความยาว 60 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 1 เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และเหล็กเส้นกลมผิวเรียบชั้นคุณภาพ SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ถูกใช้เป็นเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ตามลำดับ โดยวัสดุทุกประเภทผ่านการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลตามเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM



รูปที่ 1 ลวดผูกเหล็กรีไซเคิล

2.1 การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 (Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete) [6] โดยกำหนดกำลังรับแรงอัดประลัยออกแบบเท่ากับ 30 MPa (ประมาณ 300 kg/cm^2) สำหรับการบ่มตัวอย่างคอนกรีตใช้วิธีการหุ้มด้วยพลาสติกใสเพื่อรักษาความชื้นจนกระทั่งครบอายุการทดสอบที่ 28 วัน

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาตร 1 m^3

วัสดุ	ปริมาณ	หน่วย
ปูนซีเมนต์	372.87	kg
น้ำ	180	kg
ทราย	746.32	kg
หิน	1107	kg
น้ำหนักรวม	2406.19	kg

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

2.2.1 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงผ่าซีก

การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงผ่าซีกดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C39 [7] และ ASTM C496 [8] ตามลำดับ โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และความสูง 200 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบนี้ศึกษาแปรผันอัตราส่วนการเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร

2.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดกระทำตามมาตรฐาน ASTM C78 [9] โดยใช้คานคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150×150×600 มิลลิเมตร ทั้งนี้มีการแปรผันปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้ง โดยการเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงผ่าซีก

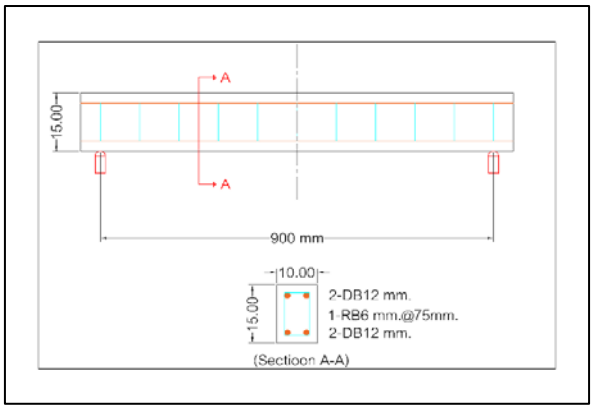
2.3 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป มีขนาดหน้าตัดกว้าง 100 มิลลิเมตร ลึก 150 มิลลิเมตร และยาว 1,000 มิลลิเมตร คานตัวอย่างถูกออกแบบให้มีกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 30 MPa โดยมีการแปรผันปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ร้อยละ 0, 0.50 และ 1.00 โดยปริมาตร ในส่วนของการเสริมเหล็กภายในโครงสร้างคานทุกตัวอย่างเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดหลักด้วยเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (4DB12) และเสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จัดวางที่ระยะห่าง 75 มิลลิเมตร (RB6@75 mm) ตลอดความยาวคานดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้พฤติกรรมการวิบัติของคานเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดเป็นหลัก หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเทหล่อ คอนกรีตจะถูกบ่มตัวอย่างด้วยวิธีการหุ้มด้วยพลาสติกใสเป็นระยะเวลา 28 วันก่อนนำไปทำการทดสอบ ตารางที่ 2 แสดงอัตราสัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างทดสอบ	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	ลวดผูกเหล็ก (kg) / (%)
RB-0.90-0AW	6.72	3.24	13.4	20	0 / 0.00
RB-0.90-0.5AW	6.72	3.24	13.4	20	0.71 / 0.50
RB-0.90-1.0AW	6.72	3.24	13.4	20	1.42 / 1.00

การทดสอบติดตั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็กเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดัดร่วมกับคานถ่ายแรงเพื่อประยุกต์น้ำหนักแบบ 4 จุด แสดงในรูปที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกด (load cell) บริเวณกึ่งกลางด้านบนของคาน เพื่อบันทึกค่าระยะแรงกระทำ และติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบแปรเปลี่ยนได้ (LVDT) บริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงคานเพื่อวัดค่าการแอ่นตัว จากนั้นเชื่อมต่อสัญญาณจาก Load Cell และ LVDT เข้ากับระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ สำหรับบันทึกข้อมูล การเพิ่มน้ำหนักดำเนินไปอย่างต่อเนื่องควบคู่กับการสังเกตพฤติกรรมทางโครงสร้างและการพัฒนารอยร้าวของคานจนกระทั่งเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2 รูปแบบการเสริมเหล็กของคานคอนกรีต



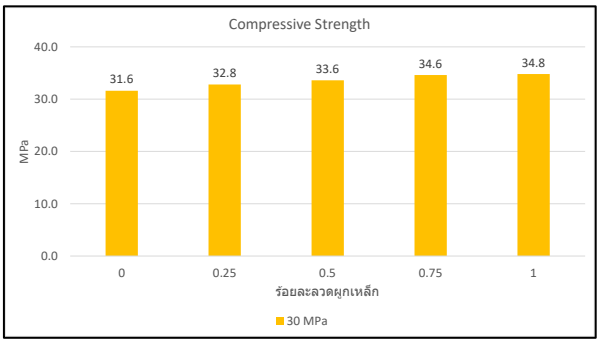
รูปที่ 3 การติดตั้งคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

3.1.1 กำลังรับแรงอัด

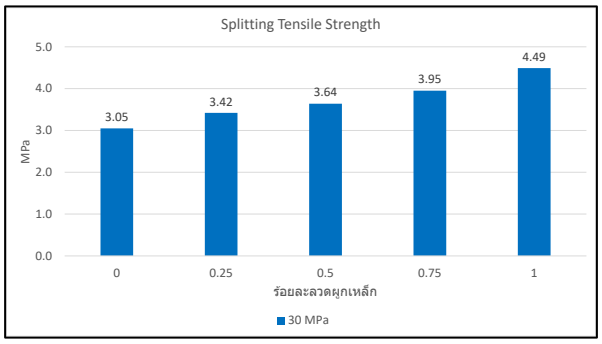
จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิล (ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากลวดผูกเหล็กที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ไว้ และช่วยต้านทานการขยายตัวด้านข้างเมื่อถูกแรงอัด ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและทนต่อการแตกกระจายได้ดีขึ้น โดยคอนกรีตที่เสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในปริมาณร้อยละ 1.0 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 34.8 MPa ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 30 MPa และจากการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) พบว่า คอนกรีตที่ผสมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 1 มีค่าการยุบตัวประมาณ 5 เซนติเมตร ซึ่งบ่งชี้ว่าคอนกรีตดังกล่าวยังคงมีความสามารถในการทำงานที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานโครงสร้างได้



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิล

3.1.2 กำลังรับแรงดึงผ่าซีก

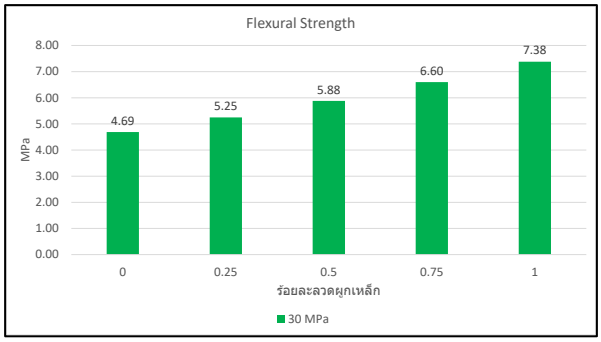
จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตอ้างอิงที่ไม่มีการผสมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 3.05 MPa และเมื่อปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ กลไกที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมยึดระหว่างหน้าสัมผัสของรอยร้าว ช่วยดึงรั้งไม่ให้รอยร้าวขยายตัว และบังคับให้รอยร้าวเกิดการแตกแขนงออกไปในหลายทิศทาง (multiple cracking) แทนที่จะวิบัติเป็นแนวเส้นตรง นอกจากนี้ ลักษณะผิวที่ขรุขระ การมีสนิมเล็กน้อย และรูปทรงที่ดัดงอของลวดผูกเหล็กรีไซเคิล ยังช่วยเพิ่มแรงเสียดทานและได้รับการยึดเกาะเชิงกลกับเนื้อคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงผ่าซีกและปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิล

3.1.3 กำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร พบว่าปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 6 กลไกสำคัญที่ส่งผลให้พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้น คือ ลวดผูกเหล็กรีไซเคิลทำหน้าที่เปลี่ยนสมบัติของคอนกรีตจากวัสดุเปราะให้เป็นวัสดุเหนียว เมื่อเกิดรอยร้าวแรกขึ้น ลวดผูกเหล็กที่วางตัวแบบสุ่ม (randomly oriented) จะทำหน้าที่รับแรงดึงแทนเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คานคอนกรีตไม่เกิดการวิบัติในทันที แต่จะชะลอการขยายตัวของรอยร้าว นอกจากนี้ลักษณะที่คดงอและขรุขระของลวดผูกเหล็กรีไซเคิลยังช่วยเพิ่มการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้ดีกว่าลวดผิวเรียบ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการดึงให้ลวดหลุดหรือขาดออกจากเนื้อคอนกรีตในขณะที่คานรับแรงดัด โดยคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่ปริมาณร้อยละ 1.0 มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 7.38 MPa และพบว่าเมื่อปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างคอนกรีตสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่าคอนกรีตอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลมีความเหนียว (toughness) เพิ่มขึ้นตามปริมาณลวดผูกเหล็กที่ผสมในเนื้อคอนกรีต จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในเนื้อคอนกรีตที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมภายใต้แรงดัดของคานคอนกรีตเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิล



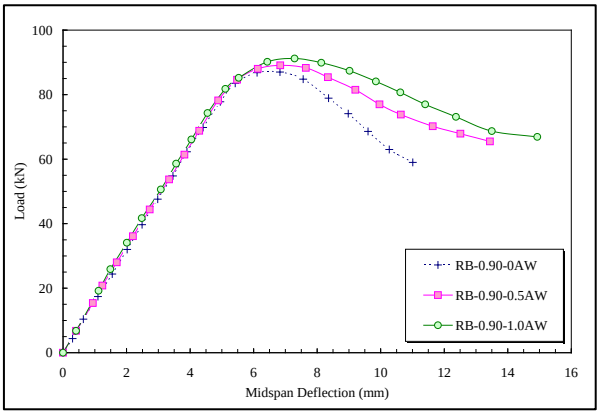
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิล

3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริม

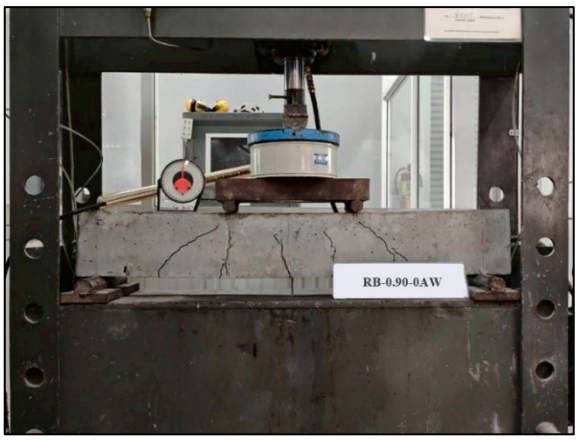
3.2.1 พฤติกรรมรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติ

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง (RB-0.90-0AW) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิล (RB-0.90-0.5AW และ RB-0.90-1.0AW) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าพฤติกรรมการรับแรงของคานทุกตัวอย่างแบ่งเป็นสองช่วง ในช่วงแรกคานแสดงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการครากที่แรงกระทำประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของแรงกระทำสูงสุด จากนั้นช่วงที่สองการแตกร้าวของคอนกรีตขยายตัวเพิ่มมากขึ้น และระยะแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนคานวิบัติในที่สุด คานทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมโดยรวมที่ใกล้เคียงกัน และมีรูปแบบการวิบัติแบบดัด (flexural failure) ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิล (RB-0.90-0.5AW และ RB-0.90-1.0AW) พบว่าคานทั้งสองตัวอย่างมีความสามารถในการรับแรงกระทำและความเหนียวที่สูงกว่าคานอ้างอิง (RB-0.90-0AW) อย่างเห็นได้ชัด โดยสามารถแอ่นตัวได้มากกว่า เนื่องจากลวดผูกเหล็กรีไซเคิลที่กระจายตัวอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ และต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใส่ลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในปริมาณที่เหมาะสม ไม่เพียงช่วยปรับปรุงกำลังสูงสุดของคาน แต่ยังเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติให้มีความเหนียวที่เด่นชัดขึ้น ถือเป็นคุณลักษณะสำคัญในการเพิ่มความปลอดภัยและความต้านทานภัยพิบัติให้แก่โครงสร้าง



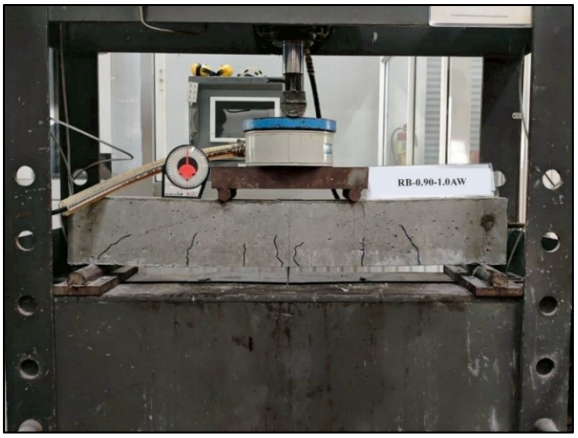
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน



รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของคาน RB-0.90-0AW



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของคาน RB-0.90-0.5AW



รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของคาน RB-0.90-1.0AW

3.2.2 เปรียบเทียบกำลังของคาน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกระทำที่จุดครากจากผลการทดสอบที่ทดสอบได้ (P_{Test}) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง (RB-0.90-0AW) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิล (RB-0.90-0.5AW และ RB-0.90-1.0AW) ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลร้อยละ 1.0 (RB-0.90-1.0AW) ให้แรงกระทำที่จุดครากสูงสุด รองลงมาได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลร้อยละ 0.5 (RB-0.90-0.5AW) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง (RB-0.90-0AW) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลร้อยละ 0.50 และ 1.0 พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยลวดผูกเหล็กรีไซเคิลร้อยละ 0.50 และ 1.0 มีแรงกระทำที่จุดครากสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 1.1 และ 3.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลมีแนวโน้มช่วยเพิ่มแรงกระทำที่จุดครากของคานได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบแรงกระทำของคาน

Specimen	ลวดผูกเหล็ก (%)	P_A (kN)	P_B (kN)	P_{Test} (kN)
RB-0.90-0AW	0	83.5	82.6	83.1
RB-0.90-0.5AW	0.50	84.6	83.8	84.2
RB-0.90-1.0AW	1.0	85.2	85.9	85.6

* P_A และ P_B คือ แรงกระทำที่จุดครากจากผลการทดสอบที่ทดสอบได้จากตัวอย่าง A และ B

4. สรุปผล

1) การเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลในคอนกรีตส่งผลให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงผ่าซีก กำลังรับแรงเฉือนตรง และกำลังรับแรงดัด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง โดยปริมาณการเสริมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 1.0

2) การเสริมลวดผูกเหล็กรีไซเคิลช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้เล็กน้อย แต่สามารถพัฒนาประสิทธิภาพกำลังรับแรงดึงผ่าซีกและกำลังรับแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากลวดผูกเหล็กช่วยเพิ่ม

ESTACON 2026 | 17th

ความต้านทานแรงดึงภายในเนื้อคอนกรีตภายใต้แรงกระทำ

3) พฤติกรรมการรับแรงของคานแบ่งเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นพฤติกรรมเชิงเส้น เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 45-70 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ก่อนเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อเหล็กเสริมเริ่มเกิดการครากที่ร้อยละ 70-80 ซึ่งรอยแตกร้าวจะขยายตัวต่อเนื่องพร้อมกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ

4) เมื่อปริมาณลวดผูกเหล็กรีไซเคิลเพิ่มขึ้น คานคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีเพิ่มความสามารถในการเสียรูปและความเหนียวสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคานอ้างอิงที่ไม่ผสมลวดผูกเหล็กรีไซเคิล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่สัญญา FF68/NKR/141

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Jang, Y., Lee, J.-M., Son, J. (2022). Development and application of an integrated management system for off-site construction projects. Buildings, 12(7), 1063.

[2] จักษดา ธำรงวุฒิ (2567). นวัตกรรมเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตผสมเถ้าขยะเทศบาลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับงานโครงสร้างพื้นฐาน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[3] จักษดา ธำรงวุฒิ (2568). การใช้ประโยชน์จากขยะผิวทางรีไซเคิลในการผลิตเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตสำหรับต้นแบบเมืองอัจฉริยะ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[4] Song, P.S. and Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials, 18, 669-673.

[5] Ravichandran, D., Prem, P.R., Kaliyavaradhan, S.K. and Ambily, P.S. (2022). Infuence of fibers on fresh and hardened properties of ultra high-performance concrete (UHPC) - A review. Journal of Building Engineering, 57, 104922.

[6] ACI Committee 211. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

[7] ASTM C39. (2018). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

[8] ASTM C496. (2018). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

[9] ASTM C78. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมยางแอสฟัลต์รีไซเคิล: การวิเคราะห์การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยวิธี GRA TOPSIS และ WSM

Multi-Objective Optimization of Mortar with Recycled Asphalt Pavement Aggregate: Full Factorial Design with GRA, TOPSIS and WSM

ภัทรพงษ์ จันทร์วิจิตร์[1], จิระยุทธ สืบสุข[1,*] และคมกร ไชยเดชาธร[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: jirayut.su@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 091 828 0696

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงทดลองด้วยแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบขนาด 5×5×3 แบบมีการทำซ้ำ รวมตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 225 ชิ้น เพื่อประเมินผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/C: 0.40–0.70) ปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวมยางแอสฟัลต์รีไซเคิล (RAP: ร้อยละ 0–100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด) และอายุบ่ม (CT: 7–90 วัน) ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (R1) และน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (R2) ของมอร์ตาร์ ผลการสลายผลรวมกำลังสองพบว่าปริมาณ RAP เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดมากที่สุด (ร้อยละ 37.1) รองลงมาคืออัตราส่วน w/C (ร้อยละ 27.9) และอายุบ่ม (ร้อยละ 14.7) สำหรับน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรนั้น อัตราส่วน w/C มีอิทธิพลสูงสุด (ร้อยละ 21.4) แต่ค่าคลาดเคลื่อนคงเหลือสูงถึงร้อยละ 59.8 แสดงว่าตัวแปรทางส่วนผสมเพียงลำพังควบคุมความหนาแน่นได้อย่างจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธี Grey Relational Analysis (GRA) TOPSIS และ Weighted Sum Method (WSM) ที่น้ำหนัก 70:30 ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกันทั้งสามวิธี โดยส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ w/C = 0.40 RAP ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และอายุบ่ม 90 วัน (กำลังรับแรงอัด 291.3 ksc หรือ 28.6 MPa; น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร 2,395.6 kg/m³) ซึ่งเป็นจุดหักงอ (knee point) บนแนวหน้าพาเรโตที่ประกอบด้วยส่วนผสมที่ไม่ถูกครอบงำ 6 ชุด ผลการศึกษาชี้ว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย RAP ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ไม่ทำให้สมรรถนะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับระดับการแทนที่ที่เหมาะสมซึ่งมีรายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ผสม RAP; การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ; การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์; GRA; TOPSIS; WSM

Abstract

This study reports a replicated 5×5×3 full factorial experiment comprising 225 specimens, conducted to quantify the effects of the water-to-cement ratio (w/C: 0.40–0.70), the fine-aggregate replacement level by reclaimed asphalt pavement aggregate (RAP: 0–100 wt.%), and the curing time (CT: 7–90 days) on the compressive strength (R1) and unit weight (R2) of mortar. Sum-of-squares decomposition showed that RAP content was the dominant factor for compressive strength, contributing 37.1%, followed by the w/C ratio (27.9%) and curing time (14.7%). For unit weight, the w/C ratio was the leading factor (21.4%), yet the residual error reached 59.8%, indicating that density can only be weakly controlled through mix-proportioning variables. Multi-objective optimisation by Grey Relational Analysis (GRA), TOPSIS and the Weighted Sum Method (WSM) with a 70:30 weighting converged on the same optimum: w/C = 0.40, 25 wt.% RAP and 90 days of curing (compressive strength 291.3 ksc ≈ 28.6 MPa; unit weight 2,395.6 kg/m³). This mixture is the knee point of a Pareto front containing six non-dominated solutions. The results indicate that replacing 25 wt.% of the fine aggregate with RAP does not significantly compromise performance, in agreement with the optimum replacement levels reported previously for RAP mortars.

Keywords: Mortar containing RAP; full factorial design; multi-objective optimization; GRA; TOPSIS; WSM

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลกกำลังเผชิญแรงกดดันสองด้านพร้อมกัน คือ การขาดแคลนมวลรวมธรรมชาติที่มีคุณภาพ และปริมาณเศษวัสดุผิวทางเดิมที่เพิ่มขึ้นจากงานบูรณะถนน มวลรวมยางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement: RAP) คือวัสดุที่ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์เก่า มีองค์ประกอบหลักเป็นมวลรวมแร่ธาตุที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มยางแอสฟัลต์ซึ่งเสื่อมสภาพจากออกซิเดชันตามอายุการใช้งาน การนำ RAP มาใช้เป็นมวลรวมในระบบซีเมนต์จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และปริมาณของเสียที่ต้องนำไปฝังกลบ [1,5]

อย่างไรก็ตาม การนำ RAP มาใช้ในมอร์ตาร์ซีเมนต์มีความท้าทายที่ต่างจากมวลรวมรีไซเคิลชนิดอื่น เพราะฟิล์มยางแอสฟัลต์ที่หุ้มผิวอนุภาค RAP เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และเฉื่อยต่อสารละลายด่างในเพสต์ซีเมนต์ ผิวสัมผัสระหว่าง RAP กับเพสต์จึงเป็นการสัมผัสกันของวัฏภาคอินทรีย์กับวัฏภาคอนินทรีย์ที่ไม่เข้ากัน

ในการอธิบายกลไกที่ทำให้เขตเปลี่ยนผ่านระหว่างมวลรวมกับเพสต์ (Interfacial Transition Zone: ITZ) ของมอร์ตาร์ผสม RAP อ่อนแอลงนั้น จำเป็นต้องแยกแยะให้ชัดเจนว่าฟิล์มแอสฟัลต์มิได้ไป “ยับยั้งการเกิด C-S-H” โดยตรง เนื่องจากซิลิกาที่ใช้สร้าง C-S-H มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S ในเนื้อปูนซีเมนต์เอง ($C_3S/C_2S + H_2O \longrightarrow$ C-

S-H + CH) ไม่ได้มาจากผิวของมวลรวม ชนิดของมวลรวมจึงไม่ได้เป็นตัวจำกัดปริมาณซิลิกาที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกิริยา หลักฐานเชิงจุลภาคของ Brand และ Roesler [1,2] ชี้ว่าความอ่อนแอของ ITZ เกิดจากกลไกทางกายภาพและกลไกที่ผิวสัมผัสร่วมกันสามประการ ได้แก่ (1) ผิวที่ไม่ชอบน้ำทำให้เพสต์เปียกผิวมวลรวมได้ไม่ดี และเกิดการสะสมของฟิล์มน้ำ (internal bleeding) บริเวณผิวสัมผัส ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เฉพาะที่สูงขึ้นและความพรุนของ ITZ เพิ่มขึ้น (2) ในบริเวณที่มีน้ำสะสมดังกล่าว ผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) เติบโตได้ใหญ่และเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันขนานกับผิวมวลรวม กลายเป็นระนาบอ่อนที่แตกร้าวได้ง่าย และ (3) พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างเพสต์กับฟิล์มแอสฟัลต์มีค่าต่ำ ประกอบกับตัวฟิล์มแอสฟัลต์เองมีกำลังและโมดูลัสต่ำ การวิบัติจึงมักเกิดขึ้นภายในเนื้อฟิล์ม (cohesive failure) มากกว่าที่ผิวรอยต่อ กล่าวโดยสรุป ปัญหาอยู่ที่ “ความหนาแน่นและแรงยึดเหนี่ยวของ ITZ” มิใช่ “ปริมาณ C-S-H ที่ผลิตได้”

ในทางกลับกัน ประเด็นเรื่องซิลิกากลับมีบทบาทสำคัญเมื่อพิจารณาแนวทางปรับปรุง ITZ กล่าวคือ ผลึก CH ที่สะสมอยู่ใน ITZ เป็นสารตั้งต้นที่พร้อมทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (CH + SiO_2 ที่ว่องไว + H_2O ⟶ C-S-H) หากเติมวัสดุปอซโซลานซึ่งให้ซิลิกาว่องไว เช่น ซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย ผลึก CH ขนาดใหญ่ใน ITZ จะถูกเปลี่ยนเป็น C-S-H ทุติยภูมิที่แน่นกว่า ทำให้ ITZ หนาแน่นขึ้นและกำลังยึดเหนี่ยวดีขึ้น [4] หลักการเดียวกันนี้ใช้อธิบายมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate: RCA) ได้เช่นกัน เพราะมอร์ตาร์เก่าที่ติดอยู่บนผิว RCA มี CH ปริมาณมากซึ่งต้องอาศัยซิลิกาว่องไวจากภายนอกเพื่อเปลี่ยนเป็น C-S-H อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงชนิดเดียวโดยเจตนา เพื่อแยกอิทธิพลของตัวแปรพื้นฐานทั้งสามให้ชัดเจนก่อน การเติมวัสดุปอซโซลานจึงถูกกำหนดไว้เป็นขอบเขตของงานวิจัยขั้นถัดไป

สำหรับดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index: CI) และดัชนีซัลโฟน (Sulfoxide Index: SI) ที่วัดด้วย FTIR-ATR นั้น เป็นตัวชี้วัดระดับการเสื่อมสภาพจากออกซิเดชันของยางแอสฟัลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งเปราะ และพลังงานพื้นผิวอิสระของฟิล์ม จึงใช้ประเมินแนวโน้มศักยภาพการยึดเหนี่ยวได้ [2] แต่ไม่ควรตีความว่าเป็นตัวชี้วัดปริมาณ C-S-H โดยตรง

ในด้านระเบียบวิธี งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้การทดลองแบบปรับทีละปัจจัย (OFAT) หรือแผนการทดลอง Taguchi ขนาดเล็ก (L9/L16) ซึ่งประเมินผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้ไม่ครบถ้วน [6] ทำให้การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและการกำหนดหน้าต่างกระบวนการที่เหมาะสมยังมีความไม่แน่นอนสูง นอกจากนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพมอร์ตาร์ผสม RAP ในเชิงหลายวัตถุประสงค์ (กำลังรับแรงอัดและน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร) ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเป็นระบบด้วยกรอบวิธีการที่ตรวจสอบความสอดคล้องกันได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์สัดส่วนการมีส่วนร่วมเชิงปริมาณของแต่ละปัจจัยและปฏิสัมพันธ์สองทางที่มีต่อการตอบสนองทั้งสอง ด้วยการสลายผลรวมกำลังสอง (2) ระบุส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเชิงหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธี GRA TOPSIS และ WSM พร้อมตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างสามวิธี (3) กำหนดหน้าต่างกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้จริง และ (4)

เปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อยืนยันความสมเหตุสมผลของชุดข้อมูล ความใหม่ของงานวิจัยนี้อยู่ที่การใช้แผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบแบบมีการทำซ้ำ (225 ชิ้น 3 ซ้ำต่อเซลล์) ซึ่งให้กำลังทางสถิติสูงกว่าแผนการทดลอง L9/L16 ที่ใช้กันทั่วไป และการสร้างแนวหน้าพาเรโตพร้อมระบุจุดหักงอสำหรับมอร์ตาร์ผสม RAP ซึ่งยังไม่ปรากฏในวรรณกรรมที่ทบทวน

2. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 กลไกผลกระทบของ RAP ต่อเมทริกซ์ซีเมนต์

ความไม่เข้ากันระหว่างฟิล์มแอสฟัลต์บนผิว RAP กับเพสต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้รับการอธิบายในระดับจุลภาคโดย Brand and Roesler [1,2] ซึ่งใช้ภาพ backscattered electron ร่วมกับ Euclidean distance mapping วิเคราะห์การกระจายตัวของความพรุน ผลึก CH และซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาภายใน ITZ ผลปรากฏว่า ITZ ของมวลรวมที่เคลือบแอสฟัลต์มีความพรุนสูงกว่าและมีผลึก CH เรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่ามวลรวมโดโลไมต์ อีกทั้งการวัดพลังงานพื้นผิวอิสระยืนยันว่าศักยภาพการยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์กับซีเมนต์มีค่าต่ำ ที่สำคัญคือการลดลงของโมดูลัสไม่ได้แปรตามความหนาหรือความแข็งของฟิล์มแอสฟัลต์ แต่แปรตามองค์ประกอบและแรงยึดเหนี่ยวของ ITZ เป็นหลัก [2] ข้อค้นพบนี้สนับสนุนคำอธิบายกลไกที่นำเสนอในหัวข้อ 1 ว่าปัญหาอยู่ที่คุณภาพของผิวสัมผัส มิใช่ปริมาณผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ในภาพรวม บทความทบทวนวรรณกรรมรายงานว่าการใส่ RAP ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 9–71 และความหนาแน่นลดลงร้อยละ 4–7 ขึ้นกับระดับการแทนที่และสัดส่วนขนาดของ RAP [6]

ในระดับมอร์ตาร์ Abraham and Ransinchung [3] แทนที่ทรายธรรมชาติด้วย RAP ละเอียดที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 พบว่ามีเพียงส่วนผสมที่ RAP ไม่เกินร้อยละ 50 เท่านั้นที่ยังผ่านเกณฑ์กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และความพรุนที่วัดด้วย Mercury Intrusion Porosimetry เพิ่มขึ้นตามปริมาณ RAP อย่างเป็นระบบ ต่อมา Abraham and Ransinchung [4] แสดงว่าการเติมซิลิกาฟูมและเถ้าชานอ้อยช่วยปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนและความคงทนของ มอร์ตาร์ผสม RAP ได้ ซึ่งเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สนับสนุนกลไกปอซโซลานที่กล่าวถึงในหัวข้อ 1 สำหรับงานในบริบทประเทศไทย Suebsuk et al. [5] รายงานว่ามวลรวม RAP ดูดซึมน้ำได้มากกว่าและช้ากว่าทราย ทำให้น้ำที่ยังไม่ถูกดูดซึมในช่วงต้นของการผสมเพิ่มความสามารถในการไหลแต่ลดกำลังรับแรงอัด และพบว่าการแทนที่ด้วย RAP ร้อยละ 25 ให้สมรรถนะดีที่สุดในช่วง w/C ต่ำ

ในด้านโครงสร้างจุลภาคเชิงกล Kamboj and Debbarma [7] ใช้ nano-indentation ร่วมกับ SEM ยืนยันว่าโมดูลัสเฉพาะที่ของ ITZ ในคอนกรีตผสม RAP ต่ำกว่าของมวลรวมธรรมชาติอย่างชัดเจน ขณะที่ Masi et al. [8] ประเมิน RAP ในฐานะมวลรวมรีไซเคิลสำหรับคอนกรีตและสรุปว่าระดับการแทนที่ปานกลาง ให้สมรรถนะที่ยอมรับได้ในงานที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก โดยรวมแล้ววรรณกรรมเห็นพ้องกันว่าการบ่มในระยะยาว ช่วยให้ ITZ ของทั้งมวลรวมธรรมชาติและ RAP แน่นขึ้น แต่ ITZ ของ RAP ยังคงด้อยกว่าเสมอ [1,7]

ESTACON 2026 | 17th

2.2 วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์

Grey Relational Analysis (GRA) ที่พัฒนาโดย Deng [6] เป็นกรอบการตัดสินใจหลายเกณฑ์ที่อิงระยะทาง เหมาะสมกับชุดข้อมูลขนาดกลาง-เล็กที่ไม่ต้องการข้อสมมติเกี่ยวกับการกระจายแบบพารามเตริก TOPSIS ของ Hwang and Yoon [7] ประเมินทางเลือกจากระยะทางเรขาคณิตพร้อมกันจากจุดอุดมคติบวกและลบในเมทริกซ์การตัดสินใจที่ถ่วงน้ำหนัก WSM เป็นวิธีรวมเชิงเส้นที่โปร่งใสที่สุด เหมาะสำหรับกรณีที่น้ำหนักสะท้อนลำดับความสำคัญทางวิศวกรรมที่กำหนดไว้ชัดเจน

การใช้ทั้งสามวิธีพร้อมกันทำหน้าที่เป็นการตรวจสอบความแข็งแกร่งของวิธีการ (methodological robustness check) เนื่องจากการที่ผลลัพธ์สอดคล้องกันในสามกรอบที่แตกต่างกันให้หลักฐานที่ชัดเจนกว่าวิธีเดียวมาก [8]

2.3 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบช่วยให้สามารถประเมินผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสองทางและสูงกว่าได้อย่างครบถ้วน ซึ่งเป็นสิ่งที่แผนการทดลองแบบ OFAT หรือ Taguchi L-array ไม่สามารถทำได้ [9] การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) ในรูปแบบ larger-is-better ให้ตัวชี้วัดที่รวมค่าเฉลี่ยและความแปรผันเข้าด้วยกัน โดย $\eta = -10\log_{10}[\text{mean}(1/y^2)]$ และการจัดลำดับปัจจัยตาม ΔS/N ช่วยแยกแยะปัจจัยวิกฤตจากปัจจัยที่ยืดหยุ่นได้ในทางปฏิบัติ

3. วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและการออกแบบส่วนผสม

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC Type I) ตามมาตรฐาน ASTM C150/C150M-24 เป็นวัสดุประสานเพียงชนิดเดียว โดยไม่เติมวัสดุปอซโซลานหรือสารผสมเพิ่มใด ๆ มวลรวม RAP ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์จริงในสนามจากแหล่งเดียว นำมาย่อยและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม. เพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียด การกระจายขนาดคละตรวจสอบตาม ASTM C136/C136M-19 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำตาม ASTM C128-22 และปริมาณยางแอสฟัลต์ในตัวอย่าง RAP ตรวจสอบตาม ASTM D6307-19 มวลรวมของกลุ่มควบคุม (RAP ร้อยละ 0) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.80 ± 0.05 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดมวลรวมละเอียดของ ASTM C33/C33M-23 การแทนที่ RAP ดำเนินการโดยน้ำหนัก (mass substitution) ที่ห้าระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดทั้งหมด

แผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 5×5×3 ครอบคลุมตัวแปรอิสระสามตัว ได้แก่ ปัจจัย A: อัตราส่วน w/C (0.40, 0.45, 0.50, 0.60 และ 0.70) ปัจจัย B: ปริมาณ RAP (ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก) และปัจจัย C: อายุบ่ม (7, 28 และ 90 วัน) รวมเป็นชุดส่วนผสม-อายุที่ไม่ซ้ำกัน 75 ชุด ชุดละ 3 ซ้ำ รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 225 ชิ้น การผสมดำเนินการด้วยเครื่องผสมมาตรฐานตาม ASTM C305-20 ตัวอย่างทดสอบเป็นลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 50 มม. หล่อและถอดแบบตาม ASTM C109/C109M-24 จากนั้นบ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบที่กำหนด ทั้งนี้อุณหภูมิบ่มถูกควบคุมที่ 30 ± 2 °C ซึ่ง

สูงกว่าค่า 23.0 ± 2.0 °C ที่ ASTM C511-21 กำหนด เนื่องจากต้องการจำลองสภาพภูมิอากาศเขตร้อนของประเทศไทย ความเบี่ยงเบนนี้ถูกใช้เหมือนกันในทุกส่วนผสมจึงไม่กระทบต่อการเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสม แต่ควรระวังเมื่อนำค่ากำลังไปเทียบกับงานที่บ่มที่ 23 °C โดยตรง

3.2 การทดสอบ

กำลังรับแรงอัดทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) โดยควบคุมอัตราการเพิ่มแรงที่ 900 N/s ซึ่งอยู่ในช่วง 900–1,800 N/s ที่ ASTM C109/C109M-24 กำหนดสำหรับลูกบาศก์ขนาด 50 มม. น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (kg/m³) คำนวณจากมวลในสภาพผิวแห้งอิ่มตัวและปริมาตรที่ได้จากการวัดขนาดจริง ของลูกบาศก์ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (ความละเอียด 0.02 มม.) ก่อนนำไปทดสอบกำลัง ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV) ภายในเซลล์การทดลองมีค่าไม่เกินร้อยละ 3.5 สำหรับกำลังรับแรงอัดและไม่เกินร้อยละ 1.2 สำหรับน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามแนวทางของ ASTM C670-15 แสดงถึงความสม่ำเสมอของการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติและการเพิ่มประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์อัตราส่วน S/N (larger-is-better: $\eta = -10\log_{10}[\text{mean}(1/y^2)]$) คำนวณในระดับเซลล์ (n = 3 ต่อเซลล์) สัดส่วนการมีส่วนร่วมประเมินด้วยการสลายผลรวมกำลังสองแบบลำดับ (sequential SS decomposition) ที่แยกผลหลักของปัจจัย A B C และค่าคลาดเคลื่อนคงเหลือ การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์สองทางประเมินผ่านตารางเดือยของค่าเฉลี่ยเซลล์และช่วงปฏิสัมพันธ์ (interaction range) การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ดำเนินการบนค่าเฉลี่ยเซลล์ 75 ค่า โดยใช้การทำให้เป็นมาตรฐาน min-max สำหรับทุกวิธี GRA ใช้สัมประสิทธิ์การแยกแยะ $\zeta = 0.5$ (มาตรฐาน) TOPSIS ใช้การทำให้เป็นมาตรฐานเวกเตอร์ตามด้วยการคำนวณระยะทางถ่วงน้ำหนัก WSM ใช้น้ำหนัก 0.70 (กำลังรับแรงอัด) และ 0.30 (น้ำหนักต่อหน่วย) จุด Pareto knee point ระบุโดยระยะตั้งฉากสูงสุดจากเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดสุดขั้วทั้งสองในปริภูมิวัตถุประสงค์ที่ทำให้เป็นมาตรฐาน

4. ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 สถิติเชิงพรรณนาและการกระจายตัวของการตอบสนอง

ตารางที่ 1 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของการตอบสนองทั้งสองจากตัวอย่างทั้ง 225 ชิ้น กำลังรับแรงอัดมีช่วงข้อมูลกว้างมาก (65.74–334.35 ksc หรือ 6.4–32.8 MPa; ค่าเฉลี่ย 197.4 ksc; CV = 30.0%) แสดงว่าการตอบสนองไวต่อปัจจัยที่ศึกษาและยืนยันว่าพิสัยการออกแบบเหมาะสม ส่วนน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรมีค่า CV เพียงร้อยละ 5.1 สะท้อนว่าความหนาแน่นถูกกำหนดโดยรูปทรงเรขาคณิตของการเรียงตัวของมวลรวมและพลังงานการอัดแน่นเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ได้ถูกควบคุมในการทดลองนี้ ค่าความเบ้ของกำลังรับแรงอัดเกือบเป็นศูนย์ (–0.01) บ่งชี้การกระจายตัวแบบสมมาตร ขณะที่น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรมีความเบ้เป็นบวก (+0.67) เนื่องจากอิทธิพลของตัวอย่างกลุ่มน้อยที่มี w/C ต่ำและไม่ผสม RAP ในช่วงอายุบ่มต้น

4.2 ผลกระทบหลักและการจัดลำดับปัจจัย

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองในแต่ละระดับของปัจจัย ผลที่น่าสนใจมีสามประการ ประการแรก กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดเกิดที่ w/C = 0.45 (235.4 ksc หรือ 23.1 MPa) ไม่ใช่ที่ w/C ต่ำที่สุด (0.40) ซึ่งดูขัดกับสมการ Abrams ที่เป็นฟังก์ชันลดทางเดียว คำอธิบายคือมวลรวม RAP ดูดซึมน้ำได้มากกว่าและช้ากว่าทราย [5] ที่ w/C = 0.40 น้ำอิสระที่เหลือหลังจากมวลรวมดูดซึมจึงไม่เพียงพอต่อการเปียกผิวและการไฮเดรชันอย่างทั่วถึง ทำให้อัดแน่นได้ยากและเหลือช่องว่างในเนื้อวัสดุ ส่วนที่ w/C สูงกว่า 0.45 ผลของน้ำอิสระส่วนเกินจะกลับมามีอิทธิพลเหนือกว่าและกำลังลดลงตามปกติ ประการที่สอง ระดับ RAP ที่ให้กำลังเฉลี่ยสูงสุดคือร้อยละ 25 (232.7 ksc) สูงกว่าส่วนผสมควบคุมที่ไม่มี RAP เพียงเล็กน้อย (230.7 ksc) ความแตกต่างนี้อยู่ในระดับเดียวกับความแปรผันของการทดสอบ จึงควรตีความว่า “ไม่แตกต่างกัน” มากกว่าจะสรุปว่า RAP ช่วยเพิ่มกำลัง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าที่พบว่าที่อายุต้นและ w/C ประมาณ 0.45 มอร์ตาร์ที่มี RAP ร้อยละ 25–50 ให้กำลังสูงกว่าส่วนผสมควบคุม [5] ประการที่สาม กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มในทุกส่วนผสม ตามจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต้องอาศัยความชื้นต่อเนื่อง

ตารางที่ 1 สถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรการตอบสนองทั้งสองตัว (N = 225)

การตอบสนอง	กำลังรับแรงอัด (ksc)	น้ำหนักต่อหน่วย (kg/m³)
ต่ำสุด	65.74	2,008.0
สูงสุด	334.35	2,682.2
ค่าเฉลี่ย	197.39	2,257.6
S.D.	59.16	114.2
CV (%)	29.97	5.06

ตารางที่ 2 ผลกระทบหลัก: ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด (R1) และน้ำหนักต่อหน่วย (R2) ต่อระดับปัจจัย

ปัจจัย / ระดับ	R1 เฉลี่ย (ksc)	R2 เฉลี่ย (kg/m³)
A: w/C = 0.40	216.91	2,289.5
A: w/C = ★0.45	★235.36	★2,318.7
A: w/C = 0.50	208.47	2,284.7
A: w/C = 0.60	180.00	2,221.8
A: w/C = 0.70	146.20	2,173.4
B: RAP ★25%	★232.74	2,281.1
B: RAP 0%	230.72	★2,314.3
B: RAP 50%	207.66	2,271.0
B: RAP 75%	178.84	2,225.9
B: RAP 100%	136.98	2,195.8
C: บ่ม ★90 วัน	★222.52	2,247.2
C: บ่ม 28 วัน	202.02	2,232.2
C: บ่ม ★7 วัน	167.63	★2,293.6

ตารางที่ 3 แสดงการจัดลำดับปัจจัยตามค่า ΔS/N สำหรับการตอบสนองทั้งสอง ปริมาณ RAP เป็นปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดมากที่สุด (ΔS/N = 4.74 dB) รองลงมาคือ w/C (4.30 dB) และอายุบ่ม (2.54 dB) ลำดับนี้ต่างจากหลักการทั่วไปที่ระบุว่า w/C เป็นปัจจัยหลักตามสมการ Abrams ความแตกต่างอธิบายได้ด้วยกลไกคู่ขนานของ RAP กล่าวคือ RAP ทำให้ ITZ ด้อยลงตามที่อภิปรายในหัวข้อ 2.1 และพร้อมกันนั้นยังลดโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมเพราะแทนที่มวลรวมแข็งด้วยอนุภาคที่มีฟิล์มยืดหยุ่นหุ้มอยู่ ผลทั้งสองทางรวมกันจึงมีน้ำหนักมากกว่าผลของ w/C ในพิสัยการทดลองนี้

สำหรับน้ำหนักต่อหน่วย อัตราส่วน w/C มีอิทธิพลสูงสุด (ΔS/N = 0.55 dB) แต่ค่า ΔS/N ทั้งหมดมีขนาดเล็กมาก (<0.56 dB เทียบกับ 4.74 dB สำหรับกำลัง) ยืนยันว่าน้ำหนักต่อหน่วยไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างมีนัยสำคัญผ่านตัวแปรส่วนผสมเพียงอย่างเดียว

4.3 สัดส่วนการมีส่วนร่วมของปัจจัยและปฏิสัมพันธ์สองทาง

ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนการมีส่วนร่วมของแต่ละปัจจัยต่อความแปรปรวนของการตอบสนอง ปริมาณ RAP อธิบายความแปรปรวนกำลังรับแรงอัดได้สูงสุด (ร้อยละ 37.1) ตามด้วย w/C (ร้อยละ 27.9) และอายุบ่ม (ร้อยละ 14.7) ค่าคลาดเคลื่อนคงเหลือ (ร้อยละ 20.3) สำหรับกำลังรับแรงอัดส่วนใหญ่น่าจะมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย สำหรับน้ำหนักต่อหน่วย ค่าคลาดเคลื่อนคงเหลือสูงถึงร้อยละ 59.8 ซึ่งสอดคล้องกับกายภาพของมอร์ตาร์สด: ความหนาแน่นถูกกำหนดโดยพลังงานการบดอัดและการเทได้ รูปทรงเรขาคณิตของการบรรจุมวลรวม และปริมาณฟองอากาศที่ถูกกักไว้ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรสุ่มภายในการออกแบบนี้

ตารางที่ 3 การจัดลำดับปัจจัยตาม ΔS/N (larger-is-better)

การตอบสนอง	กำลังรับแรงอัด (R1)	น้ำหนักต่อหน่วย (R2)
อันดับ 1	★B: RAP%	★A: w/C
ΔS/N (dB)	★4.7375	★0.5539
อันดับ 2	A: w/C	B: RAP%
ΔS/N (dB)	4.3003	★2,318
อันดับ 3	C: อายุบ่ม	C: อายุบ่ม
ΔS/N (dB)	2.5439	0.2299

ตารางที่ 4 สัดส่วนการมีส่วนร่วม (%) ของแต่ละปัจจัยต่อความแปรปรวนของการตอบสนอง

ปัจจัย	R1: กำลังรับแรงอัด (%)	R2: น้ำหนักต่อหน่วย (%)
★B: ปริมาณ RAP (%)	★37.08	13.52
A: อัตราส่วน w/C	27.94	★21.38
C: อายุบ่ม (วัน)	14.72	5.26
ค่าคงเหลือ / ปฏิสัมพันธ์	20.25	59.84
รวม	100.00	100.00

ตารางที่ 5 แสดงปฏิสัมพันธ์สองทางสามอันดับแรก เรียงตามช่วงของปฏิสัมพันธ์ ปฏิสัมพันธ์ A×B (w/C × RAP) มีช่วงสูงสุดสำหรับกำลังรับแรงอัด (49.70 ksc) โดยที่ w/C ต่ำ (0.40–0.45) ผลของ RAP ต่อกำลังมีน้อย เพราะเมทริกซ์เพสต์ที่หนาแน่นสามารถชดเชยความอ่อนแอของ ITZ ได้ แต่ที่ w/C สูง (0.70) ทั้งเพสต์ที่พรุนอยู่แล้วและ ITZ ที่ด้อยจาก RAP ส่งผลเสริมกัน (synergistic) ปฏิสัมพันธ์ B×C (RAP × อายุบ่ม) เป็นปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญเชิงกลไกมากที่สุด กล่าวคือ มอร์ตาร์ที่ไม่มี RAP มีกำลังเพิ่มขึ้นประมาณ 100 ksc ระหว่างอายุ 7 ถึง 90 วัน ขณะที่มอร์ตาร์ที่มี RAP ร้อยละ 100 เพิ่มขึ้นเพียง 32 ksc ในช่วงเดียวกัน แสดงว่าฟิล์มแอสฟัลต์จำกัดการพัฒนากำลังในระยะยาวอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์ B×C ยังมีช่วงสูงสำหรับน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (192.8 kg/m³) สะท้อนความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างปริมาณ RAP การพัฒนาความพรุนและอายุบ่ม4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์

ตารางที่ 6 แสดงผลลัพธ์การจัดลำดับหลายวัตถุประสงค์ 10 อันดับแรกจาก 75 ชุดการทดลอง สหสัมพันธ์ Spearman ระหว่างอันดับ WSM และ TOPSIS เท่ากับ 0.985 และระหว่าง WSM และ GRA เท่ากับ 0.953 ยืนยันความสอดคล้องสูงของสามวิธี 10 อันดับแรกมีความเสถียรในทุกวิธี โดยการเคลื่อนที่ของอันดับสูงสุดไม่เกิน 6 ตำแหน่ง ความสอดคล้องนี้บ่งชี้ว่าส่วนผสมที่ระบุเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่แท้จริง ไม่ใช่ผลพลอยได้จากสมมติฐานของวิธีการใดวิธีหนึ่งโดยเฉพาะ

4.5 Pareto และการระบุจุด Knee Point

การตรวจสอบการครอบงำแบบครบถ้วน (exhaustive dominance check) ระบุส่วนผสม-อายุที่เป็น Pareto-optimal จำนวน 6 ชุดจากทั้งหมด 75 ชุด (ตารางที่ 7) การที่แนวหน้าพาเรโตมีเพียง 6 จุด (ร้อยละ 8) ยืนยันว่ามีการแลกเปลี่ยน (trade-off) ที่แท้จริงระหว่างกำลังรับแรงอัดกับน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร กล่าวคือ สำหรับพื้นที่ออกแบบส่วนใหญ่ การปรับปรุงวัตถุประสงค์หนึ่งย่อมแลกมาด้วยการสูญเสียอีกวัตถุประสงค์หนึ่ง จุดหักงอ (knee point) ของแนวหน้าพาเรโตอยู่ที่ w/C = 0.40 RAP ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และอายุบ่ม 90 วัน (R1 = 291.3 ksc; R2 = 2,395.6 kg/m³) จุดนี้ให้กำลังคิดเป็นร้อยละ 93.5 ของกำลังสูงสุดบนแนวหน้าพาเรโต (311.6 ksc) พร้อมทั้งมีน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่าส่วนผสมที่กำลังสูงสุดถึง 137.7 kg/m³ และเมื่อทั้ง WSM และ TOPSIS จัดอันดับหนึ่งให้ส่วนผสมเดียวกัน การระบุจุดหักงอนี้จึงมีความน่าเชื่อถือสูง

ตารางที่ 5 ปฏิสัมพันธ์สองทางสามอันดับแรกของกำลังรับแรงอัด

อันดับ	ปฏิสัมพันธ์	ช่วง R1 (ksc)	กลไกหลัก
★1	A×B: w/C × RAP%	49.70	w/C สูงขยายผลเสียของ RAP ต่อ ITZ เกิดผลเสริมกันแบบ synergistic
2	B×C: RAP% × อายุบ่ม	44.98	ฟิล์มแอสฟัลต์จำกัดการพัฒนากำลังในระยะยาว
3	A×C: w/C × อายุบ่ม	35.23	w/C ต่ำมีซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาเหลือมากกว่า จึงได้ประโยชน์จากการบ่มระยะยาวมากกว่า

ตารางที่ 6 การจัดลำดับหลายวัตถุประสงค์: 10 อันดับแรก (จาก 75 ชุดส่วนผสม-อายุ)

Rk	w/C	RAP%	บ่ม(วัน)	R1(ksc)	R2(kg/m³)	WSM	GRA	TOPSIS
★1	0.40	25	90	291.27	2,395.6	★0.853	0.789	★0.845
2	0.45	50	90	288.68	2,371.4	0.830	0.767	0.822
3	0.50	25	90	282.22	2,396.9	0.828	0.754	0.827
4	0.50	0	90	311.60	2,257.9	0.825	★0.838	0.762
5	0.40	0	90	305.56	2,254.7	0.805	0.805	0.755
6	0.50	0	28	288.77	2,325.8	0.802	0.749	0.787
7	0.45	25	28	288.79	2,320.3	0.799	0.747	0.783
8	0.45	25	90	297.99	2,271.8	0.794	0.772	0.760
9	0.45	0	7	232.69	2,528.7	0.769	0.715	0.728
10	0.45	0	28	266.94	2,352.0	0.756	0.682	0.760

ตารางที่ 7 ส่วนผสม-อายุที่เป็น Pareto-optimal ทั้ง 6 ชุด

อันดับ Pareto	w/C	RAP%	บ่ม(วัน)	R1(ksc)	R2(kg/m³)	**หมายเหตุ**
1 (R1 สูงสุด)	0.50	0	90	311.60	2,257.9	กำลังสูงสุด
2	0.45	25	90	297.99	2,271.8	
★3 (Knee)	0.40	25	90	★291.27	★2,395.6	★WSM#1 TOPSIS#1
4	0.50	25	90	282.22	2,396.9	ใกล้ Knee
5	0.45	0	7	232.69	2,528.7	น้ำหนักสูง
6 (R2 สูงสุด)	0.50	0	7	66.82	2,537.0	กำลังต่ำมาก

ตารางที่ 8 คุณลักษณะของกลุ่มสมรรถนะทั้งสามระดับ

ระดับ	n	R1 เฉลี่ย (ksc)	ช่วง R1	R2 เฉลี่ย (kg/m³)	ลักษณะเด่น
★สูง	75	★261.5	214–334	2,323.5	w/C 0.40–0.50; RAP 0–50%; บ่ม 28–90วัน
กลาง	75	198.5	152–262	2,262.0	w/C กระจายทุกระดับ; RAP 0–75%
ต่ำ	75	132.1	66–178	2,187.4	w/C 0.60–0.70 (69%); RAP 75–100% (72%)

4.6 การแบ่งระดับสมรรถนะและกระบวนการที่เหมาะสม

การแบ่ง 225 ตัวอย่างออกเป็นสามระดับสมรรถนะ (สูง กลาง ต่ำ n = 75 แต่ละระดับ) ด้วยคะแนนรวม (70% R1 + 30% R2 ที่ทำให้เป็นมาตรฐาน) เผยให้เห็นรูปแบบที่ชัดเจน (ตารางที่ 8) กลุ่มสมรรถนะสูง (R1 เฉลี่ย 261.5 ksc) กระจุกตัวที่ w/C = 0.40–0.50 (ร้อยละ 93) ปริมาณ RAP = 0–50% (ร้อยละ 93) และอายุบ่ม 28–90 วัน (ร้อยละ 78) กลุ่มสมรรถนะต่ำ (R1 เฉลี่ย 132.1 ksc) กระจุกตัวที่ w/C = 0.60–0.70 (ร้อยละ 69) และ RAP = 75–100% (ร้อยละ 72) กระบวนการที่เหมาะสม (ร้อยละ 25 บนสุด n = 56) กำหนดได้ว่า w/C ควรอยู่ในช่วง 0.40–0.60 (ค่าฐานนิยม 0.45) ปริมาณ RAP ไม่เกินร้อยละ 75 (ค่าฐานนิยม 0%) และอายุบ่มอย่างน้อย 28 วัน (ค่าฐานนิยม 90 วัน)

4.7 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับงานที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้า โดยมีประเด็นสำคัญสี่ข้อ ประการแรก ระดับการแทนที่ที่เหมาะสมที่พบในงานนี้ (RAP ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) ตรงกับผลของ Abraham and Ransinchung [3] ที่พบว่ามอร์ตาร์ซึ่งมี RAP ไม่เกินร้อยละ 50 ยังผ่านเกณฑ์กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และตรงกับ Suebsuk et al. [5] ที่รายงานค่าเหมาะสมที่ร้อยละ 25 เช่นกัน ประการที่สอง ขนาดของการลดลงของสมรรถนะในงานนี้อยู่ในช่วงที่วรรณกรรมรายงานไว้ กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยลดลงจาก 230.7 ksc ที่ RAP ร้อยละ 0 เหลือ 137.0 ksc ที่ RAP ร้อยละ 100 คิดเป็นการลดลงร้อยละ 40.6 ซึ่งอยู่ภายในช่วงร้อยละ 9–71 ที่มีการรวบรวมไว้ [6] ส่วนน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรลดลงจาก 2,314.3 เป็น 2,195.8 kg/m³ (ร้อยละ 5.1) ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 4–7 ที่มีรายงาน แสดงว่าชุดข้อมูลของงานนี้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับองค์ความรู้เดิม

ประการที่สาม ผลที่ RAP ร้อยละ 25 ให้กำลังเฉลี่ยสูงกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย (232.7 เทียบกับ 230.7 ksc) ไม่ควรตีความว่า RAP ช่วยเพิ่มกำลัง เพราะความต่างดังกล่าวเล็กกว่าความแปรผันภายในเซลล์การทดลอง การตีความที่เหมาะสมกว่าคือ ผลลบจาก ITZ ที่ด้อยลงถูกชดเชยด้วยผลบวกจากขนาดคละที่ต่อเนื่องขึ้น และการปรับสมดุลของน้ำอิสระเนื่องจาก RAP ดูดซึมน้ำ [5] จนสุทธิแล้วไม่ต่างจากส่วนผสมควบคุม ประการสุดท้าย การที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ RAP กับอายุบ่มมีนัยสำคัญสูง ให้หลักฐานเชิงมหภาคที่สอดรับกับข้อสังเกตเชิงจุลภาคว่า ITZ ของ RAP แน่นขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน แต่ยังคงด้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติเสมอ [1,7]

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยที่ผ่านมา

ประเด็นเปรียบเทียบ	Abraham and Ransinchung [3]	งานวิจัยนี้
ระบบวัสดุ	มอร์ตาร์	มอร์ตาร์
วิธีแทนที่	โดยปริมาตร	โดยน้ำหนัก
ช่วง w/C	0.44 (คงที่)	0.40–0.70
ระดับ RAP ที่เหมาะสม	≤ 50%	25%
กำลังลดสูงสุด	≈ 30%	40.6%
ความหนาแน่นลด	–	5.1%
แผนการทดลอง	พาราเมตริก	แฟคทอเรียล 5×5×3
การหาค่าเหมาะที่สุด	ไม่มี	GRA/TOPSIS/WSM + พาเรโต

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วน w/C ปริมาณ RAP และอายุบ่ม ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของมอร์ตาร์ผสม RAP ด้วยแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 5×5×3 จำนวน 225 ตัวอย่าง สรุปผลได้ดังนี้

(1) ปริมาณ RAP เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดมากที่สุด (ร้อยละ 37.1) มากกว่าอัตราส่วน w/C (ร้อยละ 27.9) ซึ่งต่างจากหลักการทั่วไปตามสมการ Abrams เนื่องจาก RAP ส่งผลพร้อมกันสองทาง คือ ทำให้ ITZ ด้อยลงและลดโมดูลัสของวัสดุผสม

(2) น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรควบคุมได้ยากด้วยตัวแปรทางส่วนผสม เพราะค่าคลาดเคลื่อนคงเหลือสูงถึงร้อยละ 59.8 หากต้องการควบคุมความหนาแน่นให้แม่นยำจำเป็นต้องควบคุมพลังงานการอัดแน่นและปริมาณฟองอากาศเพิ่มเติม

(3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ RAP กับอายุบ่มมีนัยสำคัญเชิงกลไกมากที่สุด โดยมอร์ตาร์ควบคุมมีกำลังเพิ่มขึ้น ประมาณ 100 ksc ระหว่างอายุ 7 ถึง 90 วัน ขณะที่มอร์ตาร์ที่มี RAP ร้อยละ 100 เพิ่มขึ้นเพียง 32 ksc

(4) วิธี GRA TOPSIS และ WSM ให้ผลตรงกัน (สหสัมพันธ์ Spearman 0.953–0.985) โดยส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เชิงหลายวัตถุประสงค์คือ w/C = 0.40 RAP ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และอายุบ่ม 90 วัน (291.3 ksc และ 2,395.6 kg/m³) ซึ่งเป็นจุดหักงอของแนวหน้าพาเรโต

(5) ช่วงที่แนะนำสำหรับการใช้งานจริงคือ w/C ระหว่าง 0.40–0.60 ปริมาณ RAP ไม่เกินร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก และอายุบ่มอย่างน้อย 28 วัน ทั้งนี้หากต้องการสมรรถนะสูง ควรจำกัดปริมาณ RAP ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 10 สรุปการตั้งค่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับสามสถานการณ์การออกแบบ ได้แก่ (ก) กรณีต้องการกำลังรับแรงอัดสูงสุด (ข) กรณีต้องการน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรสูงสุด และ (ค) กรณีต้องการความสมดุลระหว่างสองวัตถุประสงค์ ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ได้ตามลำดับความสำคัญของงาน

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ผลที่ได้จำกัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการทดลองนี้ ได้แก่ การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงชนิดเดียวโดยไม่เติมวัสดุปอซโซลาน การใช้ RAP จากแหล่งเดียว และการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 30 ± 2 °C นอกจากนี้งานวิจัยนี้ไม่ได้วัดปริมาณและระดับการเสื่อมสภาพของยางแอสฟัลต์ในตัวอย่าง RAP โดยตรง จึงยังไม่สามารถแยกอิทธิพลของ “ปริมาณฟิล์มแอสฟัลต์” ออกจากอิทธิพลของ “ขนาดคละของมวล

รวม” ได้อย่างสมบูรณ์ การอธิบายกลไกในบทความนี้จึงอ้างอิงหลักฐานเชิงจุลภาคจากวรรณกรรมเป็นหลัก และควรได้รับการยืนยันด้วยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างในงานวิจัยนี้โดยตรงต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

(1) ควรวัดปริมาณยางแอสฟัลต์ใน RAP ตาม ASTM D6307-19 และวัดดัชนีการเสื่อมสภาพ CI และ SI ด้วย FTIR-ATR แล้วนำมาใช้เป็นตัวแปรร่วมในแบบจำลอง เพื่อแยกอิทธิพลของฟิล์มแอสฟัลต์ออกจากอิทธิพลของขนาดคละ

(2) ควรศึกษาการเติมวัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย เพื่อเปลี่ยนผลึก CH ที่สะสมใน ITZ ให้เป็น C-S-H ทุติยภูมิ ซึ่งเป็นแนวทางที่มีเหตุผลทางเคมีรองรับตามที่อภิปรายในหัวข้อ 1 และ 2.1 และมีหลักฐานเชิงประจักษ์สนับสนุนแล้ว [4]

(3) ควรตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ ITZ โดยตรงด้วย SEM-EDS ร่วมกับ nano-indentation เพื่อยืนยันกลไกที่อภิปรายไว้ในบทความนี้ [7]

(4) สำหรับการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ แนะนำวิธี Gradient Boosting (XGBoost) ร่วมกับการปรับค่า ไฮเปอร์พารามิเตอร์แบบเบส์ และตรวจสอบความถูกต้องด้วย 5-fold cross-validation ด้วยเหตุผลสามข้อ คือ โครงสร้างแบบ tree ensemble จำลองความไม่เป็นเชิงเส้นเชิงเกณฑ์ที่พบในข้อมูลได้ ปฏิสัมพันธ์สองทางทั้งสามคู่ถูกจำลองโดยปริยายในโครงสร้าง tree และค่า SHAP ให้การตีความความสำคัญของตัวแปรที่สอดคล้องกับผลการสลายผลรวมกำลังสอง (ลำดับ B > A > C)

(5) ควรขยายแผนการทดลองไปสู่พื้นผิวตอบสนอง (face-centered central composite design) เพื่ออธิบายความโค้งของผิวตอบสนองบริเวณค่าเหมาะสม และเพิ่มความแม่นยำของการทำนายภายในกระบวนการ

ตารางที่ 10 การตั้งค่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์	w/C	RAP (%)	บ่ม (วัน)	R1 (ksc)	R2 (kg/m³)
(ก) R1 สูงสุด	0.50	0	90	★311.60	2,257.9
(ข) R2 สูงสุด (ปลอดภัย)	0.45	0	7	232.69	**★2,528.7**
★(ค) หลายวัตถุประสงค์	★0.40	★25	★90	291.27	2,395.6

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Brand, A.S. and Roesler, J.R. (2017). "Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I – The interfacial transition zone." Construction and Building Materials, 130, pp. 171-181.

[2] Brand, A.S. and Roesler, J.R. (2017). "Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II – Cement-asphalt chemical interactions." Construction and Building Materials, 130, pp. 182-192.

[3] Abraham, S.M. and Ransinchung R.N., G.D. (2018). "Influence of RAP aggregates on strength, durability and porosity of cement mortar." Construction and Building Materials, 189, pp. 1105-1112.

[4] Abraham, S.M. and Ransinchung R.N., G.D. (2019). "Effects of reclaimed asphalt pavement aggregates and mineral admixtures on pore structure, mechanical and durability properties of cement mortar." Construction and Building Materials, 216, pp. 202-213.

[5] Suebsuk, J. et al. (2020). "Compressive strength and workability of cement mortar containing recycled asphalt pavement." Key Engineering Materials, 856, pp. 384-390.

[6] Debbarma, S., Selvam, M. and Singh, S. (2020). "Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements? – A critical review." Construction and Building Materials, 259, 120417.

[7] Kamboj, R. and Debbarma, S. (2025). "Nano-indentation and SEM analysis of the interfacial transition zone in RAP-concrete." Construction and Building Materials, 492, 142854.

[8] Masi, G., Michelacci, A., Manzi, S. and Bignozzi, M.C. (2022). "Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete." Construction and Building Materials, 341, 127745.

[9] Deng, J. (1982). "Control problems of grey systems." Systems & Control Letters, 1(5), pp. 288-294.

[10] Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, Berlin.

[11] Taguchi, G. (1987). System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost. UNIPUB, New York.

[12] Montgomery, D.C. (2019). Design and Analysis of Experiments. 10th ed. John Wiley & Sons, New Jersey.

[13] ASTM International. (2024). ASTM C109/C109M-24 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens). West Conshohocken, PA.

[14] ASTM International. (2024). ASTM C150/C150M-24 Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA.

การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยการทดสอบแบบไม่ทำลาย

Compressive Strength Evaluation of Sisal Fiber-Reinforced Concrete by Non-destructive Tests

ปณิตตา ชลอกลาง[1], จันทราทิพย์ พานเงิน[1], จักษดา ธำรงวุฒิ[1,*], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[1], ชาญชัย เงาะปก[1] และ นำชัย จ้อยสูงเนิน[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 30000

2 วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 30000

* Corresponding author: jaksada.th@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และประเมินกำลังรับแรงอัดด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยแปรผันความยาวของเส้นใยเท่ากับ 20, 40 และ 60 mm ในสัดส่วนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผสมในคอนกรีตที่ออกแบบกำลังรับแรงอัดประลัยไว้ที่ 18, 30 และ 42 MPa เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับคอนกรีตควบคุม สำหรับการทดสอบคุณสมบัติ ประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลาย การทดสอบด้วยวิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer) และการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity: UPV) ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนการเสริมเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 1.0 ที่ความยาว 20 มิลลิเมตร ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 23.6, 36.2 และ 48.6 MPa สำหรับคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัด 18, 30 และ 42 MPa ตามลำดับ คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.6, 19.9 และ 15.2 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ ดัชนีการสะท้อนกลับ (Rebound Number) และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มแปรผันตรงกับผลการทดสอบกำลังอัดแบบทำลาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้วิธีทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใย ป่านศรนารายณ์ กำลังอัด การทดสอบแบบไม่ทำลาย

Abstract

This research aims to investigate the mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete and evaluate its compressive strength using non-destructive testing (NDT). Sisal fibers with lengths of 20, 40, and 60 mm were incorporated into the concrete mixtures at dosages of 0.5%, 1.0%, and 1.5% by weight of cement. The concrete specimens were designed for target compressive strengths of 18, 30, and 42 MPa, and were evaluated in comparison with control concrete. The experimental program encompassed destructive compressive strength testing, Rebound Hammer testing, and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) testing, with all specimens cured for an age of 28 days. The experimental results revealed that the

optimum fiber content was 1.0% with a fiber length of 20 mm, which yielded the highest compressive strengths of 23.6, 36.2, and 48.6 MPa for the 18, 30, and 42 MPa design mixes, respectively. These values represent significant strength increments of 25.6%, 19.9%, and 15.2% compared to the control concrete. Furthermore, the rebound numbers and ultrasonic pulse velocities exhibited a consistent trend that strongly correlated with the destructive test results, demonstrating the high potential of utilizing non-destructive testing methods for accurately estimating the compressive strength of sisal fiber-reinforced concrete.

Keywords: Fiber-Reinforced Concrete, Sisal Fiber, Compressive Strength, Non-Destructive Test

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีกำลังรับแรงอัดสูง มีความประหยัด และสามารถหล่อขึ้นรูปเป็นโครงสร้างรูปทรงต่าง ๆ ได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตาม คอนกรีตมีข้อจำกัดสำคัญด้านความสามารถในการรับแรงดึงที่ต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณเพียงร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดประลัย ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย [1] การประยุกต์ใช้เส้นใยผสมในเนื้อคอนกรีต หรือ คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Concrete; FRC) จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงพฤติกรรมดังกล่าว โดยเส้นใยที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตจะทำหน้าที่หน่วงรั้งการขยายตัวของรอยแตกร้าว เพิ่มความเหนียว และพัฒนาสมรรถนะการรับแรงดึงของวัสดุ [2] เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal Fiber) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความหนาแน่นต่ำ ต้นทุนต่ำ ทนทานต่อความชื้น และมีกำลังรับแรงดึงสูงในระดับ 511–635 MPa ซึ่งสูงกว่าเส้นใยจากพืชชนิดอื่น เช่น ปอกระเจา ปอลินิน กัญชง และฝ้าย นอกจากนี้ การใช้เส้นใยธรรมชาติยังสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืนและการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน [3] โดยในประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกป่านศรนารายณ์ที่สำคัญ ได้แก่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา และอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

ในด้านการประเมินประสิทธิภาพโครงสร้าง วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT) เช่น วิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer) และวิธีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity; UPV) ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถประเมินคุณภาพและกำลังอัดของคอนกรีตในหน้างานจริงได้โดยไม่ทำให้โครงสร้างเสียหาย ประหยัดเวลา และมีความสะดวกในทางปฏิบัติ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และ (2) ตรวจสอบความสัมพันธ์และความสอดคล้องระหว่างผลการทดสอบแบบทำลายกับวิธีค้อนกระแทกและวิธีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อประเมินศักยภาพในการนำวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายมาใช้กับคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์

2. วัสดุและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement: OPC) ถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก โดยกำหนดให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 30 MPa เมื่อทดสอบแท่งรูปทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 20 mm ที่อายุบ่ม 28 วัน ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดที่นิยมใช้ในงานออกแบบและก่อสร้างอาคารทั่วไปในประเทศไทย

2) มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำล้างสะอาดที่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.53 และค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) เท่ากับ 2.32

3) มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนที่มีขนาดคละโตสุดเท่ากับ 19 mm (3/4 นิ้ว) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ ร้อยละ 0.33 และมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,573 kg/m^3

4) น้ำใช้น้ำประปาที่มีคุณภาพสะอาด ปราศจากสิ่งเจือปนที่เป็นอันตรายต่อคุณภาพคอนกรีต

5) เส้นใยปานศรนารายณ์ ใช้เส้นใยปานศรนารายณ์ธรรมชาติที่จัดหาจากอำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา โดยนำมาทำความสะอาด ตากให้แห้ง และตัดให้ได้ความยาวตามที่กำหนด ทั้งนี้ เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยดิบ (Raw sisal fiber) ซึ่งไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเคมี เพื่อศึกษาผลของการใช้เส้นใยธรรมชาติในสภาพที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ

2.2 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ดำเนินการตามมาตรฐาน ACI 211.1 โดยกำหนดกำลังรับแรงอัดประลัยไว้ 3 ค่า คือ 18, 30 และ 42 MPa ที่อายุการบ่ม 28 วัน สำหรับตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์) และความยาวของเส้นใย 3 ค่า คือ 20, 40 และ 60 mm รายละเอียดของอัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

f'_c (MPa)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	มวลรวมละเอียด (kg)	มวลรวมหยาบ (kg)	w/C
18	285	205	829	1,056	0.72
30	370	205	758	1,056	0.55
42	529	205	623	1,056	0.38

2.3 ตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยแผนการทดลองประกอบด้วย 3 ปัจจัยแปรผัน ได้แก่ กำลังรับแรงอัดประลัยอ้างอิง (18, 30 และ 42 MPa) ความยาวเส้นใย (20, 40 และ 60 mm) และปริมาณเส้นใย (ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน) ทั้งนี้ การทดสอบแต่ละเงื่อนไขจะใช้ตัวอย่างซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชุดการทดสอบ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติ 3 ประเภท ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด การ

ทดสอบดัชนีการสะท้อนกลับด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer Test) และการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity: UPV) ส่งผลให้มีจำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 270 ตัวอย่าง (แบ่งเป็นคอนกรีตผสมเส้นใย 243 ตัวอย่าง และคอนกรีตควบคุม 27 ตัวอย่าง) โดยตัวอย่างทั้งหมดจะถูกบ่มด้วยการห่อพลาสติกชื้นรักษาความชื้นจนกระทั่งครบกำหนดอายุบ่ม 28 วัน ก่อนนำไปทำการทดสอบ

เพื่อสะดวกต่อการจำแนกประเภท จึงได้กำหนดระบบรหัสตัวอย่างในรูปแบบ X-AA-YY-ZZ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีความหมายดังต่อไปนี้ X หมายถึง C แทนการทดสอบกำลังอัด AA หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยอ้างอิง (18, 30 และ 42 MPa) YY หมายถึง ความยาวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ (20, 40 และ 60 mm หรือใช้รหัส 0 สำหรับคอนกรีตควบคุม) ZZ หมายถึง ปริมาณเส้นใย (0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งแทนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ)

XAA-YY-ZZ

รูปที่ 1 รหัสตัวอย่าง

2.4 วิธีการทดสอบ

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดไฮดรอลิกขนาดพิกัดกำลังสูงสุด 5,000 kN โดยควบคุมอัตราการให้แรงแบบควบคุมระยะเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 0.5 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

2) การทดสอบวิธีดัชนีสะท้อนกลับของค้อนกระแทกดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C805 โดยใช้ค้อนกระแทกประเภท Schmidt Hammer Type N ทำการทดสอบจำลองบนผิวของตัวอย่างทรงกระบอกจำนวน 10 ตำแหน่งต่อหนึ่งตัวอย่าง

3) การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C597 โดยใช้เครื่องทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งทำการวัดระยะทางระหว่างหัวส่งสัญญาณและหัวรับสัญญาณ ที่ติดตั้งแนบกับผิวตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้สารตัวกลางเชื่อมต่อสัญญาณ จากนั้นบันทึกเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านเนื้อวัสดุ เพื่อนำมาคำนวณความเร็วคลื่นจากอัตราส่วนของระยะทางต่อเวลาที่วัดได้

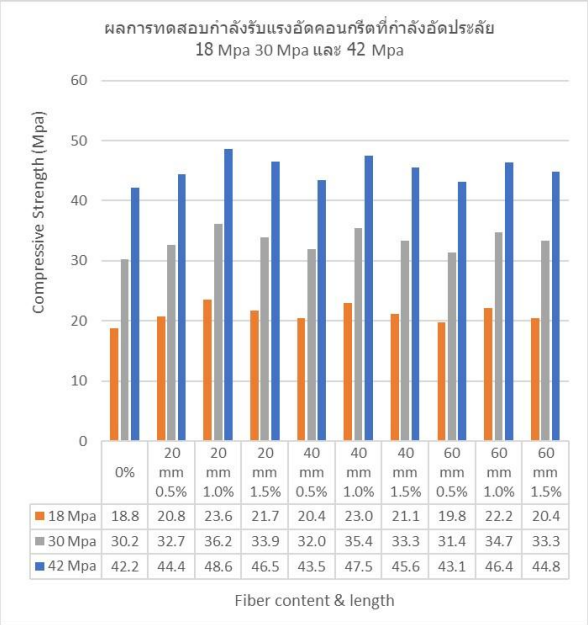
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าการเสริมเส้นใยดังกล่าวส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกระดับกำลังออกแบบ โดยปริมาณเส้นใยที่ 1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เป็นสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการต้านทานแรงอัด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่าง C18-20-1.0, C30-20-1.0 และ C42-20-1.0 มีกำลังรับแรงอัดพัฒนาขึ้นเป็น 23.6, 36.2 และ 48.6 MPa ตามลำดับ หรือคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.6, 19.9 และ 15.2 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีกำลังรับแรงอัด 18.8, 30.2 และ 42.2 MPa ตามลำดับ

สำหรับผลกระทบของความยาวเส้นใย พบว่าเส้นใยความยาว 20 mm ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด รองลงมาคือความยาว 40 mm และ 60 mm

ตามลำดับ พฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากเส้นใยที่มีความยาวมากมีแนวโน้มเกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวภายในเนื้อคอนกรีตขาดความสม่ำเสมอ [4] และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของช่องว่าง (Voids) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง



	0%	20 mm 0.5%	20 mm 1.0%	20 mm 1.5%	40 mm 0.5%	40 mm 1.0%	40 mm 1.5%	60 mm 0.5%	60 mm 1.0%	60 mm 1.5%
18 Mpa	18.8	20.8	23.6	21.7	20.4	23.0	21.1	19.8	22.2	20.4
30 Mpa	30.2	32.7	36.2	33.9	32.0	35.4	33.3	31.4	34.7	33.3
42 Mpa	42.2	44.4	48.6	46.5	43.5	47.5	45.6	43.1	46.4	44.8

รูปที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

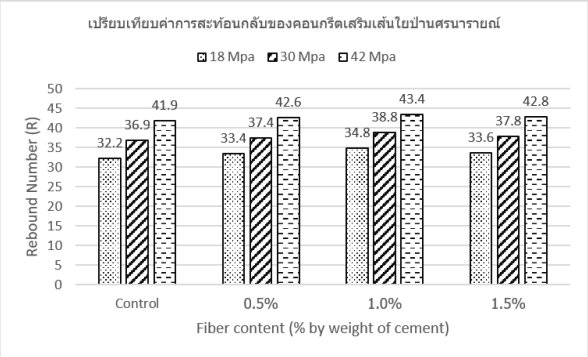
นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสูงกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีความแห้งและสูญเสียความสามารถในการทำงาน (Workability) โดยจากผลการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump test) พบว่าค่าการยุบตัวมีค่าต่ำกว่า 50 mm ซึ่งถือว่ามีความสามารถในการทำงานต่ำ ส่งผลให้การเท การอัดแน่น และการควบคุมคุณภาพคอนกรีตทำได้ยาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้าง ทั้งนี้ การลดลงของ Workability ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการอัดแน่นของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bharathi et al. (2021) [5] และ Ren et al. (2021) [6] ที่พบพฤติกรรมเดียวกันในคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับกำลังอัดออกแบบต่ำ (18 MPa) พบว่าการเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีส่วนช่วยส่งเสริมกำลังรับแรงอัดได้ในสัดส่วนที่ดีกว่าคอนกรีตที่ระดับกำลังสูง (30 และ 42 MPa)

3.2 ดัชนีสะท้อนกลับของค้อนกระแทก

รูปที่ 3 แสดงค่าดัชนีการสะท้อนกลับของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมเส้นใยปริมาณ 1.0% ร่วมกับความยาว 20 mm ให้ค่าดัชนีการสะท้อนกลับเฉลี่ยสูงสุดในทุกระดับกำลังอัด โดยตัวอย่าง C18-20-1.0, C30-20-1.0 และ C42-20-1.0 มีค่าดัชนีการสะท้อนกลับเท่ากับ 34.8, 38.8 และ 43.4 ตามลำดับ รองลงมาคือคอนกรีตที่เสริมปริมาณเส้นใย 1.5% และ 0.5% ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวมีลักษณะที่สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลายในหัวข้อที่ผ่านมา

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง ค่าดัชนีการสะท้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของปริมาณน้ำส่งผลให้โครงสร้างผลึกของเนื้อซีเมนต์เพสต์มีความอัดแน่นสูงขึ้น คอนกรีตจึงมีความหนาแน่นและความแข็งที่ผิวมากขึ้น ทำให้ค่า Rebound Number มีค่าสูงตามไปด้วย ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ จีรศักดิ์ สุพรมวัน และคณะ (2558) [7] ที่ได้ศึกษาและพัฒนา

ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสะท้อนกลับจากค้อนกระแทกกับกำลังรับแรงอัดในมอร์ต้าร์และคอนกรีต

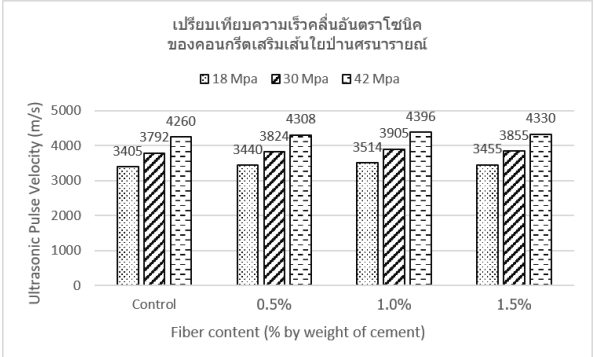


รูปที่ 3 ดัชนีสะท้อนกลับของค้อนกระแทก

3.3 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

รูปที่ 4 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่เสริมเส้นใยปริมาณ 1.0% ให้ค่าความเร็วคลื่นสูงสุด สอดคล้องกับแนวโน้มของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและดัชนีสะท้อนกลับที่กล่าวมาข้างต้น โดยตัวอย่าง C18-20-1.0, C30-20-1.0 และ C42-20-1.0 มีค่าความเร็วคลื่นเท่ากับ 3,514, 3,905 และ 4,396 m/s ตามลำดับ

ทั้งนี้ ความเร็วคลื่นเป็นดัชนีที่สะท้อนถึงความหนาแน่น ความหนาแน่นและความต่อเนื่องของโครงสร้างจุลภาคภายในคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณช่องว่างหรือโพรงภายในน้อย จะมีความสามารถในการส่งผ่านคลื่นได้ดีกว่า ส่งผลให้ความเร็วคลื่นสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และคณะ (2548) [8] ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการใช้ความเร็วคลื่นในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ความเร็วคลื่น จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแบบทำลายและแบบไม่ทำลาย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบทั้ง 3 วิธี พบว่าค่าดัชนีการสะท้อนกลับและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) มีแนวโน้มการแปรผันที่สอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญกับกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบแบบทำลาย ในทุกเงื่อนไขสัดส่วนผสมและระดับกำลังอัดออกแบบ กล่าวคือ เมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น ค่า Rebound Number และค่าความเร็วคลื่น UPV จะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยการเสริมปริมาณเส้นใยที่ 1.0% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่าผลการทดสอบสูงสุด

ดังนั้น ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่า วิธีการทดสอบความแข็งที่ผิวด้วยค้อนกระแทกและวิธีการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกมีศักยภาพ และความแม่นยำเพียงพอในการนำมาใช้เป็นแนวทางประเมินคุณภาพและกำลังรับแรงอัดเบื้องต้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการ

ตรวจสอบและประเมินกำลังของโครงสร้างในสภาพใช้งานจริงโดยไม่ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย

4. สรุปผลการวิจัย

1) การเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ในปริมาณที่เหมาะสมคือร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ร่วมกับความยาวเส้นใย 20 mm ส่งผลให้คอนกรีตพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงสุด โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.6, 19.9 และ 15.2 สำหรับคอนกรีตที่ระดับกำลังอัดออกแบบ 18, 30 และ 42 MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

2) ค่าดัชนีการสะท้อนกลับจากค้อนกระแทก (Rebound Number) มีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 และแปรผันตรงตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3) ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) มีแนวโน้มสอดคล้องกันโดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0

4) ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายทั้งสองวิธีมีแนวโน้มแปรผันสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบทำลายอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบความแข็งที่ผิวด้วยค้อนกระแทกและวิธีการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการประเมินกำลังรับแรงอัดเบื้องต้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่สัญญา FF68/NKR/141

เอกสารอ้างอิง

[1] Ahmad, J., Majdi, A., Deifalla, A.F., Ben Kahla, N. and El-Shorbagy, M.A. (2022). Concrete reinforced with sisal fibers (SSF): overview of mechanical and physical properties. Crystals 2022, 12, 952.

[2] Kang, S.T., Choi, J., Koh, K.T., Kang Seok Lee, K.S. and Lee, B.Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. Composite Structures, 145, 37-42.

[3] Mochane, M.J., Mokhena, T.C., Mokhothu, T.H., Mtibe, A., Sadiku, E.R., Ray, S.S., Ibrahim, I.D. and Daramola, O.O. (2019). Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. Express Polymer Letters, 13(2), 159-198.

[4] Al-Tamimi, G.K.A.A., Ragunath, S. and Arunvivek, G.K. (2020). Feasibility study on utilization of sisal fiber and crushed tile in concrete utility block. International Journal of Innovations in Scientific and Engineering Research, 7, 189-195.

[5] Bharathi, S.V., Vinodhkumar, S. and Saravanan, M.M. (2021). Strength characteristics of banana and sisal fiber reinforced composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1055, 12024.

[6] Ren, G., Yao, B., Huang, H. and Gao, X. (2021). Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes. Construction and Building Materials, 286, 122958.

[7] จีรศักดิ์ สุพรมวัน และคณะ (2558). การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีค้อนชมิทด์และเครื่องทดสอบกำลังอัด. การประชุมวิชาคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11.

[8] อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (2548). ผลกระทบของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตต่อการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี้. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ: กรุงเทพฯ.

พฤติกรรมการรับแรงดัดและการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน

Flexural and Cracking Behavior of Reinforced Concrete Beams with Different Reinforcement Anchorage Details

สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า[1], สุภาวดี เสริมรัมย์[2*], รัฐพล เข็มทอง[3], สุทธิพงษ์ เข็มผง[4] และจักรพันธ์ โพธิพงษ์[5]

[1*2345] สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง ขนส่งและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา
*ผู้ติดต่อ: supawadee.s@nrru.ac.th, 044-009009 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงดัด การแอ่นตัว พฤติกรรมการแตกร้าว และรูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างคานมีขนาด 10 × 20 × 75 เซนติเมตร ใช้เหล็กเสริมหลัก RB9 และเหล็กปลอก RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 โดยพิจารณารายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็ก 4 รูปแบบ ได้แก่ ปลายเหล็กตรง เหล็กงอขอ 90 องศา เหล็กงอขอ 180 องศา และการเชื่อมแผ่นเหล็กฉากที่ปลายเหล็กเสริม ตัวอย่างคานทั้งหมดทดสอบภายใต้แรงกดสถิตแบบจุดเดียวที่กึ่งกลางช่วงคานด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานวัดด้วยไดอัลเกจ และสังเกตพัฒนาการของรอยร้าวระหว่างการเพิ่มแรงกระทำ

ผลการทดสอบพบว่า รายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมมีผลต่อกำลังรับแรงและพฤติกรรมการแอ่นตัวของคาน โดยคานมีค่าแรงประลัยอยู่ระหว่าง 4,798–5,593 กิโลกรัม และมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ช่วงแรงประลัยอยู่ระหว่าง 2.60–3.50 มิลลิเมตร คานทุกตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบดัด โดยรอยร้าวหลักเริ่มเกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงคานและขยายตัวขึ้นตามความลึกของคานเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น ตัวอย่างคานที่มีรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กที่เหมาะสมสามารถรับแรงประลัยได้สูงกว่าและควบคุมการแอ่นตัวได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีรายละเอียดการยึดเหนี่ยวน้อยกว่า ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการจัดรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมที่เหมาะสมมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต และส่งผลให้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็กดีขึ้น

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, รายละเอียดการยึดเหนี่ยว, พฤติกรรมการรับแรงดัด, พฤติกรรมการแตกร้าว, การแอ่นตัว

Abstract

This research investigated the effects of reinforcement anchorage details on the flexural behavior, deflection, crack development, and failure modes of reinforced concrete beams. The specimens were 10 × 20 × 75 cm in size and reinforced with RB9 longitudinal bars and RB6 stirrups, both of SR24 grade. Four anchorage details were considered: straight bar ends, 90-degree hooks, 180-degree

hooks, and welded angle plates at the bar ends. All specimens were subjected to a single static point load applied at midspan using a Universal Testing Machine. Midspan deflection was measured using a dial gauge, and crack development was observed throughout the loading process.

The results indicated that reinforcement anchorage details influenced the load-carrying capacity and deflection behavior of the beams. The ultimate loads ranged from 4,798 to 5,593 kg, while the maximum deflections at the ultimate load stage ranged from 2.60 to 3.50 mm. All specimens exhibited flexural failure, with major cracks initially developing in the midspan region and propagating upward along the beam depth as the applied load increased. Specimens with appropriate anchorage details achieved higher ultimate load capacity and better deflection control than those with less effective anchorage details. These findings suggest that proper reinforcement anchorage detailing may improve load transfer between reinforcing steel and concrete and enhance the flexural performance of small-scale reinforced concrete beams.

Keywords: Reinforced concrete beam, Anchorage detail, Flexural behavior, Cracking behavior, Deflection

1. บทนำ

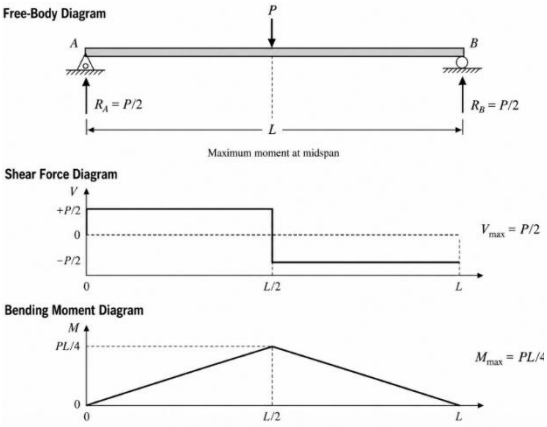
คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นองค์อาคารสำคัญในระบบโครงสร้าง ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากพื้น ผนัง หรือองค์ประกอบส่วนบน และถ่ายแรงไปยังเสาและฐานราก เมื่อคานรับน้ำหนักจะเกิดแรงภายในหลัก ได้แก่ โมเมนต์ดัดและแรงเฉือน โดยคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึงและควบคุมการแตกร้าว พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัดจึงมักประเมินจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว แรงแตกร้าวเริ่มต้น กำลังรับแรงสูงสุด ลักษณะรอยร้าว และรูปแบบการวิบัติ [1], [2] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัดมีพฤติกรรมเปลี่ยนจากช่วงเชิงเส้นก่อนเกิดรอยร้าว ไปสู่ช่วงไม่เชิงเส้นภายหลังการแตกร้าวและเข้าใกล้แรงประลัย โดยค่ารอยร้าวแรก กำลังดัด การแอ่นตัว และพลังงานที่คานสามารถดูดซับได้ เป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายสมรรถนะของคาน [1] นอกจากนี้ งานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กยังแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์พฤติกรรมของคานควรพิจารณาทั้งแรงแตกร้าว แรงคราก แรงประลัย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว และลักษณะการวิบัติ เพื่อให้สามารถอธิบายสมรรถนะเชิงโครงสร้างได้ครบถ้วน [2], [3] การทำงานร่วมกันระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ทั้งในด้านกำลังรับแรง การแอ่นตัว และพฤติกรรมรอยร้าว ซึ่งอาศัยกลไกการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เพื่อให้แรงดึงในเหล็กสามารถถ่ายเข้าสู่คอนกรีตได้อย่างเหมาะสม แนวคิดเรื่องระยะพัฒนาแรงหรือระยะฝังยึดของเหล็กเสริมจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความสามารถในการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น กำลังอัดของคอนกรีต ขนาดเหล็กเสริม ระยะหุ้มคอนกรีต ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม และการโอบรัดของเหล็กปลอก หากรายละเอียดการยึด

เหนี่ยวไม่เพียงพอ อาจทำให้เหล็กเสริมเกิดการลื่นไถลคอนกรีตแตกร้าวบริเวณปลายคาน หรือเหล็กไม่สามารถพัฒนากำลังดึงได้เต็มที่ ส่งผลต่อกำลังรับแรงและรูปแบบการวิบัติของคาน [4] โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ระยะฝังยึด สภาพผิวของเหล็กเสริม และการโอบรัดของคอนกรีตโดยรอบ [4]–[6] และรายละเอียดปลายเหล็กเสริมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยว โดยรูปแบบปลายเหล็ก เช่น เหล็กปลายตรง เหล็กปลายงอ 90 องศา เหล็กปลายงอ 180 องศา และเหล็กปลายเชื่อมเหล็กฉาก อาจให้พฤติกรรมการถ่ายแรงแตกต่างกัน โดยเฉพาะในกรณีที่ระยะฝังยึดมีข้อจำกัด เหล็กปลายงอสามารถเพิ่มแรงต้านเชิงกลบริเวณส่วนงอ ขณะที่การใช้เหล็กฉากเชื่อมปลายเหล็กอาจช่วยเพิ่มพื้นที่รับแรงและเปลี่ยนลักษณะการกระจายแรงบริเวณปลายคาน โดยทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของรายละเอียดปลายเหล็กเสริมต่อกำลังรับแรง การแตกร้าว และการแอ่นตัวของคานได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรายละเอียดปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ภายใต้แรงกดหนึ่งจุดที่กึ่งกลางคาน โดยพิจารณาค่าแรงสูงสุด การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ลักษณะรอยแตกร้าว และรูปแบบการวิบัติของคาน ทั้งนี้การทดลองไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในเหล็กเสริมโดยตรง การอภิปรายผลจึงอาศัยข้อมูลจากแรงกด การแอ่นตัว และพฤติกรรมรอยร้าวที่สังเกตได้ระหว่างการทดสอบเป็นหลัก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 1 แผนภาพพฤติกรรมคานรองรับอย่างง่ายภายใต้แรงจุดที่กึ่งกลางช่วง

คานรองรับอย่างง่ายที่รับแรงกดหนึ่งจุดกึ่งกลางคาน โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน และเกิดแรงเฉือนสูงสุดในช่วงระหว่างจุดรองรับกับตำแหน่งให้แรง จากการศึกษาของปรัชญา และคณะ [1] พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัดมีพฤติกรรมจากช่วงเชิงเส้นไปสู่ช่วงไม่เชิงเส้นภายหลังการเกิดรอยร้าว โดยรอยร้าวแรก กำลังดัด และการแอ่นตัวเป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินสมรรถนะของคาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐาน

$$\mathrm{M}max = \frac{\mathrm{PL}}{4} \quad (1)$$

$$\mathrm{V}max = \frac{\mathrm{P}}{2} \quad (2)$$

เมื่อ P คือ แรงกดที่กระทำต่อคาน และ
L คือ ระยะระหว่างจุดรองรับ

2.2 การยึดเหนี่ยวและระยะฝังยึด

การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้แรงดึงในเหล็กสามารถถ่ายเข้าสู่คอนกรีตโดยรอบได้อย่างเหมาะสม หากระยะฝังยึดไม่เพียงพอ เหล็กเสริมอาจเกิดการลื่นไถลหรือถูกดึงหลุดก่อนที่จะพัฒนากำลังดึงได้เต็มที่ ส่งผลให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงดัดได้ตามศักยภาพ Khobklang et al. [4] อธิบายว่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเกิดจากแรงเสียดทานและการขัดกันเชิงกลระหว่างผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีตโดยรอบ ขณะที่ ศตคุณ และคณะ [5] และ Petcherdchoo et al. [6] รายงานว่ากำลังยึดเหนี่ยวได้รับอิทธิพลจากกำลังอัดของคอนกรีต อายุการบ่ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และลักษณะของวัสดุยึดเกาะ แรงดึงในเหล็กเสริมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$T = As \cdot fs \tag{3}$$

เมื่อ T คือ แรงดึงในเหล็กเสริม, As คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม และ fs คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม

ระยะฝังยึดที่ต้องการสามารถประมาณจากสมดุลระหว่างแรงดึงในเหล็กเสริมกับแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยรอบผิวเหล็ก ดังสมการที่ 4

$$l_d = \frac{d_b f_y}{4\tau_b} \tag{4}$$

เมื่อ l_d คือ ระยะฝังยึดหรือระยะพัฒนาแรงของเหล็กเสริม d_b คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริม และ τ_b คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยระหว่างเหล็กกับคอนกรีต

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่หรือมีกำลังครากสูงต้องการระยะฝังยึดมากขึ้น ขณะที่คอนกรีตที่ให้กำลังยึดเหนี่ยวสูงสามารถลดความต้องการระยะฝังยึดได้ ในกรณีที่ระยะฝังยึดของเหล็กตรงมีข้อจำกัด การงอปลายเหล็ก เช่น 90 องศา หรือ 180 องศา สามารถช่วยเพิ่มการยึดรั้งเชิงกลและลดความเสี่ยงต่อการลื่นไถลหรือการดึงหลุดของเหล็กเสริมได้

2.3 การแอ่นตัวและพฤติกรรมรอยร้าวของคาน

การแอ่นตัวขึ้นอยู่กับขนาดของแรงกระทำ ความยาวช่วงคาน รวมถึงขนาดหน้าตัดของคาน เมื่อรับแรงเพิ่มขึ้นความแข็งของคานจะค่อย ๆ ลดลงภายหลังการเกิดรอยร้าวในบริเวณรับแรงดึง ทำให้การแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากการศึกษาของกองทัพ และคณะ [3] พบว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กควรพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว การกระจายตัวของรอยร้าว และลักษณะการวิบัติร่วมกัน สำหรับคานรองรับอย่างง่ายที่รับแรงกดหนึ่งจุดที่กึ่งกลางช่วง ภายใต้สมมติฐานพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นและหน้าตัดยังไม่แตกร้าว การแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางช่วงสามารถประมาณได้จากสมการ 5

$$\Delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \tag{5}$$

เมื่อ Δ_{max} คือ การแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคาน, P คือ แรงกดที่กระทำต่อคาน, L คือ ความยาวช่วงคาน, E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

2.4 ลักษณะรอยร้าวและรูปแบบการวิบัติ

ลักษณะรอยร้าว การแอ่นตัว และรูปแบบการวิบัติเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ประเมินพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงดังภาพที่ 2 รายละเอียดดังนี้

2.4.1 ลักษณะรอยร้าวจากแรงดัด

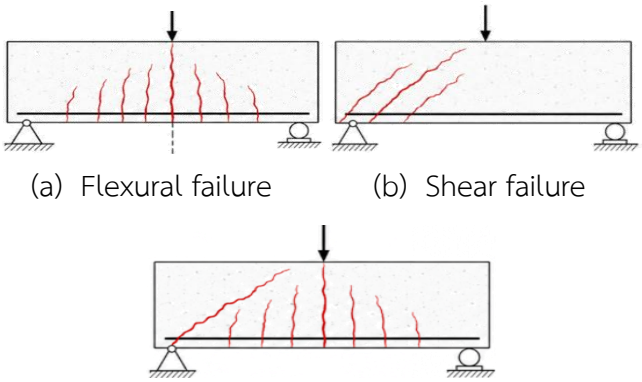
ภาพที่ 2 (a) Flexural failure การวิบัติแบบดัดมักเกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงคานรอยร้าวจะเริ่มจากด้านล่างของคานในแนวดิ่ง แล้วค่อย ๆ ขยายขึ้นด้านบนตามความลึกของหน้า โดยรอยร้าวมักขยายจากบริเวณแรงดึงไปยังบริเวณแรงอัดของหน้าตัด

2.4.2 ลักษณะรอยร้าวจากแรงเฉือน

ภาพที่ 2 (b) Shear failure การวิบัติแบบเฉือนมักเกิดบริเวณระหว่างจุดรองรับกับตำแหน่งให้แรงอย ร้าวมักเริ่มจากรอยร้าวดัดในแนวดิ่ง แล้วพัฒนาเป็นรอยร้าวเฉียงประมาณ 30–45 องศา มุ่งจากด้านล่างใกล้จุดรองรับขึ้นไปยังบริเวณจุดให้แรงหรือบริเวณรับแรงอัด โดยมักเกิดรอยร้าวเฉียงขนาดใหญ่และวิบัติแบบฉับพลัน

2.4.3 ลักษณะรอยร้าวจากแรงดัดร่วมแรงเฉือน

ภาพที่ 2 (c) Flexural-shear failure การวิบัติแบบดัดร่วมเฉือนเกิดจากอิทธิพลร่วมของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน โดยรอยร้าวมักเริ่มจากรอยร้าวดัดบริเวณด้านล่างของคาน แล้วพัฒนาเป็นรอยร้าวเฉียงเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น รอยร้าวจะเอียงจากบริเวณแรงดึงด้านล่างขึ้นไปยังตำแหน่งรับแรงหรือบริเวณรับแรงอัดด้านบน โดยเฉพาะในคานที่มีช่วงเฉือนค่อนข้างสั้นหรือมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) ที่ทำให้พฤติกรรมเปลี่ยนผ่านจากการดัดไปสู่การเฉือน ปราชญ์ และจารึก [7] พบว่า อัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลและปริมาณเหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าวมีผลต่อรูปแบบรอยร้าวและรูปแบบการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



(a) Flexural failure (b) Shear failure

(c) Flexural-shear failure

ภาพที่ 2 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีต

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

Type	Beam Size (cm)	Anchorage detail	Reinf.	loading	No. of spec.
BA	10x20x75	Straight bar end	2-RB9 Top 4 RB9 Bottom	1-point	2
BB	10x20x75	90° hook	2-RB9 Top 4 RB9 Bottom	1-point	2
BC	10x20x75	180° hook	2-RB9 Top 4 RB9 Bottom	1-point	2
BD	10x20x75	Welded angle plate	2-RB9 Top 4 RB9 Bottom	1-point	2
Total number of specimens					8

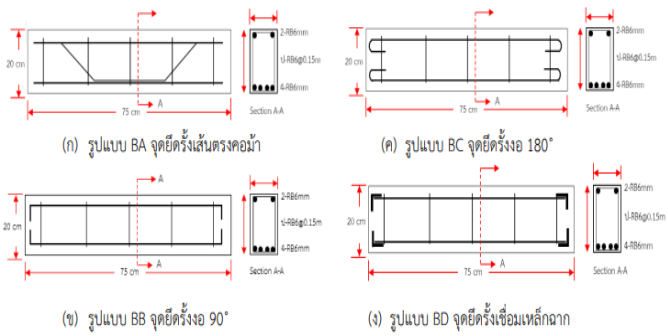
*** Reinf. = reinforcement

โดยตัวอย่างคานมีขนาด กว้าง (B) x ลึก (H) x ยาว (L) เท่ากับ 10x 20x 75 ซม. และเสริมเหล็กรับแรงดึงขนาด RB9 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SR24 โดยออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีรายละเอียดปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ เหล็กคอม้าปลายตรง (BA) เหล็กเสริมปลายงอ 90 องศา(BB) เหล็กเสริมปลายงอ 180 องศา (BC) และเหล็กเสริมปลายเชื่อมเหล็กฉาก (BD) โดยแสดงรายละเอียดเสริมเหล็กในภาพที่ 3

3.1 การเตรียมตัวอย่างการทดลอง

3.1.1 รายละเอียดการเสริมเหล็ก

ภาพที่ 3 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบ โดยการคำนวณอ้างอิงจากพื้นที่เหล็กเสริมดึงขั้นต่ำคำนวณจากสมการ $A_{s,min} = \left(\frac{14bd}{fy}\right)$ โดยที่ b =10 ซม d = 18.5 ซม. จากความลึก 20 ซม. ระยะหุ้มคอนกรีต 1.5 ซม. และ fy = 2400 กก.ซม^2.) ได้ $A_{s,min}$ เท่ากับ 1.08 ซม^2. และพื้นที่เหล็กเสริมที่ใช้ออกแบบมีพื้นที่รวมมากกว่าพื้นที่เหล็กเสริมขั้นต่ำที่กำหนด โดยเหล็กเสริมบน 2-RB9 มม. (As=1.272ซม^2.) และเหล็กเสริมล่าง 4-RB9 มม. (As=2.544 ซม^2.) ซึ่งมากกว่าเหล็กขั้นต่ำโดยคำนวณจากรูปตัด A-A ที่กึ่งกลางคาน



ภาพที่ 3 รายละเอียดการเสริมเหล็ก

3.1.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ออกแบบกำลังอัดคอนกรีต 210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน โดยอัตราส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำนวน 380 กก. ทราย 800 กก. และหิน 1060 กก. โดยออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) เท่ากับ 0.64 กำหนดค่ายุบตัว 10± 2.5 ซม. และติดตั้งแบบหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับหล่อตัวอย่างรูปแบบละ 2 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 8 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4



ภาพที่ 4 การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีต

3.2 วิธีการทดสอบตัวอย่าง

ก่อนการเตรียมตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก และการทดสอบกำลังดึงของเหล็กเสริมเพื่อหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต กำลังคราก กำลังดึงสูงสุด และการยืดตัวของเหล็กเสริม

3.2.1 การทดสอบวัสดุในการทดลอง

1) กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

ตารางที่ 2 กำลังอัดตัวอย่างคอนกรีต

Age (d)	ØCy-Size (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m^3)	Compressive Strength (kg/cm^2)
CY-7d	10x20	3.65	2325.02	202.95
CY-14d	10x20	3.76	2394.46	220.00
CY-28d	10x20	3.74	2383.30	234.43

*** CY = Cylinder specimen

7d, 14d, 28d = อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

จากตารางที่ 2 ดำเนินการกับตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน โดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามแนวทาง ASTM C39/C39M [8] พบว่าตัวอย่างที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 202.95 กก./ตร.ซม. และเพิ่มขึ้นเป็น 220.00 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 14 วัน และ 234.43 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคานมีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาการบ่มอย่างเหมาะสม โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสามารถนำไปใช้เป็นค่ากำลังอัดอ้างอิงของคอนกรีตในการวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้

2) กำลังดึงของเหล็กเสริม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติกำลังดึงเฉลี่ยของเหล็กเสริม

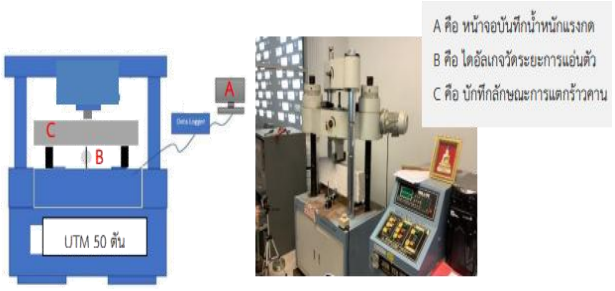
Type	As (cm^2)	(fy) (kg/cm^2)	(fu) (kg/cm^2)	Elong. (%)
RB6 (SR24)	0.282	3996.62	5706.38	21.80
RB9 (SR24)	0.636	3,196.51	5,394.81	28.24

*** fy คือ กำลังครากเฉลี่ย, fu คือ กำลังดึงเฉลี่ยสูงสุด และ Elong. คือ ร้อยละการยืดตัวเฉลี่ยจากการทดสอบแรงดึง

เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 ขนาด RB6 และ RB9 โดยทำการทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมที่ใช้จริงในงานวิจัย ผลการทดสอบพบว่าเหล็ก RB6 มีค่ากำลังครากเฉลี่ยและกำลังดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 3,996.62 และ 5,706.38 กก/ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนเหล็ก RB9 มีค่าเท่ากับ 3,196.51 และ 5,394.81 กก/ซม.^{2} ตามลำดับ โดยค่าทดสอบของเหล็กทั้งสองขนาดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของเหล็กเส้นกลม SR24 จึงถือว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเหล็กเสริมในชิ้นทดสอบ

3.2.2 การติดตั้งตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

หลังจากตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับการบ่มน้ำครบอายุ 28 วัน ได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่อง UTM ขนาด 50 ตัน โดยให้แรงกดกระทำที่กึ่งกลางช่วงคานในลักษณะคานรองรับอย่างง่าย ส่วนค่าการแอ่นตัววัดที่กึ่งกลางช่วงคานด้วยไดอัลเกจ ดังแสดงในภาพที่ 5 ทำการบันทึกการแตกร้าว การแอ่นตัว และรูปแบบการวิบัติของคาน การทดสอบดำเนินการโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว กำลังรับน้ำหนักสูงสุด และรูปแบบการแตกร้าวของคาน ทั้งนี้ ได้พิจารณาค่าการแอ่นตัวจำกัดภายใต้สภาวะใช้งานตามแนวทางมาตรฐาน ACI 318-19 [9] โดยกำหนดค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้เท่ากับ $\Delta_{allow} = \frac{L_n}{240}$ เมื่อ Δ_{allow} คือ ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้, L_n คือ ช่วงความยาวสุทธิของคานระหว่างจุดรองรับ



ภาพที่ 5 ติดตั้งตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคาน

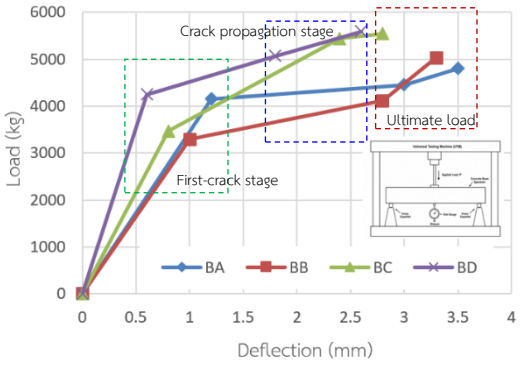
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการรับแรงดัด

Type	Ultimate Load (kg)	Moment (kg-m)	Shear (kg)	Failure mode
BA	4,798	899.53	2,399.01	Flexural
BB	5,027	942.56	2,513.50	Flexural
BC	5,539	1,038.56	2,769.50	Flexural
BD	5,593	1,048.69	2,796.5	Flexural

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบการรับแรงดัดของคานตัวอย่าง BA–BD พบว่าแรงประลัยมีค่าอยู่ระหว่าง 4,798–5,593 kg โดยตัวอย่าง BD ให้ค่าแรงประลัยสูงสุด อาจเกิดจากการเชื่อมแผ่นเหล็กฉากที่ปลายเหล็กเสริม ซึ่งมีแนวโน้มช่วยเพิ่มพื้นที่ต้านทานและกลไกการยึดรั้งเชิงกลบริเวณปลายเหล็ก ส่งผลให้คานสามารถรับแรงได้สูงขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้วัดความเครียดหรือการลื่นไถลของเหล็กเสริมโดยตรง จึงควรพิจารณาผลการถ่ายแรงจากแนวโน้มของแรงกด การแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่สังเกตได้เป็นหลัก ขณะที่ BA ให้ค่าต่ำสุด ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าแรงประลัย โดยคานทุกตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบดัด แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมหลักของคานอยู่ภายใต้การรับแรงดัดก่อนเข้าสู่สภาวะวิบัติ

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่าง BA–BD แสดงดังภาพที่ 6 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นคานมีพฤติกรรมใกล้เคียงเชิงเส้นก่อนเกิดรอยร้าว เมื่อเข้าสู่ช่วงรอยร้าวแรก ความแข็งของคานเริ่มลดลง และเมื่อรอยร้าวขยายตัว ค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามแรงกดที่เพิ่มขึ้น ที่ช่วงแรงประลัย ตัวอย่าง BD รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 5,593 kg และมีค่าการแอ่นตัว 2.60 mm ขณะที่ BA รับแรงได้น้อยสุดเท่ากับ 4,798 kg มีค่าการแอ่นตัวสูงสุด 3.50 mm ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า คาน BA ซึ่งใช้ปลายเหล็กตรงมีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพการยึดรั้งเชิงกลต่ำกว่ารูปแบบอื่น สังเกตได้จากค่าแรงประลัยที่ต่ำกว่าและค่าการแอ่นตัวที่สูงกว่า ขณะที่คาน BB และ BC ซึ่งใช้ปลายเหล็กงอ 90° และ 180° ตามลำดับ มีแนวโน้มช่วยเพิ่มการยึดรั้งเชิงกลบริเวณปลายเหล็ก ส่วนคาน BD ซึ่งใช้แผ่นเหล็กฉากเชื่อมที่ปลายเหล็ก มีแนวโน้มช่วยเพิ่มพื้นที่รับแรงบริเวณปลายเหล็ก ส่งผลให้คานรับแรงประลัยได้สูงสุดและมีค่าการแอ่นตัวต่ำสุดในชุดการทดลองนี้ ทั้งนี้ การอธิบายกลไกดังกล่าวพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด การแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่สังเกตได้เป็นหลัก ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคานทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการวิบัติแบบดัด โดยมีลำดับพฤติกรรมตั้งแต่ช่วงก่อนแตกร้าว ช่วงรอยร้าวแรก ช่วงรอยร้าวขยายตัว และช่วงแรงประลัย อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้วัดความเครียดหรือการลื่นไถลของเหล็กเสริมโดยตรง การอภิปรายผลจึงพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด การแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่สังเกตได้เป็นหลัก



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.3 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบและการคำนวณเชิงทฤษฎี

ค่าการแอ่นตัวสูงสุดจากการทดสอบและค่าการแอ่นตัวเชิงทฤษฎีของคานตัวอย่าง BA–BD การทดลองไม่ได้ทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยตรง จึงคำนวณประมาณจากกำลังอัดคอนกรีต 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 2.60–3.50 mm ขณะที่ค่าการแอ่นตัวเชิงทฤษฎีมีค่าอยู่ระหว่าง 0.291–0.339 mm โดยค่าในการทดลองสูงกว่าค่าทฤษฎีประมาณ 7.67–12.03 เท่า เนื่องจากค่าทฤษฎีคำนวณภายใต้สมมติฐานพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นและหน้าตัดไม่แตกร้าว ในขณะที่ค่าทดลองเป็นค่าที่เกิดขึ้นในช่วงแรงประลัยซึ่งคานมีรอยร้าวและความแข็งลดลงแล้ว

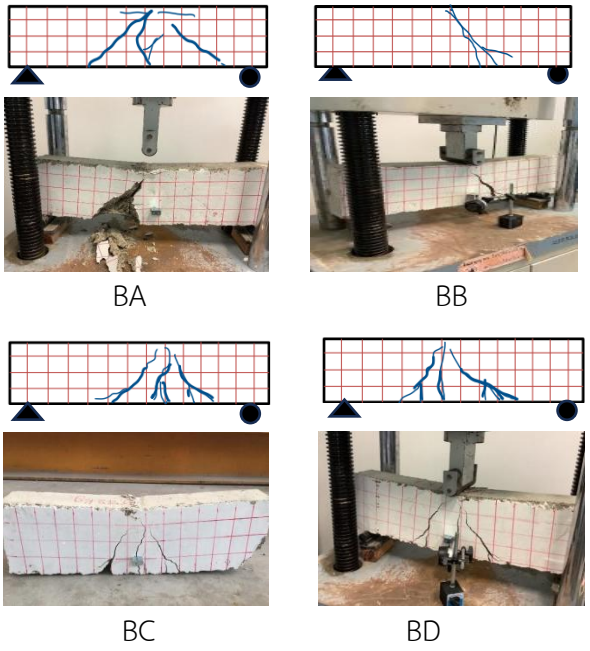
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากการทดลองและการคำนวณเชิงทฤษฎี

Type	(Pu) (kg)	Δ_{exp} (mm)	Δ_{cal} (mm)	$\Delta_{exp}/\Delta_{cal}$
BA	4,798	3.50	0.291	12.03
BB	5,027	3.30	0.305	10.82
BC	5,539	2.80	0.336	8.33
BD	5,593	2.60	0.339	7.67

*** Pu=Ultimate Load, Δ_{exp}= experimental maximum deflection, Δ_{cal} = calculated theoretical deflection $\Delta_{exp}/\Delta_{cal}$ = ratio of experimental deflection to calculated theoretical deflection

4.4 ลักษณะการแตกร้าวและรูปแบบการวิบัติ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคานทั้ง 4 รูปแบบ พบว่ารายละเอียดปลายเหล็กเสริมมีผลต่อกำลังรับแรงของคานอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะการวิบัติตัวอย่างคาน

คาน BA ซึ่งใช้เหล็กเสริมแบบคอม้าปลายตรงให้ค่ากำลังรับแรงต่ำที่สุด เท่ากับ 4,798 kg แสดงให้เห็นว่ารูปแบบปลายเหล็กตรงอาจมีประสิทธิภาพในการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวและการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตต่ำกว่ารูปแบบอื่น

คาน BB ซึ่งใช้ปลายเหล็กงอ 90° มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นเป็น 5,027 kg หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 4.77% เมื่อเทียบกับ BA แสดงว่าการงอปลายเหล็กช่วยเพิ่มกลไกการยึดเหนี่ยวได้บางส่วน แต่ผลที่เพิ่มขึ้นยังไม่มากนักเมื่อเทียบกับรูปแบบที่มีการงอปลายเหล็กมากกว่า

คาน BC ซึ่งใช้ปลายเหล็กงอ 180° ให้ค่ากำลังรับแรง 5,539 kg เพิ่มขึ้นประมาณ 15.44% เมื่อเทียบกับ BA สะท้อนว่าการงอปลายเหล็ก 180° มีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยวเชิงกล และช่วยให้การถ่ายแรงดึงในเหล็กเสริมเข้าสู่คอนกรีตได้ดีขึ้น ส่งผลให้คานสามารถพัฒนาโมเมนต์ดัดได้สูงขึ้น

คาน BD ซึ่งมีการเชื่อมเหล็กฉากที่ปลายเหล็กเสริม ให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุดเท่ากับ 5,593 kg หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 16.57% เมื่อเทียบกับ BA แสดงให้เห็นว่าการเสริมกลไกยึดเหนี่ยวที่ปลายเหล็กมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรง และสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงที่สูงขึ้นของคานในชุดการทดลองนี้

5.สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

รายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมมีผลต่อกำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคานตัวอย่างมีค่าแรงประลัยอยู่ระหว่าง 4,798–5,593 kg ตัวอย่าง BD ซึ่งใช้เหล็กเสริมปลายเชื่อมแผ่นเหล็กฉากให้ค่าแรงประลัยสูงสุด ขณะที่ตัวอย่าง BA ซึ่งใช้เหล็กปลายตรงให้ค่าแรงประลัยต่ำสุด

ค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ช่วงแรงประลัยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.60–3.50 mm โดยตัวอย่าง BA มีค่าการแอ่นตัวสูงสุด ส่วนตัวอย่าง BD มีค่าการแอ่นตัวต่ำสุด แสดงให้เห็นว่ารายละเอียดปลายเหล็กที่ช่วยเพิ่มการยึดรั้งเชิงกลมีแนวโน้มช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงและควบคุมการแอ่นตัวของคานได้ดีขึ้น [2] และคานทุกตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบดัด โดยรอยร้าวเริ่มเกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงคาน ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด และผลการทดลองมีแนวโน้มแสดงให้เห็นว่า การจัดรายละเอียดการยึดเหนี่ยวปลายเหล็กเสริมที่ช่วยเพิ่มการยึดรั้งเชิงกล อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงและควบคุมการแอ่นตัวของคานได้ดีขึ้น ทั้งนี้ การอธิบายกลไกการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตควรพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดของการทดลอง เนื่องจากไม่ได้วัดความเครียดหรือการลื่นไถลของเหล็กเสริมโดยตรง

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาต่อไป ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างทดสอบในแต่ละรูปแบบ และควรติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในเหล็กเสริมและคอนกรีต รวมถึงอุปกรณ์วัดการลื่นไถลของเหล็กเสริม เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายแรงและพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ควรศึกษาผลของระยะฝังยึด ขนาดเหล็กเสริม และกำลังอัดคอนกรีต เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ปรัชญา ก้านบัว, ลาวัลย์ ขันเกษตร, อิทธิ ผลิตศิริ, และณัฐวุฒิ อินทบุตร, “พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีส่วนผสมของเศษยางจากยางรถยนต์รีไซเคิล,” วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 15–30, 2567.

[2] ธนัตศักดิ์ ธีระเกตุ, วิกร โตวราพงศ์, ปวริศ โปษยะนันทน์, ปฏิภาณ จันทรวิชิต, Damang Dy, และยศ สมพรเจริญสุข, “พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กยึดติดด้วยอีพ็อกซี่และสลักเกลียว,” Engineering Transactions, vol. 25, no. 2(53), pp. 110–121, 2022.

[3] กองทัพ ชินวานิช, ชนะชัย ทองโฉม, ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, และเพ็ญพิชชา สนิทอินทร์, “พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วระบบ

อัดแรงภายนอก," วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 9–21, 2567.

[4] P. Khobklang, P. Jaikaew, and V. Vimonsatit, "Pull-out strength of rebar in concrete mixed with bagasse ash," Engineering and Applied Science Research, vol. 49, no. 4, pp. 562–573, 2022.

[5] ศตคุณ เดชพันธ์, เสริมศักดิ์ สุขเกษม, ชุดาภัค เดชพันธ์, ขัตติย ชมพูวงศ์, สมใจ ยุบลชิต, ธนากร ภูเงินขำ, และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, "กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอฟจีดียิปซัมเป็นวัสดุยึดเกาะ," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 623–635, 2565.

[6] A. Petcherdchoo, T. Hongubon, N. Thanasisathit, K. Punthutaecha, and S.-H. Jang, "Effect of curing time on bond strength between reinforcement and fly-ash geopolymer concrete," Applied Science and Engineering Progress, vol. 13, no. 2, pp. 127–135, 2020.

[7] ปราชญ์ อมรภิญโญ และจารึก ถีระวงษ์, "พฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก: การทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์," วิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 30, ฉบับที่ 102, หน้า 73–82, 2560.

[8] ASTM International, ASTM C39/C39M-17: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

[9] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.

การพัฒนาแผนปฏิบัติการการจัดการขยะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดเล็กที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย

A Context-Specific Construction Waste Management Action Plan for Small-Scale Construction Projects in Thailand

ธานี เสนสร[1] และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร[2]

[1,2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ธานี เสนสร:thaneesansone@gmail.com, 097-2969985, 02-9459993

บทคัดย่อ

การเติบโตของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดของเสียในปริมาณมหาศาล ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการขนาดเล็ก และขนาดกลาง (SMEs) ของไทยที่เผชิญข้อจำกัดด้านพื้นที่ บุคคลากรและเงินทุน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผนปฏิบัติการจัดการขยะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดเล็ก ที่สอดคล้องกับบริบทของ SMEs ไทย การวิจัยใช้ระเบียบวิธีแบบผสมผสาน (Mixed Methods) บูรณาการข้อมูลจากแบบสอบถามผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และข้อมูลเชิงประจักษ์จากพื้นที่นำร่อง สังเคราะห์ด้วยการตรวจสอบข้อมูลแบบสามเส้า (Data Triangulation) ผลการศึกษาพบช่องว่างเชิงระบบด้านการจัดการขยะหน้างานที่ได้รับคะแนนประเมินต่ำสุด ขณะที่ข้อมูลเชิงประจักษ์แสดงผลลัพธ์ที่แตกต่างจากบริบทของงานวิจัยในอดีต โดยพบว่าร้อยละ 71.7 นั้น มีน้ำหนักอยู่ที่ 4,126 กิโลกรัม จากน้ำหนักขยะรวมทั้งสิ้น 5,755 กิโลกรัม ของขยะคือวัสดุโครงสร้างหนักไม่ใช่บรรจุภัณฑ์ ผู้วิจัยจึงพัฒนาแนวคิดให้อยู่ในรูปแบบแผนปฏิบัติการที่บูรณาการหลัก 3R (Reduce, Reuse, Recycle) เข้ากับยุทธศาสตร์การสร้างมูลค่าเพิ่ม (Valorization) ขับเคลื่อนด้วยกลไกจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้ให้คุณประโยชน์ที่สำคัญในการพิสูจน์ว่า การบรรลุเป้าหมายเศรษฐกิจหมุนเวียนระดับฐานราก ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีอัจฉริยะที่มีต้นทุนสูง แต่มีศักยภาพที่จะขับเคลื่อนให้เกิดผลสำเร็จได้ผ่านแผนปฏิบัติการที่ออกแบบจำเพาะ มีการกระจายความรับผิดชอบที่ชัดเจน และใช้ผลตอบแทนทางการเงินเป็นกลไกขับเคลื่อน

คำสำคัญ: การจัดการขยะก่อสร้างและรื้อถอน, เศรษฐกิจหมุนเวียน, ผู้ประกอบการ SMEs, แผนปฏิบัติการ, การสังเคราะห์ข้อมูลแบบสามเส้า

Abstract

The rapid growth of the construction industry has led to the generation of substantial amounts of construction waste, posing a significant challenge to the implementation of the circular economy, particularly among small and medium-sized enterprises (SMEs) in Thailand that face constraints in land availability, workforce, and financial resources. This study aims to develop a construction waste management action plan for small-scale construction projects that is specifically tailored to the operational context of Thai SMEs. A mixed-methods research design was employed by integrating stakeholder questionnaire surveys with empirical data collected from a pilot construction site. The findings were synthesized using a data triangulation approach to enhance the reliability and validity of the results. The analysis identified a significant systemic gap in on-site waste management, which

received the lowest performance rating among the evaluated dimensions. Furthermore, the empirical findings differed considerably from those reported in previous studies. Structural construction materials, including concrete, bricks, stones, and mortar, accounted for 71.7% of the total construction waste, representing 4,126 kg out of a total waste generation of 5,755 kg, whereas packaging materials constituted only a minor proportion. Based on these findings, this study developed an integrated Construction Waste Management Action Plan that combines the principles of the 3Rs (Reduce, Reuse, and Recycle) with a valorization strategy to maximize resource recovery and economic value. The proposed framework is further supported by economic incentive mechanisms designed to encourage stakeholder participation and improve waste management performance throughout the construction process. The findings provide important evidence that achieving circular economy objectives at the grassroots level does not necessarily require high-cost smart technologies. Instead, effective implementation can be achieved through a context-specific action plan characterized by clearly defined responsibilities, practical management measures, and financial incentives that motivate stakeholders to adopt sustainable construction waste management practices.

Keywords: Construction and Demolition Waste Management (CDWM); Circular Economy; Small and Medium-sized Enterprises (SMEs); Construction Waste Management Action Plan (CWMAP); Data Triangulation

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมก่อสร้างส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยก่อให้เกิดขยะในปริมาณมหาศาล เมื่อเทียบกับภาคธุรกิจอื่น สถิติระดับสากลระบุว่าของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน CDW (Construction and Demolition waste) คิดเป็นร้อยละ 30–35 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมดทั่วโลก[5] และคาดการณ์ว่าอาจเพิ่มสูงถึงร้อยละ 40 [8] ในอนาคต ขยะจำนวนมากเหล่านี้ถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ทำให้ระบบฝังกลบต้องรับภาระเศษวัสดุก่อสร้างในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 30–40 ของพื้นที่ทั้งหมด[2]

ขยะจากโครงการก่อสร้างถูกนิยามไว้หลายระดับ ตั้งแต่ระดับมหภาคที่หมายถึง “ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างหรือรื้อถอนอาคาร”[1] มิติเชิงพฤติกรรมที่หมายถึง “วัสดุที่ไม่ได้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ตามวัตถุประสงค์หลักของการก่อสร้างที่พักอาศัย” [2] ไปจนถึงมิติเชิงกระบวนการที่ครอบคลุม “วัสดุที่เกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของโครงการก่อสร้าง”[3] งานวิจัยนี้จึงได้ให้นิยามเชิงปฏิบัติการว่า “ขยะจากโครงการก่อสร้าง หมายถึง วัสดุหรือของเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในทุกกระบวนการก่อสร้างอาคารภายในพื้นที่โครงการขนาดเล็ก ซึ่งไม่ได้ถูกนำมาใช้งานตามวัตถุประสงค์หลักเดิมอีกต่อไป”

นิยามดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในบริบทของประเทศไทย เนื่องจากการจัดการเศษวัสดุก่อสร้างในโครงการก่อสร้างขนาดเล็ก มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากโครงการขนาดใหญ่อย่างชัดเจน โครงการขนาดเล็กมักเผชิญความคับแคบของพื้นที่และขาดการวางแผนอย่างเป็นระบบ ผู้รับเหมาส่วนใหญ่จึงใช้วิธีกองขยะรวมกันโดยไม่คัดแยกประเภทวัสดุ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการลักลอบนำของเสียไปทิ้งในพื้นที่สาธารณะอย่างผิดกฎหมาย โดยมีปริมาณเฉลี่ยสูงถึงวันละ 300 ตันในเขตกรุงเทพมหานคร [2]

แม้ในระดับนานาชาติจะมีความก้าวหน้าในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี อาทิ แบบจำลองข้อมูลอาคาร (BIM) ,ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และเทคโนโลยีบล็อกเชน เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมเข้าสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน

(Circular Economy) และตั้งเป้าลดขยะฝังกลบให้เป็นศูนย์ [4] แต่เทคโนโลยี เหล่านี้กลับมีต้นทุนสูงและซับซ้อนเกินกว่าที่กลุ่ม SMEs ไทยซึ่งขาดแคลนเงินลงทุนและบุคลากรเฉพาะทางจะเข้าถึงได้ จึงเป็นปัญหาหลักของการเกิดขยะก่อสร้างในโครงการขนาดเล็ก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้น ในการใช้หลักการพื้นฐาน 3R และแนวทางที่เหมาะสมจากงานวิจัยนานาชาติ เพื่อปิดช่องว่างความต่างของงานก่อสร้างขนาดใหญ่ มาพัฒนาแนวคิดเป็นแผนเชิงปฏิบัติการที่ออกแบบเฉพาะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดเล็กของกลุ่มผู้รับเหมา SMEs ในประเทศไทย ด้วยระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods) เพื่อบูรณาการข้อมูลพฤติกรรมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ากับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน นำไปสู่รูปแบบ แผนปฏิบัติการการจัดการขยะ (Construction Waste Management Action Plan (CWMAP)) ที่ก้าวข้ามข้อจำกัดด้านพื้นที่ สร้างกลไกแรงจูงใจทางการเงิน และเปลี่ยนภาระการกำจัดขยะให้กลายเป็นมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน

2. การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

อุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลกกำลังเผชิญความท้าทายในการเปลี่ยนผ่านการบริหารจัดการทรัพยากรจากระบบเศรษฐกิจเชิงเส้น(Linear Economy) ไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ซึ่งมุ่งรักษาคุณค่าของวัสดุให้อยู่ในวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ให้นานที่สุด [5] โดยมีลำดับชั้นการจัดการขยะ (Waste Hierarchy) แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดการใช้ทรัพยากรและเพิ่มการหมุนเวียนวัสดุผ่านหลักการ 3R Reduce, Reuse และ Recycle ขยะจากการก่อสร้างและการรื้อถอนถือเป็นหนึ่งของเสียที่สำคัญที่สุดของโลก 3R เป็นเครื่องมือที่ให้ความสำคัญกับการป้องกันการเกิดขยะที่แหล่งกำเนิดเป็นอันดับแรกด้วยการ Ruduce รองลงมาคือการนำกลับมาใช้ซ้ำ Reuse และการรีไซเคิล Recycle [6] แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ และกระแสการดำเนินธุรกิจภายใต้กรอบความรับผิดชอบ ESG (Environmental, Social, and Governance) อย่างไรก็ตาม แม้ทฤษฎีจะเน้นการลดขยะจากแหล่งกำเนิด งานวิจัยระดับสากลกลับยืนยันว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดขยะในปริมาณสูงมักเป็นปัจจัยต้นน้ำ ได้แก่ ความผิดพลาดในเอกสารสัญญาและการเปลี่ยนแปลงแบบก่อสร้าง [2] สำหรับบริบทของประเทศไทย ข้อค้นพบเชิงประจักษ์สอดคล้องกันว่าปัญหาขยะส่วนใหญ่เชื่อมโยงกับฝ่ายบริหารและการจัดการโครงการ [7] โดยการวิเคราะห์เส้นทางเชิงโครงสร้าง (Path Analysis) ยืนยันทางสถิติว่า ผู้ควบคุมงานมีอิทธิพลทางตรงต่อการเกิดปริมาณขยะก่อสร้างสูงสุดที่ค่าสัมประสิทธิ์ 0.423 รองลงมาคือผู้ออกแบบที่ 0.268 ในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานหน้าไซต์กลับมีอิทธิพลน้อยที่สุดเพียง 0.216 ซึ่งเป็นการหักล้างความเชื่อเดิมที่มักโยนความผิดให้กับแรงงาน [7]

เมื่อเปรียบเทียบแนวปฏิบัติระหว่างประเทศพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ กลุ่มประเทศยุโรปมีการบังคับใช้นโยบายลดขยะอย่างเข้มงวด เช่น มาตรการ Zero Avoidable Waste [8] และบูรณาการเทคโนโลยีอัจฉริยะ อาทิ ใช้ BIM เป็นฐานในการประเมินการเกิดขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอนในระหว่างขั้นตอนการออกแบบทางสถาปัตยกรรม แนวทางนี้ทำให้สามารถระบุปริมาณขยะได้อย่างอัตโนมัติ และมีรายละเอียดที่ชัดเจน ซึ่งช่วยสนับสนุนการระบุและการเลือกกลยุทธ์ที่ส่งเสริมความยั่งยืนในระหว่างขั้นตอนการออกแบบ, AI ได้กลายเป็นพลังขับเคลื่อนที่พลิกโฉมการจัดการขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอน (CDW) โดยช่วยให้สามารถพยากรณ์ปริมาณการเกิดขยะได้อย่างแม่นยำ ทำให้การคัดแยกขยะมีประสิทธิภาพ นำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการขนส่งให้เหมาะสมที่สุด และการเลือกสถานที่ตั้ง (เพื่อกำจัด/รีไซเคิล) ในเชิงกลยุทธ์"[4] และบล็อกเชน ช่วยในการประเมินและติดตามวงจรชีวิตขยะ [9] งานวิจัยในต่างประเทศหลายชิ้นได้พัฒนากรอบแนวคิดเพื่อความยั่งยืนแบบครบวงจร อาทิ [10] ที่บูรณาการ Waste Hierarchy เข้ากับเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยมุ่งรักษามูลค่าของทรัพยากรให้หมุนเวียนอยู่ในระบบให้นานที่สุดภายใต้การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

และปัจจัยสนับสนุนเชิงนโยบาย เศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยี; [11] ที่เน้นการลด การใช้ซ้ำ การรีไซเคิล และกู้คืนทรัพยากรกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อลดการใช้ทรัพยากรใหม่ให้น้อยที่สุด; และ [12] ที่เสนอกรอบแนวคิด 3 ขั้นตอน ได้แก่ การสร้างฐานข้อมูลวัสดุในอาคาร (Material Stock Database) การประมาณปริมาณและองค์ประกอบของขยะก่อสร้างและรื้อถอน (CDW) และการประเมินความยั่งยืนของทางเลือกการจัดการ อย่างไรก็ตาม กรอบแนวคิดเหล่านี้ล้วนพัฒนาขึ้นบนบริบทของประเทศที่มีความพร้อมด้านเทคโนโลยีและเงินทุน

ในทางตรงกันข้าม ประเทศไทยยังขาดการบังคับใช้นโยบายที่เข้มงวด ทำให้โครงการอาคารสูงมีอัตราการเกิดขยะเฉลี่ยมากถึง 30.81 กิโลกรัมต่อตารางเมตร [13] ขณะที่โครงการก่อสร้างขนาดเล็ก มีลักษณะปัญหาที่แตกต่างออกไป โดยการสำรวจในไทยรายงานว่าขยะประเภทบรรจุภัณฑ์อาจมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 88.6 ของขยะทั้งหมด [14] ทั้งนี้ การสร้างมูลค่าเพิ่มภายใต้หลักเศรษฐกิจหมุนเวียนด้วยนวัตกรรมวัสดุอัพไซเคิลในระดับสากลได้ก้าวสู่การใช้งานเชิงพาณิชย์ เช่น อิฐ แต่ในประเทศไทยยังคงจำกัดอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง เนื่องจากขาดความเชื่อมั่นด้านมาตรฐานความแข็งแรงและต้นทุน [3]

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น ผู้วิจัยพบช่องว่างทางวิชาการ (Research Gaps) ที่ชัดเจน 4 ประการ อันได้แก่ ช่องว่างเชิงบริบท (Contextual Gap) คือ เทคโนโลยีขั้นสูงระดับสากลมีต้นทุนสูงและไม่อาจถ่ายโอนมาใช้กับผู้รับเหมา SMEs ไทยที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณได้โดยตรง [4]; ช่องว่างเชิงทฤษฎี (Theoretical Gap) คือ กรอบแนวคิดสากลส่วนใหญ่มุ่งจัดการที่ปลายทางและพัฒนาบนบริบทของประเทศพัฒนาแล้ว จึงละเลยการจัดการที่เน้นไปที่ปัจจัยระดับผู้ควบคุมงาน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักระดับต้นของการเกิดขยะในบริบทไทย [7]; ช่องว่างเชิงประจักษ์ (Empirical Gap) คือ ข้อมูลปริมาณและองค์ประกอบของขยะที่แท้จริงจากไซต์งานก่อสร้างขนาดเล็กในไทยยังมีจำกัดและยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน และ ช่องว่างเชิงปฏิบัติ (Practical Gap) ที่ยังไม่มีแนวทางปฏิบัติที่เป็นแบบแผน ซึ่งช่องว่างนี้เองที่สอดคล้องกับปัญหาการจัดการขยะในบริบทของ SMEs ไทยอย่างชัดเจน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ พัฒนาแผนปฏิบัติการการจัดการขยะ (Construction Waste Management Action Plan (CWMAP)) เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการขยะหน้างานที่สามารถสร้างแรงจูงใจทางการเงินให้ผู้ประกอบการ SMEs เปลี่ยนของเสียให้เป็นมูลค่าเพิ่ม[3]เพื่อความยั่งยืนทางเศรษฐศาสตร์

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Research Methodology)

ผู้วิจัยออกแบบระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยใช้แบบการวิจัยเชิงคู่ขนานประจบกัน (Convergent Parallel Design) ซึ่งบูรณาการข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ กระบวนการวิจัยแบ่งออกเป็นการเก็บข้อมูลทุติยภูมิและปฐมภูมิ ก่อนนำมาวิเคราะห์และสังเคราะห์เป็น CWMAP โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data Collection)

การเก็บข้อมูลระยะนี้มุ่งเน้นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) เพื่อสร้างรากฐานทางทฤษฎีและค้นหาช่องว่างการวิจัย ผู้วิจัยสืบค้นและทบทวนวรรณกรรมจากฐานข้อมูลวิชาการทั้งระดับสากลและระดับประเทศที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะก่อสร้าง (CDW) แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และปัจจัยอิทธิพลของบุคลากรตลอดจนกฎหมายและนโยบายสิ่งแวดล้อม จากนั้นใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อดึงตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการจัดการขยะและสกัดข้อจำกัดของไซต์งานขนาดเล็ก

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data Collection)

เพื่อให้ได้ข้อเท็จจริงเชิงประจักษ์ ผู้วิจัยแบ่งการเก็บข้อมูลปฐมภูมิออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผ่านแบบสอบถาม และการเก็บข้อมูลจากการปฏิบัติจริงในพื้นที่นำร่อง

3.2.1 การกำหนดขนาดตัวอย่างและการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยนี้ใช้การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของข้อมูลแต่ละประเภท เนื่องจากงานวิจัยมีลักษณะเป็นการวิจัยแบบผสมผสานที่ต้องบูรณาการข้อมูลจากการสำรวจความคิดเห็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ข้อมูลจากพื้นที่ก่อสร้างนำร่อง และการตรวจสอบแผน)กิบัติการโดยผู้เชี่ยวชาญ ดังนั้น การกำหนดกลุ่มตัวอย่างจึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างแบบสอบถาม พื้นที่นำร่อง และกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ

1) กลุ่มตัวอย่างแบบสอบถาม

กลุ่มตัวอย่างสำหรับแบบสอบถามคือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับการวางแผน การควบคุม การจัดหาวัสดุ และการจัดการขยะในโครงการก่อสร้าง ได้แก่ เจ้าของโครงการ ผู้ควบคุมงาน ผู้ออกแบบ ผู้รับเหมา บริษัทที่ปรึกษา และหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง การคัดเลือกใช้วิธีสุ่มแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) เพื่อให้ครอบคลุมบทบาทสำคัญในห่วงโซ่การก่อสร้าง ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำคำนวณโดยใช้สูตรของ Cochran สำหรับกรณีไม่ทราบขนาดประชากรที่แน่นอน ดังนี้

$$n_0 = (Z^2\, p(1 - p)) / e^2$$

โดยที่

n_0 = ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำ

Z = ค่ามาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 1.96

p = สัดส่วนประชากรที่คาดว่าจะมีคุณลักษณะที่ศึกษา กำหนดที่ 0.50 เพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างสูงสุด

e = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

หากกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าความคลาดเคลื่อน 8% จะได้

$$n_0 = (1.96^2 \times 0.50 \times 0.50) / 0.08^2$$

$$n_0 = 150.06$$

ดังนั้น ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำที่เหมาะสมคือประมาณ 150 ตัวอย่าง งานวิจัยนี้เก็บแบบสอบถามที่สมบูรณ์ได้ 158 ชุด ซึ่งสูงกว่าขนาดตัวอย่างขั้นต่ำที่คำนวณได้ จึงถือว่าเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์เชิงพรรณนา การเปรียบเทียบแนวโน้มความคิดเห็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และการสังเคราะห์เพื่อพัฒนา CWMAP

2) การคัดเลือกพื้นที่นำร่อง

พื้นที่นำร่องถูกคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Case Selection) โดยใช้เกณฑ์ความเหมาะสมเชิงสารสนเทศ (Information-rich case) มากกว่าการสุ่มเพื่อเป็นตัวแทนเชิงสถิติ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของพื้นที่นำร่องคือการตรวจวัดปริมาณและองค์ประกอบของขยะจริงในบริบทโครการก่อสร้างขนาดเล็ก

เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่นำร่องประกอบด้วย เป็นโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัยขนาดเล็ก, ดำเนินงานโดยผู้รับเหมา SMEs, มีข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บวัสดุและขยะ, มีการเกิดขยะจากกิจกรรมก่อสร้างจริงในช่วงเก็บข้อมูล, ผู้รับเหมายินยอมให้เข้าตรวจวัด คัดแยก ชั่งน้ำหนัก และสังเกตการณ์กระบวนการจัดการขยะ

3) การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญเพื่อประเมิน CWMAP

ผู้เชี่ยวชาญสำหรับการตรวจสอบ CWMAP ถูกคัดเลือกด้วยวิธี Purposive Sampling เนื่องจากต้องการผู้ให้ข้อมูลที่มีความรู้ ประสบการณ์ และบทบาทโดยตรงต่อการจัดการขยะก่อสร้าง

จำนวนผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านถือว่าเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบเชิงคุณภาพและการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาในขั้นพัฒนา CWMAP เนื่องจากเป้าหมาย ของขั้นตอนนี้คือการตรวจสอบความเหมาะสม ขององค์ประกอบใน CWMAP และรับข้อเสนอแนะเชิงลึก ไม่ใช่การทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติ

ดัชนีความสอดคล้องของข้อประเมินสามารถคำนวณด้วยสูตร IOC ดังนี้

$$IOC = \Sigma R / N$$

โดยที่

IOC = ค่าดัชนีความสอดคล้อง

R = คะแนนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญต่อแต่ละข้อ โดยกำหนด +1 หมายถึงสอดคล้อง, 0 หมายถึงไม่แน่ใจ,

และ −1 หมายถึงไม่สอดคล้อง

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด

เกณฑ์การพิจารณาคือ ข้อประเมินที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไปถือว่ามีความสอดคล้องในระดับยอมรับได้ ส่วนข้อที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ต้องนำไปปรับปรุง หรือตัดออกตามข้อเสนอแนะ ของผู้เชี่ยวชาญ

3.2.2 การเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถาม (Quantitative Data via Questionnaire) — ส่วนนี้มุ่งประเมินทัศนคติ พฤติกรรม และวิเคราะห์อิทธิพลเชิงโครงสร้างของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อการเกิดขยะก่อสร้าง โดยกลุ่มเป้าหมายคือบุคลากรที่เกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้าง ใช้วิธีสุ่มแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) กำหนดขนาดตัวอย่างเป้าหมาย ที่ 150 ตัวอย่าง ซึ่งเก็บแบบสอบถามที่สมบูรณ์ได้จริง 158 ชุด เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถาม ที่ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) ด้วยดัชนีความสอดคล้อง IOC (Index of Item-Objective Congruence) โดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ใช้มาตรวัดประเมินค่า 5 ระดับ (5-point Likert Scale) ตั้งแต่ 5 (ปฏิบัติจริง/เห็นด้วยมากที่สุด) ถึง 1 (ปฏิบัติจริง/เห็นด้วยน้อยที่สุด) จากนั้นวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) และตรวจสอบความเชื่อมั่นของมาตรวัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's α) สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลเชิงสาเหตุของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ประกอบการสังเคราะห์ CWMAP

3.2.3 การเก็บข้อมูลและวัดปริมาณขยะจากพื้นที่นำร่อง (Empirical Data from Pilot Site) — ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ศึกษาหน้างานจริงเพื่อเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ด้านปริมาณและลักษณะทางกายภาพของขยะ โดยคัดเลือกโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัยขนาดเล็กและขนาดกลาง (เช่น บ้านเดี่ยว ทาวน์เฮาส์) ที่ดูแลโดยผู้รับเหมากลุ่ม SMEs ในประเทศไทย จำนวน 1 โครงการ ในจังหวัดนครราชสีมา เป็นโครงการบ้านเดี่ยว 1 ชั้น จำนวน 6 หลัง มีระยะเวลาการเก็บข้อมูล 2 เดือน ซึ่งเป็นข้อจำกัดของงานวิจัย วิธีเก็บข้อมูลประกอบด้วย (ก) การวัดและประเมินปริมาณขยะ (Waste Quantification) โดยคัดแยกขยะที่เกิดขึ้นจริงและประเมินด้วยการชั่งน้ำหนักหรือวัดปริมาตร เพื่อคำนวณสัดส่วนร้อยละของขยะเชิงโครงสร้างเทียบกับขยะบรรจุภัณฑ์ (ข) การแปลงหน่วยมาตรฐาน (Volume-to-Weight Conversion) สำหรับขยะที่ชั่งน้ำหนักโดยตรงไม่ได้ และ (ค) การสังเกตการณ์พฤติกรรมหน้างาน (Participant Observation) เพื่อบันทึกข้อจำกัดทางกายภาพ

3.3 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อจัดทำ CWMAP (Data Triangulation and CWMAP Synthesis)

ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาบูรณาการแบบสามเส้าเชิงวิธีวิทยา (Methodological Triangulation) [15] โดยผู้วิจัยนำผลสถิติเชิงพรรณนาจากแบบสอบถามและค่าอิทธิพลของบุคลากรผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย มาประกอบกับข้อมูลเชิงกายภาพด้านสัดส่วนปริมาณขยะจากพื้นที่นำร่อง และฐานทฤษฎีจากวรรณกรรม แล้วสังเคราะห์ยกระดับขึ้นเป็น "CWMAP" ที่มีความจำเพาะต่อการจัดการขยะในพื้นที่จำกัด และบูรณาการแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนรวมถึงกลยุทธ์เข้าไปในกระบวนการทำงานของ SMEs

3.4 การตรวจสอบและรับรอง CWMAP (Construction Waste Management Action Plan Validation)

ผู้วิจัยใช้การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญและการสนทนากลุ่ม (Expert Review and Focus Group Discussion)แทนการสำรวจความเห็นแบบวงกว้าง โดยใช้การเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) คัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิ 5 ท่าน ประกอบด้วยนักวิชาการด้านสิ่งแวดล้อม/วิศวกรรม สถาปนิกผู้ออกแบบ ผู้บริหารโครงการ และตัวแทนผู้รับเหมา SMEs กระบวนการตรวจสอบประกอบด้วยการนำเสนอร่าง CWMAP ต่อผู้เชี่ยวชาญ

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการพัฒนา CWMAP (Data Analysis and Construction Waste Management Action Plan Development)

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติจากแบบสอบถาม (Quantitative Data Analysis)

แบบสอบถามได้รับการตอบกลับที่สมบูรณ์จำนวน 158 ชุด ผู้ตอบส่วนใหญ่เป็นผู้มีประสบการณ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมากกว่า 15 ปี (ร้อยละ 49.4) และเกี่ยวข้องกับโครงการมูลค่าสูง ครอบคลุมบทบาทหลักตลอดห่วงโซ่การก่อสร้าง โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ภาครัฐที่กำกับงานก่อสร้าง (ร้อยละ 30.4) และผู้รับเหมาก่อสร้าง (ร้อยละ 26.6) ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้มาตรวัดทุกด้านมีค่าความเชื่อมั่นในเกณฑ์ดีถึงดีมาก (Cronbach's α = 0.79–0.97)

ตารางที่ 1 โปรไฟล์ผู้ตอบแบบสอบถามจำแนกตามบทบาท (n = 158)

บทบาทของผู้ตอบแบบสอบถาม	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
เจ้าหน้าที่ภาครัฐที่กำกับงานก่อสร้าง	48	30.4
ผู้รับเหมาก่อสร้าง	42	26.6
เจ้าของโครงการภาคเอกชน	25	15.8
เจ้าของโครงการภาครัฐ	13	8.2
บริษัทที่ปรึกษา	10	6.3
อื่นๆ (ผู้ออกแบบ, ผู้ผลิตวัสดุ, บุคคลทั่วไป ฯลฯ)	20	12.7

ในภาพรวม ค่าเฉลี่ยความคิดเห็นและการ ปฏิบัติทั้ง 7 ด้านอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}$ = 3.87, S.D. = 1.10) เมื่อจำแนกรายด้าน (ตารางที่ 2) ปรากฏรูปแบบที่มีนัยสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ กล่าวคือ ผู้ตอบให้คะแนน "การควบคุมการปฏิบัติงานก่อสร้าง" สูงสุด ($\bar{X}$ = 4.22) และ "ปัจจัยผู้ว่าจ้าง" สูง ($\bar{X}$ = 4.03) สะท้อนว่ากลุ่มตัวอย่างตระหนักและให้ความสำคัญกับการควบคุมวัสดุระหว่างปฏิบัติงาน และบทบาทของบุคลากรต้นน้ำ ในทางตรงกันข้าม "การจัดการขยะหน้างาน" กลับได้คะแนนต่ำสุด ($\bar{X}$ = 3.37)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความเชื่อมั่นรายด้าน (มาตรวัด 5 ระดับ)

องค์ประกอบ (ด้าน)	จำนวนข้อ	$\bar{X}$	S.D.	α
ด้านการจัดหาวัสดุ	6	3.91	1.08	0.79
ด้านการปฏิบัติงานก่อสร้าง	5	4.22	0.88	0.92
ด้านการจัดการขยะหน้างาน	6	3.37	1.31	0.90
ปัจจัยผู้บริหารผู้รับเหมา	12	3.89	1.06	0.94
ปัจจัยผู้ว่าจ้าง	8	4.03	1.08	0.94
ปัจจัยผู้กำกับภาครัฐ	10	3.80	1.17	0.97
อุปสรรคและทัศนคติ	11	3.89	0.96	0.84
ภาพรวม (ทั้ง 7 ด้าน)	58	3.87	1.10	—

เมื่อพิจารณารายข้อ ข้อที่ได้คะแนนสูงสุดล้วนเป็นการควบคุมเชิงปฏิบัติ ได้แก่ การควบคุมการ ทำงานไม่ให้เกิดความเสียหายต่องานที่เสร็จแล้ว ($\bar{X}$ = 4.39) การควบคุมการเก็บรักษาวัสดุ ($\bar{X}$ = 4.29) และการควบคุมสต็อกวัสดุ ($\bar{X}$ = 4.25) ในทางกลับกัน ข้อที่ได้คะแนนต่ำสุดสะท้อน "ช่องว่างเชิงระบบ" ของ SMEs อย่างชัดเจน ได้แก่ การบันทึกปริมาณขยะอย่างละเอียด ($\bar{X}$ = 2.75) การใช้เครื่องมือช่วยจัดการขยะ เช่น เครื่องอัดขยะ ($\bar{X}$ = 2.78) และการตรวจสอบและประเมินผลการจัดการขยะอย่างสม่ำเสมอ ($\bar{X}$ = 3.20) ข้อค้นพบนี้ยืนยันว่าปัญหาไม่ได้เกิดจากการละเลยการควบคุมงาน แต่เกิดจากการขาดโครงสร้าง เครื่องมือ และระบบบันทึก/ติดตามการจัดการขยะอย่างเป็นระบบ

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงประจักษ์จากพื้นที่นำร่อง (Empirical Data from Pilot Site)

ผู้วิจัยลงพื้นที่ปฏิบัติการจริงเพื่อรวบรวม คัดแยก และชั่งน้ำหนักปริมาณขยะก่อสร้างที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด พบปริมาณมวลรวมสะสมทั้งสิ้น 5,755 กิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบของของเสีย (Waste Composition) ได้ผลตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบและสัดส่วนของขยะก่อสร้างจากพื้นที่นำร่อง

ประเภทวัสดุ	ปริมาณ (กก.)	สัดส่วน (ร้อยละ)
วัสดุประเภทหนัก (คอนกรีต ปูนทราย อิฐ หิน)	4,126	71.7
เศษไม้ (ไม้แบบ ไม้โครง)	919	16.0
วัสดุกรุผิว	370	6.4
พลาสติก	214	3.7
เศษเหล็ก	120	2.1
ขยะอันตราย	6	0.1
รวม	5,755	100.0

ข้อมูลเชิงประจักษ์นี้ชี้ให้เห็นวิกฤตที่แท้จริงของกลุ่ม SMEs ว่า ภาระหลักในการจัดการขยะไม่ได้มาจากเศษบรรจุภัณฑ์ชิ้นเล็ก ๆ แต่เกิดจากขยะประเภทโครงสร้างหนักและไม้ ซึ่งรวมกันกว่าร้อยละ 87.7 ของปริมาณทั้งหมด วัสดุเหล่านี้กินพื้นที่สัญจรหน้างาน มีน้ำหนักมาก และทำให้สูญเสียต้นทุนในการขนย้ายและกำจัดทิ้งอย่างมหาศาล

นอกจากนี้ ข้อค้นพบจากพื้นที่นำร่องยังสอดคล้องกับข้อมูลแบบสอบถาม ซึ่งระบุว่าวัสดุประเภทโครงสร้างเป็นขยะที่พบเกือบทุกไซต์งาน ได้แก่ เศษคอนกรีต/อิฐ/หิน (ร้อยละ 97.2 ของผู้ตอบ) และเศษไม้ (ร้อยละ 97.2) ขณะที่ของเสียอันตรายพบในสัดส่วนผู้ตอบที่น้อยกว่า (ร้อยละ 81.6) และมีปริมาณเชิงมวลเพียงร้อยละ 0.1 ในพื้นที่นำร่อง การยืนยันข้ามแหล่งข้อมูล (Cross-validation) นี้เพิ่มความเชื่อมั่นว่าภาระหลักของ SMEs คือวัสดุโครงสร้างหนักและไม้

4.3 การสังเคราะห์ข้อมูลแบบสามเส้าเพื่อพัฒนา CWMAP

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การตรวจสอบข้อมูลแบบสามเส้า (Data Triangulation) [15] เพื่อยก ระดับความน่าเชื่อถือของ CWMAP โดยประมวลหลักฐานเชิงประจักษ์จาก 3 แหล่งที่ส่งเสริมซึ่งกันและกัน ได้แก่

(1) การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

(2) ข้อมูลสำรวจเชิงปริมาณจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และ

(3) ข้อมูลการสังเกตการณ์และวัดผลเชิงประจักษ์จากพื้นที่นำร่อง การบูรณาการแหล่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันนี้ทำให้เกิดการตรวจสอบข้ามแหล่งข้อมูล (Cross-validation) และลดความเสี่ยงจากความลำเอียง (Bias) ที่อาจเกิดจากการพึ่งพาแหล่งเดียว

ผลจากการบูรณาการข้อมูลทั้ง 3 มิติ พบจุดตัดของปัญหาเชิงกลยุทธ์ (Strategic Gap) ที่ชัดเจน กล่าวคือ ทฤษฎีระดับสากลมักเน้นการใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรราคาแพงในการจัดการขยะหนัก แต่ข้อมูลเชิงสถิติชี้ว่าจุดอ่อนที่แท้จริงอยู่ที่การจัดการขยะอย่างเป็นระบบ (ด้านการจัดการขยะหน้างานได้คะแนนต่ำสุด $\bar{X}$ = 3.37 และการบันทึกปริมาณขยะ $\bar{X}$ = 2.75) ภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณและพื้นที่ของผู้ประกอบการไทย ขณะที่ข้อมูลจากพื้นที่นำร่องยืนยันว่าขยะกว่าร้อยละ 71.7 เป็นวัสดุหนัก ดังนั้น การแก้ปัญหาจึงต้องมุ่งลดการเกิดเศษวัสดุหนัก และสร้างกระบวนการหมุนเวียนเศษคอนกรีตและไม้กลับมาใช้ในหน้างานให้คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

4.4 **แผนปฏิบัติการการจัดการขยะ** (Construction Waste Management Action Plan)

จากการสังเคราะห์ข้อมูลแบบสามเส้า ผู้วิจัยได้พัฒนาแนวคิดให้อยู่ในรูปแบบของ แผนปฏิบัติการการจัดการขยะ (CWMAP)ที่บูรณาการหลักการ 3R (Reduce, Reuse, Recycle) เข้ากับเป้าหมายการสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดสำหรับกลุ่ม SMEs โดยเปลี่ยนภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะให้เป็นโอกาสในการลดต้นทุนและสร้างรายได้ แผนปฏิบัติการนี้ถูกออกแบบให้มีขั้นตอนการจัดการจำเพาะตามประเภทขยะ เรียงลำดับความสำคัญจากหมวดที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดไปหาต่ำสุด พร้อมกำหนดผู้รับผิดชอบในทุกระดับตั้งแต่ เจ้าของโครงการ วิศวกร โฟร์แมน และคนงาน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4: แผนปฏิบัติการการจัดการขยะก่อสร้างสำหรับโครงการขนาดเล็ก (Construction Waste Management Action Plan)

ลำดับ	วัตถุประสงค์และเป้าหมาย	ประเภทวัสดุ / หลัก 3R	วิธีดำเนินการ / ขั้นตอนปฏิบัติ	ระยะเวลาดำเนินการ	ผู้รับผิดชอบหลัก	ต้นทุนดำเนินการและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ	Baseline	KPI (Target)	วิธีเก็บข้อมูล / ประเมินผล	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง (Expected Outcome)	ลำดับความสำคัญ
1	ลดต้นทุนการกำจัดและลดปริมาณขยะฝังกลบ	เศษคอนกรีต อิฐ หิน ปูนทราย (Reduce, Reuse)	ตรวจสอบแบบ ก่อนก่อสร้าง และนำเศษคอนกรีตที่ยังมีคุณภาพมาบดใช้เป็นวัสดุรองพื้นหรือถนนชั่วคราวในที่ โดยไม่ทิ้งรวมพักไว้	ตลอดช่วงงานโครงสร้าง	วิศวกรโครงการ, โฟร์แมน, คนงาน	ต้นทุนดำเนินการ 0 บาท ลดค่าขนส่งและค่าฝังกลบ ลดต้นทุนซื้อดินถม	เศษคอนกรีตส่วนใหญ่ถูกนำไปกำจัด	• นำเศษคอนกรีตกลับมาใช้ ≥95% • ลดขยะฝังกลบ≥80%	ใบรายงานปริมาณวัสดุ, ภาพถ่ายหน้างาน, Site Audit รายสัปดาห์	ลดต้นทุนค่ากำจัด เพิ่มอัตรากการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน	High
2	เพิ่มรายได้จากของเสียและสร้างแรงจูงใจแรงงาน	เศษเหล็ก (Reuse, Recycle)	คัดแยกเหล็กที่สามารถนำกลับมาใช้ และจำหน่ายเศษเหล็กที่เหลือ จัดพื้นที่กองทุนสวัสดิการแรงงานจากรายได้	ทุกวันหลังเลิกงาน	โฟร์แมน, คนงาน	รายได้จากการจำหน่ายเศษเหล็กเข้ากองทุนสวัสดิการแรงงาน	ยังไม่มีระบบคัดแยกที่เป็นมาตรฐาน	• นำเหล็กกลับมาใช้ ≥20% • รายได้จากเศษเหล็กเพิ่มขึ้นทุกเดือน	ใบชั่งน้ำหนัก, ใบเสร็จรับเงิน, สมุดบัญชีรายรับ	ลดต้นทุนวัสดุและสร้างแรงจูงใจให้แรงงาน	High
3	ลดต้นทุนการจัดซื้อวัสดุใหม่	ไม้แบบและเศษไม้ (Reuse, Upcycle)	ถอดแบบอย่างระมัดระวัง ทำความสะอาด ซ่อมแซม และนำเศษไม้ไปทำค้ำยันหรือองค์ประกอบตั้งคราว	งานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม	วิศวกร, โฟร์แมน, คนงาน	ต้นทุนดำเนินการ 0 บาท ลดการซื้อไม้ใหม่	อายุการใช้งานไม้แบบไม่ถูกคิดคาม	• ใช้ไม้แบบเฉลี่ย ≥5 รอบ • ลดการซื้อไม้ใหม่ ≥20%	บันทึกการใช้งานไม้, Inventory วัสดุ, ใบจัดซื้อ	ลดต้นทุนวัสดุและลดการเกิดขยะไม้	High
4	ลดปริมาณบรรจุภัณฑ์และเพิ่มอัตรารีไซเคิล	พลาสติกและบรรจุภัณฑ์ (Reduce, Recycle)	ทำข้อตกลงรับคืนพาเลทและบรรจุภัณฑ์จากผู้จำหน่าย คัดแยกพลาสติกสะอาดเพื่อจำหน่ายรีไซเคิล	ตลอดการส่งมอบวัสดุ	วิศวกร, โฟร์แมน, คนงาน	ต้นทุนดำเนินการ 0 บาท ลดพื้นที่ทิ้งขยะ เพิ่มรายได้จากรีไซเคิล	ไม่มีระบบรับคืนบรรจุภัณฑ์	• ส่งคืนบรรจุภัณฑ์ ≥70% • รีไซเคิลพลาสติก ≥90%	บันทึกรับ-ส่งวัสดุ, ใบรับซื้อวัสดุรีไซเคิล	ลดปริมาณขยะและเพิ่ม Recycling Rate	Medium
5	ลดการสูญเสียวัสดุตกแต่ง	กระเบื้อง สี และวัสดุตกแต่ง (Reduce)	ใช้ระบบ Just-in-Time จัดซื้อเท่าที่จำเป็น จัดเก็บในพื้นที่ป้องกันแดด ฝน และความชื้น	งานสถาปัตยกรรมและตกแต่ง	วิศวกร, โฟร์แมน, คนงาน	ต้นทุนดำเนินการ 0 บาท ลดการสูญเสียจากวัสดุเสียหาย	มีการสูญเสียวัสดุจากการเก็บรักษา	• Material Loss ≤3% • ลดการสั่งซื้อเกิน ≥15%	Inventory วัสดุ, ใบจัดซื้อ, Site Inspection	ลดต้นทุนวัสดุและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุ	Medium
6	ลดความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมและการปฏิบัติตามกฎหมาย	ขยะอันตราย (Reduce)	แยกเก็บในภาชนะเฉพาะ ติดฉลาก จัดเก็บในพื้นที่ปลอดภัย และส่งกำจัดโดยผู้รับอนุญาต	ตลอดระยะเวลาโครงการ	วิศวกร, โฟร์แมน, คนงาน	มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดตามกฎหมาย แต่ลดความเสี่ยงด่างปรับและอุบัติเหตุ	ยังไม่มีระบบควบคุมที่เป็นมาตรฐาน	• อุบัติเหตุจากขยะอันตราย = 0 ครั้ง • ขยะอันตรายส่งกำจัดถูกต้อง 100%	Waste Manifest, Site Audit, รายงานการตรวจสอบ	ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมและเป็นไปตามข้อกำหนดกฎหมาย	High

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแผนปฏิบัติการการจัดการขยะ (Construction Waste Management Action Plan)เพื่อยกระดับการจัดการขยะก่อสร้างสำหรับกลุ่ม SMEs จากข้อค้นพบเชิงประจักษ์ที่ยืนยันว่าวิกฤตหน้างานเกิดจาก "ขยะประเภทโครงสร้างหนัก" ซึ่งมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 71.7 ไม่ใช่เพียงเศษบรรจุภัณฑ์ งานวิจัยจึงได้ลดช่องว่างด้วยการออกแบบแผนปฏิบัติการที่บูรณาการหลัก 3R เข้ากับยุทธศาสตร์การสร้างมูลค่าเพิ่ม (Valorization) เพื่อเปลี่ยนภาระค่ากำจัดขยะให้เป็นโอกาสในการลดต้นทุนและสร้างรายได้ กุญแจสำคัญของแนวคิดนี้คือ "กลไกจูงใจทางเศรษฐศาสตร์" ผ่านการแปลงรายได้เป็นกองทุนสวัสดิการแรงงาน จะพบว่าแผนปฏิบัติการนี้สร้างมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่จูงใจได้จริงผ่าน 3 ส่วนหลัก ได้แก่:

1. รายได้ทางตรงจากการขายวัสดุรีไซเคิล (Direct Cash Return) จากข้อมูลเชิงประจักษ์ในพื้นที่นำร่อง พบเศษเหล็ก 120 กิโลกรัม และพลาสติก 214 กิโลกรัม เมื่อประเมินมูลค่าตามราคาตลาดรับซื้อของเก่าเฉลี่ย (เศษเหล็กประมาณ 10-12 บาท/กก. และพลาสติกใส/บรรจุภัณฑ์ประมาณ 5-8 บาท/กก.) จะสร้างรายได้ทางตรงประมาณ 2,000 - 2,500 บาทต่อโครงการ เงินจำนวนนี้เพียงพอสำหรับการจัดตั้ง "กองทุนสวัสดิการแรงงาน" เพื่อนำไปซื้อเครื่องดื่ม น้ำดื่ม หรือจัดเลี้ยงสังสรรค์รายเดือน ซึ่งเป็นกลไกเชิงจิตวิทยาที่สร้างแรงจูงใจ (Incentive) ให้แรงงานหน้าไซต์งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การลดต้นทุนแฝงจากการประหยัดค่ากำจัดขยะ (Disposal Cost Savings) ความคุ้มค่าที่แท้จริงของผู้ประกอบการอยู่ที่การลดต้นทุนแฝง ข้อมูลเชิงประจักษ์ยืนยันว่าขยะที่มีสัดส่วนสูงสุดคือวัสดุประเภทโครงสร้างหนัก (คอนกรีต ปูนทราย อิฐ หิน) ซึ่งมีปริมาณมากถึง 4,126 กิโลกรัม หรือกว่า 4.1 ตัน (ร้อยละ 71.7) หากต้องจ้างรถบรรทุกขนทิ้ง จะมีต้นทุนค่าขนส่งและค่าธรรมเนียมบ่อขยะเฉลี่ย 1,000 - 1,500 บาทต่อคันรถ (ปริมาณ 1.5 - 2 ตัน/คัน) การนำเศษคอนกรีต 4.1 ตัน มาทุบย่อยและถมปรับระดับพื้นที่หน้างานทันที จะช่วยประหยัดค่าขนทิ้งได้ประมาณ 2,500 - 4,000 บาทต่อโครงการ รวมทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อดินมาถมเพิ่มอีกด้วย

3. การขยายผลเชิงเศรษฐศาสตร์ในมุมมองของ SMEs (Economies of Scale) เมื่อนำรายได้ทางตรงและการลดต้นทุนแฝงมารวมกัน แผนปฏิบัติการนี้จะสร้างมูลค่าผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ (Economic Value Added) รวมประมาณ 4,500 - 6,500 บาท ต่อการสร้างบ้าน 1 หลัง ในมุมมองของผู้ประกอบการ SMEs ที่มีการรับเหมาสร้างบ้านหลายหลังต่อปี (เช่น 5-10 โครงการต่อปี) มูลค่าผลประโยชน์สะสมรวมจะสูงถึง 22,500 - 65,000 บาทต่อปี ซึ่งช่วยเชื่อมโยงความร่วมมือตั้งแต่บุคลากรต้นน้ำในการออกแบบและจัดซื้อเชิงป้องกัน (Reduce) ไปจนถึงการหมุนเวียนวัสดุหน้างานโดยโฟร์แมนและคนงาน (Reuse/Recycle) ท้ายที่สุด งานวิจัยนี้ได้ให้คุณูปการสำคัญว่า การขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ในระดับฐานราก ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีอัจฉริยะที่มีต้นทุนสูงแต่นำเสนอแนวทางที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงผ่านแผนปฏิบัติการที่ออกแบบมาอย่างจำเพาะ (Tailor-made) สอดคล้องกับข้อจำกัดด้านพื้นที่ และใช้ผลตอบแทนทางการเงินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งแผนปฏิบัตินี้สามารถใช้เป็นกรอบแนวทางเบื้องต้น เพื่อนำไปทดสอบ

ดำเนินการและติดตามผลสัมฤทธิ์ตามเป้าหมายที่วางไว้ในระยะยาวต่อไป

เอกสารอ้างอิง (References)

[1] กรมควบคุมมลพิษ และสำนักงานความร่วมมือทางวิชาการของเยอรมัน (GTZ). (2548). “แนวทางปฏิบัติในการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน (Version 1) พ.ศ. 2548.” 19 ตุลาคม.

[2] สุชา กิตติวรารัตน์ และภูษิต เลิศวัฒนารักษ์. (2555). “การจัดการเพื่อลดเศษวัสดุก่อสร้างในงานสถาปัตยกรรมของบ้านพักอาศัยขนาดเล็ก.” Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS) 9, 2: 81-94.

[3] บุณยนุช ขันโบราณ. (2568). “กลยุทธ์การจัดการของเสียเชิงนวัตกรรมในโครงการก่อสร้างอาคารเพื่อการประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุอัพไซเคิล.” วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรกฎาคม.

[4] Wu, Zezhou, Tianjia Pei, Zhikang Bao, S. Thomas Ng, Guoyang Lu, and Ke Chen. (2024). “Utilizing intelligent technologies in construction and demolition waste management: From a systematic review to an implementation framework.” Frontiers of Engineering Management 12, 1 (March): 5-7.

[5] Swarnakar, V., and M. Khalfan. (2024). “An analysis of circular economy adaptation in construction and demolition waste management sector: a systematic literature review and conceptual implementation framework.” Smart and Sustainable Built Environment 16 (October): 2.

[6] Zhang, Chunbo, Mingming Hu, Francesco Di Maio, Benjamin Sprecher, Xining Yang, and Arnold Tukker. (2022). “An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe.” Science of the Total Environment 803: 4-11.

[7] วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์ และสุรพันธ์ สันติยานนท์. (2565). “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดขยะก่อสร้างในโครงการก่อสร้างอาคาร: แนวทางการวิเคราะห์เส้นทาง.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ 3rd International Conference on Humanities and Social Sciences จัดโดยมหาวิทยาลัยศรีปทุม, 404-414.

[8] Ou, Yifu, Amos Darko, Alessandro Manzardo, Luca Mora, and Zhikang Bao. (2026). “An analytical framework of quantifying carbon emission impacts of construction and demolition waste circularity and trading: A case study of the UK.” Environmental Impact Assessment Review 118: 108343.

[9] Liu, Z., T. Wu, F. Wang, M. Osmani, and P. Demian. (2022). “Blockchain enhanced construction waste information management framework.” Sustainability 14: 12145.

[10] Awino, F. B., and S. E. Apitz. (2024). “Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review.” Integrated Environmental Assessment and Management 20, 1: 9-35.

[11] Wu, Z., T. Pei, Z. Bao, S. T. Ng, G. Lu, and K. Chen. (2025). “Smart technologies in construction and demolition waste management: A bibliometric review and implementation framework.” Frontiers of Engineering Management 12, 1: 1-23.

[12] Nadazdi, A., Z. Naunovic, and N. Ivanisevic. (2022). “Circular economy in construction and demolition waste management: A Western Balkans study.” Sustainability 14: 871.

[13] ชญานิษฐ์ วิทยาภิรมย์, นรารัชต์พร นวลสวรรค์ และชาติ เจียมไชยศรี. (2568). “การประเมินอัตราการเกิดของเสียจากกิจกรรมในงานก่อสร้างอาคารสูงสำหรับการบรรลุเป้าหมายการก่อสร้างที่ยั่งยืน.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (เมษายน): 6.

[14] วิมลมาศ บุญยั่งยืน และชลลดา เลาะฟอ. (2563). “ศึกษาการจัดการของเสียในสถานที่ก่อสร้างอย่างยั่งยืน.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 จัดโดย จังหวัดชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม.

[15] Denzin, N. K. (1978). The research act: A theoretical introduction to sociological methods. McGraw-Hill.

การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงพื้นที่ภายในอาคารเทศบาลสูงเนิน เพื่อจัดแสดงผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการค้าและการท่องเที่ยวด้วยภูมิปัญญาพื้นถิ่น

Developing Guidelines for Renovating the Interior of the Sung Noen Municipal Building to Showcase Products and Promote Trade and Tourism Based on Local Wisdom

ปริญญา เชิดเกียรติพล

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่อยู่ 340 ถ.สุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
ผู้ติดต่อ : 1976Parinya@gmail.com, 0896265402

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงพื้นที่ภายในอาคารสำนักงานเทศบาลสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา ให้มีความน่าสนใจและช่วยกระตุ้นการค้าผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นอย่าง “ผ้าเงี่ยงนางดำ” โดยใช้กระบวนการวิจัยเชิงสร้างสรรค์ร่วมกับการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม และการวิจัยเชิงคุณภาพ ผ่านการเก็บข้อมูลความต้องการจากกลุ่มชาวบ้านผู้ทอผ้าจำนวน 15 คน และเจ้าหน้าที่ภาครัฐจำนวน 5 คน ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันพบว่า พื้นที่จัดแสดง ส่วนจำหน่าย และส่วนจัดเก็บผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำถูกจัดรวมกันในพื้นที่ขนาด 24 ตารางเมตร ซึ่งยังไม่ส่งเสริมศักยภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านบรรยากาศและการจัดสรรพื้นที่ใช้สอย ผู้วิจัยจึงได้สังเคราะห์ข้อมูลนำไปสู่แนวทางการออกแบบสถาปัตยกรรมภายในและผังพื้นที่ใช้สอยใหม่ โดยแยกพื้นที่ใช้งานออกเป็น 3 ส่วนอย่างเป็นสัดส่วน ได้แก่ พื้นที่ส่วนขาย พื้นที่จัดเก็บผลิตภัณฑ์ และพื้นที่หยุดพักคอยสำหรับนักท่องเที่ยว ผลลัพธ์เชิงประจักษ์จากการดำเนินโครงการแบ่งออกเป็น 4 มิติสำคัญ ได้แก่ 1) การยกระดับมูลค่าเชิงพาณิชย์และศักยภาพของผลิตภัณฑ์วัฒนธรรมด้วยการใช้สภาพแวดล้อมทางกายภาพขับเน้นอัตลักษณ์สินค้า 2)การส่งเสริมเศรษฐกิจสร้างสรรค์และการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในเขตอุทยานธรณีโคราช 3) ความยั่งยืนของภูมิปัญญาพื้นถิ่นผ่านกลไกความร่วมมือแบบมีส่วนร่วมที่สร้างความภาคภูมิใจในรากเหง้า และ 4)ผลกระทบเชิงวิชาการที่สามารถถอดรหัสกระบวนการออกแบบไปสู่การบริการวิชาการรับใช้สังคมในชุมชนอื่นที่มีบริบทคล้ายคลึงกัน โดยการออกแบบปรับปรุงสถาปัตยกรรมภายในสามารถขยายผลผ่าน 4 แนวทางเชิงวิธีวิทยา ประกอบด้วย 1) การพัฒนากรอบทฤษฎีสีการเลือกคู่สีเพื่อการจัดแสดงผลิตภัณฑ์วัฒนธรรมโดยใช้ผนังโทนสีหม่นเพื่อขับเน้นความสดใสของผ้าทอ 2) การพัฒนาแบบจำลองพื้นที่อเนกประสงค์ลูกผสม ที่ผสานการขายสินค้าหลักเข้ากับกิจกรรมเสริมเพื่อสร้างรายได้หมุนเวียนประจำวัน 3) การออกแบบรายละเอียดมาตรฐานสถาปัตยกรรมพึ่งตนเองต้นทุนต่ำในระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป ที่พึ่งพาวัสดุราคาย่อมเยาเพื่อให้ช่างฝีมือในท้องถิ่นสามารถจัดสร้างและซ่อมแซมได้เอง และ4)การบูรณาการองค์ความรู้สู่แพลตฟอร์มการออกแบบแบบเปิด (Open-Source Design Platform) เพื่อเผยแพร่พิมพ์เขียวและเทคนิคการจัดวางผังพื้นที่ให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและวิสาหกิจชุมชนทั่วประเทศ อันเป็นการสร้างกลไกการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากและสืบสานภูมิปัญญาพื้นถิ่นอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: 1.ผ้าเงี่ยงนางดำ, 2.กระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมภาย, 3.การจัดสรรพื้นที่ใช้สอย, 4.ภูมิปัญญาพื้นถิ่น, 5.ผลิตภัณฑ์พื้นถิ่น

Abstract

This research aims to investigate guidelines for renovating the interior space of the Sung Noen Municipal Office Building in Nakhon Ratchasima Province, with the objective of enhancing its spatial appeal and stimulating the commerce of the local cultural product, "Ngiang Nang Dam" fabric. Utilizing a creative research methodology integrated with Participatory Action Research (PAR) and qualitative inquiry, data were collected from key stakeholders, including 15 local weavers and 5 municipal officials. The baseline analysis revealed that the existing exhibition, retail, and storage functions were consolidated within a constrained 24-square-meter area, which structurally undermined product potential due to a suboptimal interior atmosphere and inadequate spatial allocation. Consequently, the empirical data were synthesized into interior architectural design guidelines and a reconfigured functional layout that systematically segregates the space into three distinct zones: a retail area, a product storage area, and a tourist waiting lounge. The empirical outcomes of this project manifest in four crucial dimensions: 1) the elevation of commercial value and the potential of cultural products through physical environments designed to accentuate product identity; 2) the promotion of the creative economy and cultural tourism within the Khorat Geopark network; 3) the long-term sustainability of local wisdom facilitated by participatory mechanisms that foster community pride; and 4) academic impacts that decode the design methodology into community-engaged academic services for areas with analogous cultural contexts. Furthermore, the interior architectural interventions provide scalable methodological frameworks through four primary approaches: 1) the development of a conceptual color matrix for cultural displays, utilizing muted background tones to accentuate the vibrant hues of native textiles; 2) the formulation of a hybrid space model that synthesizes primary retail functions with daily micro-economic activities to ensure continuous revenue; 3) the engineering of low-cost, self-reliant vernacular architectural details via modular display systems that utilize affordable materials, empowering local craftsmen to execute construction and maintenance autonomously; and 4) the integration of acquired knowledge into an open-source design platform to disseminate blueprints and spatial configuration techniques to local government units and community enterprises nationwide, thereby establishing a sustainable mechanism for grassroots economic development and the preservation of local heritage.

Keywords: 1.Pha Ngiang Nang Dam, 2. Interior Architecture Design Process, 3.Functional Layout, 4.Local wisdom, 5. local products

1. บทนำ

เนื่องจากเทศบาลตำบลสูงเนิน อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา มีผลิตภัณฑ์สิ่งทอพื้นถิ่นที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวและเป็นมรดกทางภูมิปัญญาที่สืบทอดมาจากบรรพบุรุษกลุ่มชาติพันธุ์ลาวผู้อพยพตั้งถิ่นฐานมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2442 คือ “ผ้าเงี่ยงนางดำ” ซึ่งในปัจจุบันกลุ่มทอผ้าสูงเนินได้นำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สร้างสรรค์ที่หลากหลาย อาทิ เครื่องแต่งกาย กระเป๋า และหมวก ทว่าพื้นที่จัดเก็บ จัดแสดง และจัดจำหน่ายในปัจจุบันกลับประสบข้อจำกัดด้านสถานที่ โดยยังคงใช้พื้นที่ร่วมกับห้องทำงานของเจ้าหน้าที่บริเวณชั้น 1 ของอาคารสำนักงานเทศบาลตำบลสูงเนิน ซึ่งมีลักษณะเป็นห้องขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 2.50 เมตร (รวมพื้นที่ใช้สอย 24 ตารางเมตร) ตั้งอยู่ติดกับพื้นที่จอดรถใต้อาคาร และมีทิศตะวันออกเชื่อมต่อกับทางเท้าและถนนสาธารณะ ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว จึงนำมาสู่โครงการวิจัยเชิงสร้างสรรค์และการปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม โดยความร่วมมือระหว่างกลุ่มทอผ้า องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และภาคเอกชน เพื่อศึกษาคุณค่าบริบทของพื้นที่และวิเคราะห์ประเด็นปัญหา อันจะนำไปสู่การกำหนดแนวทางและกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมภายในสำหรับการปรับปรุงพัฒนาพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งผลสัมฤทธิ์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยในครั้งนี้ คือผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมภายในที่ช่วยยกระดับคุณค่าผลิตภัณฑ์และสร้างอัตลักษณ์เชิงพื้นที่ เพื่อพัฒนาพื้นที่ดังกล่าวให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวและศูนย์รวมผลิตภัณฑ์ชุมชนควบคู่ไปกับจุดพักคอยที่สามารถสร้างโอกาสและรายได้ให้แก่ท้องถิ่นอย่างยั่งยืน อีกทั้งยังสามารถเชื่อมโยงกับแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ที่สำคัญในพื้นที่ เช่น วัดป่าภูผาสูง เมืองโบราณเสมา และปราสาทเมืองแขก ตลอดจนส่งเสริมภาพลักษณ์และการท่องเที่ยวในเขตอุทยานธรณีโคราช (Khorat Geopark) ได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณค่าบริบทของพื้นที่และวิเคราะห์ประเด็นปัญหาห้องชั้น 1 ชั้น 1 ของอาคารสำนักงานเทศบาล ตำบลสูงเนิน ซึ่งมีลักษณะเป็นห้องขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 2.50 เมตร (รวมพื้นที่ใช้สอย 24 ตารางเมตร) เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงสถาปัตยกรรมภายใน

2.2 เพื่อสร้างกระบวนการมีส่วนร่วมของภาคีเครือข่ายในการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมภายใน

2.3 เพื่อสรุปแนวทางการปรับปรุงพัฒนาและดำเนินการออกแบบพื้นที่ให้มีความเหมาะสมและน่าสนใจ

3. วิธีการวิจัย และระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การวิจัยมีวิธีดังนี้

3.1.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากผู้ใช้งานได้แก่ข้อมูลด้านความต้องการด้านพื้นที่ โดยรวบรวมข้อมูลจาก ชาวบ้านกลุ่มทอผ้าเงี่ยงนางดำ และจากคนในหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 ศึกษาสำรวจข้อมูลสภาพปัจจุบันเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ

3.1.3 การออกแบบปรับปรุงพื้นที่สถาปัตยกรรมภายใน

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

จัดทำขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูลแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

3.2.1 ข้อมูลจากปฐมภูมิจากการเข้าสำรวจข้อมูลจากการลงพื้นที่จริง

3.2.2 ข้อมูลด้านทุติยภูมิจากหนังสือ, เอกสาร, และรายงานวิชาการต่างๆ

3.3 การศึกษาวิจัย

3.3.2 การศึกษารวบรวมข้อมูลเบื้องต้นได้แก่ การศึกษาเนื้อหาเอกสารอ้างอิงบทความข้อเขียนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสถาปัตยกรรมภายใน การหาพื้นที่ใช้สอย ประวัติความเป็นมาผ้าเงี่ยงนางดำ และความเป็นมาอำเภอสูงเนิน เป็นต้น

3.3.3 การศึกษารวบรวมข้อมูลด้วยการลงพื้นที่สำรวจสภาพจริง

3.3.4 ดำเนินการออกแบบด้วยกระบวน การออกแบบจากการรวบรวมข้อมูลที่ได้สำรวจ ศึกษาและวิเคราะห์

3.3.5 นำงานออกแบบนำเสนอแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ชาวบ้านกลุ่มทอผ้าและผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำข้อเสนอแนะนำมาปรับปรุงแบบให้เหมาะสมกับความต้องการ

3.3.6 สรุปผลการวิจัยจากกระบวนการทั้งหมดเป็นแนวทางการออกแบบปรับปรุงพื้นที่ภายในที่ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำ

3.4 กลุ่มตัวอย่าง

3.4.2 ชาวบ้านกลุ่มทอผ้าเงี่ยงนางดำ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำนวน 15 คน

3.4.3 พื้นที่ศึกษาอาคารสำนักงานเทศบาลตำบลสูงเนิน

3.5 การดำเนินงานงานออกแบบตกแต่งส่วนจัดแสดงภายใน

3.5.1 ขั้นศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์โครงการ ขั้นตอนนี้คือการทำความเข้าใจ "อัตลักษณ์ของแบรนด์" และ "ธรรมชาติของตัวสินค้า" เพื่อกำหนดทิศทางการออกแบบ

3.5.2 การศึกษาเก็บข้อมูลพฤติกรรมผู้ใช้โครงการ (User Behavior)

3.5.3 วิเคราะห์สรุปพื้นที่ใช้สอย คำนวณปริมาณสินค้า (SKU) ที่ต้องจัดแสดง และสัดส่วนพื้นที่ระหว่าง ส่วนโชว์, ส่วนม้วนเก็บสต็อก, และส่วนบริการลูกค้า

3.5.4 การดำเนินการออกแบบภายใน

3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.6.1 ทฤษฎีด้านพื้นที่และวัฒนธรรม (Space & Cultural Identity Theories)

กลุ่มทฤษฎีนี้ใช้เพื่ออธิบายว่า "สเปซจะช่วยสืบสานและสะท้อนคุณค่าของผ้าเงี่ยงนางดำร" โดยทฤษฎีภูมิภาคนิยมวิพากษ์ (Critical Regionalism) เพื่อสร้างสเปซที่มีกลิ่นอายถิ่นกำเนิด (Sense of Place) แต่อินเตอร์และร่วมสมัยการนำกรอบนำลวดลาย "เงี่ยงนางดำ" หรือภูมิปัญญาการทอผ้าของสูงเนินมาลดทอนรูปทรง (Abstraction) ผนวกกับวัสดุสมัยใหม่ โดยสื่อถึงการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ไม่อยู่ในกระแสทุนนิยมจนไร้รากเหง้า (Kenneth Frampton) แต่ก็ไม่เชยหรือลอกเลียนแบบอดีตตรงๆ (International Style) จนไร้รากเหง้า แต่ก็ไม่เชยหรือลอกเลียนแบบอดีตตรงๆ (Vernacular Kitsch)

3.6.2 ทฤษฎีความผูกพันกับพื้นที่ (Place Attachment Theory)

การสร้างความรู้สึกผูกพัน อัตลักษณ์ร่วม และความภาคภูมิใจระหว่าง"คน"กับ"สถานที่"โดยกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน (Participatory Action Research - PAR) โดยการออกแบบพื้นที่ให้มีส่วนที่คนในชุมชนสูงเนิน โดยเฉพาะกลุ่มแม่บ้านช่างทอสามารถเข้ามาใช้งาน ร่วมนำเสนอไอเดีย หรือความภาคภูมิใจของวัฒนธรรมพื้นถิ่น (Community Pride Wall) เพื่อแสดงให้เห็นว่าพื้นที่นี้เป็นของพวกเขาไม่ใช่แค่ร้านค้าของนายทุนภายนอก

3.6.3 ทฤษฎีด้านประสบการณ์และการรับรู้ของผู้บริโภค (Experiential & Perception Theories)

กลุ่มทฤษฎีนี้ใช้เพื่อออกแบบ ทางสัญจรและบรรยากาศที่ส่งผลต่ออารมณ์ความรู้สึกของลูกค้า โดยทฤษฎีการตลาดเชิงประสบการณ์ของ Bernd Schmitt ที่เน้นการสร้างประสบการณ์ 5 ด้าน: *Sense* (ประสาทสัมผัส), Feel (ความรู้สึก), Think (ความคิด), Act (การกระทำ), และ Relate (ความสัมพันธ์) ทฤษฎีการประยุกต์ใช้ในการจัดโซนนิ่ง (Zoning) สิ่งแวดล้อม/บรรยากาศ (Stimulus: S) ส่งผลต่อสภาวะอารมณ์ภายในของบุคคล (Organism: O) และนำไปสู่พฤติกรรมการตอบสนอง (Response: R) ว่าจะสู้/อยู่ต่อ(Approach)หรือจะหนี

(Avoidance) (Environmental Psychology: Mehrabian Russell Model (S-O-R)) มีการควบคุมปัจจัยทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นของการจัดวางสินค้า (Density), อุณหภูมิ, และโทนสี (สีดำ/เทา/ครีม) ของผ้าเงี่ยงนางดำ เพื่อให้ลูกค้ารู้สึกผ่อนคลาย ส่งผลให้อยู่ในพื้นที่นานขึ้น และเพิ่มโอกาสในการตัดสินใจซื้อผ้าที่มีมูลค่าสูง

3.6.4. ทฤษฎีด้านการสื่อสารและการสร้างมูลค่า (Communication & Value Creation Theories)

กลุ่มทฤษฎีนี้ใช้เพื่อ เปลี่ยนผ้าทอให้กลายเป็นงานศิลปะและวัฒนธรรมที่มีมูลค่าสูง โดยหลักการ สัญวิทยาในงานสถาปัตยกรรม (Semiotics in Architecture) โดยการใช้พื้นที่ สเปซ หรือวัตถุเป็น "ตัวส่งสาร" (Signifier) เพื่อให้ผู้พบเห็นตีความถึงความหมายที่ซ่อนอยู่ (Signified) และการออกแบบแท่นจัดแสดง (Display Pedestal) หรือการแขวนผ้าทอให้ลอยตัวคล้ายงานประติมากรรมในพิพิธภัณฑ์ (Museum-like Display) สื่อสารเชิงสัญลักษณ์ให้ผู้ซื้อรับรู้ทันทีว่า ผ้าเงี่ยงนางดำชิ้นนี้ไม่ใช่ผ้าตัดเสื้อทั่วไป แต่เป็น "งาน

4.วิธีการดำเนินงาน

กระบวนการวิจัย (Methodology) ได้ดำเนินการตามหลักวิจัยเชิงคุณภาพและการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (PAR) บทคัดย่อในส่วนระเบียบวิธีวิจัยองค์ประกอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 กลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants)

- **กลุ่มชุมชน:** สมาชิกกลุ่มทอผ้าเทศบาลสูงเนิน จำนวน 15 คน
- **กลุ่มภาครัฐและผู้บริหารพื้นที่:** เจ้าหน้าที่และผู้บริหารเทศบาลตำบลสูงเนิน จำนวน 5 คน

4.2 เครื่องมือและวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล (Research Instruments & Data Collection)

- **การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview):** ดำเนินการสัมภาษณ์ผู้บริหารเทศบาลตำบลสูงเนินและแกนนำกลุ่มทอผ้า
- **การสนทนากลุ่ม (Focus Group Discussion):** ร่วมสนทนากับกลุ่มช่างทอผ้าในชุมชนและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง เพื่อร่วมกันหาข้อสรุปและแนวคิดในการออกแบบ
- **การประชุมเชิงปฏิบัติการ (Workshop / Public Hearing):** ร่วมมือกับกลุ่มช่างทอผ้าและผู้บริหารเทศบาลตำบลสูงเนิน ในการระดมความคิดเพื่อร่วมกันออกแบบผังพื้นที่ขนาด 24 ตารางเมตร

4.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Data Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นข้อความและความต้องการเชิงพื้นที่ ประกอบด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้:

- **การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis):** เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลด้านการใช้สอยพื้นที่ และสรุปองค์ประกอบด้านสถาปัตยกรรมภายใน
- **การวิเคราะห์เชิงประเด็น (Thematic Analysis):** เพื่อถอดรหัสอัตลักษณ์ของ "ผ้าเงี่ยงนางดำ" แล้วนำมาแปลงเป็นแนวคิดและรูปแบบในการออกแบบสถาปัตยกรรมภายใน

5.ผลการวิจัยหรือการศึกษา

5.1 งานสำรวจพื้นที่ และรวบรวมข้อมูลประเด็นปัญหาจากคนในชุมชน

ดำเนินการโดยมีส่วนร่วมกับชุมชน สำรวจพื้นที่โครงการที่เป็นไปได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้แก่ เทศบาลสูงเนิน กลุ่มทอผ้าเงี่ยงนางดำ และพื้นที่จากเอกชน เป็นต้น เพื่อนำมาพิจารณาเลือกพื้นที่เพื่อพิจารณานำเข้าสู่กระบวนการออกแบบตามแนวทางโครงการ โดยมีผลสำรวจดังนี้

5.1.1 พื้นที่จัดแสดงเพื่อการจำหน่าย และจัดเก็บที่ส่งเสริมคุณค่าของผลิตภัณฑ์ ยังไม่เหมาะสมและไม่ส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์น่าสนใจและมีคุณค่า

5.1.2 ส่วนจำหน่ายและส่วนโชว์การทอผ้าไม่ได้อยู่ในพื้นที่เดียวกัน ขาดการส่งเสริมกัน



ภาพแสดงส่วนจำหน่ายผลิตภัณผ้าเงี่ยงนางดำในปัจจุบัน

5.2 ผลการสำรวจข้อมูลพื้นฐานและกิจกรรมที่เกี่ยวข้องผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำมีดังนี้

5.2.1 มีความต้องการพื้นที่แสดงผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำที่มีความเป็นสัดส่วนเรียบร้อย เพื่อส่งผลต่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์

5.2.2 ต้องการพื้นที่จัดเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีความสะดวกเป็นระเบียบเรียบร้อย

5.2.3 ต้องการหน้าร้านที่สามารถเคลื่อนที่สะดวกติดตั้ง และจัดเก็บง่าย

5.2.4 เนื่องจากกลุ่มทอผ้าชาวบ้านผ้าเงี่ยงนางดำ มีทักษะสร้างรายได้เสริม เช่น ขายเครื่องดื่ม ขนม และอาหาร จึงมีความต้องการความหลากหลายด้านเสริมการค้าผลิตภัณฑ์พื้นถิ่น

5.2.5 มีความเป็นเอกลักษณ์เป็นจุดหมาย เพื่อเยี่ยมชม เป็นสถานที่พักคอยสำหรับการท่องเที่ยว

5.3 การออกแบบปรับปรุงร้านค้าผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำของอาคารเทศบาลสูงเนิน

จากการสำรวจความต้องการด้านพื้นที่ขายของร้านค้าผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำของอาคารเทศบาลสูงเนินมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 การออกแบบเพื่อส่งเสริมผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำ ที่รองรับพื้นที่ขาย พื้นที่แสดงผลิตภัณฑ์ทางตั้ง และเป็นระเบียบเรียบร้อย

5.3.2 ควรมีลักษณะเด่นชัด สามารถส่งเสริมผลิตภัณฑ์ให้ดูโดดเด่นสวยงาม น่าร้านมีความเป็นเอกลักษณ์ดึงดูดความสนใจได้

5.3.3 การจัดผังพื้นที่เพื่อการขายที่ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ และส่งเสริมให้ร้านค้าน่าสนใจ มีวิธีการดังนี้

5.3.4 ดังนั้นการออกแบบด้วยการจัดสรรพื้นที่เป็นสัดส่วน กำหนดให้ประตูส่วนทางเข้าใกล้ถนนหลักเป็นหน้าร้าน เมื่อคนภายนอกที่เป็นลูกค้าหรือนักท่องเที่ยวเข้าร้านต้องกำหนดให้อยู่ในพื้นที่สำหรับลูกค้าที่สามารถเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และหลากหลายที่สุด ภายในร้านจัดแบบพื้น

5.3.5 จากแนวทางออกแบบข้างต้น ควรเลือกใช้ตู้โปร่งที่สามารถโชว์ผลิตภัณฑ์ได้ รองรับมุมมองคนทั่วไปให้สัมผัสความสวยงามของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากผ้าเงี่ยงนางดำได้

5.3.6 เนื่องจากความงามของผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำจัดเป็นศิลปะอย่างหนึ่ง ที่ส่งเสริมให้บรรยากาศภายในร้านสวยงามเปรียบเสมือนแกลอรี่แสดงงานศิลปะแขนงหนึ่งที่สัมผัสได้จากการมองเห็นและผิวสัมผัสนั้น จึงอาจมีกิจกรรมที่ส่งเสริมด้านสุทรียที่สัมผัสทางรสชาติได้แก่ กาแฟ หรือขนมเค้กเป็นต้น

5.3.7 แนวทางออกแบบสะท้อนอัตลักษณ์ผ้าเงี่ยงนางดำผ่านวัสดุ สี และรูปแบบจากการระดมความคิดร่วมกับชาวบ้านกลุ่มทอผ้า และทีมงานและผู้บริหารเทศบาลสูงเนินได้สรุปกรอบนิยามแนวคิดในการออกแบบมีที่มาจากสิ่งสำคัญของสูงเนิน โดยสรุปดึงภาพจำสำคัญจากสถานที่ท่องเที่ยวขึ้นชื่อคือเหล่าปราสาทหินโบราณที่มีความเก่าแก่ 1000ปี ร่วมกับตัวแทนวัฒนธรรมเป็นผลิตภัณฑ์ผ่าเงี่ยงนางดำสูงเนิน กำหนดกรอบนิยามแนวความคิด

“ปราสาทหินโบราณ + ผ้าเงี่ยงนางดำ”

โดยการสังเคราะห์ข้อมูลสรุปผลแนวทางการออกแบบมีดังนี้

- การเลือกใช้วัสดุการตกแต่งภายในเบื้องต้นได้เสนอเป็นวัสดุที่ราคาไม่แพงก่อสร้างง่ายสามารถสร้างโดยช่างชาวบ้านที่มีค่าจ้างไม่แพงได้ ได้แก่ทำผนังตกแต่งโครงเคร่าไม้บุผังด้วยแผ่นยิบซัมทาสี หรือทำเป็นผนังปูนขัดมัน
- สีขาวควันบุหรี่เมื่อทำให้ออกมืดลง จะจัดอยู่ในโทนสีเทา (Gray Tone) โดยเฉพาะกลุ่ม สีเทาควันบุหรี่ (Smoky Gray) หรือเฉดสี ขาวอมเทาเข้ม ที่จะมีความหม่นและดูสุขุมขึ้นโดยไม่ทึบตันเหมือนสีดำ เพื่อให้เกิดการขับสีของผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำที่มีกลุ่มสีผ้าที่สดใสเด่นขึ้น
- มีการประดับประดาขึงผ้าเงี่ยงห้อยลงมาจากฝ้าเพดาน เป็นการแสดงอัตลักษณ์ด้วยผ้าเงี่ยงนางดำ สร้างบรรยากาศความเป็นพื้นถิ่นสูงเนินแบบตรงไปตรงมาสัมผัสได้

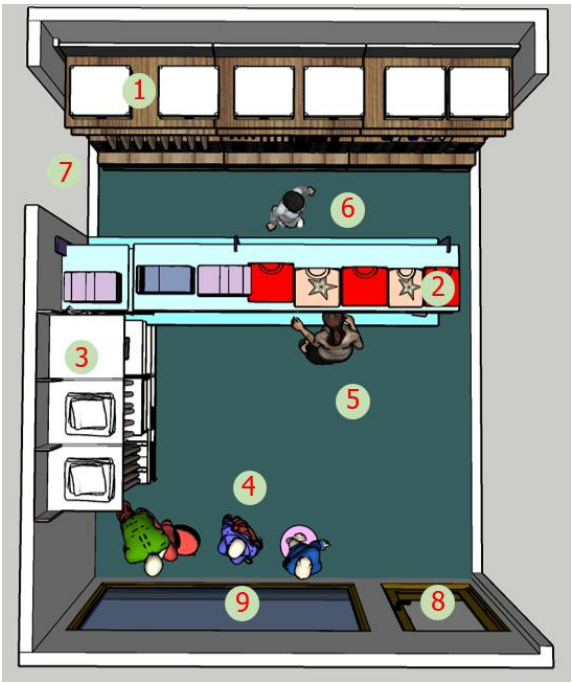
5.3.8 การออกแบบสถาปัตยกรรมภายในแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ส่วนผู้ให้บริการ และส่วนลูกค้ามีรายละเอียดดังนี้

1) ส่วนผู้ให้บริการ

- จากความต้องการส่วนผู้ให้บริการกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ใช้งานได้ 2 – 3 คน ประกอบไปด้วยส่วนเคาร์เตอร์บริการที่มีกิจกรรมแสดงสิ้นค้าต่างๆเช่นผลิตภัณฑ์ผ้า, กิจกรรมการขายขนม และกาแฟที่เป็นอาชีพเสริมของชาวบ้านกลุ่มทอผ้าเงี่ยงนางดำได้ โดยออกแบบบให้พื้นใช้วัสดุสีเขียวแก่ออกเข้มมืด เพื่อเกิดความขัดแย้งกับส่วนผนัง ตู้และชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อนกว่าให้เด่นน่าสนใจยิ่งขึ้น
- ส่วนโชว์สินค้า โดยออกแบบให้มีลักษณะทางตั้งเป็นชั้นวางซ้อนกันโดยระดับผิวโต๊ะลงมาออกแบบให้เป็นตู้ทึบไว้เก็บสินค้า ขนานกับตู้โชว์ผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำติดผนังหลังห้อง โดยมีพื้นที่ว่างต้องกลางสำหรับพนักงานขาย

2) ส่วนบริการ

- ออกแบบหน้าร้านให้มีโต๊ะเก้าอี้อเนกประสงค์สามารถสร้างบรรยากาศผู้คนที่สามารถนั่งเล่นจิบกาแฟ นั่งพักคอย หรือเป็นจุดนัดหมาย ฯ เพิ่มความสนใจแก่คนทั่วไปให้นำสายตายมายังร้านได้ โดยบริเวณหน้าร้านมีหลังคายื่นออกมาให้ร่มเงาพร้อมขึงผ้าเงี่ยนใต้หลังคาพลิ้วไหวเพลินตาได้
- ภายในร้านส่วนบริการรองรับลูกค้าได้ 4 – 5 คน ประกอบด้วยพื้นที่โถงร้าน ส่วนเลือกชมและจัดแสดงผลิตภัณฑ์ และส่วนติดต่อซื้อขายผลิตภัณฑ์



ภาพมุมบนแสดงแปลนวางตำแหน่งการส่วนต่างๆ

ความหมายแบบ(เลขที่ประกอบภาพ)

1) ส่วนตู้เก็บผลิตภัณฑ์
2) โต๊ะเคาร์เตอร์บริการ โชว์ผลิตภัณฑ์ และขายกาแฟ
3) ส่วนแสดงผลิตภัณฑ์
4) พื้นที่โชว์ผลิตณฑ์
5) พื้นที่โล่งภายในรองรับลูกค้า
6) พื้นที่สำหรับพนักงานฝ่ายขาย
7) ช่องทางเข้าออกภายใน
8) ประตูทางเข้า
9) หน้าต่างโชว์ผลิตภัณฑ์ และเป็นจุดสังเกตมองเข้ามาจากภายนอก



ภาพมุมด้านข้างแสดงแนวทางการออกแบบลักษณะเฟอร์นิเจอร์ส่วนต่างๆ

ความหมายแบบ (เลขที่ประกอบภาพ)

1) ส่วนตู้เก็บผลิตภัณฑ์
2) โต๊ะเคาร์เตอร์ประชาสัมพันธ์ส่งเสริมการขาย เก็บผลิตภัณฑ์ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
3) ส่วนแสดงผลิตภัณฑ์
4) พื้นที่ใกล้ฝ้าเพดาน ขึงโชว์ผ้าเงี่ยงนางดำ
5) พื้นที่โล่งภายในรองรับลูกค้า
6) หน้าร้านมีหลังคายื่นพร้อมขึงผ้าเงี่ยงโชว์เด่นดึงดูดสายตา
7) พื้นที่หน้าร้านมีมุมกาแฟ

6. อภิปราย สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากข้อความข้างต้น สามารถสรุปผลการวิจัยโดยแยกแยะตามกลุ่ม **ผลผลิต (Outputs)** และ **ผลลัพธ์ (Outcomes)** ตามหลักการรายงานผลงานวิจัยเชิงสร้างสรรค์และการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (PAR) ได้ดังนี้ครับ

6.1. ผลผลิต (Outputs) คือ สิ่งที่ได้มาโดยตรงจากการดำเนินงานในโครงการ (รูปธรรม/แนวทางที่จับต้องได้)

6.1.1 แนวทางการออกแบบสถาปัตยกรรมภายใน (Interior Design Guidelines): ได้ข้อสรุปและแนวทางเชิงกายภาพในการปรับปรุงพื้นที่ภายในอาคารสำนักงานเทศบาลสูงเนิน

6.1.2 ผังการจัดสรรพื้นที่ใช้สอยใหม่ (Spatial Zoning): มีการแยกพื้นที่ใช้งานที่เดิมรวมกันอยู่ออกเป็นสัดส่วนอย่างชัดเจน ได้แก่:

1) พื้นที่ส่วนขาย/จำหน่ายผลิตภัณฑ์
2) พื้นที่สำหรับจัดเก็บผลิตภัณฑ์ (Stock)
3) พื้นที่หยุดพักคอยสำหรับต้อนรับนักท่องเที่ยว

6.1.3 ฐานข้อมูลความต้องการของชุมชน: ชุดข้อมูลความต้องการและปัญหาด้านพื้นที่ใช้สอยที่ได้จากการมีส่วนร่วมของกลุ่มชาวบ้านทอผ้าสูงเนินและเจ้าหน้าที่เทศบาล

6.2. ผลลัพธ์ (Outcomes)

6.2.1 การยกระดับศักยภาพผลิตภัณฑ์และการค้า: บรรยากาศภายในและการจัดสรรพื้นที่ใหม่ช่วยส่งเสริมศักยภาพของ "ผ้าเงี่ยงนางดำ" ให้มีความน่าสนใจ โดดเด่น และช่วยกระตุ้นยอดขายให้ดีขึ้น

6.2.2 การส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม: อาคารเทศบาลสูงเนินได้รับการยกระดับให้กลายเป็น "สถานที่ท่องเที่ยว" ที่พร้อมรองรับนักท่องเที่ยว ซึ่งช่วยกระจายรายได้สู่ท้องถิ่น

6.2.3 ความยั่งยืนของภูมิปัญญาพื้นถิ่น: เกิดกลไกที่ช่วยสืบสานและส่งเสริมผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำของกลุ่มทอผ้าเทศบาลสูงเนินอย่างยั่งยืน ผ่านความร่วมมือแบบมีส่วนร่วมของคนในชุมชนและภาครัฐ

6.2.4 ข้อเสนอแนะแนวทางการนำผลการออกแบบไปประยุกต์ใช้ผลลัพธ์จากการวิจัยและออกแบบพื้นที่จัดแสดงและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ผ้าเงี่ยงนางดำ อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา มิได้จำกัดประโยชน์อยู่เพียงการพัฒนาพื้นที่ศึกษาเฉพาะถิ่นเท่านั้น หากแต่สามารถถอดรหัสกระบวนการและวิธีวิทยาการออกแบบ (Design Methodology) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้และขยายผลเชิงบริการวิชาการแก่ชุมชนอื่นที่มีบริบททางภูมิปัญญาวัฒนธรรมและสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน โดยมีแนวทางและข้อเสนอแนะในการนำไปขยายผลเชิงวิชาการรับใช้สังคม ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้หลักทฤษฎีสีตัดกันเพื่อส่งเสริมอัตลักษณ์ผลิตภัณฑ์ (Application of Contrastive

Color Theory for Identity Accentuation) กระบวนการวิจัยได้สกัดคู่สีเพื่อการออกแบบภายในโดยใช้ผนังโทนสีเทาควันบุหรี่ (Smoky Gray) เพื่อสร้างบรรยากาศที่สุขุมและขับเน้น (Accentuate) สีสันอันสดใสของผลิตภัณฑ์ผ้าทอพื้นเมือง แนวคิดนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็น "กรอบดัชนีคู่สีเพื่อการจัดแสดงผลิตภัณฑ์วัฒนธรรม (Cultural Product Display Color Matrix)" สำหรับชุมชนหัตถกรรมอื่นๆ โดยมีหลักการสำคัญคือ การใช้วัสดุพื้นหลังที่มีค่าความสว่างต่ำ (Low Value) หรือโทนสีหม่น (Muted Tone) ที่มีความขัดแย้งเชิงส่งเสริมกับโทนสีหลักของผลิตภัณฑ์ท้องถิ่น เช่น การใช้โทนสีครามเข้ม (Indigo) เพื่อขับเน้นงานจักสานไม้ไผ่ที่มีโทนสีสว่าง หรือการใช้โทนสีตรงข้ามเชิงทัศนศิลป์เพื่อเพิ่มความพรีเมียมและสร้างความสะดุดตาให้แก่ผลิตภัณฑ์ในระดับสากล

2) การขยายผลสู่โมเดลพื้นที่อเนกประสงค์เชื่อมโยงกิจกรรมชุมชน (Hybrid Cultural and Community Hub Model) แนวทางการจัดสรรพื้นที่การใช้งานภายในที่ผสานรวมระหว่างกิจกรรมหลัก (การจัดแสดงและจัดจำหน่ายสิ่งทออัตลักษณ์) และกิจกรรมเสริมเพื่อสร้างรายได้หมุนเวียนประจำวัน (การบริการเครื่องดื่มและขนมพื้นถิ่น) ถือเป็นแบบจำลองธุรกิจชุมชนระยะยาว (Sustainable Business Model) สถาบันการศึกษาและนักออกแบบสามารถนำโมเดลพื้นที่ลูกผสม (Hybrid Space) นี้ไปปรับใช้ในการยกระดับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนอื่น เพื่อแก้ปัญหาการขาดความต่อเนื่องของรายได้ โดยมุ่งเน้นการออกแบบพื้นที่ทางกายภาพกึ่งภายนอก (Semi-outdoor Space) ให้รองรับการจัดกิจกรรมปฏิสัมพันธ์ (Tactile and Experiential Activities) เช่น กิจกรรมทดลองทำ (Workshops) ซึ่งจะช่วยแปรสภาพจาก "ร้านค้าทั่วไป" สู่ "จุดหมายปลายทางของการท่องเที่ยวเชิงประสบการณ์" (Micro-experiential Destination) ที่สร้างความตื่นตัวให้แก่เศรษฐกิจฐานราก

3) การพัฒนาแบบสถาปัตยกรรมระดับพื้นถิ่นร่วมสมัยที่มีต้นทุนต่ำ (Low-Cost Vernacular Architectural Detail)ข้อจำกัดด้านงบประมาณและทักษะฝีมือช่างในระดับท้องถิ่นได้รับการแก้ไขผ่านแนวทางการออกแบบที่พึ่งพาวัสดุสำเร็จรูปในตลาดที่ราคาย่อมเยาและก่อสร้างง่าย เช่น โครงเคร่าไม้บุแผ่นยิปซัม และปูนเปลือยขัดมัน ประกอบกับการใช้ระบบแขวนขึงผ้าเพื่อแสดงอัตลักษณ์ในแนวตั้ง องค์ความรู้นี้สามารถถอดรหัสออกมาเป็น "แบบรายละเอียดมาตรฐานสถาปัตยกรรมพึ่งตนเอง (Self-Reliant Vernacular Details)" ในลักษณะโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่ยืดหยุ่นได้ (Modular Display Systems) เพื่อเปิดโอกาสให้วิสาหกิจชุมชนอื่นสามารถดาวน์โหลดไปปรับปรุง ซ่อมแซม หรือต่อเติมพื้นที่ของตนเองได้ด้วยช่างฝีมือชาวบ้าน (Local Craftsmen) โดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีขั้นสูงหรือผู้รับเหมาภายนอกที่มีมูลค่าสูง

4) การบูรณาการเชิงบูรณาการระหว่างการเรียนการสอนกับการบริการวิชาการ (Academic Integration and Open-Source Knowledge Platform)เพื่อสร้างผลกระทบทางสังคม (Social Impact) ที่กว้างขวาง สถาบันอุดมศึกษาสามารถนำแนวทางและวิธีวิทยาการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research: PAR) จากโครงการนี้ไปบรรจุลงในกระบวนการเรียนการสอนรายวิชาการออกแบบสถาปัตยกรรมภายใน การออกแบบนิทรรศการ หรือการจัดการทางวัฒนธรรม โดยขับเคลื่อนผ่านโครงการพัฒนานักศึกษาในลักษณะของการเรียนรู้ผ่านการบริการสังคม (Community-Engaged Learning) นอกจากนี้ ควรมีการพัฒนาแพลตฟอร์มการออกแบบแบบเปิด (Open-Source Design Platform) เพื่อเผยแพร่แบบก่อสร้าง รายการวัสดุ และเทคนิคการจัดวางพื้นที่ที่ผ่านการสรุปผลแล้ว ให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) และกลุ่มสตรี/กลุ่มอาชีพหัตถกรรมทั่วประเทศ สามารถนำไปปรับใช้ในบริบทของตนเองได้อย่างทั่วถึงและยั่งยืน

7. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก ผศ.ดร.นิธิ ลิศนันท์ ที่ให้

คำปรึกษา และแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณกลุ่มชาวบ้านทอผ้าอำเภอสูงเนิน และนายรักชาติ กิริวัฒนศักดิ์ ส.อบจ.อำเภอสูงเนิน อนุเคราะห์ข้อมูลพื้นที่งานวิจัยในโครงการ

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากร สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาที่ช่วยเหลือให้ข้อมูลด้านระบวนการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ช่วยเหลือให้การสนับสนุนงานวิจัยใหม่ตลอดมา

ขอขอบคุณคณาจารย์ในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอาจารย์ต่างคณะในมหาวิทยาลัยราชฏักนครราชสีมา ตลอดจนบิดา มารดา และเพื่อนที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ซึ่งช่วยเหลือให้คำปรึกษาและให้กำลังใจต่อผู้ทำวิจัย โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนภาควิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประจำปีงบประมาณ 2566

ขอขอบคุณแก่ ว่าที่ร้อยโท ภูมินันท์ พรชีวโชติ ปลัดเทศบาลสูงเนิน และ นางเบญจา ดวงสูงเนิน รองประธานคณะกรรมการบริหารตัวแทนกลุ่มทอผ้าเทศบาลตำบลสูงเนิน ที่อนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อการออกแบบงานสถาปัตยกรรมส่งเสริมคุณค่าผ้าเงี่ยงนางดำ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

8. การเขียนเอกสารอ้างอิง

[1]กิติ สินธุเสก. (2544). การออกแบบสถาปัตยกรรมภายในพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2]นภาพรรณ สุทธะพินทุ. (2540) ปฏิบัติการออกแบบตกแต่งภายใน 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[3]นรมิตร ลิ่วธนมงคล. (2520). คู่มือการออกแบบบ้าน. กรุงเทพมหานคร : บริษัท กราฟิคอาร์ต จำกัด.

[4]ภัทราวดี ศิริวรรณ. (2555). Interior Designs ความรู้พื้นฐานงานออกแบบตกแต่งภายใน.ปทุมธานี : บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด.

[5]วัฒนะ จูฑะวิภาต. (2553). ศิลปะการออกแบบตกแต่งภายใน. กรุงเทพฯ: บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด.

[6]สนอง แก่นแก้ว.(2562). พระราชบัญญัติควบคุมอาคารและพระราชบัญญัติอาคารชุด. กรุงเทพมหานครฯ : พิมพ์อักษร, ห่างหุ้น ส่วนจำกัด.

[7]กฤษฎา อินทรสถิตย์. (2565). การเขียนแบบสถา--ปัตยกรรมภายใน. ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[8]นภาพรรณ สุทธะพินทุ. (2545). ออกแบบตกแต่งภายใน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[9]วรพงศ์ วรชาติอุดมพงศ์. (2535). ออกแบบตกแต่งภายใน. ศิลปาบรรณาคาร.

[10]คำนาย อภิปรัชญาสกุล.(2557). การบริหารร้านค้าปลีก. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์โฟกัสมีเดียแอนด์ พับลิชชิ่ง

[11]เขมิกา หวังสุข. (2543). พัฒนาการทางวัฒนธรรมในลุ่มแม่น้ำมูล: กรณีศึกษาแหล่งโบราณคดีเมืองเสมา อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. คลังวิชาการ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[12]กองโบราณคดี กรมศิลปากร. (2562). รายงานการสำรวจและขุดแต่งโบราณสถานเมืองเสมา อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา. โรงพิมพ์สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี.

[13]ปรีชา นพมาศ. (2558). เมืองโบราณเสมา:พัฒนาการทางประวัติศาสตร์และโบราณคดีบนลุ่มแม่น้ำมูลตอนบน. วารสารโบราณคดี, 36(2), 45-68.

[14]ศุภมิตร อาดัม. (2564). การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบสถาปัตยกรรมปราสาทหินโบราณในเขตอำเภอสูงเนิน: ปราสาทเมืองแขก ปราสาทโนนกู่ และปราสาทเมืองเก่า. วารสารศิลปสถาปัตยกรรมและการออกแบบ, 18(1), 112-129.

[15]สถิตย์ ทิมวัฒนธรรม. (2561). แนวทางการจัดการและพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์อย่างยั่งยืนในกลุ่มปราสาทหินโบราณ อำเภอสูงเนิน

จังหวัดนครราชสีมา (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
[16]อานนท์ เพ็งดิษฐ์, และ สุวิทย์ ธีรศาศวัต. (2563). พัฒนาการของชุมชนโบราณในลุ่มน้ำลำตะคอง: กรณีศึกษาเมืองโบราณเสมาและศาสนสถานประจำชุมชน. วารสารประวัติศาสตร์และสังคมศาสตร์, 3(2), 15-32.
[17]มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา. (2563). บอกรักษ์สูงเนิน : รวมบทความวิชาการ-สารคดีในพื้นที่อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
[18]สำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 9 พิมาย. (ม.ป.ป.). รายงานการขุดค้นทางโบราณคดีเมืองเสมา (เล่ม 2) งานพัฒนาเมืองเสมา อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา. สำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 9 พิมาย.
[19]ปุราณรักษ์ (หจก.). (2542). รายงานการขุดแต่งเพื่อการบูรณะโบราณสถานเมืองเสมา ตำบลเสมา อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา. รายงานเสนอต่อสำนักงานโบราณคดีและพิพิธภัณฑ์แห่งชาติที่ 9 จังหวัดนครราชสีมา.
[20]สุจิตต์ วงษ์เทศ. (2563). นครราชสีมา เมืองพญามหานคร มาจากเมืองราด ของพ่อขุนผาเมือง ที่สูงเนิน ลำตะคอง. สำนักพิมพ์มติชน.
[21]รุ่งโรจน์ ภิรมย์อนุกูล. (2563). หลักฐานโบราณวัตถุประเภทจารึกที่มีอายุเก่ากว่า พ.ศ. 1800 จากอำเภอสูงเนิน นครราชสีมา. ใน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา (บ.ก.), บอกรักษ์สูงเนิน : รวมบทความวิชาการ-สารคดีในพื้นที่อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา (น. 147-180). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
[21]เทศบาลตำบลสูงเนิน. (2563). บันทึกภูมิปัญญาทอบันทึกภูมิปัญญาผ้าเงี่ยงนางดำ. ใน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา (บ.ก.), บอกรักษ์สูงเนิน : รวมบทความวิชาการ-สารคดีในพื้นที่อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.

การหาก๊าซเรือนกระจกอาคารที่พักอาศัย 3 ชั้น ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยนวัสดุคาร์บอนต่ำ

Greenhouse Gas Emission Assessment of a Three-Story Residential Building: A Comparative Study Before and After Incorporating Low-Carbon Materials

ยุทธศักดิ์ อนันตเดชศักดิ์[1]

[1] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร*
140 ถนน เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก จ.กรุงเทพมหานคร 10530
**Email : a.yuthasak@gmail.com, 066-1491999*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก(CO_2) ของงานโครงสร้างและงานระบบน้ำดี–น้ำเสียของอาคารที่พักอาศัย 3 ชั้น 2 คูหาที่ก่อสร้างด้วยระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลัง(Post-Tension Building) โดยใช้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์เป็นฐานในการคำนวณ ผลการศึกษาพบว่าในส่วนงานโครงสร้างสามารถลดปริมาณ CO_2 จากปกติ 210,800.37 $kgCO_2eq$ ลงเหลือ 182,851.96 $kgCO_2eq$ ลดลงร้อยละ 13.26 เมื่อเปลี่ยนเป็นวัสดุที่คำนึงถึงการปล่อย CO_2 ในส่วนของงระบบน้ำดีน้ำเสีย การใช้ท่อ PPR PN10 ในส่วนของน้ำดี และ PVC คลาส 8.5 ในส่วนของน้ำเสียปล่อยก๊าซ CO_2 น้อยกว่าการใช้ท่อ PVC หรือ ท่อ PPR PN10 เพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 21.8 และ 38.6

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก, คอนกรีตคาร์บอนต่ำ, วัฏจักรชีวิตของสิ่งปลูกสร้าง

Abstract

This study aimed to evaluate the carbon dioxide(CO_2) emissions associated with the structural and water supply–drainage systems of two three-story residential buildings constructed using a post-tensioned concrete slab system. The assessment was conducted based on the Carbon Footprint of Products(CFP) of construction materials. The results indicated that the structural system could reduce CO_2 emissions from 210,800.37 $kgCO_2eq$ to 182,851.96 $kgCO_2eq$, representing a 13.26% reduction, through the adoption of low-carbon construction materials. For the water supply and drainage systems, the combination of PPR PN10 pipes for the water supply system and PVC Class 8.5 pipes for the drainage system resulted in lower CO_2 emissions than using either PVC pipes or PPR pipes alone, achieving emission reductions of 21.8% and 38.6%, respectively.

Keywords: Greenhouse Gas Emissions, Low-Carbon Concrete, Building Life Cycle Assessment (LCA)

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างแต่ละประเภทมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการสกัดวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานผลิต กระบวนการผลิตวัสดุ ไปจนถึงกระบวนจัดการกับวัสดุเหล่านั้น สำหรับงานก่อสร้างในแต่ละประเภท กระบวนการดังกล่าวนั้นสามารถประเมินได้ด้วยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์(Carbon Footprint: CF) ของวัสดุ ค่าดังกล่าวสะท้อนปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตของวัสดุในแต่ละขั้นตอน และเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของอาคาร

งานโครงสร้างและงานระบบน้ำดี–น้ำเสียเป็นองค์ประกอบของอาคารที่ใช้วัสดุหลากหลายชนิด เช่น คอนกรีต เหล็ก ท่อ และอุปกรณ์ประกอบระบบ ซึ่งมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์แตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการนำวัสดุมาใช้เป็นส่วนประกอบในก่อสร้างอาคารแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของวัสดุที่ใช้

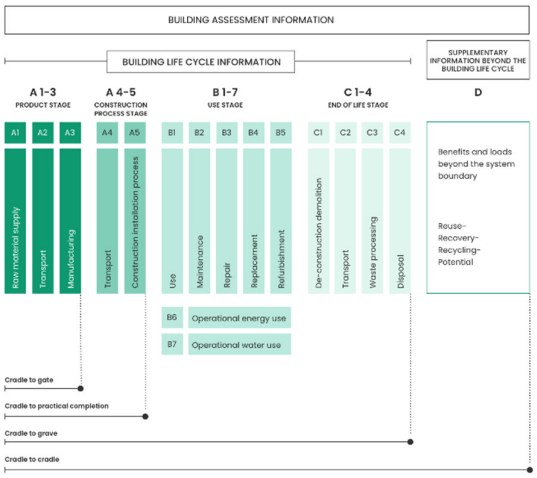
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากงานโครงสร้าง และงานระบบน้ำดี–น้ำเสียของวัสดุ ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยนมาใช้วัสดุคาร์บอนต่ำ โดยอาศัยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัสดุเป็นเกณฑ์ในการประเมิน เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุแต่ละประเภท

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาปริมาณก๊าซเรือนกระจก(CO_2) ในเฟสที่ 1 (A1-A3) ของวัฏจักรชีวิตของสิ่งปลูกสร้าง ในการศึกษานี้ได้ใช้อาคารที่พักอาศัย 3 ชั้น 2 คูหา พื้นที่ใช้สอย 3,000 ตารางเมตรประกอบไปด้วยห้องพัก 66 ห้อง ที่ก่อสร้างด้วยระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลัง(Post-Tension Building) ในหมวดงานโครงสร้าง และ งานระบบน้ำดีน้ำเสีย โดยอาศัยข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก(องค์การมหาชน) ในส่วนของงานโครงสร้าง ได้หาปริมาณก๊าซ CO_2 ในส่วนของงานคอนกรีต งานเหล็กเสริมคอนกรีต และ งานเหล็กรูปพรรณ และในส่วนของงานระบบน้ำดีน้ำเสียได้หาปริมาณ CO_2 ในงานระบบน้ำดีน้ำเสียที่ใช้ท่อ PVC ทั้งโครงการเปรียบเทียบ งานงานระบบน้ำดีน้ำเสียที่ใช้ท่อ PPR PN10 ทั้งโครงการ และเปรียบเทียบ กับ โครงการที่ใช้ PPR PN10 ในระบบน้ำดี และ PVC ในระบบน้ำเสีย

2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิต Life-Cycle Assessment Phases (LCA) [3]

การประเมินวัฏจักรชีวิตคือกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์หรือบริการตลอดวงจรชีวิตของมัน ตั้งแต่ขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งาน และการกำจัดเมื่อหมดอายุใช้งาน โดยมีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจและลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด โดยที่ LCA ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของอาคารและผลิตภัณฑ์[3]

ระยะการผลิต (Product Stage)

A1 การสกัดและแปรรูปวัตถุดิบ รวมถึงการแปรรูปวัสดุรีไซเคิลหรือวัสดุทุติยภูมิ

A2 การขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานผู้ผลิต

A3 กระบวนการผลิต

ทั้งสามขั้นตอนนี้อาจรวมกันเป็นโมดูลเดียว (A1-A3) และครอบคลุมการใช้พลังงาน วัตถุดิบ และกระบวนการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น

ระยะกระบวนการก่อสร้าง (Construction Process Stage)

A4 การขนส่งวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ไปยังสถานที่ก่อสร้าง

A5 การติดตั้งหรือก่อสร้างภายในโครงการ รวมถึงผลกระทบจากการสูญเสียวัสดุระหว่างการก่อสร้าง เช่น การผลิต การขนส่ง การจัดการของเสีย และการกำจัดวัสดุที่สูญเสีย

ระยะการใช้งาน (Use Stage)

B1 การใช้งานหรือการนำผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้งแล้วไปใช้งาน

B2 การบำรุงรักษา

B3 การซ่อมแซม

B4 การเปลี่ยนทดแทน

B5 การปรับปรุงหรือการปรับปรุงครั้งใหญ่ (Refurbishment)

B6 การใช้พลังงานระหว่างการใช้งานอาคาร เช่น ระบบทำความร้อน ระบบปรับอากาศ และระบบประกอบอาคารอื่น ๆ

B7 การใช้น้ำระหว่างการใช้งานอาคาร

สำหรับ B6 และ B7 ยังรวมถึงการจัดหาวัสดุ ผลิตภัณฑ์ พลังงาน และน้ำ การขนส่ง ตลอดจนการจัดการของเสียจนถึงสถานะสิ้นสุดของของเสียหรือการกำจัดของเสียขั้นสุดท้ายที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน

ระยะสิ้นสุดอายุการใช้งาน (End-of-Life Stage)

C1 การรื้อถอนหรือการทุบทำลาย

C2 การขนส่งไปยังสถานที่จัดการของเสีย

C3 การแปรรูปของเสียเพื่อการนำกลับมาใช้ซ้ำ การนำกลับมาใช้ประโยชน์ หรือการรีไซเคิล

C4 การกำจัดของเสียขั้นสุดท้าย

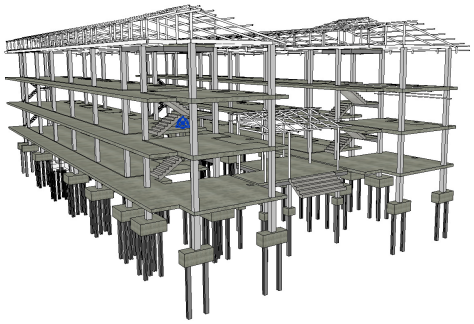
การหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้โดย

Total $kgCO_2eq$ = ปริมาณวัสดุ x (CF Factor)

3. ผลการศึกษา

3.1 งานโครงสร้าง

ตัวอย่างพื้น Post-tension แสดงดังรูปที่ 2 ปริมาณวัสดุที่ได้นำไปใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการคำนวณหาปริมาณ CO_2 แสดงในตารางที่ 1 และคาร์บอนฟุตพริ้นของผลิตภัณฑ์ในส่วนของงานโครงสร้าง แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างพื้น Post-tension

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง

ลำดับ	รายการ	ก่อนปรับเปลี่ยน		หลังปรับเปลี่ยน	
		ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย
1.00	**หมวดงานโครงสร้าง**				
1.10	งานคอนกรีต				
	คอนกรีตผสมสำเร็จ 210 ksc (LEAN)	4.12	ลบ.ม.	4.12	ลบ.ม.
	คอนกรีตผสมสำเร็จ 240 ksc	534.18	ลบ.ม.	534.18	ลบ.ม.
	ฐานราก	13.05	ลบ.ม.	13.05	ลบ.ม.
	เสา	37.47	ลบ.ม.	37.47	ลบ.ม.
	คาน	6.11	ลบ.ม.	6.11	ลบ.ม.
	พื้น	464.33	ลบ.ม.	464.33	ลบ.ม.
	บันไดคอนกรีต	13.22	ลบ.ม.	13.22	ลบ.ม.
1.20	เหล็กเสริมคอนกรีต				
	ตะแกรง Ø 12 @0.50 M.	7.10	ตัน	7994.92	เมตร
	เหล็กเสริม SR 24 Ø 6 มม.	0.15	ตัน	33.46	เมตร
	เหล็กเสริม SR 24 Ø 9 มม.	3.75	ตัน	3.75	เมตร
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 12 มม.	10.13	ตัน	3083.84	เมตร
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 16 มม.	4.25	ตัน	4.25	ตัน
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 20 มม.	11.34	ตัน	1748.10	เมตร
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 25 มม.	8.29	ตัน	8.29	ตัน
2.00	**หมวดโครงหลังคา**				
2.10	งานโครงสร้างหลังคา				
	เหล็กกล่อง 50x50x3.2 มม.	5313.97	กก.	5313.97	กก.
	เหล็กกล่อง 100x50x3.2 มม.	4532.30	กก.	4532.30	กก.
	เหล็กกล่อง 100x100x2.3 มม.	609.06	กก.	609.06	กก.
	เหล็กกล่อง 200x50x4.5 มม.	1395.68	กก.	1395.68	กก.
	เหล็กกล่อง 200x100x4.5 มม.	8691.41	กก.	8691.41	กก.
2.20	บันไดเหล็ก				
	C-200x80x80x7.5mm.	1564.29	กก.	1564.29	กก.
	CHECKER PLATE 4.5 mm.	1.00	ตัน	1.00	ตัน

ตารางที่ 2 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัสดุโครงสร้าง[2]

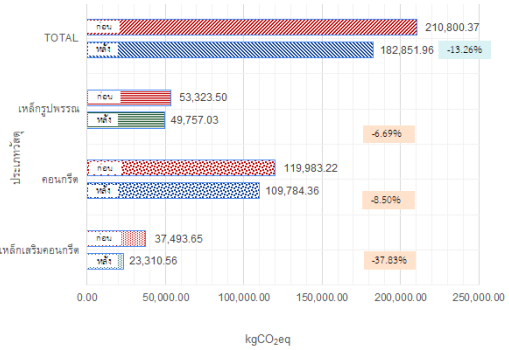
วัสดุปกติ				วัสดุคาร์บอนต่ำ		
ลำดับ	รายการ	Emission Factor ปริมาณ CO_2		รายการ	Emission Factor ปริมาณ CO_2	
1	**หมวดงานโครงสร้าง**					
1.1	งานคอนกรีต					
	คอนกรีตผสมสำเร็จ 210 ksc (LEAN)	209.00	$kgCO_2e/m^3$	คอนกรีตผสมสำเร็จ 210 ksc (LEAN)	197.00	$kgCO_2e/m^3$
	คอนกรีตผสมสำเร็จ 240 ksc	223.00	$kgCO_2e/m^3$	คอนกรีตผสมสำเร็จ 240 ksc	204.00	$kgCO_2e/m^3$
2	**เหล็กเสริมคอนกรีต**					
	ตะแกรง Ø 12 @0.50 M.	801.00	$kgCO_2e/t$	ตะแกรงพอลิเมอร์เสริมใย Ø 12 mm.#	626.00	gCO_2e/m
	เหล็กเสริม SR 24 Ø 6 มม.	703.00	$kgCO_2e/t$	พอลิเมอร์เสริมใย Ø 6 มม.	7.83	gCO_2e/m
	เหล็กเสริม SR 24 Ø 9 มม.	769.00	$kgCO_2e/t$			
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 12 มม.	801.00	$kgCO_2e/t$	พอลิเมอร์เสริมใย Ø 12 มม.	626.00	$kgCO_2e/m$
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 16 มม.	983.00	$kgCO_2e/t$			
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 20 มม.	815.00	$kgCO_2e/t$	พอลิเมอร์เสริมใย Ø 20 มม.	1.16	$kgCO_2e/m$
	เหล็กเสริม SD 40 Ø 25 มม.	879.00	$kgCO_2e/t$			
3	**หมวดโครงหลังคา และบันได**					
3.1	งานโครงสร้างหลังคา					
	เหล็กกล่อง 50x50x3.2 มม.	2.47	$kgCO_2e/kg$	เหล็กกล่อง 50x50x3.2 มม.	2.43	$kgCO_2e/kg$
	เหล็กกล่อง 100x50x3.2 มม.	2.47	$kgCO_2e/kg$	เหล็กกล่อง 100x50x3.2 มม.	1.73	$kgCO_2e/kg$
	เหล็กกล่อง 100x100x2.3 มม.	2.47	$kgCO_2e/kg$			
	เหล็กกล่อง 200x50x4.5 มม.	2.47	$kgCO_2e/kg$			
	เหล็กกล่อง 200x100x4.5 มม.	2.47	$kgCO_2e/kg$			
3.2	บันไดเหล็ก					
	C-200x80x80x7.5mm.	1.65	$kgCO_2e/kg$			
	CHECKER PLATE 4.5 mm.	2.63	$kgCO_2e/t$			

ผลการหาปริมาณ CO_2 ในส่วนของงานโครงสร้างก่อนปรับเปลี่ยนวัสดุมีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 210,800.37 $kgCO_2eq$ หลังปรับเปลี่ยนวัสดุเป็นวัสดุคาร์บอนต่ำ มีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 182,851.96 $kgCO_2eq$ โดยจำแนกตามประเภทของวัสดุ ได้ดังนี้ ปริมาณ CO_2 ในส่วนของเหล็กเสริมคอนกรีตเท่ากับ 37,493.65 $kgCO_2eq$ เมื่อเปลี่ยนเป็น GFRP ปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือ 23,310.56 $kgCO_2eq$ ลดลงร้อยละ 37.83 ในส่วนของคอนกรีต ปริมาณ CO_2 ก่อนปรับเปลี่ยนเท่ากับ 119,983.22 $kgCO_2eq$ เมื่อเปลี่ยนเป็นคอนกรีตคาร์บอนต่ำปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือ 109,784.36 $kgCO_2eq$ ลดลงร้อยละ 8.50 ปริมาณ CO_2 ในส่วนของเหล็กรูปปพรรณก่อนนำเหล็กคาร์บอนต่ำมาใช้ร่วมกับเหล็กปกติ มีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 53,323.50 $kgCO_2eq$ หลังจากนำเหล็ก

คาร์บอนต่ำมาใช้ร่วมกับเหล็กปกติ พบว่า CO_2 ลดลงเหลือ 49,757.03 kgCO_2eq หรือร้อยละ 6.69 ดังแสดงในตารางที่ 3 และกราฟรูปที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณ CO_2 งานโครงสร้าง

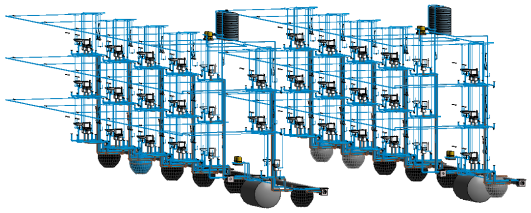
รายการ	ก่อน	หลัง	การเปลี่ยนแปลง
	CO_2eq (kg.)	CO_2eq (kg.)	%
เหล็กเสริมคอนกรีต	37,493.65	23,310.56	-37.83%
คอนกรีต	119,983.22	109,784.36	-8.50%
เหล็กรูปพรรณ	53,323.50	49,757.03	-6.69%
TOTAL	210,800.37	182,851.96	-13.26%



รูปที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณ CO_2 ของวัสดุ

3.2 ระบบน้ำดีน้ำเสีย

ผลการศึกษาระบบท่อน้ำดีน้ำเสียได้แบ่งรูปแบบการใช้ท่อในงานระบบแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้ รูปแบบที่ 1.ระบบน้ำดีใช้ PVC Class13.5 น้ำเสียใช้ PVC Class8.5 รูปแบบที่ 2. ระบบน้ำดีน้ำเสียใช้ PPR PN10 รูปแบบที่ 3.ระบบน้ำดีใช้ PPR PN10 และน้ำเสียใช้ PVC Class8.5 ตามลำดับ ตัวอย่างงานระบบแสดงในรูปที่ 4 ปริมาณงานของทั้งสามรูปแบบแสดงในตารางที่ 4 และคาร์บอนฟุตพริ้นของงานท่อแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 4 แสดงระบบงานน้ำดีน้ำเสีย

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณงานท่อน้ำดีน้ำเสีย

ลำดับที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย
1	PVC		
1.1	ท่อน้ำประปา PVC Class13.5	530,862.88	cm³
1.2	ท่อน้ำเสีย,ท่ออากาศ PVC Class8.5	1,749,342.53	cm³
1.3	ข้อต่อ PVC หนา(ท่อน้ำดี)	75	Kg.
1.4	ข้อต่อ PVC เกลียวทองเหลือง(ท่อน้ำดี)	341	ชิ้น
1.5	ข้อต่อ PVC บาง(ท่อน้ำเสีย)	235	Kg.
2	PPR		
2.1	ท่อน้ำประปา PPR PN10	152,394.39	cm³
2.2	ท่อน้ำเสีย,ท่ออากาศ PPR PN10	2,011,866.70	cm³
2.3	ข้อต่อ PPR PN10 (ท่อน้ำดี)	34.78	Kg.
2.4	ข้อต่อ PPR PN10 เกลียวทองเหลือง(ท่อน้ำดี)	341	ชิ้น
2.5	ข้อต่อ PPR PN10 (ท่อน้ำเสีย)	416.47	Kg.
3	PPR + PVC		
3.1	ท่อน้ำประปา PPR PN10	152,394.39	cm³
3.2	ท่อน้ำเสีย,ท่ออากาศ PVC Class8.5	1,749,342.53	cm³
3.3	ข้อต่อ PPR PN10 (ท่อน้ำดี)	34.78	Kg.
3.4	ข้อต่อ PPR PN10 เกลียวทองเหลือง(ท่อน้ำดี)	341	ชิ้น
3.5	ข้อต่อ PVC บาง(ท่อน้ำเสีย)	235	Kg.

ตารางที่ 5 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของงานท่อ[2]

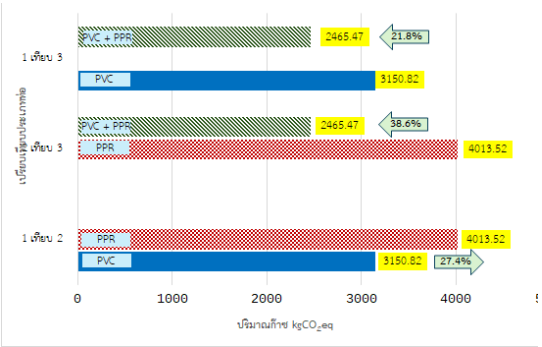
ลำดับ	ชนิดท่อ	ปริมาณ CF	หน่วยการทำงาน
1	ท่อ PVC เอสซีจี ระบบประปา-คลาส 8.5	0.9	gCO$_2$e/cm^3 ปริมาตร 1 ลบ.ซม.
2	ท่อ PVC เอสซีจี ระบบประปา-คลาส 13.5	1.5	gCO$_2$e/cm^3 ปริมาตร 1 ลบ.ซม.
3	ท่อ PPR เอสซีจี PN10 (SDR 11)	1.2	gCO$_2$e/cm^3 ปริมาตร 1 ลบ.ซม.
4	ข้อต่อ PPR PN10 เอสซีจี	2.9	kgCO$_2$e/kg 1 กิโลกรัม
5	ข้อต่อ PPR PN10 เอสซีจี (ทองเหลือง) ขนาด 20 mm.	206	gCO2e/ชิ้น 1 ชิ้น
6	ข้อต่อ PPR PN10 เอสซีจี (ทองเหลือง) ขนาด 40-50 mm.	1.1	kgCO$_2$e/ชิ้น 1 ชิ้น
7	ข้อต่อ PVC เอสซีจี "งานรับแรงดัน (อีด)" และ "งานระบายน้ำ (อีด)"	2.5	kgCO$_2$e/kg 1 กิโลกรัม
8	ข้อต่อ PPR PN10 เอสซีจี (ทองเหลือง) ขนาด >50 mm.	2.3	kgCO$_2$e/ชิ้น 1 ชิ้น
9	ข้อต่อ PVC เกลียวทองเหลือง-หนา ฟ้า เอสซีจี 18 mm	145	kgCO$_2$e/ชิ้น 1 ชิ้น
10	ข้อต่อ PVC เกลียวทองเหลือง-หนา ฟ้า เอสซีจี 40-55 mm	736	kgCO$_2$e/ชิ้น 1 ชิ้น
11	ข้อต่อ PVC เอสซีจี "งานรับแรงดัน (อีด)" และ "งานระบายน้ำ (อีด)" Fitting INDO metal	398	kgCO$_2$e/ชิ้น 1 ชิ้น

ผลของการหาปริมาณ CO_2 ของทั้ง 3 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 มีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 3,150.82

kgCO_2eq รูปแบบที่ 2 มีปริมาณ CO_2 เท่ากับ 4,013.52 kgCO_2eq และในรูปแบบที่ 3 เท่ากับ 2,465.47 kgCO_2eq เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณ CO_2 ทั้ง 3 รูปแบบ แบบที่ 1 เทียบกับ 2 ปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.4 แบบที่ 1 เทียบกับแบบที่ 3 ปริมาณ CO_2 ลดลงร้อยละ 21.8 และ แบบที่ 2 เทียบกับ แบบที่ 3 ปริมาณ CO_2 ลดลงร้อยละ 38.6 ดังแสดงในตารางที่ 6 และ กราฟรูปที่ 5

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบก๊าซ CO_2 ของทั้งสามรูปแบบ

ระบบท่อ	ปริมาณ CO_2 kgCO_2eq	การเปรียบเทียบ	ความแตกต่าง	
1. PVC	3,150.82	1 เทียบ 2	เพิ่มขึ้น	27.4%
2. PPR	4,013.52	2 เทียบ 3	ลดลง	38.6%
3. PPR + PVC	2,465.47	1 เทียบ 3	ลดลง	21.8%



รูปที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณ CO_2 ของทั้ง 3 แบบ

4. บทสรุปและอภิปรายผลวิจัย

การศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) โดยใช้โปรแกรม Autodesk Revit 2024 เป็นเครื่องมือหลักในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อ หาปริมาณงาน ในส่วนของงานโครงสร้างและงานระบบน้ำดี-น้ำเสียของอาคารที่พักอาศัย 3 ชั้นที่ระบบพื้นของอาคารสร้างด้วยระบบ Post-tension ปริมาณวัสดุ ที่ได้จากแบบจำลอง นำมาหาปริมาณ CO_2 โดยอาศัยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัสดุเป็นเกณฑ์จากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.)

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำสามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 ได้ โดยในส่วนของงานโครงสร้าง การปรับเปลี่ยนวัสดุสามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 รวมจาก 210,800.37 เป็น 182,851.96 kgCO_2eq หรือคิดเป็นร้อยละ 13.26 ของปริมาณ CO_2 ทั้งหมดของงานโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของงานโครงสร้าง พบว่าการเปลี่ยนจากเหล็กเสริมคอนกรีตเป็น GFRP สามารถลด CO_2 ได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 37.83 รองลงมาคือการเปลี่ยนคอนกรีตปกติเป็นคอนกรีตคาร์บอนต่ำสามารถลด CO_2 ได้ร้อยละ 8.50 และเหล็กรูปพรรณเหล็กคาร์บอนต่ำเป็นส่วนผสมกับเหล็กรูปพรรณปกติสามารถลด CO_2 ได้ร้อยละ 6.69 ขณะที่ระบบน้ำดี–น้ำเสียพบว่า การเลือกใช้ท่อ PPR PN10 สำหรับระบบน้ำดีร่วมกับท่อ PVC Class 8.5 สำหรับระบบน้ำเสียปล่อย CO_2 น้อยที่สุด 2,465.47 kgCO_2eq เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ PVC หรือ PPR เพียงอย่างเดียว การทดลองการปรับเปลี่ยนวัสดุปกติมาใช้วัสดุคาร์บอนต่ำ แสดงให้เห็นว่าการคัดเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของแต่ละระบบมีส่วนสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมของอาคารได้

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคารสามารถดำเนินการได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบผ่านการคัดเลือกวัสดุที่มีค่า

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือระบบของอาคาร ทั้งนี้ แม้ว่าวัสดุบางประเภทจะมีอัตราการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในเชิงร้อยละไม่สูง แต่เนื่องจากมีปริมาณการใช้งานมาก จึงส่งผลต่อการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของอาคารอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การคำนึงถึงความสำคัญของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ของวัสดุตั้งแต่กระบวนการออกแบบและการเลือกวัสดุ จึงเป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาร่วมกับการออกแบบเพื่อด้วยในอนาคต

5ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาที่มุ่งเน้นการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจก(CO_2) ของงานโครงสร้างและงานระบบน้ำดี–น้ำเสีย โดยอาศัยแบบจำลอง BIM และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัสดุ จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก(องค์การมหาชน)

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาครั้งต่อไป ควรขยายขอบเขตและเพิ่มความละเอียดของการวิเคราะห์ ดังนี้นอกจากการลดปริมาณ CO_2 แล้ว ควรวิเคราะห์ต้นทุนเริ่มต้น ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost: LCC) และระยะเวลาคืนทุนของวัสดุคาร์บอนต่ำ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ออกแบบและผู้ประกอบการ ควรศึกษาการบูรณาการการเลือกวัสดุคาร์บอนต่ำร่วมกับการออกแบบเชิงประหยัดพลังงาน การใช้พลังงานหมุนเวียน และการชดเชยคาร์บอน เพื่อกำหนดแนวทางการออกแบบอาคารที่สามารถมุ่งสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Carbon Building) ได้อย่างเป็นรูปธรรม

6 เอกสารอ้างอิง

[1]. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์(วสท.)"มาตรฐานการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ตามแนวทางสภาวิชาชีพ"พิมพ์ครั้งที่ 1, 2567

[2]. องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (ม.ป.ป.). คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YUc5dFpRPT0

[3]. https://help.oneclicklca.com/en/articles/275901-life-cycle-stages

[4]. ศูนย์องค์ความรู้ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม,https://hub.mnre.go.th/th/knowledge/detail/65375

[5]. WoodWorks, “Introduction to Whole Building Life Cycle Assessment: The Basics”, 2024,https://www.woodworks.org/resources/introduction-to-wholebuilding-life-cycle-assessment-the-basics/

[6]. Dong, Y., Liu, P., & Hossain, M. U. (2023). “Life cycle sustainability assessment of building construction: A case study in China. Sustainability”, 15(9), 7655. https://doi.org/10.3390/su15097655

[7]. Eslami, H., Yaghma, A., Jayasinghe, L. B., & Waldmann, D. (2024). “Comparative life cycle assessment of light frame timber and reinforced concrete masonry structural systems for single-family houses in Luxembourg”. Heliyon, 10(4), e26083. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26083

ชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า แสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ด้วย PLC Siemens S7-1200

A Web-Based Power Factor Correction Simulator with Remote Monitoring and Control Using Siemens S7-1200 PLC

อภิวัฒน์ อัศวเมฆิน*,วิไลพร เงินบาท,เกษม เนื้อแก้ว,รชานนท์ วารีย์,ณัฐวุฒิ จันทะราช,ดาลป ดวงบุบผา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
E-mail apiwat.au@rmuti.ac.th,080-0067104

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction; PFC) สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ ที่สามารถแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โครงสร้างของระบบประกอบด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ EU9-RC18B ทำหน้าที่ตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า สื่อสารผ่านโปรโตคอล Modbus RTU บนสายส่ง RS-485 กับโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ Siemens S7-1200 โดยใช้โมดูล CB1241 RS-485 เป็นช่องทางสื่อสาร พีแอลซีทำหน้าที่ประมวลผลค่าตัวประกอบกำลังและตัดสินใจสับ-ปลดชุดคาปาซิเตอร์ชดเชยจำนวน 4 ขั้น โดยมีการพัฒนา Web Server ด้วย Node.js เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลเรียลไทม์และสลับโหมดการทำงานระหว่างอัตโนมัติและควบคุมด้วยมือผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ผลการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน Metrix PX110 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และค่าตัวประกอบกำลังอยู่ที่ร้อยละ 0.74, 2.4, 2.9 และ 5.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบที่สภาวะโหลดต่าง ๆ พบว่าระบบสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจากค่าเริ่มต้น 0.75 ให้เพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 0.95 ได้ตรงตามขอบเขตเป้าหมายในทุกกรณีทดสอบ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ส่งผ่านเว็บเบราว์เซอร์ไม่เกินร้อยละ 1.29 ซึ่งยืนยันว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับใช้เป็นต้นแบบในการเรียนการสอนและการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก

คำสำคัญ: ตัวประกอบกำลัง, การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ, พีแอลซี, Modbus RTU, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This paper presents the design and implementation of a Power Factor Correction (PFC) simulator for a single-phase 50 Hz power system, featuring remote monitoring and control via a web browser. The system architecture comprises an EU9-RC18B power meter for electrical parameter measurement, communicating via Modbus RTU over RS-485 with a Siemens S7-1200 Programmable Logic Controller (PLC) through a CB1241 RS-485 communication module. The PLC processes the measured power factor and switches a four-step capacitor bank to compensate the reactive power. A Node.js-based web server

was developed to provide real-time data visualization and mode switching between automatic and manual control through the internet. Calibration against the Metrix PX110 reference meter shows that the maximum measurement errors of voltage, current, active power, and power factor are 0.74%, 2.4%, 2.9%, and 5.5%, respectively. Functional tests under various load conditions demonstrate that the proposed system can improve the power factor from an initial value of 0.75 up to the range of 0.91 to 0.95, meeting the target range in every test case. The communication error of data transmitted to the browser does not exceed 1.29%, confirming the accuracy and reliability of the developed system as a suitable prototype for educational and small-scale industrial applications.

Keywords: Power Factor, Reactive Power Compensation, PLC, Modbus RTU, Internet of Things

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังภาคอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์มักประสบปัญหาค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor; PF) ต่ำ อันเนื่องมาจากการใช้งานโหลดประเภทเหนี่ยวนำ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัลลาสต์ของหลอดปล่อยประจุ ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบสายส่ง แรงดันตกที่ปลายสาย และที่สำคัญ ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำกว่าเกณฑ์ที่การไฟฟ้ากำหนดจะต้องชำระค่าปรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในอัตรา 56.07 บาทต่อกิโลวาร์ [1]

การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ในระบบที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การเลือกใช้คาปาซิเตอร์ขนาดคงที่จะไม่สามารถรักษาค่าตัวประกอบกำลังให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถสับ-ปลดคาปาซิเตอร์ตามสภาวะโหลดจริง

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller; PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมที่นิยมใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกผ่านโปรโตคอลมาตรฐาน เช่น Modbus RTU [2] นอกจากนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและควบคุมระบบไฟฟ้าจากระยะไกลได้สะดวกยิ่งขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาวงจรชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟภายในบ้านพักอาศัย [3] หรือการสร้างชุดทดลองเพื่อการเรียนการสอนโดยใช้การควบคุมแบบรีเลย์เดิม [4] แต่ยังขาดการบูรณาการระหว่างระบบควบคุมระดับอุตสาหกรรมและการแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ในชุดเดียวกัน

บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่บูรณาการระหว่างเพาเวอร์มิเตอร์อุตสาหกรรม EU9-RC18B กับพีแอลซี Siemens S7-1200 ผ่านการสื่อสารแบบ Modbus RTU บนสาย RS-485 พร้อมพัฒนาส่วนแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ด้วย

Node.js โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1.สร้างต้นแบบที่ใช้งานได้จริงสำหรับการเรียนการสอนสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังและระบบควบคุมอัตโนมัติ 2.ทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังภายใต้สภาวะโหลดที่แตกต่างกัน และ 3.ตรวจสอบความถูกต้องของการสื่อสารข้อมูลผ่านเว็บเบราว์เซอร์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปรียบเทียบระบบ PFC แบบดั้งเดิมกับระบบที่นำเสนอ

ค่าตัวประกอบกำลัง ($cos\theta$) ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง P (วัตต์) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ S (โวลต์-แอมแปร์) และขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ต้องใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_C เพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังจาก $cos\theta_1$ เป็น $cos\theta_2$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [1]

$$cos\theta = P / S = P / \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (1)$$

$$Q_C = P\ (tan\theta_1 - tan\theta_2) \quad (2)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าจริง หน่วยวัตต์, Q คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ หน่วยวาร์, Q_C คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ชดเชย หน่วยวาร์, และ θ_1, θ_2 คือ มุมของเพาเวอร์แฟกเตอร์ก่อนและหลังการชดเชย ตามลำดับ

ระบบปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถจำแนกได้เป็น 3 ระดับเทคโนโลยี ได้แก่1.การชดเชยแบบคงที่ (Fixed-Compensation) ซึ่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาดคงที่ขนานกับโหลด มีโครงสร้างเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ แต่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดการชดเชยตามสภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้ [3] 2.การชดเชยแบบสับ-ปลดด้วยมือผ่านวงจรรีเลย์หรือคอนแทกเตอร์ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องตรวจวัดและตัดสินใจสับ-ปลดเองทำให้เกิดความล่าช้าและขาดความยืดหยุ่นในระบบที่มีโหลดเปลี่ยนแปลงเร็ว [4] และ 3.การชดเชยแบบอัตโนมัติด้วยตัวควบคุมเฉพาะทาง (Automatic Power Factor Controller; APFC) [6] ซึ่งสามารถสั่งการสับ-ปลดคาปาซิเตอร์ตามค่าตัวประกอบกำลังที่ตรวจวัดได้ แต่โดยทั่วไปยังเป็นระบบปิด (Closed System) ที่ไม่รองรับการสื่อสารกับเครือข่ายภายนอก และมีข้อจำกัดในการเฝ้าติดตามและบันทึกข้อมูลย้อนหลัง

ระบบที่นำเสนอในบทความนี้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของระดับที่ 3 แต่ขยายขีดความสามารถด้วยการใช้พีแอลซีอุตสาหกรรม Siemens S7-1200 เป็นแกนกลางการประมวลผลแทนตัวควบคุม APFC สำเร็จรูป ร่วมกับเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่พัฒนาด้วย Node.js เพื่อให้สามารถเฝ้าติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ตารางที่ 1 สรุปการเปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบทั้ง 4 ระดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบ PFC ในระดับเทคโนโลยีต่าง ๆ

คุณลักษณะ	Fixed	Manual	APFC	ระบบที่เสนอ
ปรับตามโหลด	×	△	✓	✓
อัตโนมัติ	×	×	✓	✓
ควบคุมระยะไกล	×	×	×	✓
บันทึกข้อมูล	×	×	△	✓
แก้ไขโปรแกรม	×	×	△	✓

หมายเหตุ: ✓ = รองรับ, △ = บางส่วน, × = ไม่รองรับ

จากตารางที่ 1 ระบบที่นำเสนอครอบคลุมข้อจำกัดของระบบ APFC แบบเดิมในประเด็นการควบคุมและเฝ้าติดตามจากระยะไกลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ และความยืดหยุ่นในการแก้ไขโปรแกรมควบคุมผ่านซอฟต์แวร์ TIA Portal โดยไม่ต้องเปลี่ยนฮาร์ดแวร์

2.2 การสื่อสาร Modbus RTU บนสาย RS-485

Modbus RTU เป็นโปรโตคอลสื่อสารแบบอนุกรมที่ใช้กันแพร่หลายในระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม รูปแบบการสื่อสารเป็นแบบ Master-Slave โดยอุปกรณ์ Master สามารถอ่านและเขียนค่ารีจิสเตอร์ของอุปกรณ์ Slave ผ่านฟังก์ชันโค้ดที่กำหนด เช่น ฟังก์ชัน 0x03 สำหรับการอ่าน Holding Register และ 0x10 สำหรับการเขียนหลายรีจิสเตอร์พร้อมกัน [5] ในงานวิจัยนี้พีแอลซีทำหน้าที่เป็น Master ส่วนเพาเวอร์มิเตอร์ทำหน้าที่เป็น Slave โดยใช้พารามิเตอร์การสื่อสาร 9,600 bps, 8 data bits, no parity, 1 stop bit ตามคุณลักษณะเฉพาะของเพาเวอร์มิเตอร์

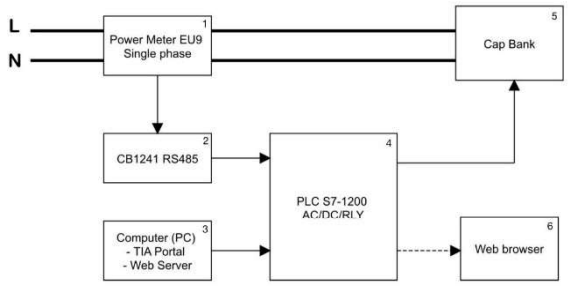
2.3 การพัฒนาเว็บเซิร์ฟเวอร์และการสื่อสารกับพีแอลซี

เว็บเซิร์ฟเวอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างพีแอลซีกับผู้ใช้งานตามสถาปัตยกรรมแบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์ ในงานวิจัยนี้พัฒนาเซิร์ฟเวอร์ด้วย Node.js ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมการทำงานของจาวาสคริปต์ฝั่งเซิร์ฟเวอร์ จุดเด่นของ Node.js คือการประมวลผลแบบไม่ปิดกั้น (Non-blocking I/O) จึงรองรับการร้องขอข้อมูลจากผู้ใช้หลายรายพร้อมกันได้ดี การเชื่อมต่อกับพีแอลซีใช้โปรโตคอล S7 Communication ซึ่งทำงานบนมาตรฐาน ISO-on-TCP ตาม RFC 1006 ผ่านพอร์ต TCP หมายเลข 102 โดยอาศัยไลบรารี nodes7 ในการอ่านและเขียนค่าตัวแปรในหน่วยความจำของพีแอลซีโดยตรง ด้านการให้บริการผู้ใช้ เซิร์ฟเวอร์เปิด HTTP Server เพื่อส่งหน้าเว็บที่สร้างด้วย HTML, CSS และ JavaScript ไปยังเว็บเบราว์เซอร์ และปรับค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าให้เป็นปัจจุบันแบบเรียลไทม์ การเข้าถึงระบบจากภายนอกเครือข่ายท้องถิ่นทำได้ผ่านบริการ Dynamic DNS (DDNS) ร่วมกับการส่งต่อพอร์ต ทำให้ผู้ใช้เฝ้าติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกลผ่านอินเทอร์เน็ตได้

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สถาปัตยกรรมของระบบ

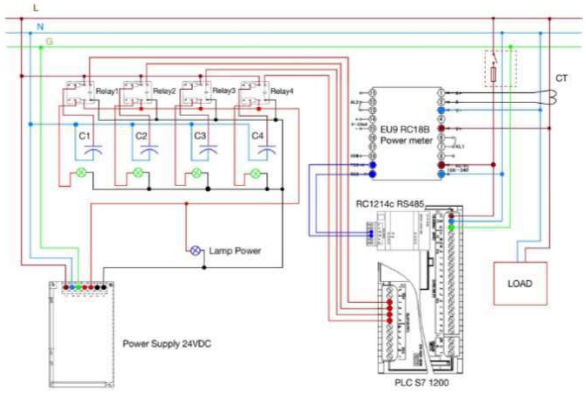
โครงสร้างการทำงานของชุดจำลองแสดงในรูปที่ 1 ระบบประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน คือ 1.ส่วนตรวจวัด ใช้เพาเวอร์มิเตอร์ EU9-RC18B ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่าตัวประกอบกำลัง 2.ส่วนประมวลผลและควบคุม ใช้พีแอลซี Siemens S7-1200 (CPU 1214C AC/DC/RLY) ร่วมกับโมดูลสื่อสาร CB1241 RS-485 และ 3.ส่วนแสดงผลและควบคุมระยะไกล พัฒนาเป็น Web Server ด้วย Node.js โดยใช้ภาษา HTML, CSS และ JavaScript สำหรับส่วนติดต่อผู้ใช้ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟใช้คาปาซิเตอร์ 4 ขั้น (CAP1–CAP4) ที่ควบคุมการสับ-ปลดด้วยรีเลย์ 24 VDC



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบโดยรวม

3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

วงจรของชุดจำลองรับไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว 230 โวลต์ ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักเพื่อการป้องกันกระแสไฟฟ้าในวงจรถูกตรวจวัดด้วยหม้อแปลงกระแส (CT) ขนาด 100/5 แอมแปร์ และส่งสัญญาณกระแสทุติยภูมิเข้าสู่เพาเวอร์มิเตอร์ EU9-RC18B พร้อมกับสัญญาณแรงดันที่รับเข้ามาโดยตรง โดยในชุดต้นแบบนี้ได้ใช้หลอดไฟแสดงสถานะแทนการต่อคาปาซิเตอร์จริง เพื่อให้ปลอดภัยและสะดวกในการสาธิตการทำงานของระบบควบคุม รีเลย์ 24 VDC ทั้ง 4 ตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อชุดคาปาซิเตอร์ตามคำสั่งจากพีแอลซี



รูปที่ 2 วงจรรวมของชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

3.3 การสื่อสารระหว่างพีแอลซีและเพาเวอร์มิเตอร์

การสื่อสารระหว่างพีแอลซีและเพาเวอร์มิเตอร์ดำเนินการผ่านโปรแกรม TIA Portal โดยใช้บล็อกฟังก์ชัน MB_COMM_LOAD เพื่อกำหนดพารามิเตอร์การสื่อสารเริ่มต้น และฟังก์ชัน MB_MASTER เพื่อร้องขอข้อมูลจากเพาเวอร์มิเตอร์อย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่ได้รับเป็นข้อมูลแบบมาตรฐาน IEEE-754 (Double Word) จึงต้องใช้คำสั่ง SWAP เพื่อจัดเรียงลำดับไบต์ใหม่ และคำสั่ง CONV เพื่อแปลงเป็นจำนวนจริง (Real) ก่อนนำไปประมวลผลต่อ

3.4 อัลกอริทึมการควบคุมและการพัฒนาเว็บเซิร์ฟเวอร์

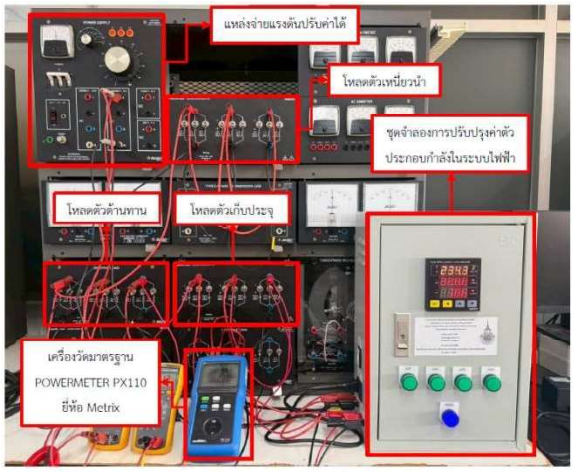
การกำหนดขอบเขตเป้าหมายของค่าตัวประกอบกำลังไว้ที่ช่วง 0.90 ถึง 0.95 พิจารณาจากสองเงื่อนไขหลัก เงื่อนไขแรกคือเกณฑ์ค่าปรับของการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 ถึง 7 จะถูกเรียกเก็บค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เมื่อความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเกินร้อยละ 61.97 ของความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเทียบเท่ากับค่าตัวประกอบกำลังต่ำกว่า 0.85 [1] การควบคุมให้สูงกว่า 0.85 จึงทำให้พ้นเกณฑ์การปรับ เงื่อนไขที่สองคือการหลีกเลี่ยงการชดเชยเกิน ระบบใช้คาปาซิเตอร์แบบสับ-ปลดจำนวน 4 ขั้น จึงปรับค่าได้เป็นช่วงแบบไม่ต่อเนื่อง การตั้งเป้าให้เข้าใกล้ 1.0 เพิ่มความเสี่ยงที่จะชดเชยเกินจนค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า และอาจทำให้แรงดันที่ปลายสายสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ช่วง 0.90 ถึง 0.95 จึงเป็นค่าที่ตัวควบคุมเพาเวอร์แฟกเตอร์อัตโนมัติในทางปฏิบัตินิยมตั้งไว้ เพราะรักษาระยะห่างที่ปลอดภัยเหนือเกณฑ์การปรับและลดโอกาสการชดเชยเกินจากการปรับแบบขั้น

ระบบควบคุมในโหมดอัตโนมัติแบ่งระดับการทำงานของคาปาซิเตอร์ออกเป็น 4 ช่วงตามค่าตัวประกอบกำลังที่อ่านได้ ดังนี้: 0.75 ≤ PF < 0.80 สั่งให้ CAP1 ทำงาน; 0.80 ≤ PF < 0.85 สั่งให้ CAP1–CAP2 ทำงาน; 0.85 ≤ PF < 0.90 สั่งให้ CAP1–CAP3 ทำงาน; และ 0.90 ≤ PF ≤ 0.95 สั่งให้ CAP1–CAP4 ทำงาน ระบบใช้เวลาหน่วง 5 วินาทีก่อนวนรอบใหม่เพื่อรักษาเสถียรภาพและป้องกันการตัดต่อซ้ำซ้อน

4. ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 การปรับเทียบความแม่นยำของเครื่องวัด

การปรับเทียบความแม่นยำดำเนินการโดยเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จากชุดจำลองกับค่าจากเครื่องวัดมาตรฐาน Metrix POWER METER PX110 ภายใต้สภาวะโหลดสามประเภท คือ ตัวต้านทาน (R), ตัวต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ (R-L) และตัวต้านทานต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ (R-C) ผลการปรับเทียบสรุปดังตารางที่



รูปที่ 3 การทดสอบและปรับเทียบความแม่นยำของเครื่องวัด

ตารางที่ 2 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากการปรับเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด (%)
แรงดันไฟฟ้า (V)	V	0.74
กระแสไฟฟ้า (I)	A	2.40
กำลังไฟฟ้าจริง (P)	W	2.90
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)	Var	6.80
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)	VA	3.60
ตัวประกอบกำลัง (PF)	-	5.50

ผลจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า โดยเฉพาะค่าแรงดันไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.74 ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟพบความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 6.8 ในกรณีของโหลด R-L ที่ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่พบได้ทั่วไปของหม้อแปลงกระแสและอุปกรณ์ตรวจวัดเมื่อทำงานที่มุมเฟสใกล้ ±90 องศา

4.2 ความแม่นยำของการสื่อสารผ่านเว็บเบราว์เซอร์

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่แสดงบนเว็บเบราว์เซอร์กับค่าที่อ่านจากเพาเวอร์มิเตอร์โดยตรง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทุกพารามิเตอร์ไม่เกินร้อยละ 1.29 ซึ่งยืนยันว่าโครงสร้างการสื่อสารระหว่าง PLC, Node.js Server และเว็บเบราว์เซอร์มีความเสถียรเพียงพอสำหรับการเฝ้าติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกล



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงผลและลักษณะการส่งค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์

4.3 สมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

การทดสอบสมรรถนะของระบบในโหมดอัตโนมัติดำเนินการที่ค่าตัวประกอบกำลังเริ่มต้น 4 ระดับ คือ 0.75, 0.80, 0.85 และ 0.89 ผลการทดสอบสรุปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในโหมดอัตโนมัติ

กรณี	PF ก่อน	Q ก่อน (Var)	ขั้น CAP	Q หลัง (Var)	PF หลัง
1	0.75	228.5	CAP1–CAP4	98.1	0.93
2	0.80	196.1	CAP1–CAP3	83.7	0.95
3	0.85	160.2	CAP1–CAP2	94.7	0.94
4	0.89	128.6	CAP1	80.4	0.95

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังให้เข้าสู่ขอบเขตเป้าหมาย 0.90–0.95 ได้ในทุกกรณีทดสอบ โดยเลือกจำนวนขั้นของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมกับสภาวะโหลด สำหรับการทดสอบในโหมดควบคุมด้วยมือ ระบบสามารถตอบสนองต่อคำสั่งสับ-ปลดคาปาซิเตอร์จากผู้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างถูกต้องและทันท่วงที

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่บูรณาการระหว่างเพาเวอร์มิเตอร์ EU9-RC18B PLC Siemens S7-1200 และเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่พัฒนาด้วย Node.js ผลการสอบเทียบความแม่นยำกับเครื่องวัดมาตรฐาน Metrix PX110 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของพารามิเตอร์หลักอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสามารถทำได้ในช่วง 0.91–0.95 ตรงตามเป้าหมายในทุกกรณีทดสอบ การสื่อสารข้อมูลผ่านเว็บเบราว์เซอร์มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1.29 ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะสมสำหรับเป็นต้นแบบในการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังและระบบควบคุมอัตโนมัติ รวมถึงสามารถต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กได้ การพัฒนาในอนาคตควรขยายขอบเขตไปสู่ระบบไฟฟ้า 3 เฟส และเพิ่มฟังก์ชันการจัดเก็บข้อมูลย้อนหลังเพื่อการวิเคราะห์เชิงสถิติ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ABB. Technical Application Papers No. 8: Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants. ABB.

[2] Siemens AG. (2018). SIMATIC S7 S7-1200 Programmable Controller: System Manual. Nuremberg, Germany: Siemens AG.

[3] ชาญณรงค์ ดิษฐอ่วม และ บรรจง มะลิวัลย์. (2552). การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน. ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[4] เฉลียว เกตุแก้ว. (2556). การออกแบบชุดการเรียนรู้การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า. รายงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

[5] Modbus Organization. (2006). MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02. North Grafton, MA: Modbus Organization, Inc.

[6] ศุภกร ต้นสุภาวุฒิ และ อนุชัย จันทร์วงค์. (2552). เครื่องปรับค่าตัวประกอบกำลังขนาดเล็กเพื่อประยุกต์ใช้กับที่อยู่อาศัยขนาดครัวเรือน. ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[7] IEEE. (2010). IEEE Std 1459-2010: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. New York, NY: IEEE.

เครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษา กรณีศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

A Microcontroller-Controlled Fingerprint Scanner for Student Attendance Verification : A Case Study in Electrical Engineering

เกษม เนื้อแก้ว*, กฤษณะ สุขา, วัชรพงษ์ กงไกล, อภิรักษ์ ลุนเดชา, อภิวัฒน์ อัศวเมฆิน, วิไลพร เงินบาท และเทียนทอง ยวงแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: kasem.nu@rmuti.ac.th, 043-283700

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ และสร้างเครื่องสแกนลายนิ้วมือ สำหรับตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษา และแจ้งเตือนผลการเข้าเรียนผ่านระบบออนไลน์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการข้อมูลการเข้าเรียน และลดภาระงานของบุคลากรทางการศึกษา ระบบนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลข้อมูลลายนิ้วมือ หรือไอดีของนักศึกษา โดยข้อมูลนักศึกษาทั้งหมดจะถูกจัดเก็บ และดึงข้อมูลจากกูเกิลชีต ซึ่งเป็นฐานข้อมูลบนคลาวด์ที่มีความยืดหยุ่น และเข้าถึงได้ง่าย เมื่อนักศึกษาทำการสแกนลายนิ้วมือ ระบบจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล หากข้อมูลถูกต้องระบบจะบันทึกเวลาเข้าเรียน และแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดีของเครื่องสแกนลายนิ้วมือ พร้อมทั้งส่งการแจ้งเตือนไปยังนักศึกษาผ่านช่องทางออนไลน์ที่กำหนดไว้ ระบบนี้มีความแม่นยำสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ จากกลุ่มตัวอย่าง 10 คน จำนวน 100 ครั้ง

คำสำคัญ: ระบบควบคุม เครื่องสแกนลายนิ้วมือ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This article presents design and constructs a fingerprint scanner for student attendance monitoring and online notification. The system aims to enhance the efficiency of attendance data management and reduce the workload of educational personnel. This system utilizes a high-performance microcontroller to process fingerprint data or student IDs entered via a keypad. All student information is stored in and retrieved from Google Sheets, serving as a flexible and accessible cloud-based database. Upon a student scanning their fingerprint, the system verifies the data and cross-references it with the database. If the information is a match, the system records the attendance time, displays the result on the scanner's LCD screen, and simultaneously sends a notification to the student via a designated online channel. This system has a high accuracy rate of 100 percent, based on a sample ground of 10 people performing 100 tests.

Keywords: Control system, Fingerprint scanner, Microcontroller.

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน รวมถึงในภาคการศึกษา ระบบตรวจสอบการเข้าร่วมการเรียนการสอนของนักศึกษาเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ต้องการความถูกต้อง และแม่นยำ แต่ในหลายสถาบันยังใช้วิธีการลงชื่อหรือบันทึกข้อมูลแบบแมนนวล ซึ่งอาจมีข้อผิดพลาดหรือถูกปลอมแปลงข้อมูลได้ง่าย ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของความโปร่งใส และประสิทธิภาพในการบันทึกการเข้าเรียน ดังนั้น ทีมผู้จัดทำจึงได้พัฒนาโครงการที่นำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษา โดยใช้เครื่องสแกนลายนิ้วมือร่วมกับระบบแจ้งเตือนออนไลน์ ระบบนี้ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ ได้แก่ โมดูลสแกนลายนิ้วมือ, บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และจอแอลซีดี ซึ่งทำหน้าที่บันทึก และแสดงผลข้อมูลการเข้าเรียนของนักศึกษา ส่วนซอฟต์แวร์จะใช้กูเกิลสเปรดชีตเป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับจัดเก็บข้อมูลการเข้าเรียน และส่งการแจ้งเตือนไปยังนักศึกษาแบบเรียลไทม์

ข้อดีของระบบนี้คือ ช่วยเพิ่มความแม่นยำ และลดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล ลดโอกาสในการปลอมแปลงลายเซ็นหรือการให้เพื่อนช่วยลงชื่อแทน รวมถึงช่วยให้การประมวลผลข้อมูลเป็นไปอย่างรวดเร็ว และสะดวกมากยิ่งขึ้น อาจารย์สามารถตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษาได้ทันทีผ่านฐานข้อมูลออนไลน์ ในขณะที่นักศึกษาสามารถตรวจสอบสถานะการเข้าเรียนของตนเองผ่านการแจ้งเตือนทางออนไลน์ ซึ่งช่วยเพิ่มความโปร่งใส และเป็นหลักฐานยืนยันการเข้าร่วมการเรียนการสอนได้อย่างชัดเจน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำเครื่องสแกนลายนิ้วมือเพื่อตรวจสอบการเข้าเรียนและแจ้งเตือนผ่านออนไลน์ คณะผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ แนวคิด ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลต่างๆที่มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ มาประยุกต์ใช้ในการจัดทำงานวิจัย ดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องสแกนลายนิ้วมือ สำหรับระบบสมาร์ตโฮม งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนลายนิ้วมือเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในระบบสมาร์ตโฮม โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวล็อกประตู และระบบไฟฟ้า ระบบจะอ่านภาพลายนิ้วมือ แปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล และมีการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันเมื่อการเข้าสู่ระบบล้มเหลว ช่วยเพิ่มความปลอดภัย และอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน

2.2 ระบบตรวจสอบการเข้าเรียนของนักศึกษาด้วยลายนิ้วมือ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์เพื่อจัดการข้อมูลการเข้าเรียน โดยระบบสามารถบันทึกลายนิ้วมือ ภาพถ่าย เวลาเรียน และคะแนนสอบได้ อาจารย์สามารถจัดการรายวิชาได้สะดวก ในขณะที่ผู้ปกครองสามารถตรวจสอบสถานะการเข้าเรียนผ่านเว็บไซต์ได้ ระบบนี้ช่วยลดข้อผิดพลาดในการคำนวณเวลาเรียน และคะแนน ทำให้การบริหารจัดการชั้นเรียนมีประสิทธิภาพ และแม่นยำมากขึ้น

จากบทสรุปงานวิจัยทั้ง 2 เรื่อง เทคโนโลยีหลักที่ใช้ร่วมกันอย่างชัดเจนที่สุดคือ เทคโนโลยีการสแกนลายนิ้วมือ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีไบโอเมทริกซ์ (Biometrics) หรือชีวภาพ

3. การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมเครื่องสแกนลายนิ้วมือมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำเทคโนโลยีทางชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในการระบุและยืนยันอัตลักษณ์บุคคลอย่างถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากลายนิ้วมือเป็นข้อมูลเฉพาะบุคคลที่ไม่อาจลอกเลียนแบบได้ จึงช่วยแก้ปัญหาการแอบอ้างสิทธิ์หรือการทุจริตได้อย่างเป็นรูปธรรม

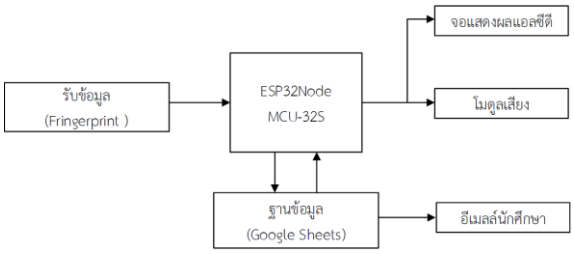
การทำงานของระบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถอธิบายโครงสร้างและกระบวนการทำงานของแต่ละส่วนประกอบได้ดังนี้

1) ส่วนรับข้อมูล แหล่งรวบรวมข้อมูล เป็นส่วนเริ่มต้นของกระบวนการทำงาน ทำหน้าที่รับข้อมูลทางชีวมิติ (Biometric Data) จากผู้ใช้งาน ซึ่งในระบบนี้คือโมดูลสแกนลายนิ้วมือ โดยอุปกรณ์จะทำการอ่านลักษณะเฉพาะของลายนิ้วมือ แปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล และส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผลกลางเพื่อทำการตรวจสอบ และยืนยันตัวตนต่อไป

2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการทำงานของระบบ โดยทำหน้าที่รับข้อมูลที่ส่งมาจากแหล่งรวบรวมข้อมูล นำมาประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่ถูกบันทึกไว้ในระบบ นอกจากนี้ ESP32 ยังทำหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์แสดงผล และอุปกรณ์แจ้งเตือน รวมถึงใช้ความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Wi-Fi) แบบไร้สาย เพื่อสื่อสาร และรับส่งข้อมูลกับฐานข้อมูลบนระบบคลาวด์

3) ส่วนแสดงผลและแจ้งเตือน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สื่อสาร และแสดงสถานะการทำงานของระบบให้ผู้ใช้งานทราบ ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ได้แก่ จอแสดงผลแอลซีดี (LCD Display) ทำหน้าที่แสดงข้อความสถานะการทำงานของเครื่อง เช่น สถานะพร้อมใช้งาน ผลการสแกนลายนิ้วมือ ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ใช้งาน หรือเวลาปัจจุบัน เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบผลการปฏิบัติงานได้ในทันที โมดูลเสียง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเสียงแจ้งเตือนเพื่อสนับสนุนการแสดงผลทางหน้าจอ โดยจะส่งเสียงเมื่อผู้ใช้งานทำการสแกนลายนิ้วมือ และการแจ้งเตือนผู้ใช้ผ่านจีเมล

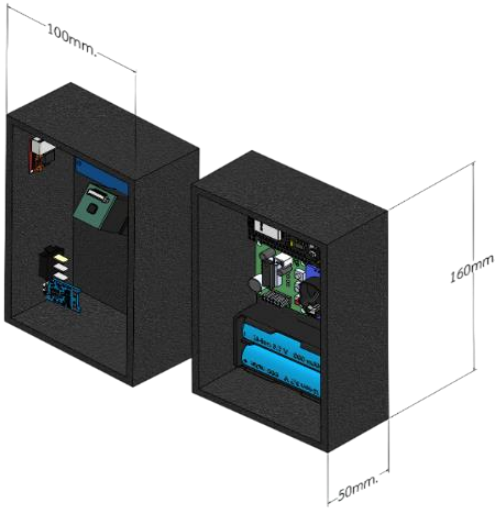
4) ส่วนการจัดการข้อมูลและการแจ้งเตือนระยะไกล (Database and Remote Notification Unit) ฐานข้อมูล (Google Sheets) ทำหน้าที่เป็นระบบฐานข้อมูลหลักในการจัดเก็บข้อมูลการบันทึกเวลาเข้าเรียน โดยทำงานร่วมกับ ESP32 ผ่านการเชื่อมต่อเครือข่าย เมื่อการยืนยันตัวตนสำเร็จ ระบบจะส่งข้อมูล (เช่น รหัสนักศึกษา เวลาที่บันทึก) ไปจัดเก็บลงในฐานข้อมูลแบบเรียลไทม์ และระบบยังสามารถดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลกลับมายัง ESP32 เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรม
การออกแบบระบบการทำงาน

4. การออกแบบโครงสร้าง

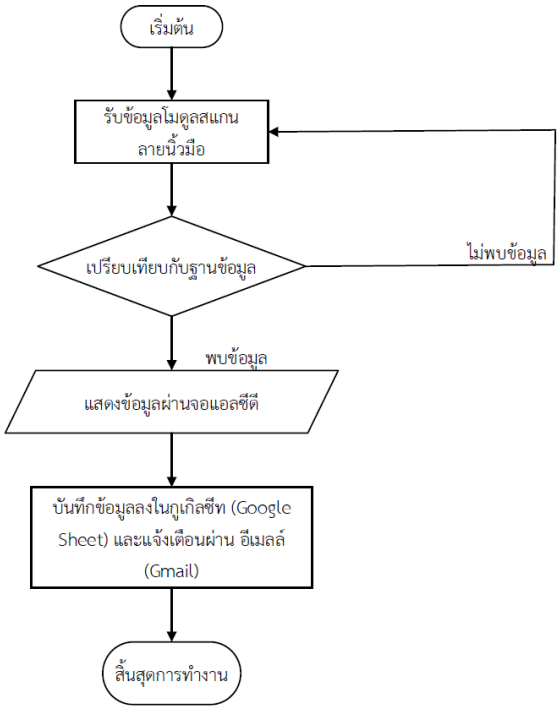
การออกแบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอลโทรลเลอร์โดยใช้โปรแกรมในการออกแบบเป็นรูปแบบสามดี (3D) โดยเลือกใช้โปรแกรม Autodesk Inventor Professional 2025 ในการออกแบบ โดยชิ้นงานมีขนาด 100x160 มิลลิเมตร สามารถเห็นการจัดวางอุปกรณ์ภายในพื้นที่อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือ

5. การออกแบบโปรแกรมควบคุม

การออกแบบซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบประมวลผลเพื่อรองรับการใช้งานใน 2 สถานการณ์ ได้แก่ กรณีที่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (ออนไลน์) และกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (ออฟไลน์) เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และป้องกันการสูญหายของข้อมูล โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 3 (กรณีออนไลน์)



รูปที่ 3 แผนผังการดำเนินการของซอฟต์แวร์กรณีที่ออนไลน์

6. การทดสอบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบได้ถูกแบ่งออกเป็นการทดสอบอย่างเป็นระบบ โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ เน้นการทดสอบความแม่นยำ และความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเครื่องสแกนลายนิ้วมือ การรองรับข้อมูลผู้ใช้งานสูงสุด 1,000 รายการ การแสดงผลผ่านจอแอลซีดี รวมถึงระบบพลังงานสำรองที่รองรับการใช้งานต่อเนื่องไม่เกิน 8 ชั่วโมง สำหรับระบบออนไลน์ได้ทำการทดสอบเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อบันทึกลงกูเกิลสเปรดชีต และความแม่นยำในการแจ้งเตือนผ่านอีเมล โดยรายละเอียดผลการทดสอบแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

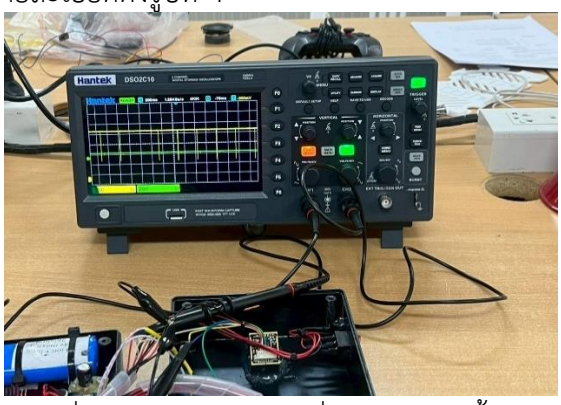
1) การทดสอบโมดูลสแกนลายนิ้วมือรุ่น AS608

2) การทดสอบโมดูลลดระดับแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Step Down Converter)

3) การทดสอบการทำงานของเครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

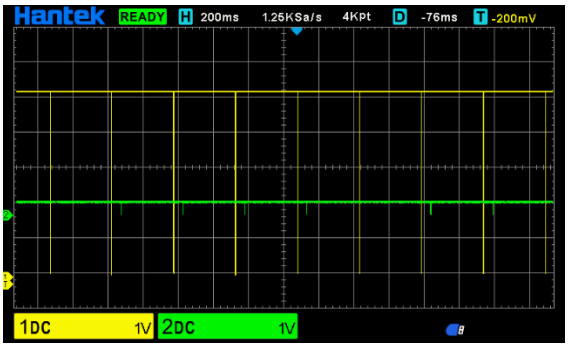
1) การทดสอบโมดูลสแกนลายนิ้วมือ รุ่น AS608)

การทดสอบโมดูลสแกนลายนิ้วมือมีจุดประสงค์หลักเพื่อหาประสิทธิภาพด้านความถูกต้อง และระยะเวลาในการประมวลผล เนื่องจากระบบบันทึกเวลาปฏิบัติงานต้องการความรวดเร็ว และสามารถป้องกันการปลอมแปลงบุคคลได้ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจสอบคุณลักษณะของสัญญาณไฟฟ้า เพื่อประเมินอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลและความเสถียรของการใช้พลังงาน ผลลัพธ์จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ตอบสนองได้อย่างสมบูรณ์ โดยขั้นตอนการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ มีรายละเอียดดังรูปที่ 4



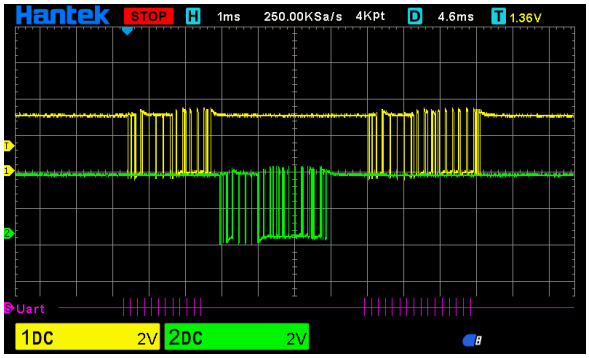
รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบเครื่องสแกนลายนิ้วมือใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) จับที่ขา Tx และ Rx โดยที่ใช้สายช่องที่1 จับที่ Tx และกราวด์ สายช่องที่2 จับที่ Rx และกราวด์

การวัดสัญญาณก่อน และหลังการวางนิ้ว การทดสอบสภาวะการทำงานของโมดูลสแกนลายนิ้วมือ ดังรูปที่ 5 พบว่าในสภาวะรอรับคำสั่ง (Idle) ก่อนการวางนิ้ว สัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่ที่ระดับลอจิกสูง (High) และลดลงมาที่ระดับลอจิกต่ำ (Low) ประมาณ 13 ครั้งต่อวินาที เนื่องจากการส่งสัญญาณตรวจสอบสถานะอย่างต่อเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และเมื่อสิ้นสุดการประมวลผลพร้อมทั้งยกนิ้วออก ระบบจะเข้าสู่โหมดพักการทำงาน (Standby) โดยสัญญาณจะกลับคืนสู่ระดับลอจิกสูงอย่างคงที่ เพื่อหยุดการสื่อสาร และรอการสแกนในครั้งต่อไป



รูปที่ 5 กราฟสัญญาณของโมดูลสแกนลายนิ้วมือทดสอบการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการรับ-ส่งข้อมูล (ก่อนและหลังวางนิ้ว)

การวัดสัญญาณขณะวางนิ้วค้างไว้ การทดสอบวัดสัญญาณที่ขา Tx และ Rx ด้วยฟังก์ชันถอดรหัสบัส (Bus Decode) ของออสซิลโลสโคป ขณะวางนิ้วค้างไว้ ดังรูปที่ 6 พบการสื่อสารข้อมูล 3 ขั้นตอน เริ่มจากรูปคลื่นสัญญาณ CH1 (สีเหลืองด้านซ้าย) ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32) ได้ส่งคำสั่งให้โมดูลเริ่มจับภาพลายนิ้วมือ จากนั้นโมดูลจะประมวลผลและตอบกลับผ่านสัญญาณ CH2 (สีเขียวตรงกลาง) ซึ่งมีลักษณะพัลส์ (Pulse) ที่หนาแน่นเพื่อยืนยันการสัมผัส และรายงานสถานะ เนื่องจากยังมีการวางนิ้วค้างไว้ ESP32 จึงดำเนินการส่งคำสั่งชุดถัดไปผ่านสัญญาณ CH1 (สีเหลืองด้านขวา) เพื่อดึงข้อมูลลักษณะเฉพาะและนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลต่อไป



รูปที่ 6 กราฟสัญญาณของโมดูลสแกนลายนิ้วมือเซ็นเซอร์ตรวจพบการสัมผัสของนิ้วมือ และรับ-ส่งข้อมูล (วางนิ้วค้าง)

เริ่มการทดสอบสแกนลายนิ้วมือ ให้นำนิ้วมือไปวางทาบที่เลนส์กระจกของเซ็นเซอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพและความแม่นยำในการใช้งานจริง เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติจากการทดสอบสแกนลายนิ้วมือกับกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานจำนวน 10 คน คนละ 10 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 100 ครั้ง เพื่อประเมินอัตราความสำเร็จ (Success Rate) ในการระบุตัวตน รวมถึงนำค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Confidence Score) มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรม เพื่อวัดระดับความเสถียรของระบบ และดูผลลัพธ์บนหน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์ ดังนี้

กรณีที่ 1 สแกนผ่าน (เป็นนิ้วมือที่บันทึกไว้แล้ว) หน้าจอจะแสดงลำดับการทำงานดังนี้

- ถ่ายภาพสำเร็จ (Image taken)
- แปลงภาพเป็นจุดตัดลาย (Image converted)
- ค้นพบข้อมูลที่ตรงกันในระบบ! (Found a print match!)
- จากนั้นจะบอกว่านิ้วมือนี้ตรงกับผู้ใช้ ไอดี หมายเลขอะไร (เช่น ID1) และมีความแม่นยำกี่เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบดังตารางที่ 1

กรณีที่ 2 สแกนไม่ผ่าน (เป็นนิ้วมือคนอื่น หรือนิ้วมือที่ไม่ได้บันทึก)

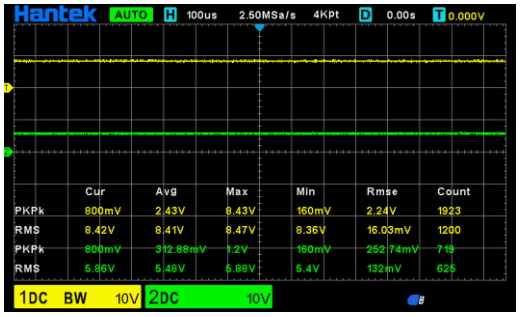
- ถ่ายภาพสำเร็จ (Image taken)
- แปลงภาพเป็นจุดตัดลาย (Image converted)
- ไม่พบข้อมูลที่ตรงกันในระบบ (Did not find a match)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการทดสอบ อีเอสพี32 ต่อร่วมกับโมดูลสแกนลายนิ้วมือ รุ่นเอเอส608

ลำดับ	ผู้ใช้	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่ผ่าน	จำนวนครั้งที่ผิดพลาด	ความแม่นยำ
1	นายอดิศร พิกาด	10	10	0	100%
2	นายปฏิภาณ ไชยยา	10	10	0	100%
3	นายรติพงษ์ ภูจำเริญ	10	10	0	100%
4	นายนครินทร์ ศรีจันทร์	10	10	0	100%
5	นายณัฐวุฒิ จันทะราช	10	10	0	100%
6	นายกฤษณะ สุขา	10	10	0	100%
7	นายรชานนท์ วารีย์	10	10	0	100%
8	นายพัชรพล บุกกลาง	10	10	0	100%
9	นายสุวรรณชาด พึ่งผล	10	10	0	100%
10	นายสุธิมนต์ ทวีลัย	10	10	0	100%
รวม		100	100	0	100%

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทำการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานจำนวน 10 คน คนละ 10 ครั้ง รวมการทดสอบทั้งสิ้น 100 ครั้ง พบว่าระบบมีอัตราความแม่นยำโดยรวมสูงถึง 100% โดยสามารถสแกน และระบุตัวตนได้ถูกต้องทั้งหมด 100 ครั้ง และไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเลยจากการทดสอบ ผู้ใช้งานทุกคนสามารถสแกนผ่านได้อย่างสมบูรณ์แบบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือที่พัฒนาขึ้นนี้มีความเสถียรสูง ทำงานได้แม่นยำ และพร้อมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) การทดสอบโมดูลลดระดับแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Step Down Converter) การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมดูลลดระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ โมดูลดังกล่าวอาศัยหลักการสวิตชิงเรกูเลชัน (Switching Regulation) ในการลดทอนแรงดันขาเข้า (Vin) ช่วง 6 ถึง 24 โวลต์ ให้เป็นแรงดันขาออก (Vout) ระดับ 5 โวลต์อย่างคงที่ การทดสอบมุ่งเน้นไปที่ความสามารถในการรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulation) และการตรวจสอบสัญญาณรบกวนขาออก เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ดิจิทัล ข้อมูลที่ได้จะนำมายืนยันความเสถียร และความปลอดภัยของระบบจ่ายพลังงาน ดังรูปที่ 7 ดูว่าแรงดังไฟฟ้า ขาเข้า 8 โวลต์ และขาออก 5 โวลต์ ได้มาตามที่ต้องการ



รูปที่ 7 กราฟสัญญาณของ DC-DC Step Down Converter ด้วยออสซิลโลสโคป

3) การทดสอบการทำงานของเครื่องสแกนลายนิ้วมือควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพ และสมรรถนะโดยรวมของระบบเครื่องสแกนลายนิ้วมือที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจำลองสถานการณ์การใช้งานจริงด้วยการให้ผู้ใช้งานสแกนลายนิ้วมือที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล

ผลการทดสอบการทำงานในสถานะออนไลน์ ดังรูปที่ 8 วัดความรวดเร็วและความถูกต้องของระบบในการประมวลผลและสื่อสารข้อมูล จากการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 รายชื่อ พบว่าระบบสามารถอ่านและประมวลผลลายนิ้วมือได้สำเร็จครบถ้วนทั้ง 10 รายการ โดยระบบสามารถบันทึกข้อมูลการสแกนลงในตารางกูเกิลชีตได้อย่างถูกต้องและเป็นปัจจุบัน (Real-time) พร้อมทั้งสามารถส่งข้อความแจ้งเตือน

ผ่านทางอีเมลไปยังผู้ใช้งานได้สำเร็จทุกรายการ และบันทึกผลดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 หน้าจอแสดงผลสถานะไวไฟ เอสดีการ์ด
เซ็นเซอร์ วันที่เวลา
และแบตเตอรี่ ขณะออนไลน์

ตารางที่ 2 ตารางการทดสอบเครื่องสแกนลายนิ้วมือแจ้งเตือนผ่านออนไลน์ ในกรณีอยู่ในสถานะออนไลน์

ลำดับที่	ชื่อกลุ่มตัวอย่าง	ผลการสแกนลาย	ผลการบันทึกข้อมูล (Google Sheets)	ผลการแจ้งเตือน (Gmail)	หมายเหตุ
1	นายอดิศร พิภาค	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
2	นายปฏิภาณ ไชยยา	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
3	นายรติพงษ์ ภูจำเริญ	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
4	นายนครินทร์ ศรีจันทร์	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
5	นายณัฐวุฒิ จันทะราช	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
6	นายกฤษณะ สุขา	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
7	นายรชานนท์ วารีย์	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
8	นายพัชรพล บุกกลาง	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
9	นายสุวรรณชาต พึ่งผล	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime
10	นายสุธิมนต์ ทวีลัย	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	Realtime

7. สรุปผลการทดลองโครงงาน

จากการทดสอบเครื่องสแกนลายนิ้วมือบันทึกเวลาเรียนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 พบว่าระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตเงื่อนไข โดยระบบเซนเซอร์ตรวจลายนิ้วมือมีความแม่นยำในการระบุตัวตนสูง ระบบจ่ายไฟฟ้าทำงานได้เสถียรภาพ ปลอดภัย และมีเสียงแจ้งเตือนการสแกนลายนิ้วมือที่ชัดเจน สำหรับการจัดการข้อมูลระบบสามารถบันทึกเวลาลง Google Sheets และส่งอีเมลแจ้งเตือนได้แบบเรียลไทม์เมื่อเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และหากอยู่ในสถานะออฟไลน์ ระบบจะบันทึกข้อมูลสำรองลง SD Card อย่างปลอดภัย พร้อมทั้งซิงค์ข้อมูลและส่งอีเมลย้อนหลังให้อัตโนมัติเมื่อกลับมาออนไลน์ สำหรับด้านพลังงาน แบตเตอรี่สามารถรองรับการใช้งานต่อเนื่องได้นานถึง 8 ชั่วโมง ซึ่งครอบคลุมหนึ่งวันทำการ และใช้เวลาชาร์จจนเต็มเพียง 2-3 ชั่วโมง จากผลการทดสอบทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้มีสมรรถนะอย่างสูง มีเสถียรภาพ และความปลอดภัย พร้อมนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับอุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลองนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กัลยาณี บรรจงจิตร, ทวีฤทธิ์ มานวกุล และวณิชย์ วิชญเศรณี. (2562). โปรแกรมเช็คชื่อนิสิตด้วยลายนิ้วมือ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] สมจินต์ จันทรเจษฎากร, ทัศพล บาลี และณรงค์ศักดิ์ ผลพระชัยกุล. (2564). ระบบตรวจสอบการลงทะเบียนของนักศึกษาด้วยความทรงจำ. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

[3] อรรถวิทย์โอฬาการรณรงค์, ประภาพิมแก้ว, และ อภินันท์ ธรรมธีระศิษฏ์. (2564). ระบบตรวจสอบการเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษาด้วยการเยี่ยมชมแบบออนไลน์. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร แม่สอด

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

Efficiency Enhancement of an Evaporative Air Cooler Using Thermoelectric Technology

วารุณี คชอาจ[1], สรายุทธ ฐิตะภาส[2] ,หอมหวน ตาสาโรจน์[3] และ สิทธิศักดิ์ เริงฤทธิ์[4,*]

[1-4] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000
*ผู้ติดต่อ: sittisak.ro@ksu.ac.th, 063-721-8998

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของพัดลมไอเย็น โดยการประยุกต์ใช้ระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Cooling) ร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำเย็น เพื่อเพิ่มสมรรถนะการลดอุณหภูมิอากาศภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โดยทำการดัดแปลงพัดลมไอเย็นขนาดความจุน้ำ 3 ลิตร และอัตราการไหลของอากาศ 300 m^3/h ให้ทำงานร่วมกับโมดูลเพลเทียร์ (Peltier Module) ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านหม้อน้ำขนาด 20×30 เซนติเมตร และชุดนำอากาศเข้า โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 20 แอมแปร์ การทดสอบประสิทธิภาพกระทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 35°C โดยบันทึกอุณหภูมิอากาศขาเข้า อุณหภูมิน้ำ อุณหภูมิหม้อน้ำ และอุณหภูมิอากาศขาออก ทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถลดอุณหภูมิน้ำจาก 28°C ลงเหลือประมาณ 12°C ภายในเวลา 30 นาที และสามารถรักษาอุณหภูมิหม้อน้ำเฉลี่ยไว้ที่ประมาณ 13.5°C ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศขาออกลดลงจาก 35°C เหลือ 24°C และมีความเสถียรต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับพัดลมไอเย็นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็น (Refrigerant-free) มีโครงสร้างระบบไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นระบบปรับอากาศขนาดเล็กที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, เพลเทียร์, พัดลมไอเย็น, การถ่ายเทความร้อน, การประหยัดพลังงาน

Abstract

This study aims to develop and enhance the efficiency of an evaporative air cooler by integrating a Thermoelectric Cooling system with a chilled water circulation system. The goal is to improve cooling performance specifically for Thailand's hot and humid climate. A standard evaporative cooler with a 3-liter water capacity and an airflow rate of 300 m^3/h was modified to operate with Peltier modules, a 20×30 cm radiator heat exchanger, and an air intake assembly, powered by a 12V 20A DC power supply. The system performance was evaluated under an ambient temperature of 35°C. Data including inlet air temperature, water temperature, radiator temperature, and outlet air temperature were recorded at 5-minute intervals over a 60-minute duration. The experimental results demonstrated that the system could reduce the water temperature from 28°C to approximately 12°C within 30 minutes, maintaining an average radiator temperature of 13.5°C. Consequently, the outlet air temperature was reduced from 35°C to approximately 24°C and remained stable throughout the testing period.

The findings indicate that the application of thermoelectric technology in evaporative coolers significantly enhances cooling capacity without the use of chemical refrigerants. The system features electrical simplicity and shows high potential for development into a portable, energy-efficient, and eco-friendly air conditioning solution

Keywords : Thermoelectric, Peltier, Evaporative Air Cooler, Heat Transfer, Energy Saving

1. บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีอุณหภูมิสูงตลอดทั้งปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ส่งผลให้ความต้องการใช้งานระบบทำความเย็นในภาคครัวเรือน ภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System) จะสามารถลดอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า ต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษาที่สูง รวมถึงการใช้สารทำความเย็นที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

พัดลมไอเย็น (Evaporative Air Cooler) เป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่าย ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ และอาศัยหลักการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) เพื่อลดอุณหภูมิของอากาศ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่เปิดหรือกึ่งเปิด อย่างไรก็ตาม พัดลมไอเย็นที่มีจำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่ใช้น้ำที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมเป็นตัวกลางในการระเหยความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นลดลงเมื่ออุณหภูมิน้ำสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย ผู้ใช้งานจำนวนมากจึงนิยมเติมน้ำแข็งลงในถังเก็บน้ำเพื่อช่วยเพิ่มความเย็น แม้ว่าวิธีดังกล่าวจะช่วยลดอุณหภูมิของลมได้ในระยะเวลาสั้น แต่ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเพิ่มค่าใช้จ่ายและความไม่สะดวกในการใช้งาน

เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Cooling Technology) หรือโมดูลเพลเทียร์ (Peltier Module) เป็นระบบทำความเย็นแบบสถานะของแข็งที่อาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ในการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยไม่ใช้สารทำความเย็น ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ และมีข้อดีด้านโครงสร้างกะทัดรัด เสียงรบกวนต่ำ และบำรุงรักษาง่าย อย่างไรก็ตาม หากนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ทำความเย็นอากาศโดยตรง ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่อมีภาระความร้อนสูง ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อลดอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าสู่ระบบพัดลมไอเย็น จึงเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการระเหย และสามารถรักษาประสิทธิภาพการทำความเย็นได้อย่างต่อเนื่อง

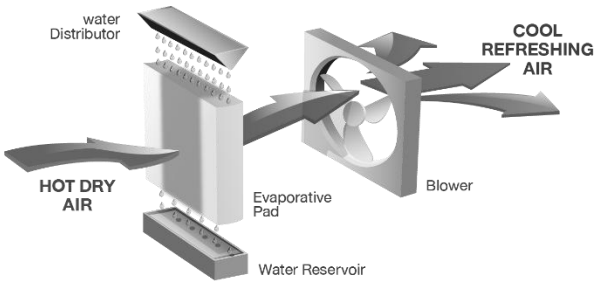
และจากการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด พบว่ายังมีการศึกษาที่มุ่งเน้นการควบคุมอุณหภูมิน้ำของพัดลมไอเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการประเมินสมรรถนะด้านการลดอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาพัดลมไอเย็นร่วมกับชุดทำน้ำเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของน้ำภายในระบบ และศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นร่วมกับชุดทำน้ำเย็นด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

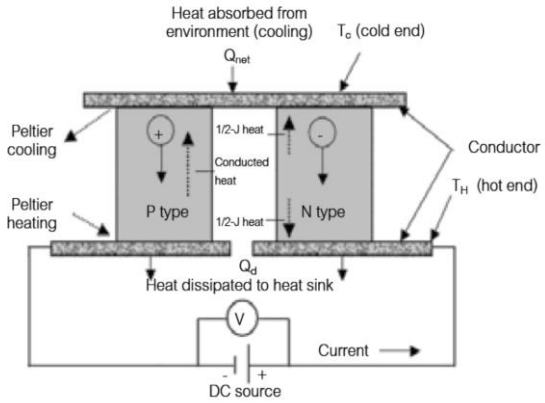
พัดลมไอเย็น (ฉ่ำมิ่งขวัญ, 2563) คือ พัดลมที่ทำงานผ่านระบบการระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ(Evaporative cooling) เป็นหลักการวิธีทางธรรม ชาติที่ใช้น้ำในการลดอุณหภูมิของอากาศ โดยการแบ่ง อนุภาคให้มีขนาดเล็ก เมื่ออากาศร้อนผ่าน

พื้นผิวน้ำ อากาศร้อนส่วนหนึ่งจะถูกน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าดูดความร้อน และน้ำบางส่วนได้รับความร้อนกลายเป็นไอผลที่ได้คือ อุณหภูมิอากาศร้อนจะลดลง แต่มีปริมาณไอน้ำในอากาศที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีหลักการทำงานของพัดลมไอเย็นจะอาศัยหลักการโดยการระเหยตัวของน้ำ ปั๊มทำหน้าที่ดึงน้ำจากถังเก็บน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างบรรจุน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ ไปยังแผงกระจายน้ำด้านบน น้ำเย็นถูกกระจายผ่านแผงทำความเย็น (Cooling pad) ด้วยแรงโน้มถ่วง ลมร้อนจากภายนอกถูกดูดผ่านแผ่นกรอง (Filter) หลังจากนั้นไหลสัมผัสกับแผงทำความเย็นทำให้น้ำดึงเอาความร้อนจากอากาศ (ลมร้อน) มาใช้ในการระเหย เมื่ออากาศถูกดึงความร้อนจะทำให้อุณหภูมิลดลง มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมที่ไหลผ่านแผงทำความเย็นในขณะนั้น พัดลมจะดูดอากาศที่ผ่านแผงทำความเย็นลมที่ออกมามีอุณหภูมิที่ต่ำ (ลมเย็น) และผ่านแผงปรับทิศทางลม (Shutter) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของพัดลมไอเย็น

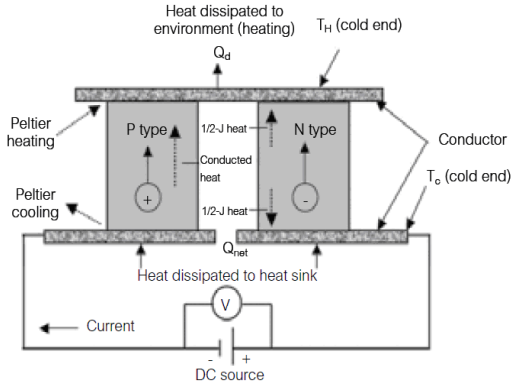
เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) (ทิพย์แสนพรหม, 2561) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานที่ทำจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถสร้างความเย็นและปั๊มความร้อนได้ จากปรากฏการณ์เพลเทียร์ ที่ได้กล่าวว่าเมื่อมกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำสองชนิดที่ต่อกัน จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำสองชนิด ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า หลักการทำงานของอุปกรณ์มีดังนี้ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำสองชนิด (ชนิด n และ p) ที่อยู่ภายในอุปกรณ์ ด้านหนึ่งของอุปกรณ์จะเย็น (Cold end) และอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์จะร้อน (Hot end) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เทอร์โมอิเล็กทริกขณะทำความเย็น

อุณหภูมิทางด้านเย็น (Tc) จะลดลง ในขณะที่ความร้อนจะถูกดูดจากสิ่งแวดล้อม (Heat absorbed) การดูดความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกทางด้านเย็นจะไปกระตุ้นทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิด p ที่มีระดับพลังงานต่ำกว่าไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และปล่อยความร้อนที่อิเล็กตรอนได้รับทางด้านร้อนของอุปกรณ์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกจะร้อน ส่วนด้านร้อนจะกลายเป็นเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับความสามารถในการทำความเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าน้อย เมื่อเทียบการทำความร้อน เนื่องจากความเย็นที่ผลิตได้ถูกลดทอนจากความร้อน

ไหลย้อนกลับที่เกิดจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อน และด้านเย็น (Conducted heat)และความร้อนที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้า (Joule heat)



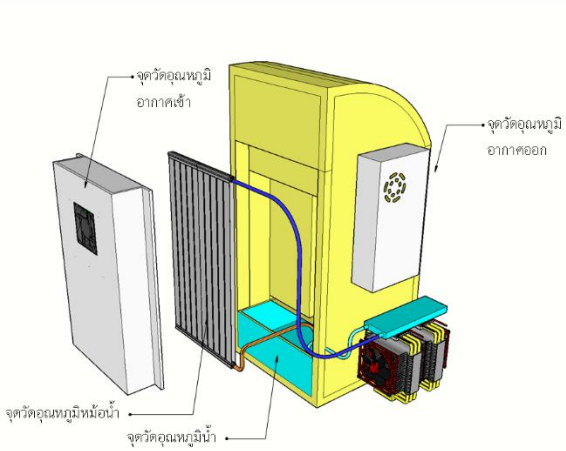
รูปที่ 3 เทอร์โมอิเล็กทริกขณะทำความร้อน

3. วิธีการดำเนินการ

ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการดัดแปลงพัดลมไอเย็น MISAWA รุ่น AV-511ความจุน้ำ 3 ลิตร เป็นพัดลมไอเย็นขนาดเล็กใช้พลังงานไฟฟ้า 60 วัตต์ สามารถปรับแรงลมได้ 3 ระดับ ปริมาณลม : 300 m^3/h ร่วมกับ ชุดทำน้ำเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกโดยด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งกับฮีทซิงค์ (Heat Sing) และชุดระบายความร้อนพร้อมพัดลมแรงดันไฟฟ้าเพื่อช่วยในการระบายความร้อน และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งกับกล่องอลูมิเนียมเพื่อเป็นทางผ่านของน้ำสำหรับทำความเย็น เพื่อส่งให้กับหม้อน้ำหรือแผงออยคูลเลอร์ที่ใช้ทดแทนแผงรังผึ้งของพัดลม ซึ่งจะหมุนเวียนน้ำกลับสู่ถังพักน้ำ ส่วนทางเข้าได้ติดตั้งชุดนำอากาศเข้าโดยมีพัดลมดูดอากาศเข้าสู่ชุดนำอากาศเข้า



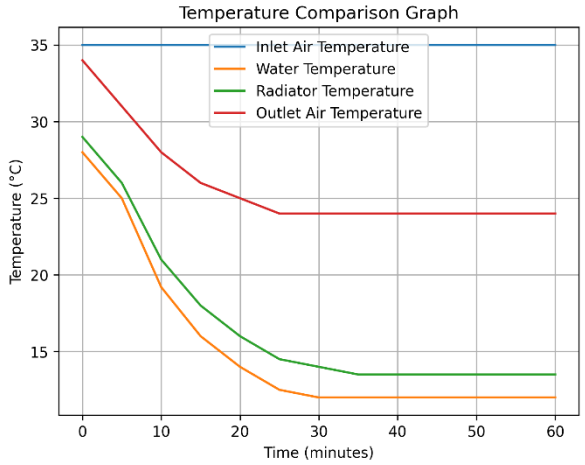
รูปที่ 4 พัดลมไอเย็น MISAWA รุ่น AV-511



รูปที่ 5 พัดลมไอเย็นที่ทำการดัดแปลงพร้อมจุดวัดอุณหภูมิ

4. ผลการศึกษา

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในระบบพัดลมไอเย็นร่วมกับเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งอุณหภูมิอากาศขาเข้า(Inlet Air Temperature) อุณหภูมิน้ำ (Water Temperature) อุณหภูมิหม้อน้ำ (Radiator Temperature) และอุณหภูมิอากาศขาออก(Outlet Air Temperature) เป็นระยะเวลา 60 นาที



รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ทำการวัด

ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบพัดลมไอเย็นร่วมกับเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 6 Temperature Comparison พบว่าอุณหภูมิน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0–25 นาที จาก 28°C เหลือ 12°C ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 30 นาที แสดงถึงประสิทธิ ภาพการทำงานของระบบทำความเย็นเทอร์โมอิเล็ก ทริก และสำหรับอุณหภูมิอากาศขาออกลดลงจาก 35°C เหลือ 24°C หรือคิดเป็นการลดลงประมาณ 11°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศขาเข้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดอุณหภูมิน้ำมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำความเย็นของพัดลมไอเย็น

ผลการทดลองยืนยันว่าการประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ต้องใช้ระบบคอมเพรสเซอร์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy Performance Analysis)

การประเมินสมรรถนะการทำความเย็นของพัดลมไอเย็นร่วมกับระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบโดยพิจารณาจากกำลังความเย็นที่ผลิตได้เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในระบบ จากทดลองประกอบด้วยชุดทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกและพัดลมไอเย็น โดยชุดเทอร์โมอิเล็กทริกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 V ที่กระแสไฟฟ้า 14.9 A ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 178 W ขณะที่พัดลมไอเย็นใช้กำลังไฟฟ้า 60 W ดังนั้นกำลังไฟฟ้ารวมของระบบมีค่าเท่ากับ

$$P_{input} = 178 + 60 = 238\,W$$

ส่วนการคำนวณกำลังความเย็น (Cooling Capacity)

พัดลมไอเย็นมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 300 m³/h หรือ 0.083 m³/s เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของอากาศที่ประมาณ 1.2 kg/m³ จะได้อัตราการไหลมวลของอากาศเป็น

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

$$\dot{m} = 1.2 \times 0.083 = 0.1\ {}^{kg}/_{s}$$

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้ามีค่าเฉลี่ย 35°C และอุณหภูมิอากาศขาออกลดลงเหลือ 24°C ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ

$$\Delta T = 11\ ^{\circ}C$$

กำลังความเย็นของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนของอากาศ

$$Q_c = \dot{m} C_p \Delta T$$

เมื่อ C_p คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (1005 J/kg·K)

$$Q_c = 0.1 \times 1005 \times 11 = 1105\ W$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP)

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบสามารถประเมินได้จากค่า COP ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังความเย็นที่ผลิตได้ต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้

$$COP = \frac{Q_C}{P_{input}}$$

$$COP = \frac{1105}{238} = 4.6$$

5. สรุปและการอภิปรายผล

จากผลการคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบพัดลมไอเย็นร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.6 นั้น สามารถนำมาวิเคราะห์และอภิปรายได้ดังนี้ ค่า COP = 4.6 บ่งชี้ว่าระบบนี้มีความสามารถในการทำความเย็นได้สูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบถึง 4.6 เท่า เมื่อพิจารณาในด้านของพลังงานไฟฟ้า แม้ว่าการเพิ่มชุดเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) เข้าไปในระบบจะทำให้กำลังไฟฟ้ารวมของระบบเพิ่มขึ้นจากเดิม 60 วัตต์ (กำลังไฟพัดลมไอเย็นเดิม) เป็น 238 วัตต์ (เพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า) แต่กำลังความเย็นที่ระบบสามารถทำได้กลับสูงถึง 1,105 วัตต์ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิอากาศลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญถึง 11 °C (จาก °C 35 °C เหลือ 24 °C) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โมดูลเพลเทียร์ 178 วัตต์นั้น มีความคุ้มค่าเชิงพลังงานและให้ผลตอบแทนในรูปของอุณหภูมิที่ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบพัดลมไอเย็นแบบเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ สำหรับอุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการศึกษาใครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] วิทธวัช ทิพย์แสนพรหม และ มลฤดี บุญยะศรี. (2561). การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบพัดลมไอเย็นโดยใช้ชุดทำน้ำเย็นเธอร์โมอิเล็กทริกเพื่อความสบายเชิงความร้อนและการประหยัดพลังงาน (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

[2] ธนากร จวงเจิม และ พศวัต ไกรศรีสมบัติ. (2561). ระบบอนุรักษ์พลังงานจากพัดลมไอเย็น (ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.

[3] บะไบ๋ คาริชมาลย์, จีรัง คำนวนตา, และ สัญญา พันธุ์แพง. (2563). พัดลมไอน้ำอัจฉริยะ. ใน รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม ครั้งที่ 1 (หน้า 756-765). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (ม.ป.ป.). บทที่ 3 การอนุรักษ์พลังงานในระบบปรับอากาศ. ใน ตำราอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส ด้านปฏิบัติ (ด้านไฟฟ้า). กระทรวงพลังงาน. http://www2.dede.go.th/dede/pr_e/Pre_E_B/Elec_B_3.pdf

[5] กิตติ นิลผึ้ง. (2558). กล่องทำความเย็นเธอร์โมอิเล็กทริกขับเคลื่อนโดยเซลล์แสงอาทิตย์. ใน รายงานสืบเนื่องจากการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (หน้า 260). ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[6] สุวิทย์ จักษุจินดา, ทศวรรษ สีตะวัน, และ อาธรณ์ วรอัด. (2552). การประดิษฐ์ตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร.

ชุดสาธิตระบบไฟฟ้าไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์

Hybrid Wind and Solar Electrical Power Demonstration System

สมศักดิ์ วัชระคุปต์*, ชาญณรงค์ ทิพย์ประเสริฐ, พิจักษณ์ โสภาศรีจันทร,
พินิจ ศรีธร, มงคล ด่านบำรุงตระกูล, อดิศร พลเสนา และ ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา
*E-mail: somsak.wa@rmuti.ac.th, 086-2604802

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดสาธิตระบบผลิตไฟฟ้าไฮบริดจากกังหันลมแนวตั้งและโซลาร์เซลล์ รวมถึงทดสอบการทำงานของระบบและประเมินประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้า ในการผลิตได้จากแต่ละแหล่งจะถูกส่งผ่านตัวควบคุมการชาร์จเข้าสู่ระบบ กักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด เช่น แสงแดดในช่วงเที่ยงและลมจากสิ่งแวดล้อมที่ควบคุมความเร็วโดยใช้มิเตอร์วัดความเร็วลม มิเตอร์วัดความเข้มแสงและมัลติมิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่ากังหันลมแนวตั้งและโซลาร์เซลล์สามารถทำงานได้จริง โดยมีค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายโมง โดยระบบผลิตไฟฟ้าไฮบริดสามารถให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 33.67 W ในช่วงสภาพแวดล้อมดีที่สุด และสามารถกักเก็บพลังงานได้ 33.67 Wh ภายในระยะเวลาต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการใช้แหล่งพลังงานเดี่ยวอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: กังหันลมแนวตั้ง, ชุดสาธิตระบบผลิตไฟฟ้าไฮบริด, โซลาร์เซลล์

Abstract

This research aims to develop a demonstration set of a hybrid power generation system using a vertical axis wind turbine and solar cells. The electrical energy generated from each source is transmitted through a charge controller into the energy storage system using batteries. Voltage and current values are then measured to calculate the electrical power output under specified environmental conditions . The experimental results showed highest efficiency was observed during the period from noon to 1:00 PM. Under the most favorable environmental conditions, the hybrid power generation system produced an average maximum power output of 33.67 W and was able to store 33.67 Wh of energy within 1 hour, which was significantly higher than the use of a single energy source alone.

Keywords: Vertical Axis Wind, Turbine Hybrid Power Generation Demonstration System, Solar Cell

1. บทนำ

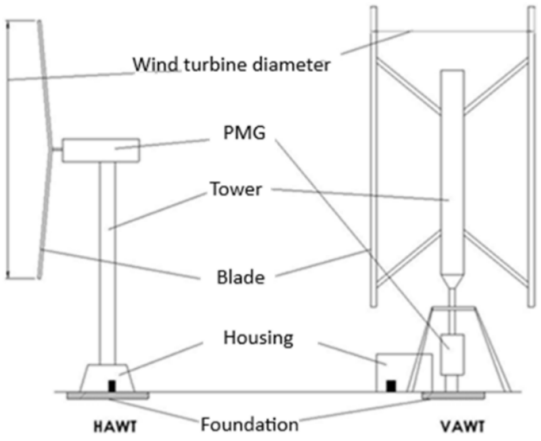
ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตและการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าเชิงพาณิชย์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อภาระค่าใช้จ่ายของทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความจำเป็นเร่งด่วนในการหาทางเลือกใหม่ที่สามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโหลดที่ต้องมีการใช้งานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เช่น ระบบไฟถนนสาธารณะหรือระบบส่องสว่างภายนอกอาคาร

หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจสูงสุดคือการนำพลังงานหมุนเวียน มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งเป็นแหล่งพลังงาน สะอาดที่มีศักยภาพสูง แต่การใช้แหล่งพลังงานเดียวมักประสบปัญหาความไม่ต่อเนื่อง เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ที่ผสานโซลาร์เซลล์เข้ากับกังหันลมแนวตั้ง จึงถูกนำมาใช้เนื่องจากกังหันลมแนวตั้งสามารถผลิตพลังงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน รวมถึงในสภาวะลมเบา ซึ่งเป็นการเสริมจุดแข็งและอุดช่องว่างจุดอ่อนของพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้สามารถรับประกันการผลิตและลดความผันผวนของพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ 1.ออกแบบและสร้างชุดผลิตไฟฟ้าไฮบริดจากพลังงานลมพิกัด 100 W และโซลาร์เซลล์พิกัดอยู่ที่ 18 W ที่สามารถเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ 2.แสดงการทดสอบการทำงานพร้อมประเมินการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนดพร้อมประเมินโหลดที่เหมาะสม

2. ระบบไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์

พลังงานลมจะใช้แนวคิดของกังหันลมแนวตั้งหรือ Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นดิน แตกต่างจากกังหันลมทั่วไปที่พบในฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่ซึ่งมักเป็นแบบแกนนอนหรือ Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) โดยจุดเด่นสำคัญของกังหันลมแนวตั้งคือสามารถรับลมได้จากทุกทิศทางโดยไม่จำเป็นต้องมีระบบหันหน้าเข้าหาลม จึงเหมาะสำหรับพื้นที่เมืองหรือบริเวณที่ทิศทางลมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น บริเวณอาคารสูง ถนน หรือชุมชนเมืองที่เกิดกระแสลมปั่นป่วนอยู่เสมอ [1] ซึ่งลักษณะกังหันลมแนวตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 1 [2] และสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบกังหันลมได้ดังสมการที่ 1



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนแนวนอน (HAWT) และกังหันลมแกนแนวตั้ง (VAWT)

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad (1)$$

โดย

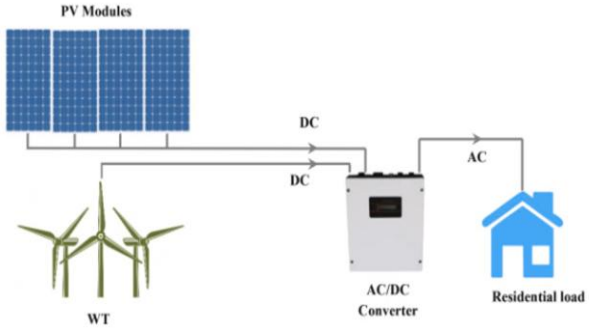
P = กำลังไฟฟ้า

ρ = ความหนาแน่นอากาศ

A = พื้นที่กวาดของใบพัด

v = ความเร็วลม

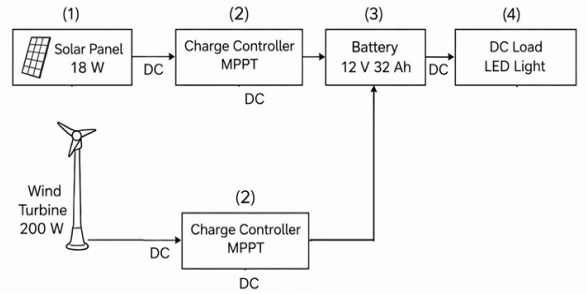
ระบบไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์ หรือ Hybrid Wind–Solar Energy System เป็นระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่นำพลังงานหมุนเวียนสองชนิด ได้แก่ พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ มาทำงานร่วมกันภายในระบบเดียว เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการผลิตพลังงานและลดข้อจำกัดของแหล่งพลังงานแต่ละประเภท แนวคิดของระบบไฮบริดเกิดขึ้นจากปัญหาสำคัญของพลังงานหมุนเวียนที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีแสงแดดเพียงพอ ขณะที่พลังงานลมก็ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและความเร็วลมซึ่งเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการรวมพลังงานทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันจึงช่วยให้ระบบสามารถผลิตพลังงานได้ต่อเนื่องและมีความมั่นคงมากขึ้น [3] ซึ่งลักษณะระบบไฮบริดจากพลังงานลมและโซลาร์เซลล์แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และกังหันลมแบบออฟกริด [4]

3. การดำเนินการวิจัย

กระบวนการออกแบบและสร้างชุดสาธิตระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด สามารถอธิบายได้เป็นระบบบล็อคไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด

โดยระบบประกอบไปด้วย 1. แผงโซลาร์เซลล์ มีขนาดพิกัดอยู่ที่ 18 W และกังหันลมแนวตั้งโดยจะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดพิกัดอยู่ที่ 200 W 2. ชาร์จคอนโทรลเลอร์ MPPT เป็นตัวจัดเรียงกระแสและแรงดันให้เหมาะสมกับการชาร์จพิกัดอยู่ที่ 30 A 3. แบตเตอร์รี่ ขนาด 12 V 32 Ah 4. ไฟ LED เป็นโหลดที่ใช้ในการทดสอบพิกัดอยู่ที่ 100 W

การสร้างชุดกังหันลมแนวแกนตั้งและโครงสร้างหลักของระบบ จะเริ่มจากการเตรียมเหล็กซึ่งเป็นวัสดุหลักของโครงสร้างแล้วจึงตัดตามขนาดและรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้โดยลักษณะชุดกังหันลมแนวแกนตั้งที่สร้างเสร็จแล้วเป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดกังหันลมแนวแกนตั้ง

การประกอบชุดโซลาร์เซลล์ส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการออกแบบโดย

กำหนดแผงโซลาร์เซลล์ (กำลังผลิต 18 วัตต์, ขนาด 35x45 เซนติเมตร) ติดตั้งดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การติดตั้งโซลาร์เซลล์

การทำงานของชุดสาธิตระบบไฟฟ้าไฮบริดเปิดให้แผงโซลาร์เซลล์และกังหันลมผลิตพลังงานไฟฟ้าพร้อมกัน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากทั้งสองแหล่งจะถูกส่งเข้าสู่ระบบควบคุม ซึ่งทำหน้าที่รวมและควบคุมการไหลของพลังงานให้เหมาะสม จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะระบบทำงานพร้อมกันเมื่อติดตั้งร่วมกันเป็นลักษณะได้ดังรูปที่ 6 โดยติดตั้งทดสอบที่พื้นที่เขตที่อยู่อาศัย และกำหนดให้มุมเอียงโซลาร์เซลล์อยู่ที่ 15 องศา หันไปทางทิศใต้ โดยจะแสดงมิเตอร์วัดความเร็วลม มิเตอร์วัดความเข้มแสง และมัลติมิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดได้ดังรูปที่ 7-9



รูปที่ 6 การทำงานร่วมกันของระบบไฮบริด



รูปที่ 7 มิเตอร์สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า



รูปที่ 8 มิเตอร์วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์



รูปที่ 9 มิเตอร์วัดค่าความเร็วลม

4. ผลการทดลอง

โดยการทดสอบโซลาร์เซลล์ทำการทดสอบในช่วงแดด ส่วนการทดสอบกังหันลมแนวตั้งใช้ลมธรรมชาติที่มีความเร็วลมประมาณ 7-8 m/s ในแต่ละวันตลอด

ทั้ง 1 สัปดาห์และนำค่าเฉลี่ยมาแสดงผล ค่าดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์แปรผันตามความเข้มของแสงอาทิตย์และกำลังงานลมแปรผันตามกำลังสามของความเร็วลม โดยตารางที่ 1 จะแสดงค่าจากการทดสอบโซลาร์เซลล์ตลอดทั้งวัน

ตารางที่ 1 ค่าปริมาณการทดสอบจากโซลาร์เซลล์

เวลา	ความเข้มแสง (W/m^2)	กำลังไฟฟ้า (W)
8:00	727.92	11.7
12:00	933.6	18.00
15:00	751.5	13.79
17:00	353.99	1.34
19:00	0	0

จากตารางจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 12:00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุด 933.6 W/m^2 และให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 18 W ซึ่งเท่ากับพิกัดของโซลาร์เซลล์ที่จะผลิตได้ แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์แปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ โดยผลการทดสอบต่อไปจะเป็นการทดสอบกังหันลมแนวตั้งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

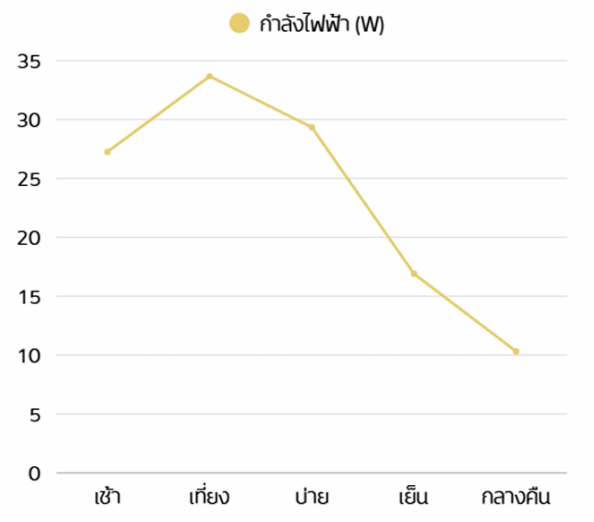
ตารางที่ 2 ค่าปริมาณการทดสอบจากกังหันลม

เวลา	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า (W)
กลางวัน	8	16.32
กลางคืน	7	10.32

จากตารางพบว่ากังหันลมสามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่องทั้งกลางวันและกลางคืน และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น เมื่อทำการเปิดให้โซลาร์เซลล์และกังหันลมทำงานพร้อมกัน ได้ทำการวัดค่าในช่วงเวลาต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 3 และแสดงเป็นลักษณะกราฟได้ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 3 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบระบบไฮบริด

เวลา	แรงดัน(V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
8:00	13.3	2.1	27.26
12:00	13.8	2.5	33.67
15:00	13.7	2.2	29.35
17:00	13.53	1.3	16.91
19:00	12.9	0.8	10.32



รูปที่ 10 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบไฮบริด

จากผลการทดลองพบว่าระบบไฮบริดสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าการใช้แหล่งพลังงานเพียงแหล่งเดียวในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงเที่ยงที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 33.67 W และในช่วงกลางคืนก็สามารถผลิตไฟฟ้าจากการทำงานของกังหันลมแนวตั้ง ลำดับถัดไปในตารางที่ 4 จะแสดงกำลังผลิตเปรียบเทียบของโซลาร์เซลล์ กังหันลมแนวตั้ง

และระบบไฮบริด โดยนำค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดทุกๆ 1 ชั่วโมงในตลอดวันและนำมาคิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าแต่ละระบบผลิต

ระบบผลิตไฟฟ้า	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
โซลาร์เซลล์	18.00
กังหันลมแนวตั้ง	16.32
ระบบไฮบริด	33.67

จากผลการทดสอบพบว่า ระบบไฮบริดสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 33.67 Wh ภายในระยะเวลาต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการใช้แหล่งพลังงานเพียงแหล่งเดียวอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการผสานพลังงานจากโซลาร์เซลล์และกังหันลมช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิต พร้อมกักเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ทั้งกลางวันและกลางคืน

5. สรุปผล

จากการสร้างชุดสาธิตระบบไฟฟ้าไฮบริด และสามารถเก็บค่าพลังงานได้สำเร็จ โดยจากผลการทดลองพบว่าชุดสาธิตมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและแรงลมในเวลานั้นๆ โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายโดย จากผลการทดสอบพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าไฮบริดสามารถให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 33.67 W ในช่วงสภาพแวดล้อมดีที่สุด และสามารถกักเก็บพลังงานได้ 33.67 Wh ภายในระยะเวลาต่อชั่วโมงซึ่งสูงกว่าการ ใช้แหล่งพลังงานเดี่ยวอย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะว่าลมจากธรรมชาติเป็นลมในสถานที่ชนบท ความแรงของลมจึงไม่มากเท่าลมจากที่สูง ภูเขาหรือชายทะเล แล้วกังหันแนวตั้งที่สร้างอาจจะยังไม่เป็นรูปแบบที่ทำงานได้เหมาะสมจึงทำให้กำลังผลิตค่อนข้างน้อยและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสานพลังงานลมและแสงอาทิตย์ช่วยเพิ่มความต่อเนื่องและเสถียรภาพของการผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แล้วยังสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างตลอดเวลาทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน

แนวทางปรับปรุงในอนาคตสามารถทำได้โดยออกแบบลักษณะกังหัน ในรูปแบบอื่นๆหรือทดสอบในสถานที่มีลมแรงมากๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Kaliamoorthy, A. Kumar, and P. Rajasekar. (2021). “Hybrid Wind and Solar Photovoltaic Generation with Energy Storage Systems.” *Energies*, vol. 14, no. 20, pp. 6521.

[2] I. Malael. (2026). “A Novel Approach to Mitigate Blade-to-Blade Interactions in Vertical-Axis Wind Turbines Suitable for Urban Areas.” MDPI

[3] A. M. De Broe, S. Drouilhet, and V. Gevorgian. (2010). “Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode.” *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2587–2595.

[4] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, and H. M. Salman. (2023). “A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications.” *Sustainability*, ScienceDirect, vol. 20.

[5] M. Balduzzi, J. Bianchini, and A. Ferrara. (2018). “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 193–207.

[6] A. Al-Quraan, M. Al-Maaitah, and H. Al-Kouz. (2021). “High-resolution numerical simulation of the performance of vertical axis wind turbines in urban area.” *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 1234–1248.

[7] D. Ferreira, T. van Bussel, and G. van Kuik. (2017). “Design for urban vertical-axis wind turbines: balancing performance and noise.” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 854, no. 1, pp. 012036.

[8] M. T. Islam, D. S. K. Ting, and A. Fartaj. (2008). “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 4, pp. 1087–1109.

[9] M. N. Tandjaoui, M. Benmessaoud, and A. Boudghene Stambouli. (2021). “Modelling, Design and Control of a Standalone Hybrid PV-Wind Micro-Grid System.” *Energies*, vol. 14, no. 16, pp. 4849.

การศึกษาการสลับเฟสที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าของสายส่งขนาด 500 กิโลโวลต์ วงจรคู่

A Study of Phase Sequence Effects on Electric Fields of 500 kV Double-Circuit Power Transmission Lines

สมศักดิ์ วัชระคุปต์*, ฉันทิสา ชลวิทย์เลิศศิลป์, สุพิชญา ชลวิทย์เลิศศิลป์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา
*E-mail: somsak.wa@rmuti.ac.th, 086-2604802

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการสลับเฟสที่มีต่อการกระจายสนามไฟฟ้า ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 กิโลโวลต์ แบบวงจรคู่ อย่างไรก็ตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้สนามไฟฟ้ารอบสายส่งเพิ่มขึ้นและอาจกระทบต่อความปลอดภัยของประชาชน การสลับเฟสจึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดความไม่สมดุลของระบบและลดระดับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งพิจารณารูปแบบการสลับเฟสจำนวน 6 รูปแบบและจำลองผลด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบที่ 1 (ABC – A′B′C′) มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่รอบตัวนำ 283,713 V/m ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่ารูปแบบอื่นที่มีค่า 331,869 V/m และ 371,593 V/m ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ICNIRP พบว่าค่าสนามไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยในระยะห่างจากกึ่งกลางเสา 20 เมตรขึ้นไป

คำสำคัญ: การสลับเฟส, สนามไฟฟ้า, วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

Abstract

This research studies the effect of phase transposition on the electric field distribution of a 500 kV double-circuit power transmission lines. As transmission voltage increases, the electric field surrounding the transmission line also increases, which may affect public safety. Phase transposition is therefore considered an effective approach to reducing system imbalance and mitigating the resulting electric field. In this study, six phase transposition configurations were evaluated using the Finite Element Method (FEM). The simulation results indicate that Configuration 1 (ABC – A′B′C′) produced the lowest maximum electric field around the conductors, with a value of 283,713 V/m, compared with 331,869 V/m and 371,593 V/m for the other configurations. Furthermore, comparison with the ICNIRP guidelines shows that the electric field levels remain within the recommended safety limits at distances of 20 meters or more from the center of the transmission tower.

Keywords: Phase Transposition, Electric Field, Finite Element Method

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูงที่สุดอยู่ที่ 500 กิโลโวลต์ ระบบนี้ถูกออกแบบมา เพื่อรองรับการส่งพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากจากแหล่งผลิตไปยังพื้นที่ต่างๆทั่วประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนี้ยังมีบทบาทสำคัญในการลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการส่ง ไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าระยะทางไกลจำเป็นต้องเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อ ช่วยลดการสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้การเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นย่อมส่งผล กระทบต่อปริมาณสนามไฟฟ้า อันเนื่องมาจากสายส่งที่มีแรงดันสูง [1]

จะพบว่าระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์ มีความสำคัญต่อผู้ใช้ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามก็มีผลกระทบคือยิ่งแรงดันไฟฟ้าสูง ก็ยิ่งทำให้การกระจายสนามไฟฟ้ารอบๆสายส่ง เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า การออกแบบและจัดการ โครงสร้างของสายส่ง โดยวิธีการไขว้สายแบบสลับเฟส ก็จะช่วยลดความเข้มของสนามไฟฟ้า การกระจายสนามไฟฟ้ารอบๆของสายส่ง ปรับปรุงความสมดุลของระบบไฟฟ้า ลดการรบกวนของระบบ การส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรคู่ช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านได้โดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนเสาไฟฟ้าเมื่ออยู่ในพื้นที่ที่จำกัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการศึกษา การกระจายสนามไฟฟ้าในระบบ สายส่งไฟฟ้า 500 กิโลโวลต์ วงจรคู่แบบสลับเฟส สูงจากพื้น 48.5 เมตร ในแบบ 2 มิติ เพื่อพัฒนาการออกแบบระบบสายส่งที่มีประสิทธิภาพ

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า

การเกิดการคายประจุอ้างอิงตามทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์และเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (1) [2]

$$\nabla \cdot D = \sigma \tag{1}$$

สมการ (1) ซึ่งเป็นรูปแบบเชิงพื้นที่ของกฎของเกาส์ (Gauss's Law) สำหรับสนามไฟฟ้า โดยการกระจัดไฟฟ้าในบริเวณนั้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

$$D = \varepsilon E \tag{2}$$

สมการ (2) เป็นค่าความเป็นไดอิเล็กทริกของตัวกลาง (Permittivity) สมการนี้บ่งชี้ว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เมื่อนำสมการ (2) ไปแทนในสมการ (1) จะได้สมการ (3) ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่าง

$$\nabla \cdot \varepsilon E = \sigma \tag{3}$$

สมการ (4) โดยสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางจากตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังตำแหน่งที่มีศักย์ต่ำไฟฟ้า เครื่องหมายลบในสมการแสดงถึงทิศทางดังกล่าว

$$E = -\nabla V \tag{4}$$

เมื่อแทนสมการ (4) เข้าไปในสมการ (3) จะได้สมการ (5)

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = \sigma \tag{5}$$

โดยที่

E คือ ค่าสนามไฟฟ้า

V คือ ศักย์ไฟฟ้า

D คือ การกระจัดไฟฟ้า

σ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าจริง

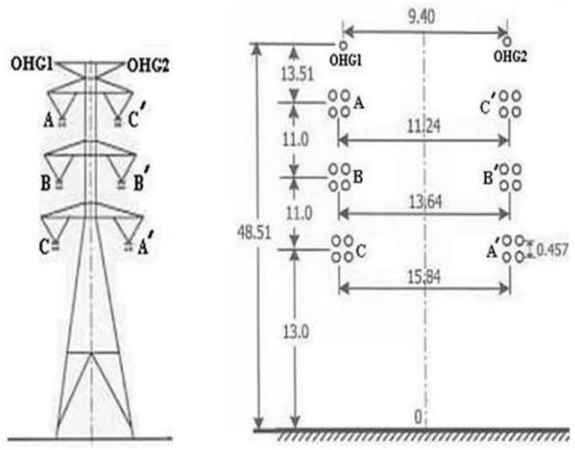
∇ คือ เกรเดียนต์ซึ่งใช้ในการหาทิศทางและขนาดของการเปลี่ยนแปลงในอากาศ

ε คือ ค่าความเป็นไดอิเล็กทริกของวัสดุ

สนามไฟฟ้าในสายส่งจะมีมาตรฐานความปลอดภัย ICNIRP เป็นแนวทางระดับนานาชาติที่ออกแบบมาเพื่อปกป้องสุขภาพของมนุษย์ จากการสัมผัสสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก โดยแยกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ ประชาชนทั่วไปค่าสนามไฟฟ้าไม่เกิน 5 kV/m และผู้ปฏิบัติงาน ค่าสนามไฟฟ้าไม่เกิน 10 kV/m ถือว่าปลอดภัย

3. การดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การวิเคราะห์และการจำลองสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องทราบลักษณะทางกายภาพของสายส่งที่ใช้ในการศึกษา ดังรูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของสายส่งที่ใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์งานวิจัยนี้ [3]



รูปที่ 1 ระบบสายส่งวงจรคู่และรายละเอียดของระยะที่ใช้ในการจำลองผล (เมตร)

รูปแบบการไขว้สายโดยทั่วไป จะไขว้สายตลอดแนวสายส่งเพื่อให้แต่ละเฟสได้รับตำแหน่งที่แตกต่างกัน ลำดับเฟสที่ใช้มี 6 รูปแบบหลัก ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของเฟส ABC ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 รูปแบบการสลับเฟส 6 รูปแบบ

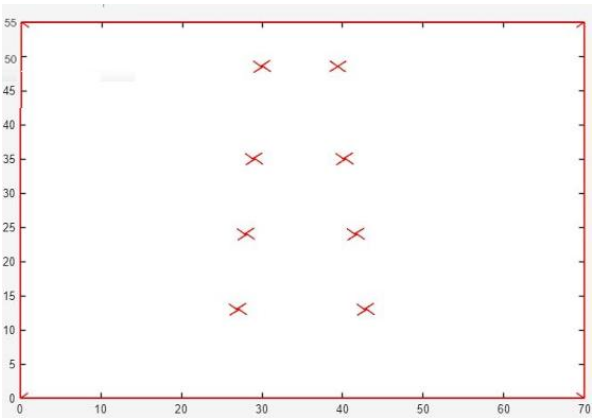
รูปแบบ	ลำดับเฟส วงจรที่ 1	ลำดับเฟส วงจรที่ 2
กลุ่ม 1	ABC	A'B'C'
กลุ่ม 2	ABC	A'C'B'
กลุ่ม 3	ABC	B'A'C'
กลุ่ม 4	ABC	B'C'A'
กลุ่ม 5	ABC	C'B'A'
กลุ่ม 6	ABC	C'A'B'

งานวิจัยนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้ารอบสายส่งขนาด 500 กิโล แสดงไว้ในตารางที่ 2 [4 - 5]

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

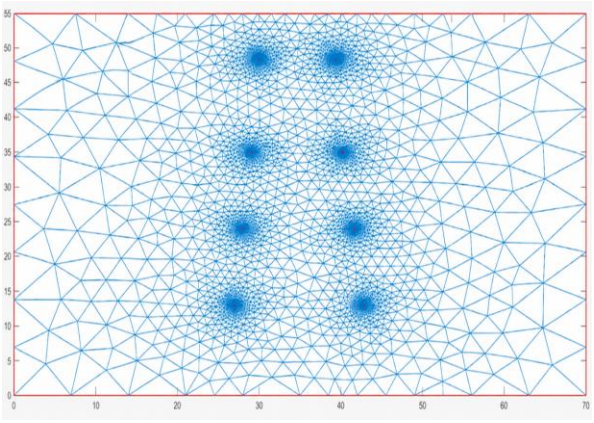
พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันเฟส A มุม 30	353 kV
แรงดันเฟส B มุม -90	0 kV
แรงดันเฟส C มุม 150	-353 kV
สภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศ (ε_0)	8.854 x 10-12 F/m
สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของอากาศ (ε_r)	1
ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (σ)	0 C/m^2

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์มาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการจำลองสนามไฟฟ้ารอบสายส่ง จะนำค่าต่างๆ มาใช้ในโปรแกรมแมทแลบ โดยขั้นตอนแรกจะเลือกรูปแบบการจำลองในโปรแกรม PDE tool ขั้นตอนต่อมาเป็นการวาดรูประบบสายส่งวงจรคู่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบสายส่งวงจรคู่จากโปรแกรม

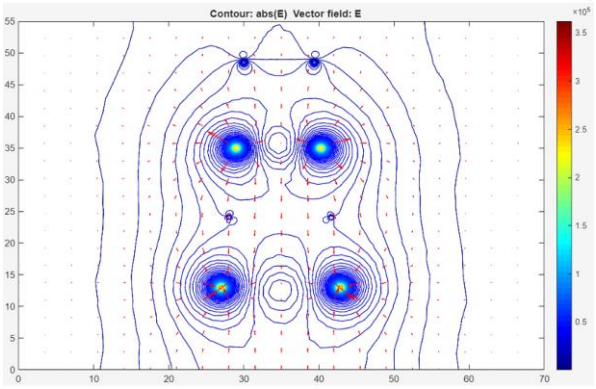
เมื่อดำเนินการวาดรูประบบสายส่งเสร็จแล้ว จึงดำเนินการสร้างเมซตีกริดของระบบสายส่ง โดยการสร้างเมซของระบบจะสร้างครอบคลุมพื้นที่หมดดังรูปที่ 3



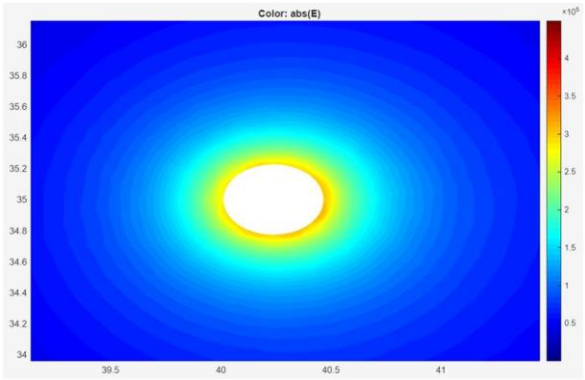
รูปที่ 3 วิธีการสร้างเมช

4. ผลการจำลอง

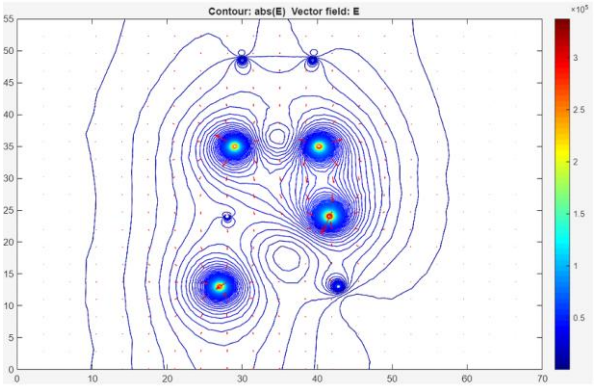
การจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบสายส่ง 500 กิโลโวลต์ ภายใต้รูปแบบการสลับเฟสที่กำหนดไว้ ผลการจำลองจะแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของค่าสนามไฟฟ้าและเวกเตอร์ทิศทางของสนามไฟฟ้า เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้ารอบตัวนำได้ ทั้งนี้ได้แสดงผลลัพธ์ทั้งหมด 6 รูปแบบ โดยพบว่าผลลัพธ์บางรูปแบบเหมือนกันจึงจำแนกออกเป็น 3 ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4 – 9



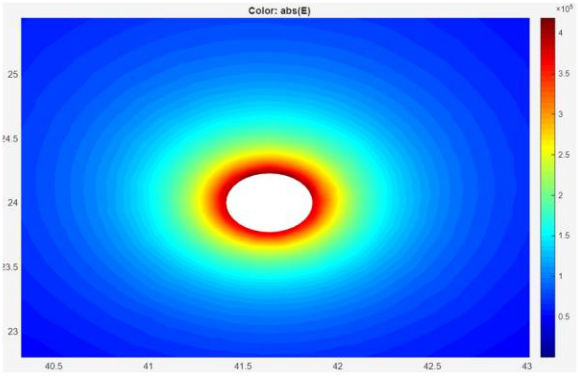
รูปที่ 4 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบ ABC – A'B'C' และ ABC – C'B'A'



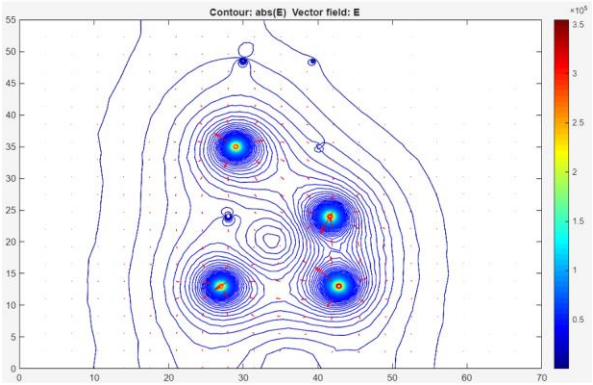
รูปที่ 5 สนามไฟฟ้าที่ตัวนำ ABC – A'B'C'



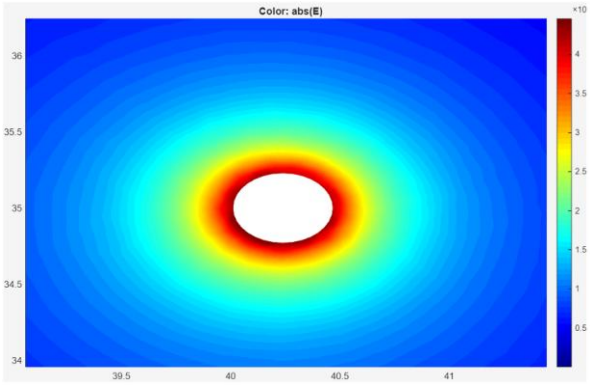
รูปที่ 6 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบ ABC – A'C'B' และ ABC – C'A'B'



รูปที่ 7 สนามไฟฟ้าที่ตัวนำ ABC – A'C'B'



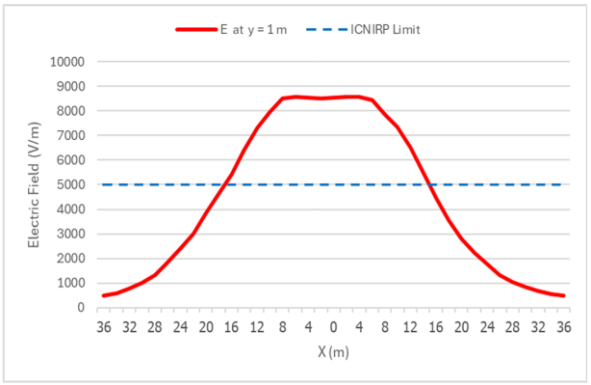
รูปที่ 8 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบ ABC – B'C'A' และ ABC – B'A'C'



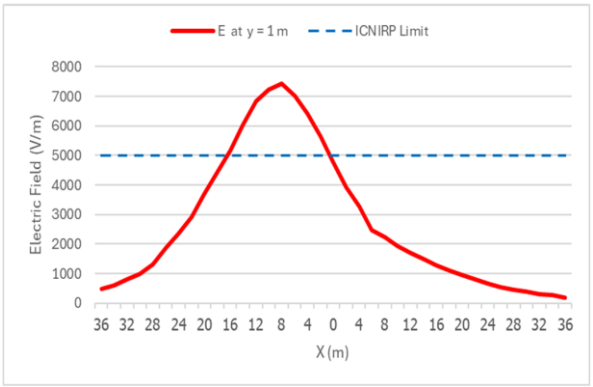
รูปที่ 9 สนามไฟฟ้าที่ตัวนำ ABC – B'C'A'

จากผลการจำลองสนามไฟฟ้ารอบสายส่ง เมื่อจัดเฟสแบบ ABC–A'B'C' ความต่างศักย์ของทั้งสองวงจรจะสมมาตรกัน ทำให้สนามไฟฟ้าเกิดการกระจายอย่างสมดุล ซ้าย–ขวาใกล้เคียงกัน และเส้นคอนทัวร์มีรูปทรง สม่ำเสมอ เมื่อมีการสลับเฟส เช่น ABC–C'A'B' หรือ ABC–A'C'B' ขณะที่บางคู่ความต่างศักย์อยู่ที่ 353 kV ส่งผลให้สนามไฟฟ้าเกิดการเสริมกันในบางตำแหน่ง และหักล้างกันในบางตำแหน่ง ทำให้รูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สมมาตร โดยรูปแบบ ABC–A'B'C' พบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่รอบตัวนำเฟส A มีค่าประมาณ 283,713 V/m ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่ารูปแบบอื่น รูปแบบการสลับเฟสอื่น เช่น ABC–A'C'B' และ ABC–C'A'B' ซึ่งให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดถึง 331,869 V/m และ 371,593 V/m ทำให้เห็นความแตกต่างการกระจายของสนามไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบ

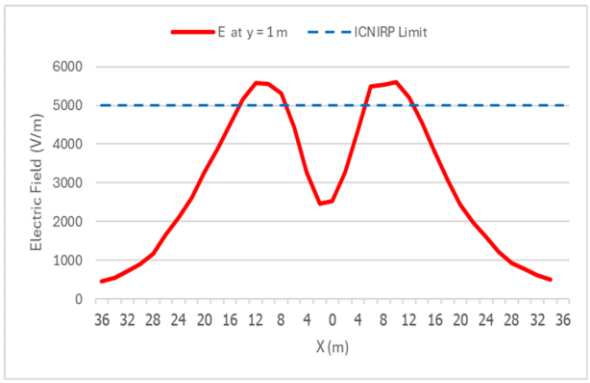
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอผลการประเมินระดับสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองในรูปแบบกราฟ ในระดับความสูง 1 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่สัญจรของประชาชนหรือพื้นที่ที่อาจมีสิ่งปลูกสร้าง โดยแสดงค่าในรูปที่ 10 – 12 ทั้ง 6 แบบ



รูปที่ 10 ค่าสนามไฟฟ้า ABC – A'B'C' และ ABC – C'B'A' ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร



รูปที่ 11 ค่าสนามไฟฟ้า ABC – A'C'B' และ ABC – C'A'B' ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร



รูปที่ 12 ค่าสนามไฟฟ้ารูปแบบ ABC – B'C'A' และ ABC – B'A'C' ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร

จากผลกราฟที่ 10 – 12 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร โดยจากกราฟที่ 10 จะสัมพันธ์กับผลการจำลองรูปที่ 4 ที่พบว่าค่าสนามไฟฟ้าจะคล้ายกับค่าสนามไฟฟ้าที่คู่เฟสด้านล่างที่มีค่าสูงในตำแหน่งใต้เสา ซึ่งผลกราฟที่ 11 ก็จะสัมพันธ์กับผลการจำลองรูปที่ 5 ที่สนามไฟฟ้าใต้เสาเฟสด้านซ้ายมากและด้านขวาน้อย สำหรับผลกราฟที่ 12 สัมพันธ์กับผลการจำลองรูปที่ 6 เช่นกัน

จากผลทั้งหมด พบว่าในระยะ 10 เมตรจากกึ่งกลางสายส่ง ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกือบทุกรูปแบบการสลับเฟสมีค่า สูงกว่า 5 kV/m ซึ่งเกินกว่าขีดจำกัดที่มาตรฐาน ICNIRP เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างมากขึ้น เช่น 20 เมตรและ 30 เมตร ค่าสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าต่ำกว่า 5 kV/m จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะตั้งแต่ 20–30 เมตรขึ้นไปเป็นบริเวณที่มีความปลอดภัย ตามมาตรฐาน ICNIRP

5. สรุปผล

จากผลการจำลองสนามไฟฟ้ารอบสายส่งภายใต้รูปแบบการสลับเฟสที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีการกระจายทั้งในลักษณะสมมาตรและไม่สมมาตร ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างคู่เฟสที่อยู่ใกล้กัน โดยเมื่อประเมินด้านความปลอดภัยตามเกณฑ์มาตรฐาน ICNIRP ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร พบว่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงในบริเวณใกล้กึ่งกลางเสา อย่างไรก็ตาม เมื่อมีระยะห่างจากกึ่งกลางเสา 20 เมตรขึ้นไป ค่าสนามไฟฟ้าจะลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกรูปแบบการสลับเฟส ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการกำหนดเขตทางสายส่งไฟฟ้า (Right of Way: ROW) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเสี่ยงต่อประชาชนจากการสัมผัสสนามไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าเลือกสลับเฟสที่ทำให้สนามไฟฟ้ากระจายตัวอย่างสมดุล ไม่เพียงช่วยให้พื้นที่โดยรอบสายส่งมีความปลอดภัยตามมาตรฐานสากลเท่านั้น ส่งผลให้ระบบสายส่งมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการส่งจ่ายไฟฟ้าที่ดีขึ้น

สำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในเรื่องของสนามแม่เหล็ก ความร้อนหรือรูปแบบสายควบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งได้จ่ายได้

เอกสารอ้างอิง

[1] อานนท์ อิศรมงคลรักษ์. (2557). “การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการติดตั้งสายเคเบิล ADSS บนเสาส่งประเภท SH ของระดับแรงดัน 500 kV ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 (EECON-37) 19–21 พฤศจิกายน, หน้า 293-296.

[2] M.V.K. Chari and S.J. Salon. (2000). , Numerical Methods in Electromagnetism, Academic Press, USA.

[3] Pao-la-or, P., Kulworawanichpong, T., Sujitjorn, S., and Peaiyoung, S. (2006). ,

Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Induction Motors: A Finite Element Approach, WSEAS Transactionson Systems, Vol.5, No.3, pp. 617-624.

[4] Pin-anong, P. (2002). , The Electromagnetic Field Effects Analysis which Interfere to Environment near the Overhead Transmission Lines and Case Study of Effects Reduction, [M.Eng. thesis], School of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

[5] L. Li and G. Yougang. (1998). "Analysis of Magnetic Field Environment near High Voltage Transmission Lines," Proceedings of the International Conferences on Communication Technology, pp.S26-05-1 - S26-05-5.

[6] อาคม แก้วระวัง. (2548). "สนามแม่เหล็กไฟฟ้า". พิมพ์ครั้งที่ 1 คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2545). "ไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม". จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

[8] มาตรฐานการก่อสร้าง สายส่ง 115 kV. (2549). กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

ระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

A Smart Shopping Basket Module for Enhancing Grocery Store Management Efficiency

ธีรภัทร กันพงษ์[1], กฤติพงศ์ ปานานนท์[1]*, กฤษดา ชูชื่น[1], เศรษฐกาล โปร่งนุช[2] และ พรภวิษย์ บุญศรีเมือง[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

เลขที่ 1 ถนนอู่ทองนอก แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

*ผู้ติดต่อ: s64122519003@ssru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 091 005 4747

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ โดยมีความสามารถ เพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานของร้านค้าปลีกรายย่อยในชุมชน โดยระบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มอดูลตะกร้าอัจฉริยะและเว็บแอปพลิเคชัน ตัวตะกร้าประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 สามารถอ่านบาร์โค้ดแบบ 1 มิติที่ระยะ 5 เซนติเมตร ด้วยอัตราความสำเร็จร้อยละ 100 และแสดงข้อมูลสินค้าบนจอโอแอลอีดี ความละเอียด 128x64 พิกเซล รองรับการใช้งานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงด้วยแหล่งพลังงานพกพา ข้อมูลสินค้าจะถูกเชื่อมโยงกับระบบเว็บแอปพลิเคชัน ซึ่งรองรับการจัดการคลังสินค้า การดูรายละเอียดการซื้อ สรุปรายงานยอดขาย และระบบชำระเงินเบ็ดเสร็จ โดยทำงานได้อย่างสมบูรณ์บนเว็บเบราว์เซอร์หลัก ได้แก่ กูเกิลโครม ไมโครซอฟต์เอดจ์ และไฟร์ฟอกซ์ ด้วยอัตราความสำเร็จร้อยละ 100 ประโยชน์ของระบบที่สร้างขึ้นคาดว่าจะช่วยยกระดับให้ร้านค้าปลีกระดับชุมชนมีระบบการจัดการภายในร้านที่ดียิ่งขึ้น และเป็นแนวทางในการลดภาระในการบริหารจัดการสินค้าของผู้ประกอบการรายย่อย และส่งเสริมการประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี เพื่อให้ร้านขายของชำในชุมชนสามารถปรับตัวและรับมือกับสภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจได้

คำสำคัญ: มอดูลตะกร้าอัจฉริยะ, เว็บแอปพลิเคชัน, ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266

Abstract

This paper presents the design and development of a grocery store management system and a smart shopping basket module to enhance the operational efficiency of local small-scale retail stores. The system consists of two main components: a smart basket module and a web application. Processed by an ESP8266 microcontroller, the smart basket can read 1D barcodes at a distance of 5 cm with a 100% success rate, and displays product information on a 128x64 pixel OLED screen. It supports 8 hours of continuous operation powered by a portable power bank. Product data is seamlessly linked to the web application, which facilitates inventory management, purchase tracking, sales report generation, and integrated payment processing. The system operates flawlessly on major web browsers, including Google Chrome, Microsoft Edge, and Firefox, achieving a 100% success rate. The benefits of this system include upgrading community-level retail management, potentially reducing the inventory management workload for small-scale entrepreneurs, and promoting the application of innovation and technology to enable local grocery stores to adapt and cope with economic crises.

Keywords: Smart Shopping Basket Module, Web Application, ESP8266 Microcontroller

1. บทนำ

ร้านขายของชำหรือร้านค้าปลีกขนาดย่อยในระดับชุมชนส่วนใหญ่ในประเทศไทย [1] ยังคงประสบปัญหาในการบริหารจัดการระบบคลังสินค้าและการจัดทำรายงานรายรับรายจ่าย เนื่องจากยังคงใช้รูปแบบการจดบันทึกข้อมูลลงในสมุดและการคำนวณผ่านเครื่องคิดเลข [2] ซึ่งมักก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการตรวจสอบข้อมูลสินค้าคงเหลือและความล่าช้าในการบันทึกข้อมูลทางการเงิน ปัญหาการบันทึกข้อมูลด้วยมือไม่เพียงแต่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล [3] แต่ยังส่งผลกระทบต่อขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการรายย่อยเมื่อเทียบกับร้านสะดวกซื้อขนาดใหญ่ที่มีระบบการจัดการที่ทันสมัยและแม่นยำกว่า ทำให้ร้านค้าชุมชนต้องเผชิญกับความท้าทายและสภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจดิจิทัล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่คณะผู้วิจัยนำมาพัฒนาต่อยอด ได้แก่ ตะกร้าสินค้าอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมระบบบนชิปแบบอาร์ม [4] ซึ่งเป็นต้นแบบรุ่นที่ 1 โดยปฏิวัติกระบวนการเลือกซื้อสินค้าและการชำระเงินในร้านค้าปลีกย่อย ลดระยะเวลาที่ใช้ในการชำระเงินที่จุดชำระเงินจากแนวทางการออกแบบเดิมพบว่า ตะกร้าอัจฉริยะ [5] ดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านน้ำหนักที่ค่อนข้างมากในการถือใช้งาน และยังมีข้อจำกัดด้านฟังก์ชันในส่วนการบริหารจัดการข้อมูลสินค้า

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ สำหรับร้านค้าปลีกรายย่อยในชุมชน ระบบที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง [6] และการติดตามรายละเอียดยอดขายได้ตามเวลาจริงผ่านเว็บแอปพลิเคชัน โดยระบบจะทำงานผสานร่วมกับมอดูลตะกร้าอัจฉริยะที่ออกแบบให้มีน้ำหนักเบารองรับการใช้งานแบตเตอรี่ 8 ชั่วโมง ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 (ESP 8266) [7] และแสดงผลราคารวมสินค้าผ่านจอแสดงผลแบบโอแอลอีดี (OLED) ในทันทีหลังการอ่านรหัสสินค้าผ่านมอดูลอ่านบาร์โค้ด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและขอบเขตการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ออกแบบและพัฒนาระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

2) ทดสอบและประเมินผลระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

2.2 ขอบเขตการวิจัย

1) ระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การออกแบบและสร้างระบบเว็บแอปพลิเคชัน และมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

2) มอดูลตะกร้าอัจฉริยะมีน้ำหนักรวมอุปกรณ์ประมาณ 1.00 กิโลกรัม สามารถอ่านรหัสบาร์โค้ดแบบ 1 มิติ และแสดงข้อมูลรายการสินค้าพร้อมราคารวมบนจอแสดงผลแบบโอแอลอีดีความละเอียด 128x64 พิกเซล (Pixel)

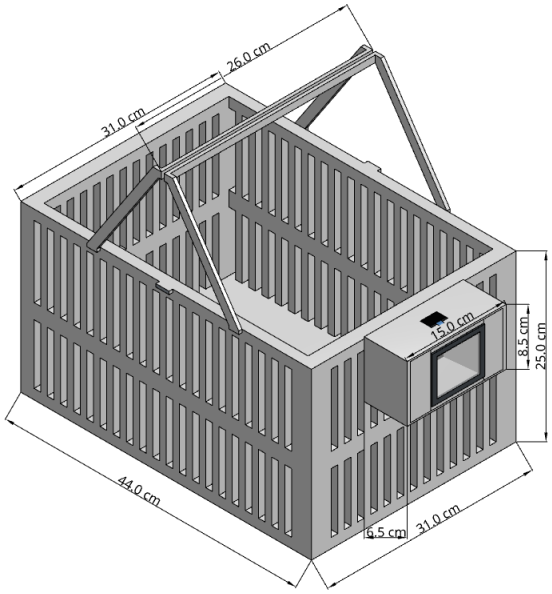
3) ระบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการจัดการข้อมูลสินค้าภายในร้าน สรุปยอดขายได้ตามเวลาจริง และรองรับระบบการชำระเงินของสินค้าที่ใช้ร่วมกับมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

4) แบตเตอรี่ของมอดูลตะกร้าอัจฉริยะรองรับการทำงานอย่างต่อเนื่องได้ 8 ชั่วโมงต่อการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

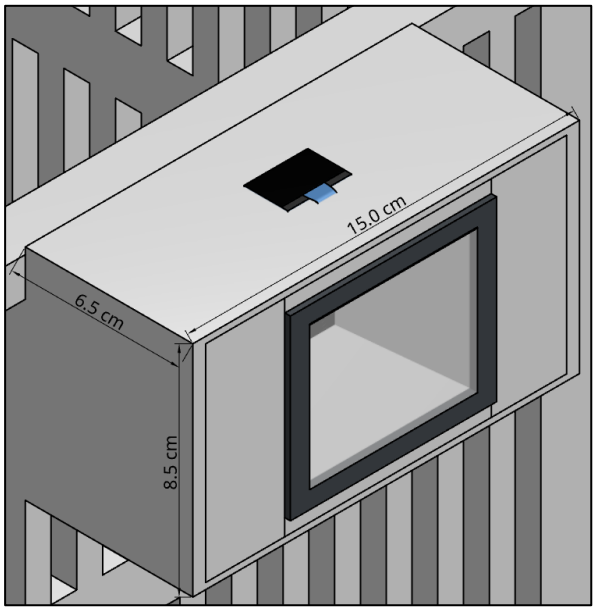
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างมอดูลตะกร้าอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Onshape [8] ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยตะกร้าพลาสติกสำหรับใส่สินค้าติดกับมอดูลคอนโทรลเลอร์ [9] โดยตะกร้าสำหรับใส่สินค้าจะมีขนาดความกว้าง 31 เซนติเมตร ความยาว 44 เซนติเมตร และความสูง 25 เซนติเมตร บริเวณด้านหน้ามีการติดตั้งกล่องมอดูลอุปกรณ์ อ่านบาร์โค้ดสินค้าและแสดงผล ซึ่งมีขนาดความกว้าง 6.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความสูง 8.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2

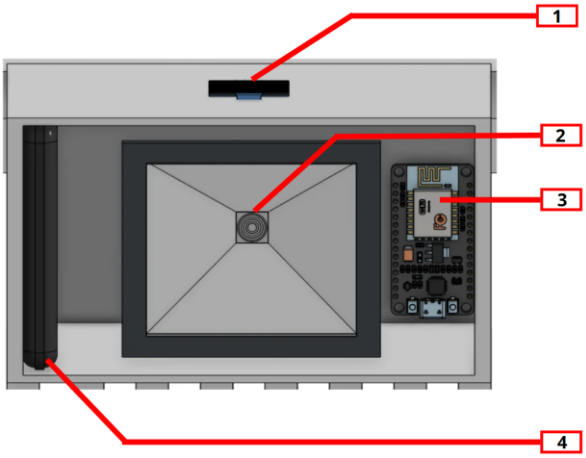


รูปที่ 1 โครงสร้างโดยรวม



รูปที่ 2 โครงสร้างส่วนมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

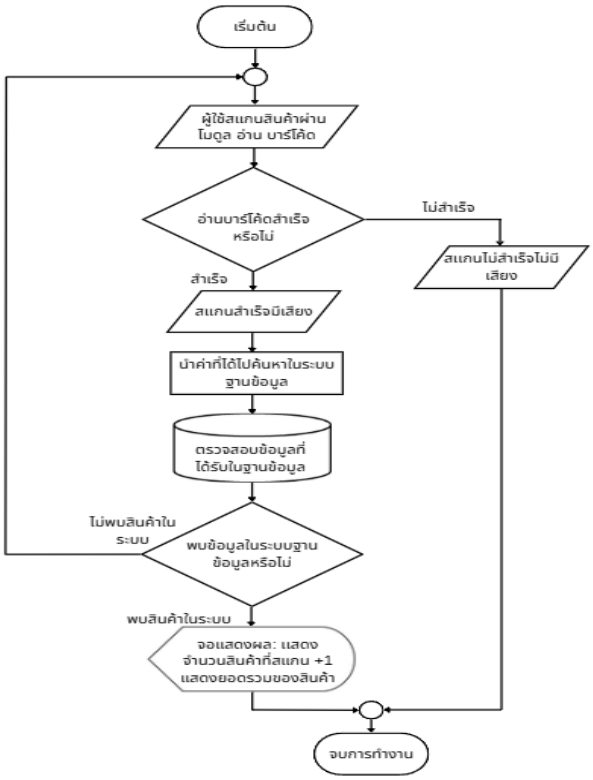
การจัดวางภายในกล่องอุปกรณ์มอดูลตะกร้าอัจฉริยะ ได้แก่ 1) จอแสดงผลโอแอลอีดี ความละเอียด 128x64 พิกเซล ใช้แสดงรายการสินค้าและราคาที่เข้ามาผ่านมอดูลอ่านบาร์โค้ด 2) มอดูลอ่านบาร์โค้ด 1 มิติ มีหน้าที่อ่านบาร์โค้ดของสินค้าแล้วแสดงผลที่จอ 3) ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 ติดตั้งร่วมกับแผงวงจรส่วนขยายพอร์ตแบบโหนดเอ็มซียู (NodeMCU) ใช้สำหรับประมวลผลร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ 4) พาวเวอร์แบงค์ (Power bank) แหล่งพลังงานสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดวางอุปกรณ์ภายในกล่องมอดูล

3.2 การทำงานของมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

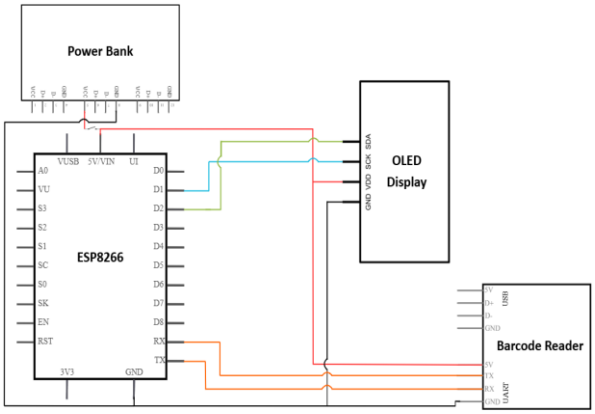
การทำงานของมอดูลตะกร้าอัจฉริยะประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 เพื่อบริหารจัดการข้อมูลระหว่างอุปกรณ์และระบบฐานข้อมูล [10] เริ่มต้นเมื่อผู้ใช้สแกนบาร์โค้ดของสินค้า ผ่านมอดูลอ่านบาร์โค้ด หากการอ่านบาร์โค้ดไม่สำเร็จ เช่น รหัสบาร์โค้ดไม่ตรงประเภทของมอดูลอ่านบาร์โค้ดระบบจะกลับไปรอรับข้อมูลใหม่อีกครั้ง หากสำเร็จจะมีสัญญาณเสียงของมอดูลอ่านบาร์โค้ดดังและนำรหัสไปตรวจสอบกับระบบฐานข้อมูล ในกรณีที่ไม่พบข้อมูลสินค้าในระบบจะวนกลับไปเริ่มต้นกระบวนการใหม่ หากพบข้อมูลสินค้าในระบบฐานข้อมูลจะส่งคืนข้อมูลรายการสินค้า พร้อมราคาและแสดงผลจำนวนสินค้าพร้อมยอดราคารวมผ่านหน้าจอโอแอลอีดี ความละเอียด 128x64 พิกเซล เพื่อให้ผู้ใช้ทราบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนชำระเงิน แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังการทำงานของมอดูลตะกร้าสินค้า

3.3 การออกแบบแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์

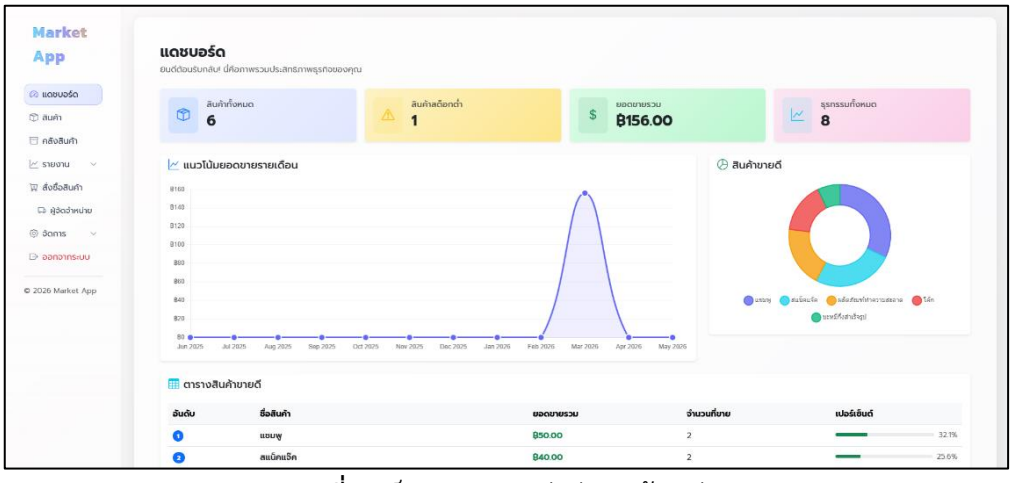
การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ แสดงดังรูปที่ 5 ดังนี้ 1) สวิตช์ไฟ 2) หน้าจอแสดงผลโอแอลอีดีขนาด 128x64 พิกเซล 3) มอดูลอ่านบาร์โค้ด T613 4) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 5) พาวเวอร์แบงค์ขนาด 5,000 มิลลิแอมป์



รูปที่ 5 บล็อกการเชื่อมต่ออุปกรณ์

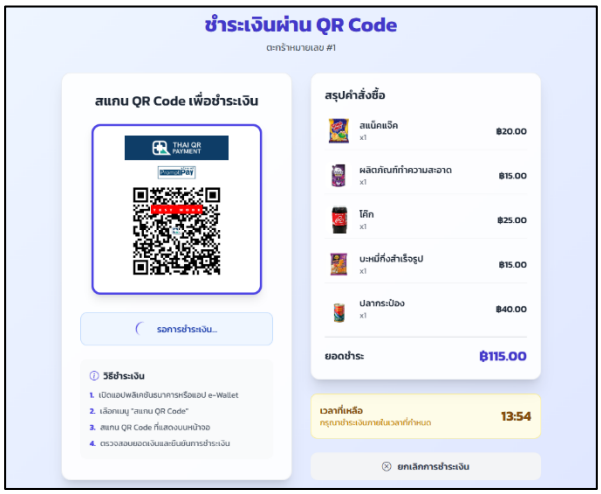
3.4 การออกแบบส่วนเว็บแอปพลิเคชัน

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน ได้ออกแบบตาม UX/UI ที่ประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไปด้วยการตอบแบบสอบถาม ซึ่งผลการประเมินพบว่าระบบสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งานโดยมุ่งเน้นการใช้งานที่ครอบคลุมของทั้งผู้ประกอบการและผู้ใช้งานผ่านฟังก์ชันหลักแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) บริหารจัดการคลังสินค้า ใช้สำหรับบันทึก เพิ่ม ลด หรือแก้ไขข้อมูลรายการสินค้าในร้าน เช่น ชื่อสินค้า ราคาสินค้า และรหัสบาร์โค้ด โดยระบบจะเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลเพื่อตัดสต็อกสินค้าโดยอัตโนมัติทันทีที่มีการขาย ทำให้จำนวนสินค้าคงเหลือเป็นปัจจุบัน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เว็บแอปพลิเคชันส่วนหน้าหลัก

2) ฟังก์ชันการชำระเงิน รองรับกระบวนการชำระเงินเบ็ดเสร็จภายในระบบ สำหรับผู้ใช้มอดูลตะกร้าอัจฉริยะ เลือกสินค้าที่ต้องการจะซื้อเรียบร้อยแล้ว สามารถตรวจสอบยอดรวมและดำเนินการชำระเงินได้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เว็บแอปพลิเคชันส่วนหน้าชำระเงิน

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง

มอดูลตะกร้าอัจฉริยะที่ได้ออกแบบและสร้าง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 มอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

การทดลองแบ่ง 2 ส่วน ได้แก่ 1) ทดลองมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ 2) ทดลองระบบเว็บแอปพลิเคชัน

4.2 การทดลองมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

การทดลองมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ทดลองระยะการอ่านบาร์โค้ด ดังตารางที่ 1 2) ทดลองหน้าจอแสดงผลสินค้า ดังตารางที่ 2 3) ทดลองชั่งน้ำหนักของตะกร้าอัจฉริยะ ดังรูปที่ 10 และน้ำหนักที่ได้คือ 1,035 กรัม

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการอ่านบาร์โค้ดของสินค้า

การทดลอง	สำเร็จ(ครั้ง)	ไม่สำเร็จ (ครั้ง)
ระยะห่าง 5 เซนติเมตร	100	0
ระยะห่าง 10 เซนติเมตร	85	15
ระยะห่าง 15 เซนติเมตร	0	100

ตารางที่ 1 แสดงการทดลองการอ่านบาร์โค้ดของสินค้า โดยกำหนดช่วงระยะห่างในการทดสอบที่ 5 10 และ 15 เซนติเมตร อ้างอิงจากพฤติกรรมความสะดวกในการหยิบโดยในระยะ 5 เซนติเมตรเป็นระยะที่อ่านบาร์โค้ดสำเร็จมากที่สุดในการสแกนสินค้ารองลงมาที่ระยะ 10 เซนติเมตร ที่ยังสามารถอ่านบาร์โค้ดได้

ตารางที่ 2 ผลการทดลองหน้าจอแสดงผลสินค้า

หมวดหมู่สินค้าที่ทดสอบ	สำเร็จ (ครั้ง)	ไม่สำเร็จ (ครั้ง)
เครื่องดื่ม	20	0
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด	20	0
อาหารสำเร็จรูป	20	0
ขนม	20	0
ผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนตัว	20	0
สรุป	100	0

ตารางที่ 2 แสดงการทดลองหน้าจอแสดงผลด้วยสินค้าจำนวน 5 หมวดหมู่ อ้างอิงจากประเภทสินค้าอุปโภคบริโภคที่นิยมขายในร้านค้า หมวดหมู่ละ 20 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 100 ครั้ง พบว่าสามารถแสดงผลรายการสินค้าและราคารวมได้ครบถ้วนในแต่ละหมวดหมู่สินค้า ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการทดลองการแสดงผลหน้าจอ



รูปที่ 10 ผลการทดลองน้ำหนักของตะกร้าอัจฉริยะ

4.3 การทดลองระยะเวลาการใช้งาน

การทดลองระยะเวลาการใช้งานมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ เป็นการทดลองการใช้งานมอดูลอย่างต่อเนื่องโดยใช้พาวเวอร์แบงค์ขนาด 5,000 มิลลิแอมป์ ด้วยการจับเวลาและนำมาตรวจสอบพลังงานทุก 2 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบระยะเวลาการใช้งาน แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองระยะเวลาการใช้งาน

ชั่วโมง	พลังงาน**(%)**
2	78
4	56
6	33
8	11
10	0

ตารางที่ 3 แสดงการทดลองระยะเวลาการใช้งานมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ ผลที่ได้คือมอดูลตะกร้าอัจฉริยะใช้งานได้จนระยะเวลาครบ 8 ชั่วโมง จะเหลือระดับพลังงานแบตเตอรี่โดยเฉลี่ยร้อยละ 11 ซึ่งจะสามารถใช้งานต่อไปได้อีกไม่เกินระยะเวลา 1 ชั่วโมงโดยประมาณ ซึ่งถือเป็นเวลาที่แนะนำให้เริ่มชาร์จหลังจากใช้งานครบ 8 ชั่วโมง

4.4 การทดลองส่วนเว็บแอปพลิเคชัน

การทดลองการทำงานส่วนเว็บแอปพลิเคชันเป็นการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบบริหารจัดการร้านขายของชำบนคอมพิวเตอร์พกพา โดยทำการทดสอบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ได้แก่ กูเกิลโครม ไมโครซอฟต์เอดจ์ และไฟร์ฟอกซ์ ซึ่งพบว่าระบบสามารถประมวลผลและตอบสนองการทำงานในฟังก์ชันหลัก ดังนี้ 1) เข้าสู่ระบบ 2) การเพิ่มสินค้า 3) การแก้ไขข้อมูลสินค้า 4) การลบสินค้า 5) การค้นหารายชื่อสินค้า 6) การค้นหารหัสสินค้า 7) การชำระเงิน 8) การคำนวณยอดขายปัจจุบัน 9) การดาวน์โหลดรายงานสรุปยอดขาย ทั้งหมด

รวม 9 รายการได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ คิดเป็นความสำเร็จร้อยละ 100 ในทุกการทดสอบของส่วนเว็บแอปพลิเคชัน

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน และเปรียบเทียบ

จากการวิเคราะห์และประมาณการต้นทุนฮาร์ดแวร์ทั้งหมดของมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ พบว่ามีต้นทุนรวมของอุปกรณ์หลัก 1,970 บาท ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 8266 แผงวงจรส่วนขยาย มอดูลอ่านบาร์โค้ด T613 จอแสดงผลโอแอลอีดี ความละเอียด 128x64 พิกเซล พาวเวอร์แบงค์ 5,000 มิลลิแอมป์ และตะกร้าพลาสติก เมื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบประมาณการต้นทุนกับต้นแบบตะกร้าอัจฉริยะบนสถาปัตยกรรมอาร์ม [4] ที่ประกอบด้วย บอร์ดราสเบอร์รี่พาย 3 โมเดลบีพลัส จอแสดงผลแบบสัมผัสทีเอฟทีแอลซีดีขนาด 7 นิ้ว มอดูลอ่านบาร์โค้ด SM-MN200 พาวเวอร์แบงค์ 10,000 มิลลิแอมป์ และตะกร้าวัสดุอะคริลิค พบว่ามีต้นทุนรวมของอุปกรณ์โดยประมาณการ 6,740 บาท การพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนด้านฮาร์ดแวร์ลงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนของอุปกรณ์โดยประมาณการ ราคาเฉลี่ยในท้องตลาด

รายการอุปกรณ์	ราคาโดยประมาณ	
	ต้นแบบ [4]	พัฒนา
1. บอร์ดประมวลผลหลัก	1,590	170
2. แผงวงจรส่วนขยาย	-	40
3. หน้าจอแสดงผล	2,650	120
4. มอดูลอ่านบาร์โค้ด	1,750	1,300
5. แหล่งจ่ายพลังงาน	400	200
6. ตะกร้าใส่สินค้า	350	140
รวมทั้งสิ้น	6,740	1,970

หมายเหตุ: ราคา ณ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2569

5. อภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบการทำงานของระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ สามารถนำผลการวิจัยมาอภิปรายในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) จากการประเมินผลการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับต้นแบบตะกร้าอัจฉริยะบนสถาปัตยกรรมอาร์ม [4] พบว่าการพัฒนาขึ้นต่อยอดสามารถแก้ไขข้อจำกัดเดิมได้ สามารถปรับลดน้ำหนักรวมของตะกร้าจากเดิม 2.9 กิโลกรัม ลงเหลือเพียง 1.035 กิโลกรัม ทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกในการถือ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี [5] ซึ่งร้านค้าจำเป็นต้องติดแท็กสัญญาณใหม่บนสินค้าทุกชิ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้เทคโนโลยีบาร์โค้ดที่สามารถอ่านบาร์โค้ดตรวจรหัสบนบรรจุภัณฑ์เดิมได้ทันที

2) ระบบยังมีข้อจำกัดในส่วนของหน้าจอแสดงผลโอแอลอีดี ที่ติดตั้งบนมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ ซึ่งอาจมีขนาดค่อนข้างเล็ก ส่งผลให้การมองเห็นข้อมูลรายการสินค้าแบบย่อจากการอ่านบาร์โค้ดเข้ามา ได้ยากขึ้นสำหรับผู้ใช้งานบางกลุ่มหรือในบางสภาวะแสง

3) ในด้านผลกระทบต่อผู้ใช้งานจริง เมื่อเปรียบเทียบกับรถเข็นช้อปปิ้งอัจฉริยะที่ขับเคลื่อนด้วยปัญญาประดิษฐ์ [6] ที่มีความซับซ้อนและต้นทุนการติดตั้งสูง ระบบที่พัฒนาขึ้นได้ประยุกต์ใช้การอ่านบาร์โค้ดร่วมกับเว็บแอปพลิเคชัน ซึ่งเข้าถึงง่ายและเหมาะกับร้านค้าชุมชนมากกว่า แต่สามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการจัดการสินค้า และช่วยยกระดับการจัดการร้านโชห่วยให้ทันสมัย ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจดิจิทัล

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยการพัฒนาระบบบริหารจัดการร้านขายของชำและมอดูลตะกร้าอัจฉริยะ บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่กำหนดไว้ทั้ง 2 ประการ ดังนี้ 1) ด้านการออกแบบและพัฒนา ระบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มอดูลตะกร้าอัจฉริยะ

และเว็บแอปพลิเคชัน โดยมอดูลตะกร้าอัจฉริยะสามารถอ่านรหัสบาร์โค้ดสินค้าได้อย่างแม่นยำในระยะ 5 เซนติเมตร พร้อมแสดงผลข้อมูลผ่านหน้าจอโอแอลอีดีความละเอียด 128x64 พิกเซล และรองรับการใช้งานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง 2) ด้านการทดสอบและประเมินผล พบว่าในส่วนของเว็บแอปพลิเคชันสามารถบริหารจัดการข้อมูลสินค้า ชำระเงิน สรุปรายงานยอดขายได้อย่างถูกต้อง และระบบสามารถทำงานร่วมกันเพื่อตัดยอดสินค้าคงคลังได้อัตโนมัติ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเพื่อช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการร้านขายของชำของผู้ประกอบการรายย่อย และส่งเสริมการประยุกต์ใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี เพื่อให้ร้านขายของชำในชุมชนสามารถปรับตัวและรับมือกับสภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจได้ สำหรับแนวทางพัฒนาต่อ ในด้านฮาร์ดแวร์ควรใช้จอแสดงผลที่มีรายละเอียดชัดขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความชัดเจนในการมองเห็นข้อมูลรายการสินค้า และเพิ่มการรองรับการอ่านบาร์โค้ดแบบ 2 มิติ หรือรหัสคิวอาร์ เพื่อรองรับบรรจุภัณฑ์ที่หลากหลาย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรณิกา สุริยะกมล และ ฉัตรวรัญ องคสิงห์. (2562). "ร้านค้าโชห่วยกับการอยู่รอดในยุคเศรษฐกิจดิจิตอล." เอกสารประกอบการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2 สิงหาคม.

[2] กิตติ ภักดีวัฒนะกุล. (2551). คัมภีร์ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ (MIS). กรุงเทพฯ: เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์.

[3] Y. Rekik, A. A. Syntetos, and C. H. Glock, "Modeling inventory inaccuracy in retail stores: The role of technological interventions," International Journal of Production Economics, vol. 218, pp. 127-141, 2019.

[4] S. Prongnuch, S. Sitjongsataporn, and P. Sang-aroon, "Low-cost Smart Basket Based on ARM System on Chip Architecture: Design and Implementation," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 7, no. 4, pp. 15-23, 2022.

[5] M. Shahroz, M. F. Mushtaq, M. Ahmad, S. Ullah, A. Mehmood, and G. S. Choi, "IoT-Based Smart Shopping Cart Using Radio Frequency Identification," IEEE Access, vol. 8, pp. 68426-68438, 2020.

[6] M. I. Zulfiqar, A. Khalid, A. Siddig, M. J. Nawaz, and S. Saay, "AI-Driven Smart Shopping Carts with Real-Time Tracking and Inventory Forecasting for Enhanced Retail Efficiency," IEEE Access, vol. 13, pp. 55576-55585, 2025.

[7] ดอนสัน ปงผาบ, อภิศักดิ์ พรหมฝาย และพีรพล จันทร์หอม. (2565). IoT เบื้องต้นบน NodeMCU. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี.

[8] Onshape. (2026). Onshape Product Development Platform. Accessed May 17. Available from https://www.onshape.com/

[9] C. Roopa and N. C. Reddy, "Research on Smart Shopping Cart," International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, vol. 6, no. 4, pp. 359-363, 2020.

[10] S. S. Sophiya and M. Ramachandran, "RFID-Enabled IoT Smart Shopping Cart for Automated Billing and Enhanced Retail Experience," in Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Nagpur, India, Aug 2025.

การออกแบบสายอากาศแพตช์ขนาดกะทัดรัดสำหรับการสื่อสารยานพาหนะกับทุกสิ่งสำหรับ V2X
Design of a Compact Patch Antenna for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications

พิมพิไล ดวงก้อม[1], อรปรียา อาจพงษา[1], พรชัย ศรีจุลหา[1], จรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว[1] และ สุธาสินี ละมุลตรี[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40000

*สุธาสินี ละมุลตรี: suthasinee.la@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบเบื้องต้นของสายอากาศโมโนโพลวงกลมขนาดกะทัดรัดสำหรับการสื่อสารยานพาหนะกับทุกสิ่งสำหรับ V2X ที่ความถี่ 5.8 GHz โดยโครงสร้างสายอากาศเป็นแบบแพตช์วงกลมที่มีรัศมี 6 มม. พิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 เท่ากับ 30x40 มม.^{2} ที่มีค่า ε_r เท่ากับ 4.3 วางบนวัสดุฐานรองที่มีความสูง 1.6 มิลลิเมตร ป้อนสัญญาณโดยสายส่งแบบไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม โดยจะออกแบบให้สายอากาศมีแบบรูปแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง มีค่า $|S_{11}| < -15$ dB ครอบคลุม 5.8 – 5.9 GHz มีอัตราขยายไม่น้อยกว่า 2.5 dBi ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ ในการดำเนินการจะศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่มีผลต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ และคุณลักษณะเชิงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยศึกษาสายอากาศเดี่ยวและสายอากาศ MIMO 2 องค์ประกอบ พบว่าการศึกษาเบื้องต้นนี้มีแนวโน้มที่จะได้สายอากาศที่สามารถพัฒนาต่อไปเพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับ V2X ได้

คำสำคัญ: สายอากาศแพตช์ขนาดกะทัดรัด, การสื่อสารยานพาหนะกับทุกสิ่ง, V2X

Abstract

This paper presents a preliminary design of a compact circular monopole antenna for Vehicle-to-Everything (V2X) communications at 5.8 GHz. The circular patch of radius 6 mm is designed on an FR-4 substrate of 30x40 mm^2 with a ε_r of 4.3 and a thickness of 1.6 mm. The structure utilizes a microstrip feed line with a characteristic impedance of 50 ohms. The design aims to achieve an omnidirectional radiation pattern and a return loss ($|S_{11}|$) of less than -15 dB across the 5.8 – 5.9 GHz frequency range. Additionally, the antenna maintains a gain of at least 2.5 dBi throughout the operating bandwidth. In this study, various antenna parameters were investigated to analyze their effects on impedance matching and radiation characteristics using an electromagnetic simulation program. The preliminary results indicate that the proposed design is promising for further development and practical implementation in V2X applications.

Keywords: Compact Patch Antenna, Vehicle-to-Everything, V2X

ESTACON 2026 | 17th

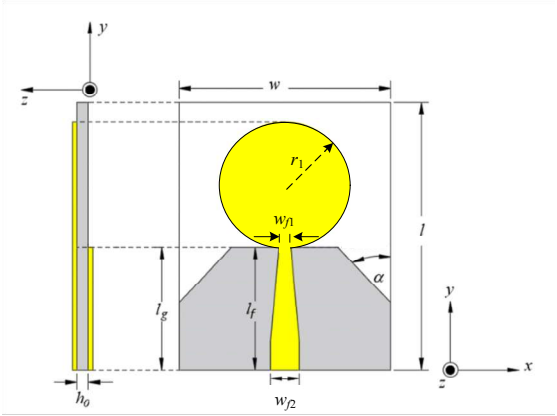
1. บทนำ

การสื่อสารระหว่างยานยนต์กับทุกสรรพสิ่ง (Vehicle-to-Everything: V2X) ถือเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation Systems: ITS) ซึ่งระบบดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยสายอากาศที่มีความน่าเชื่อถือสูง สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี และมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งบนยานพาหนะที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สายอากาศแบบแพตช์และสายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานด้านยานยนต์ เนื่องจากมีข้อดีในด้านโครงสร้างที่เรียบ แบน มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และสามารถติดตั้งรวมเข้ากับพื้นผิวโลหะของตัวรถได้อย่างกลมกลืน [1] อย่างไรก็ตาม สายอากาศแพตช์แบบดั้งเดิมมักประสบปัญหาข้อจำกัดเรื่องช่วงกว้างแถบความถี่ที่แคบ (Narrow Bandwidth) และมีประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดขนาดของสายอากาศให้เล็กลง ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยหลายงานในปัจจุบันจึงได้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การซ้อนโครงสร้างหลายชั้น (Multilayer Stacking) การเพิ่มองค์ประกอบปรสิต (Parasitic Elements) และการปรับปรุงโครงสร้างระบบป้อนสัญญาณ (Feeding Network) เพื่อทลายข้อจำกัดดังกล่าว [2] - [3] สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ V2X และอินเทอร์เน็ตของยานยนต์ (Internet of Vehicles: IoV) นั้น ได้มีการพัฒนาสายอากาศเฉพาะทางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น การออกแบบสายอากาศโลโก้แบบบางพิเศษ (Ultra-Thin Logo Antenna) การพัฒนาสายอากาศแบบยืดหยุ่นและสายอากาศที่สอดคล้องกับพื้นผิว (Conformal Antenna) สำหรับติดตั้งบนโครงสร้างรถยนต์ รวมไปถึงการออกแบบสายอากาศที่รองรับสองย่านความถี่ (Dual-Band Antenna) สำหรับการสื่อสารระหว่างยานพาหนะด้วยกัน (Vehicle-to-Vehicle: V2V) โดยตรง [4] แต่อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในเชิงการประยุกต์ใช้ แต่ในหลายกรณีก็ยังคงมีข้อจำกัดเรื่องต้นทุนการผลิต วัสดุที่ใช้มีราคาสูง หรือยังขาดการประเมินสมรรถนะเชิงทดลองในสภาพแวดล้อมการขับขี่จริง นอกจากนี้งานวิจัยบางส่วนได้เริ่มขยายขอบเขตไปสู่การพัฒนาสายอากาศแบบหลายพอร์ตและสายอากาศแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multi-Input Multi-Output: MIMO) สำหรับยานยนต์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของลิงก์การสื่อสาร [5] - [6] ทว่าโครงสร้างดังกล่าวมีความซับซ้อนในการออกแบบสูง จึงไม่เหมาะสมกับระบบ V2X ที่ต้องการโครงสร้างที่เรียบง่ายและมีต้นทุนต่ำในเชิงพาณิชย์ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ายังคงขาดแคลนงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาสายอากาศแพตช์ขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบ V2X ที่สามารถรักษาสมรรถนะ ทั้งในด้านช่วงกว้างแถบความถี่ ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น และความสอดคล้องเชิงโครงสร้างไว้ได้อย่างสมดุล [7] - [9] พร้อมทั้งมีการประเมินผลเชิงทดลองอย่างเป็นระบบ แม้ว่าการศึกษาการออกแบบเชิงโครงสร้างและการเลือกใช้วัสดุฐานรองที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับระบบ IoV และการสื่อสารในยุคใหม่ในระยะหลังได้พัฒนาการยกระดับสมรรถนะได้อย่างมีนัยสำคัญ [10] - [12] แต่การปรับปรุงโครงสร้างให้ตอบโจทย์ความต้องการเฉพาะของ V2X ยังคงเป็นประเด็นที่ท้าทาย ซึ่งข้อจำกัดและช่องว่างทางวิจัยดังกล่าวถือเป็นแรงจูงใจสำคัญในการนำเสนองานวิจัยในบทความนี้

2. ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศกะทัดรัดสำหรับ V2X เริ่มต้นได้ออกแบบสายอากาศขนาดโมโนโพลวงกลมขนาดเล็กมีระนาบกราวด์บางส่วนที่สามารถปฏิบัติการที่ย่านความถี่ 5.8-5.9 GHz [11],[12] โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยโมโนโพลวงกลมที่มีรัศมี r_1 ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น ป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มที่มีความยาว l_f และความกว้าง w_{f1} และ w_{f2}

พิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ที่มีค่า ε_r เท่ากับ 4.3 วางบนวัสดุรองรับ (Substrate) ที่มีความยาว l ความกว้าง w และความสูง h_0 เท่ากับ 1.6 มม. และมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Tangent) δ เท่ากับ 0.02 ส่วนด้านหลังมีแผ่นระนาบกราวด์แบบบางส่วนที่มีความยาว l_g และความกว้างเท่ากับ w โดยที่ระนาบกราวด์จะมีการปรับแต่งด้วยมุม α เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศเดี่ยว

สำหรับการป้อนสัญญาณนั้น ค่าความยาวเริ่มต้นของเส้นไมโครสตริปป้อนสัญญาณ l_f จะเลือกที่ความยาวประมาณ $\lambda/4$ เมื่อ λ คือค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ ดังนั้นในโครงงานนี้จึงใช้ค่า l_f = 13 มม. ส่วนค่าความกว้าง w_f สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) กล่าวคือ w_{f1} = 2 มม. w_{f2} =3 มม.

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon_r + 1.41}} \ln\left(\frac{5.98h_0}{0.8w_f + t}\right) \qquad (1)$$

โดย

ความสูงของวัสดุรอง h_0 เท่ากับ 1.6 มม.

t คือค่าความหนาของตัวนำ ซึ่งในโครงงานนี้มีทองแดงเป็นแผ่นตัวนำ มีความหนาเท่ากับ 0.035 มม.

สำหรับการออกแบบสายอากาศโมโนโพลวงกลมรัศมี r_1 นั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาค่าความยาวรัศมีที่ทำเป็นเกิดความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ที่ความถี่ความถี่ปฏิบัติการ 5.8 GHz ด้วยสมการที่ (2) [13] ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเริ่มต้น r_1 ได้ เท่ากับ 5.5 มม.

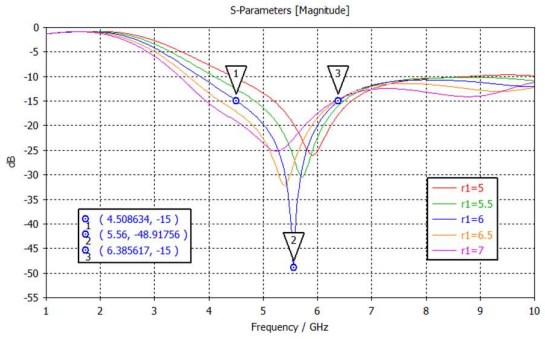
$$f_r = \frac{72}{2.25r_1}\text{GHz} \qquad (2)$$

หมายเหตุ หน่วยของ r_1 ในสมการที่ (2) เป็นมิลลิเมตร

ในการพิจารณาได้พิจารณาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์และการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งได้แสดงในหัวข้อต่อไป

3. การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สายอากาศ

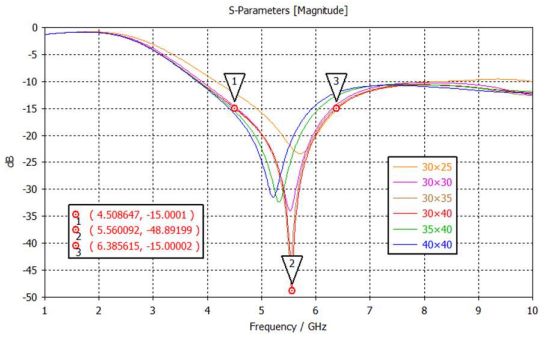
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 2 ผลกระทบของ r_1 ต่อ $|S_{11}|$

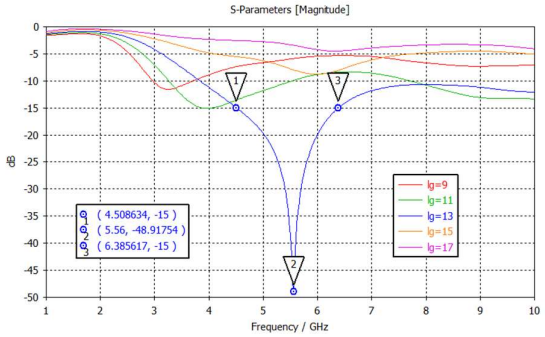
รูปที่ 2 แสดงผลการจำลองการศึกษาผลกระทบของรัศมีแพตช์วงกลม (r_1) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ($|S_{11}|$) ของสายอากาศ จากการแปรผันค่า r_1 ตั้งแต่ 5 ถึง 7 มม. พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์และแถบความถี่ปฏิบัติการ โดยเมื่อกำหนดให้ r_1 = 5 มม. ความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อนไปย่านความถี่สูง และให้ช่วงกว้างแถบความถี่ที่ค่า $|S_{11}|$

≤ -15 dB อยู่ในช่วง 5.2 – 6.6 GHz เมื่อเพิ่มขนาดเป็น r_1= 5.5 มม. ความถี่เรโซแนนซ์จะเริ่มเลื่อนไปยังย่านความถี่ต่ำ โดยมีแถบความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 4.86 – 6.44 GHz สำหรับกรณีที่ r_1= 6 มม. พบว่าสายอากาศเกิดการเข้าคู่เชิงอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมและให้การตอบสนองเชิงความถี่ที่กว้างที่สุดครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 4.51 – 6.39 GHz ทว่าเมื่อขยายขนาด r_1 เพิ่มขึ้นเป็น 6.5 มม. และ 7 มม. ความถี่เรโซแนนซ์ กลับเลื่อนไปทางย่านความถี่สูงขึ้นอีกครั้ง ส่งผลให้แถบความถี่ปฏิบัติการแคบลงเหลือเพียง 4.2 – 6.3GHz และ 3.9 – 6.3 GHz ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลกระทบของพารามิเตอร์ r_1 ทั้ง 5 ค่า จึงสรุปได้ว่า r_1 = 6 มม. เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้พัฒนาสายอากาศ เนื่องจากครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน V2X ที่ต้องการ และมีประสิทธิภาพในการเข้าคู่เชิงอิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด



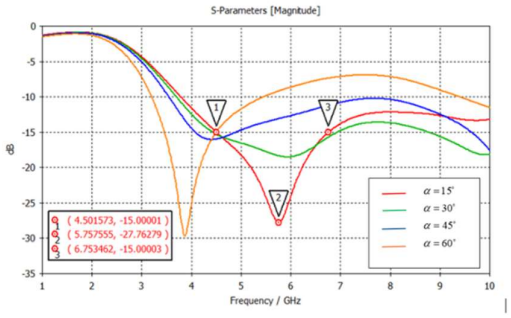
รูปที่ 3 ผลกระทบของขนาดวัสดุฐานรองต่อ $|S_{11}|$

สำหรับผลการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับพารามิเตอร์ขนาดวัสดุฐานรอง ($w \times l$) ดังรูปที่ 3 จากการแปรผันขนาดของฐานรอง พบว่าขนาดของพื้นที่ส่งผลโดยตรงต่อการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์และประสิทธิภาพการจัดส่งกำลัง โดยการเพิ่มความยาว l จาก 25 มม. ไปจนถึง 35 มม. (ในขณะที่คงความกว้าง w = 30 มม.) จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนลงสู่ย่านความถี่ต่ำลงตามลำดับ ในขณะที่การขยายความกว้าง w เป็น 35 มม. และ 40 มม. จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนกลับขึ้นไปที่ย่านความถี่สูงขึ้น จากผลการเปรียบเทียบโครงสร้างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าวัสดุฐานรองขนาด 30 x 40 มม.^{2} เป็นพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด เนื่องจากให้แถบความถี่ปฏิบัติการที่กว้างที่สุดในช่วง 4.51 – 6.39 GHz และมีระดับการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่สุดตลอดย่านความถี่ใช้งาน V2X



รูปที่ 4 ผลกระทบของขนาดความยาวระนาบกราวด์

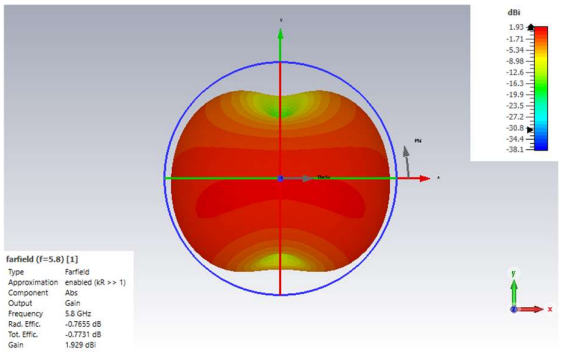
ผลการจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการปรับเปลี่ยนความยาวระนาบกราวด์ (l_g) ดังรูปที่ 4 เมื่อแปรผันค่า l_g ขนาด 9 11 13 15 และ 17 มม. พบว่าความยาวกราวด์ที่สั้นหรือยาวจนเกินไป (ได้แก่ 9 11 15 และ 17 มม.) จะส่งผลกระทบเชิงลบต่อการแมตช์อิมพีแดนซ์ ทำให้แถบความถี่ปฏิบัติการแคบลงและไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน ในขณะที่ความยาว l_g = 13 มม. จะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด โดยสายอากาศสามารถตอบสนองเชิงความถี่ได้กว้างที่สุดในช่วง 4.51 – 6.39 GHz ครอบคลุมย่านความถี่เป้าหมายได้อย่างครบถ้วน ดังนั้น ขนาด l_g = 13 มม. จึงถูกเลือกเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้



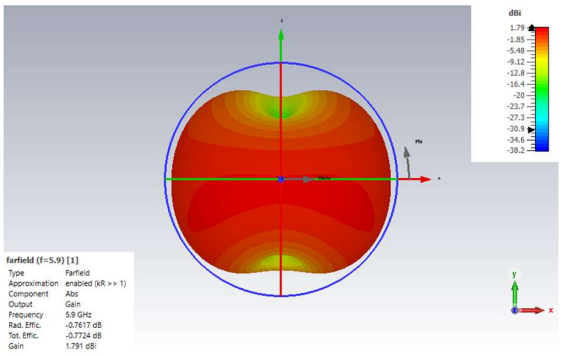
รูปที่ 5 ผลกระทบของ α ต่อ $|S_{11}|$

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของสายอากาศเมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียงบนระนาบกราวด์เป็นมุม α ดังรูปที่ 5 โดยแปรผันค่ามุม α ขนาด 15° 30° 45° และ 60° พบว่าการปรับมุมตัดของกราวด์ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเรโซแนนซ์ สำหรับมุม α = 30° และ 45° จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปทางย่านความถี่สูง ซึ่งให้แถบความถี่ปฏิบัติการในช่วง 4.5 - 6.8 GHz และ 4.1-4.7 GHz ตามลำดับ ในขณะที่การเพิ่มมุมเป็น $\alpha = 60^\circ$ จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนลงสู่ย่านความถี่ต่ำ และส่งผลให้แถบความถี่ปฏิบัติการแคบลงเหลือเพียง 3.5– 4.4 GHz ซึ่งไม่ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการที่ต้องการออกแบบอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่มุม α = 15° พบว่าสายอากาศให้สมรรถนะการเข้าคู่เชิงอิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่สุด และมีแถบความถี่ปฏิบัติการที่ค่า $|S_{11}|$ ≤-15 dB กว้างขวางที่สุดครอบคลุมตั้งแต่ 4.6 –6.7 GHz ซึ่งตอบสนองต่อย่านความถี่เป้าหมาย 5.8 – 5.9 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น มุม α = 15° จึงเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศนี้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเดี่ยวนี้สรุปในตารางที่ 1

โดยสายอากาศที่ออกแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่มีอัตราการขยายเท่ากับ 1.93 dBi และ 1.79 dBi สำหรับความถี่ 5.8 GHz และ 5.9 GHz ดังรูปที่ 6(ก) และ(ข) ตามลำดับ



(ก)



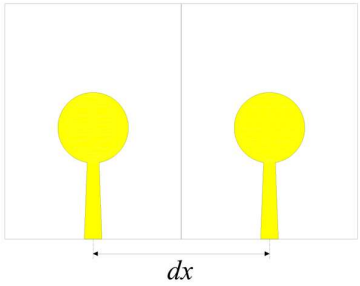
(ข)

รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวที่ความถี่ (ก) 5.8 GHz (ข) 5.9 GHz

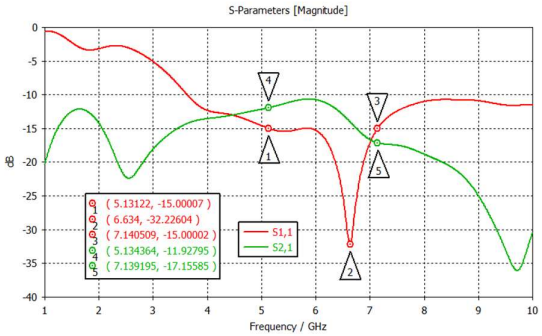
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ออกแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
l	40	l_f	13
w	30	w_{f1}	2
r_1	6	w_{f2}	3
l_g	13	α	15°
w_g	30	h_0	1.6

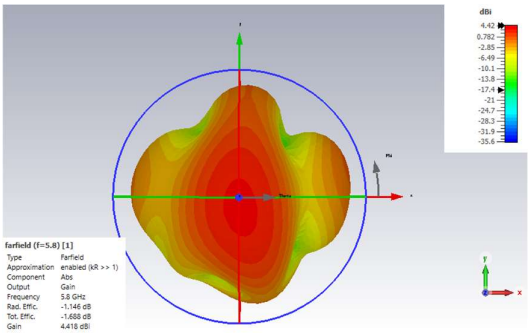
นอกจากนี้ ได้พิจารณาการจัดเรียงเป็นระบบสายอากาศ MIMO แบบ 2 องค์ประกอบแบบที่ 1 วางห่างกันด้วยระยะ d_x ที่วัดจากแกนกลางของสายอากาศแต่ละองค์ปรกอบ (ในกรณีศึกษานี้ d_x= 30 มม.) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังรูปที่ 7 พบว่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (พิจารณา $|S_{11}|$) มีการเข้ากันได้เชิงอิมพีแดนซ์ดียิ่งขึ้นตลอดย่านความถี่ที่พิจารณา คือ 5.13 GHz ถึง 7.14 GHz และการรบกวนสัญญาณระหว่างพอร์ต (พิจารณา $|S_{21}|$) ต่ำกว่า -10 dB ดังรูปที่ 8 โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่มีอัตราการขยายสูงขึ้นเป็น 4.42 dBi และ 4.4 dBi ที่ความถี่ 5.8 GHz และ 5.9 GHz ดังรูปที่ 9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



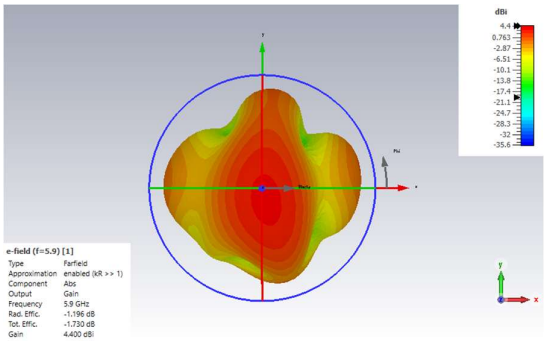
รูปที่ 7 การจัดเรียงสายอากาศ 2xMIMO แบบที่ 1



รูปที่ 8 $|S_{11}|$ ของสายอากาศ 2xMIMO แบบที่ 1



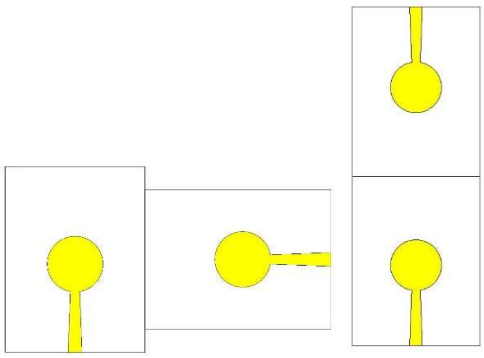
(ก)



(ข)

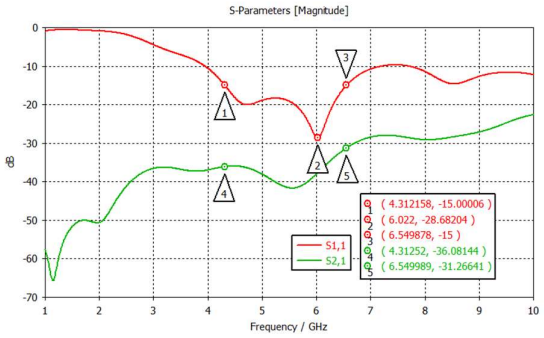
รูปที่ 9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 2xMIMO แบบที่ 1 (ก) f= 5.8 GHz (ก) f=5.9 GHz

นอกจากนี้ได้พิจารณาผลกระทบการจัดวางสายอากาศ MIMO สององค์ประกอบแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ที่แตกต่างกันด้วย ดังรูปที่ 10 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

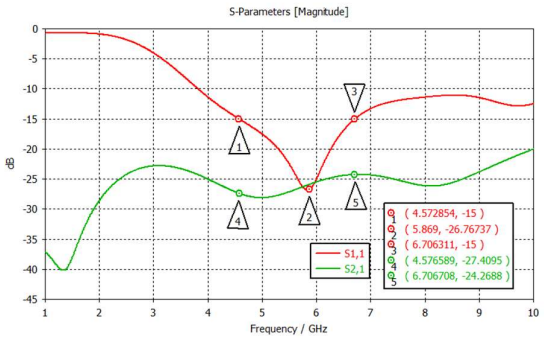


(ก) (ข)

รูปที่ 10 การจัดวางสายอากาศ 2xMIMO (ก) แบบที่ 2 (ข) แบบที่ 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 $|S_{11}|$ ของ 2xMIMO แบบที่ (ก) 2 (ข) 3

พบว่าการจัดเรียงแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ครอบคลุมความถี่แถบกว้างขึ้นเทียบกับแบบที่ 1 คือ

ESTACON 2026 | 17th

ครอบคลุมความถี่ 4.31-6.55 GHZ และ 4.57-6.7 GHZ โดยเกิดความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ต่ำ 6.02 GHz ($|S_{11}|$ = -28.68) และ 5.87 GHz ($|S_{11}|$ = -26.77) สำหรับแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ การจัดเรียงแบบที่ 2 จะมีสัญญาณรบกวนระหว่างพอร์ตดีที่สุดคือ ต่ำกว่า -31 dB ขณะที่การรบกวนระหว่างพอร์ตของการจัดเรียงแบบที่ 3 ต่ำกว่า -24.2 dB ซึ่งการจัดเรียบแบบที่ 2 และ 3 จะช่วยปรับปรุงการรบกวนสัญญาณระหว่างพอร์ต แต่อัตราการขยายของสายอากาศสูงสุดแบบที่ 2 และ 3 จะลดลง คืออัตราการขยายของสายอากาศแบบที่ 2 และแบบที่ 3 เท่ากับ 3.44 dBi และ 2.26 dBi ตามลำดับ

4. สรุปและวิจารณ์

บทความนี้นำเสนอการออกแบบเบื้องต้นของสายอากาศแพตช์แบบโมโนโพลวงกลมขนาดกะทัดรัดสำหรับประยุกต์ใช้งาน V2X ที่ความถี่ 5.8 GHz จากการศึกษาและปรับแต่งพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างผ่านโปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าสายอากาศเดี่ยวที่ได้รับการปรับปรุงพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุด ($w \times l$ = 30x40 มม.^{2} r_1 = 6 มม. l_g = 13 มม. และมุม $\alpha = 15^\circ$) สามารถตอบสนองเชิงความถี่ครอบคลุมแถบความถี่กว้างตั้งแต่ 4.6 – 6.7 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการปฏิบัติการ 5.8 – 5.9 GHz ได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นระบบสายอากาศ MIMO แบบ 2 องค์ประกอบ สายอากาศยังคงรักษาสมรรถนะการเข้าคู่เชิงอิมพีแดนซ์ได้ดีและการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่มีค่าอัตราขยายสูงสุด 4.42 dBi ที่ความถี่ 5.8 GHz และ 4.4 dBi ที่ความถี่ 5.9 GHz ซึ่งผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดเบื้องต้นที่วางไว้ (ไม่น้อยกว่า 2.5 dBi) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำโครงสร้างสายอากาศดังกล่าวไปจัดสร้างจริงและทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อพัฒนาระบบสื่อสาร V2X ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงาน วิจัยสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

[1] Singh, J., Stephan, R., Hein, M. A. (2019), “Low-profile penta-band automotive patch antenna using horizontal stacking and corner feeding,” IEEE Access, vol. 7, pp. 74198–74205.

[2] Li, L. et al. (2024) “An Ultra-Thin Multi-Band Logo Antenna for Internet of Vehicles Applications,” Electronics, vol. 13, no. 14.

[3] Lakshmi, M. N. V. K., Prasad, A. M. (2024). “Design of high flexible multi-band conformal printed patch antenna for sub-6 GHz vehicular communication,” International Journal of Electronics.

[4] Yahya, M., et al., (2025). “A compact dual-band antenna for enhanced vehicle-to-vehicle communication,” Transportation Research Procedia, vol. 84, pp. 370–377.

[5] Kannappan, L., et al. (2023). “Quad-port multiservice integrated optically transparent automotive antenna,” Scientific Reports, vol. 13, 17614.

[6] Keshavarz, R., et al. (2023). “Dual-band slant-polarized MIMO antenna set for vehicular communication,” Proc. EuCAP.

[7] Khan, S., et al. (2024). “Antenna systems for IoT applications: A review,” Discover Sustainability, vol. 5, 412.

[8] Huang, J., Jiawei Zhu, J., Li, H., *et al.* (2024). “Filtering wideband omnidirectional patch antenna with four operation states,” AEU –

International Journal of Electronics and Communications, vol. 177, 155223.

[9] Ha, Y., et al. (2021). “Extremely low-profile monopolar microstrip antenna with wide bandwidth,” Sensors, vol. 21, 5295.

[10] Ashong, E. T., et al. (2025). “Dual-band multilayer patch antenna for multiband internet-of-vehicles applications,” Electronics, vol. 14, 4400.

[11] Singh, J., Stephan, R., Hein, M. A. (2019). “Low-profile penta-band automotive patch antenna using horizontal stacking and corner feeding,” IEEE Access, vol. 7, pp. 74198–74205.

[12] Kanmani Ruby, E. D., Sathiyapriya, T., Sundaravadivel, P., *et al*. (2025). “Compact circularly polarized dual band antenna with modified patch for ISM and V2X communication systems,” Scientific Reports, vol. 15, 5885.

[13]Lamultree, S., Jansri, C. and Phongcharoenpanich, C. (2020). “Investigation of 3.1-10.6 GHz circular monopole antenna with modified partial ground plane,” Przegląd Elektrotechniczny, vol. 96, no. 4, pp. 49-52

การออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยึดแนวราบ

Design and Development of a Flat-Mounted Heating Plate for Surface-Mount Technology Devices

วิไลพร เงินบาท[1], เจษฎาภร พลเคน, ญาณาธิป แก้วอินทร์, พีรภาส ผายชำนาญ,
อภิวัฒน์ อัศวเมฆิน, เกษม เนื้อแก้ว และศุภกร วิศวภัทรธนธร

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
เลขที่ 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
*E-mail : wilaiporn.ng@rmuti.ac.th, 081-9496091

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับงานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนพื้นผิว (Surface Mount Device : SMD) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 5 ระดับ ได้แก่ 140°C, 150°C , 160°C, 170°C และ 180°C ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์อุณหภูมิ นำมาประมวลผลและควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังแผ่นทำความร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบการทำงานของแผ่นให้ความร้อนพบว่า ตัวเครื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตรงตามค่าที่ออกแบบไว้ทั้ง 5 ระดับอย่างแม่นยำ และเมื่อนำไปทดสอบการละลายตะกั่วบัดกรีที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 138°C และ 180°Cพบว่าแผ่นให้ความร้อนสามารถละลายตะกั่วมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 138°C ได้สมบูรณ์ โดยใช้เวลาอยู่ในช่วง 5 และ สามารถละลายตะกั่วมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 180°C ได้สมบูรณ์ในเวลา 7 นาทีตามลำดับ

คำสำคัญ: แผ่นให้ความร้อน, อุปกรณ์ติดตั้งบนพื้นผิว (SMD), ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This research aims to design and construct a temperature-controlled heating plate for soldering surface-mount devices (SMDs). The system is capable of regulating temperatures across five levels: 140°C, 150°C, 160°C, 170°C and 180°C. It is controlled by a microcontroller that receives signals from a temperature sensor, processing the data to regulate power delivery to the heating element using the pulse-width modulation (PWM) technique to match the predefined target temperatures. The operational test results indicated that the device precisely controlled the temperatures at all five designed levels. Furthermore, melting tests conducted on solder alloys with melting points of 138°C and 180°C revealed that the hot plate achieved complete melting for the 138°C melting-point solder within a range of 5 minutes, and successfully completed the melting process for the 180°C melting-point solder within 7 minutes, respectively.

Keywords: Heating Plate, Surface-Mount Device (SMD), Microcontroller

1. บทนำ

การบัดกรีเป็นกระบวนการสำคัญในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรพิมพ์ (PCB) ซึ่งเดิมทีนิยมใช้เทคโนโลยีแบบเจาะรูทะลุ (Through-Hole Technology : THT) [1] อย่างไรก็ตามปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงและมีความซับซ้อนมากขึ้น เทคโนโลยีการติดตั้งบนพื้นผิว (Surface-Mount Technology : SMT) จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความหนาแน่นของการจัดวางอุปกรณ์ [2] แม้ว่า SMT จะช่วยยกระดับการผลิต แต่ด้วยขนาดที่เล็กและการเชื่อมต่อที่ซับซ้อน ส่งผลให้การซ่อมแซมหรือปรับปรุงวงจรทำได้ยากกว่าระบบ THT เดิม [3] แผ่นให้ความร้อนอเนกประสงค์ที่มีวางจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดการขาดระบบควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ โดยความร้อนมักพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดภาวะช็อกความร้อน (Thermal Shock) เกิดความเสียหายได้ และเครื่องมือทั่วไปยังไม่มีฟังก์ชันที่ปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของตะกั่วบัดกรีแต่ละประเภทได้อย่างเฉพาะเจาะจง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะการออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับงานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนพื้นผิวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยหลักการนำความร้อนของความต้านทานของขดลวด [4] โดยเครื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิสำหรับบัดกรีขาอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังแผ่นทำความร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างสัญญาณพัลล์ (Pulse Width Modulation : PWM) ในการควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังแผ่นทำความร้อน เพื่อให้สามารถรักษาและควบคุมระดับอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนดไว้ [5] ซึ่งรองรับการหลอมละลายตะกั่วบัดกรีที่มีจุดหลอมเหลวที่ 138°C และ 183°C ตามลำดับ [6]

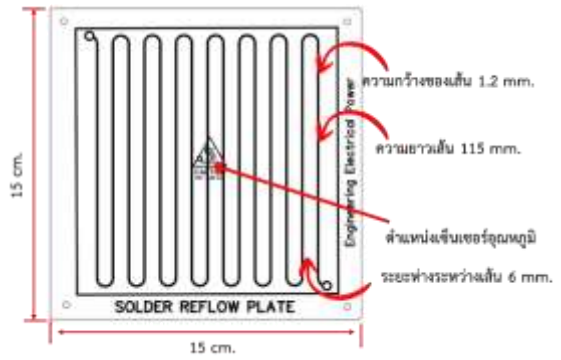
2. การออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยึดแนวราบ

การออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนสำหรับงานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนพื้นผิวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยหลักการนำความร้อนของความต้านทานของขดลวดมาออกแบบและสร้างแผ่นทำความร้อนให้กับเครื่องบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต้องควบคุมการจ่ายพลังงานให้เหมาะสม โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์มาประมวลผลและจ่ายพลังงานให้กับแผ่นทำความร้อน

2.1 การออกแบบลายทองแดงบนแผ่นความร้อน

การออกแบบขนาดของลายทองแดงบนแผ่นความร้อนขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด และความหนาของทองแดง เพื่อให้แน่ใจว่าเส้นทองแดงสามารถรองรับกระแสได้โดยไม่ร้อนเกินไปหรือเกิดการเสียหาย กำหนดอุณหภูมิเป้าหมายสูงสุด 180°C พื้นที่หน้าตัดของเส้นทองแดงที่มีจำหน่ายเท่ากับ 38.4 ตร.ซม. ความยาวของเส้นทองแดงเท่ากับ 2.19 ม. นำมาออกแบบลายทองแดงบนแผ่นความร้อน ที่ขนาด 15*15 ตร.ซม. โดยกำหนดลักษณะลายทองแดงลายทองแดงบนแผ่นบัดกรีแบบรีโฟลว์ดังรูปที่ 1 ความกว้างของแต่ละเส้น 1.2 มม. ระยะห่าง

ระหว่างเส้น 6 มม. ความยาวต่อเส้น 115 มม. ทั้งหมดจำนวน 15 เส้น

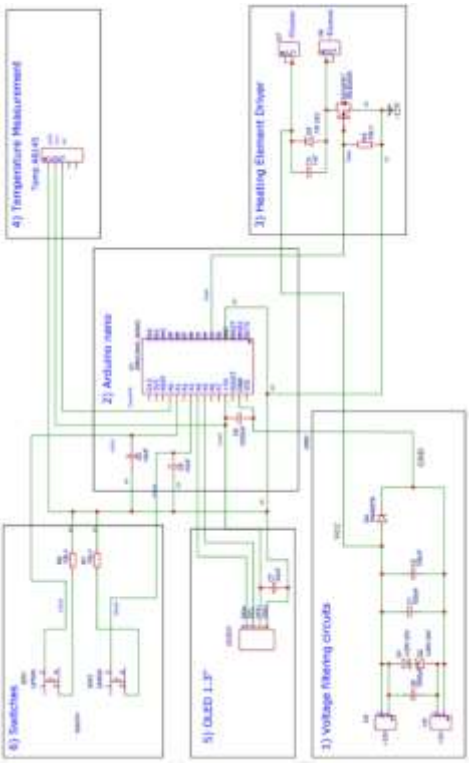


รูปที่ 1 ลายทองแดงบนแผ่นความร้อน

2.2 การออกแบบวงจรและระบบควบคุมการทำงานของแผ่นให้ความร้อน

ในการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน จะใช้การปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นความร้อน โดยเครื่องออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 5 ระดับ ได้แก่ 140℃, 150℃ , 160℃, 170℃ และ 180℃

การออกแบบให้ระบบนี้เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหน่วยประมวลผลหลักในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ วงจรประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ 1) วงจรกรองแรงดัน 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดูโน นาโน 3) วงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ 4) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 5) หน้าจอแสดงผลขนาด 1.3 นิ้ว และ 6) สวิตช์ปุ่มกดสำหรับการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยวงจรควบคุมของแผ่นให้ความร้อนแสดงดังรูปที่ 2 การทำงานของวงจรไมโครคอนโทนลเลอร์จะรับค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ผู้ใช้งานตั้งค่าไว้ผ่านสวิตช์ หากอุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย ระบบจะสั่งให้จ่ายกระแสไฟฟ้าไปขดลวดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดระบบจะลดหรือหยุดการจ่ายกระแสโดยอัตโนมัติ แผ่นให้ความร้อนสำหรับงานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนพื้นผิวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงในรูปที่ 3



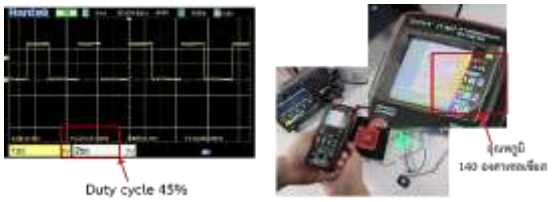
รูปที่ 2 วงจรควบคุมของแผ่นให้ความร้อน



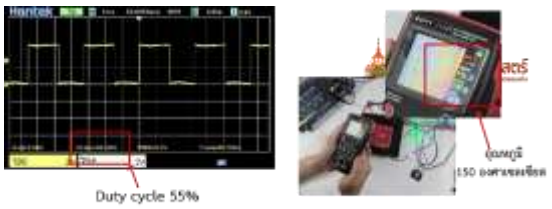
รูปที่ 3 แผ่นให้ความร้อนสำหรับงานบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนพื้นผิว

2.3 การออกแบบวงจรและระบบควบคุมการทำงานของแผ่นให้ความร้อน

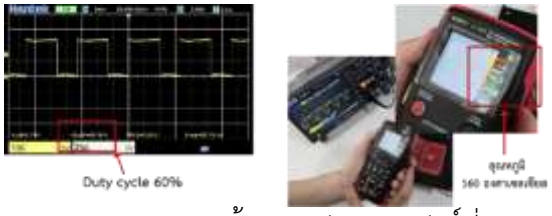
การออกแบบการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ (PWM) ในการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน ระบบใช้เทคนิคการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด โดยทำการตรวจวัดรูปคลื่นสัญญาณ ด้วยออสซิโลสโคป และอุณหภูมิสูงสุดของแผ่นความร้อนเมื่อได้รับพลังงาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของแผ่นความร้อน โดยจ่ายพลังงานให้กับแผ่นความร้อนที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 45%, 55%, 60%, 70% และ 80% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 ตามลำดับ



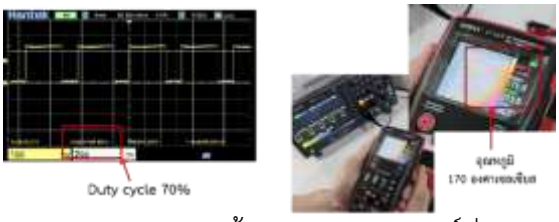
(ก) ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 45%



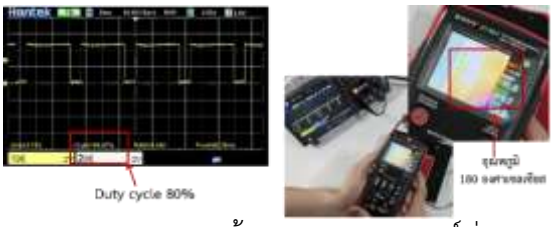
(ข) ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 55%



(ค) ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 60%



(ง) ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 70%



(จ) ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 80%

รูปที่ 4 ทดสอบจ่ายพลังงานให้กับแผ่นความร้อนที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์

จากการทดสอบปรับความกว้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ 45% ทำอุณภูมิสุงสุดที่ 140°C สัญญาณพัลส์ที่ 55% ทำอุณภูมิสุงสุดที่ 150°C สัญญาณพัลส์ที่ 60% ทำอุณภูมิสุงสุดที่ 160°C สัญญาณพัลส์ที่ 70% ทำอุณภูมิสุงสุดที่ 170°C สัญญาณพัลส์ที่ 80% ทำอุณภูมิสุงสุดที่ 180°C

จากการทดสอบการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ (PWM) ได้ออกแบบการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นทำความร้อนเป็นดังนี้ ควบคุมการทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 4 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงเริ่มต้นระบบ ช่วงเร่งอุณหภูมิ ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย และช่วงรักษาอุณหภูมิ ดังรูปที่ 5 แสดงช่วงการควบคุมการทำงานของระบบ

1) ช่วงเริ่มต้นระบบ จะกำหนดความกว้างของสัญญาณพัลส์ 40% Duty Cycle เป็นระยะเวลา 120 วินาที เพื่อช่วยป้องกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

2) ช่วงเร่งอุณหภูมิ หลังจากครบระยะเวลา 120 วินาที ระบบจะปรับค่า ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% เพื่อเร่งอุณหภูมิ

3) ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย ระบบจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 95% ของอุณหภูมิเป้ามหมาย

4) ช่วงรักษาอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของแผ่นความร้อนถึง 95% ของค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้เหมาะสม และจะรักษาอุณภูมิของของแผ่นความร้อนให้ได้ตามค่าเป้าหมาย

ช่วงการควบคุมการทำงาน	อุณหภูมิเป้าหมาย (องศาเซลเซียส)				
	140℃	150℃	160℃	170℃	180℃
ช่วงที่ 1 เริ่มต้นระบบ					
-ความกว้างของสัญญาณพัลส์	40% 120 วินาที				
ช่วงที่ 2 ช่วงเร่งอุณหภูมิ					
-ความกว้างของสัญญาณพัลส์	80%				
-95% ของอุณหภูมิเป้าหมาย	131℃	142℃	152℃	161.5	171℃
ช่วงที่ 3 ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย					
-ความกว้างของสัญญาณพัลส์	45%	55%	60%	70%	80%
-ของอุณหภูมิเป้าหมาย	140℃	150℃	160℃	170℃	180℃
ช่วงที่ 4 ช่วงรักษาอุณหภูมิ					
-ความกว้างของสัญญาณพัลส์	45%	55%	60%	70%	80%
-ของอุณหภูมิเป้าหมาย	140℃	150℃	160℃	170 ℃	180℃

รูปที่ 5 แสดงช่วงการควบคุมการทำงานของระบบ

3. ทดสอบการทำงานของแผ่นให้ความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยึดแนวราบ

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน ได้ทำการทดสอบการตอบสนองของระบบที่ค่าอุณหภูมิเป้าหมาย 140℃ , 150℃, 160℃, 170℃ และ 180℃ ตามลำดับ

4.1) อุณหภูมิที่ 140℃ เริ่มต้นระบบจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 40% เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ช่วงเร่งอุณหภูมิจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% จนกว่าอุณหภูมิจะถึง 131℃ (95% ของ 140℃) ที่เวลา 210 วินาที เข้าสู่ช่วงที่ 3 ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย จะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 45% จนถึงอุณหภูมิ 140℃ ที่เวลา 330 วินาที ช่วงที่ 4 ช่วงรักษาอุณหภูมิ จะปรับกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิเป้าหมาย

4.2) อุณหภูมิที่ 150 ℃ เริ่มต้นระบบจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 40% เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ช่วงเร่งอุณหภูมิจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% จนกว่าอุณหภูมิจะถึง 142℃ (95% ของ 150℃) ที่เวลา 240 วินาที เข้าสู่ช่วงที่ 3 ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย จะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 55% จนถึงอุณหภูมิ 150℃ ที่เวลา 330 วินาที ช่วงที่ 4 ช่วงรักษาอุณหภูมิ จะปรับกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิเป้าหมาย

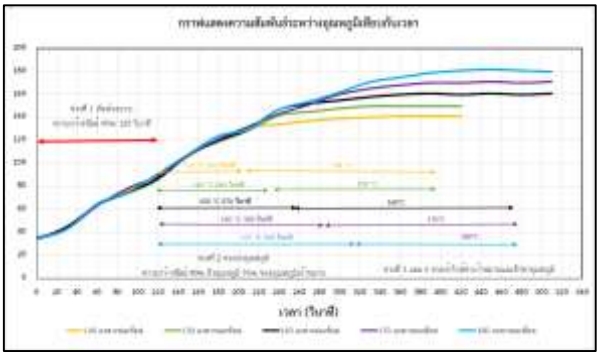
4.3) อุณหภูมิที่ 160℃ เริ่มต้นระบบจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 40% เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ช่วงเร่งอุณหภูมิจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% จนกว่าอุณหภูมิจะถึง 152℃ (95% ของ 160℃) ที่เวลา 270 วินาที เข้าสู่ช่วงที่ 3 ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย จะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 60% จนถึงอุณหภูมิ 160℃ ที่เวลา 360 วินาที ช่วงที่ 4 ช่วงรักษาอุณหภูมิ จะปรับกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิเป้าหมาย

4.4) อุณหภูมิที่ 170℃ เริ่มต้นระบบจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 40% เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ช่วงเร่งอุณหภูมิจะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 80% จนกว่า

อุณหภูมิจะถึง 160°C (95% ของ 170°C) ที่เวลา 300 วินาที เข้าสู่ช่วงที่ 3 ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย จะทำงานที่ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 70% จนถึงอุณหภูมิ 170°C ที่เวลา 390 วินาที ช่วงที่ 4 ช่วงรักษาอุณหภูมิ จะปรับกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิเป้าหมาย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของอุณหภูมิที่ 140°C , 150°C, 160°C, 170°C และ 180°C

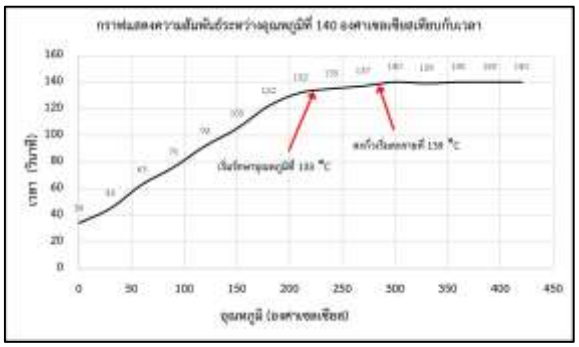
เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)				
	140	150	160	170	180
0	34	34	34	35	34
30	44	43	45	43	43
60	64	64	64	63	65
90	76	74	75	78	75
120	90	86	87	89	91
150	106	108	107	107	108
180	121	119	120	121	124
210	131	129	130	132	130
240	134	142	147	143	147
270	137	145	152	151	154
300	139	148	155	160	162
330	140	150	158	165	171
360	141	150	160	168	175
390	141	150	161	170	179
420	141	150	160	170	181
450	-	-	161	171	182
480	-	-	160	170	181
510	-	-	161	171	180



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

3.1 ทดสอบการละลายของตะกั่วที่ 138°C และ 180°C

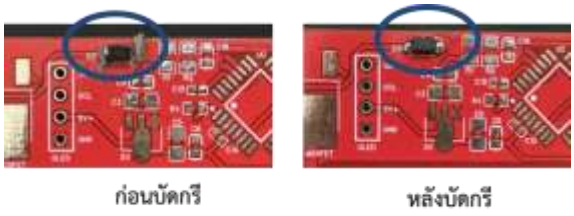
เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นความร้อน ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถในการให้ความร้อนเพื่อหลอมละลายตะกั่วที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 138°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับงานบัดกรีที่ต้องการใช้ความร้อนไม่สูง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการละลายของตะกั่วที่ 138 °C

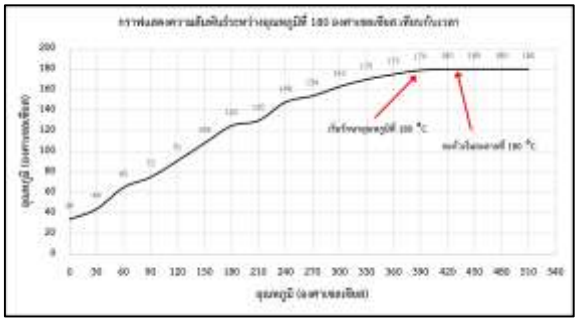
จากผลการทดสอบการหลอมละลายตะกั่วที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 138°C ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามช่วงเวลา โดยเริ่มต้นจากประมาณ 34°C และสามารถเพิ่มอุณหภูมิถึงประมาณ 140°C ภายในเวลา 300 วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการ

หลอมละลายตะกั่วได้ตามต้องการ แสดงการหลอมละลายตะกั่วดังรูปที่ 8 หลังจากนั้นระบบสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงประมาณ 139–140 ℃ ได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 8 การละลายของตะกั่วที่ 138 ℃

ทดสอบความสามารถในการให้ความร้อนเพื่อหลอมละลายตะกั่วที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 180℃ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่นิยมใช้งานในกระบวนการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบติดตั้งบนแผงวงจร เนื่องจากตะกั่วสามารถหลอมละลายและไหลตัวได้ดี ช่วยให้การเชื่อมต่อระหว่างขาอุปกรณ์กับแผงวงจรมีความแน่นหนาและมีคุณภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการละลายของตะกั่วที่ 180℃ แสดงดังรูปที่ 9 จากผลการทดสอบความสามารถในการหลอมละลายตะกั่วที่อุณหภูมิประมาณ 180 ℃ พบว่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามช่วงเวลาโดยเริ่มต้นจากประมาณ 34 ℃ และสามารถเพิ่มอุณหภูมิถึงประมาณ 179℃ ภายในเวลา 390 วินาที และเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ 180℃ ในช่วงเวลาประมาณ 420 วินาที หลังจากนั้นระบบสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 180℃ ได้อย่างต่อเนื่อง แสดงการหลอมละลายตะกั่วดังรูปที่ 10 จะเห็นว่าสามารถละลายตะกั่วได้สมบูรณ์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการละลายของตะกั่วที่ 180 ℃



รูปที่ 10 การละลายของตะกั่วที่ 180 ℃

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างแผ่นให้ความร้อนแนวราบสำหรับใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทเทคโนโลยีติดผิวหน้า (Surface-Mount Technology: SMT) ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยหลักการนำความร้อนของความต้านทานของขดลวด พร้อมทั้งพัฒนาระบบควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อันเนื่องมาจากความร้อนในส่วนของการควบคุมการทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 4 ช่วงหลัก ได้แก่ 1) ช่วงเริ่มต้นระบบ 2) ช่วงเร่งอุณหภูมิ 3) ช่วงเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย และ 4) ช่วงรักษาอุณหภูมิ ผลการทดสอบการทำงานของแผ่นให้ความร้อนทดสอบการหลอมละลายตะกั่วที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 138°C ผลการทดสอบพบว่า

เวลาในการเริ่มต้นถึงหลอมละลายตะกั่วได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา 5 นาที ทดสอบการหลอมละลายตะกั่วที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 180°C ผลการทดสอบพบว่าเวลาในการเริ่มต้นถึงหลอมละลายตะกั่วได้อย่างสมบูรณ์ 7 นาที และสามารถรักษาอุณหภูมิเป้าหมายให้คงที่ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการสร้างสรรค์สู่งานวิจัยถ่ายทอดเทคโนโลยีนักศึกษาระดับปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2569 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Jiang, Y. Zhou, and X. Wang, Introduction to Electronic Manufacturing Technologies: From Through-Hole to Advanced Packaging. Singapore: Springer, 2023, pp. 45–62.

[2] ชลทิศ เขื่อนแก้ว. (2558). เทคโนโลยีการประกอบและการบัดกรีอุปกรณ์ติดผิวหน้า (SMT), กรุงเทพฯ: นักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[3] IPC, IPC-7711/7721D: Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies, IPC Standard, Focused Update, Oct. 2025.

[4] R. A. Serway and J. W. Jewett, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 11th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2024, ch. 26, pp. 712–725.

[5] วีรเชษฐ์ ขันเงิน และ นวภัทรา หนูนาค. (2560). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics), กรุงเทพฯ: วี.เจ. พริ้นติ้ง.

[6] Indium Corporation, "Technical Data Sheet: Low-Temperature Solder Paste Indium5.8Bi (138°C) and Standard Sn63/Pb37 (183°C) Alloys," Indium Corp., Clinton, NY, Tech. Rep., Jan. 2026

เครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Solar Panel Cleaning Machine

ขวัญใจ นาชัยภูมิ[1,*], ชัยรุจ แก้วโหมดตาด, ธเนศ โพธิ์สุ, ศรัญวุฒิ สานารินทร์ และ กำธร เลยหยุด

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

*ผู้ติดต่อ: kwanjai.na@rmuti.ac.th, 087-2414500

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบขนาดกลาง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง ร่วมกับตัวขับมอเตอร์ BTS7960 ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24V สำหรับหมุนแปรงทำความสะอาดพร้อมระบบจ่ายน้ำ เครื่องต้นแบบสามารถปรับความเร็วรอบได้ในช่วง 0–270 รอบต่อนาที และเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ทั้งตามและทวนเข็มนาฬิกา จากการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 300W จำนวน 8 แผง ที่ติดตั้งบนดาดฟ้าอาคาร พบว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยก่อนทำความสะอาดอยู่ที่ 39.37 V และเพิ่มขึ้นเป็น 42.01 V หลังทำความสะอาด คิดเป็นการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 6.52 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องทำความสะอาดที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีต้นทุนการดำเนินงานต่ำเพียง 105.6 บาทต่อเดือนเมื่อใช้งาน 8 ชั่วโมงต่อวัน

คำสำคัญ: เครื่องทำความสะอาด, แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Abstract

This research aims to design and construct a solar panel cleaning machine for medium-scale systems. The system employs an Arduino UNO R3 microcontroller as the main processing unit, integrated with a BTS7960 motor driver to control a 24V DC motor that drives a rotating cleaning brush with water delivery. The prototype supports variable rotational speed from 0 to 270 RPM with both clockwise and counterclockwise rotation. Field tests conducted on eight 300W solar panels installed on a rooftop revealed that the average output voltage increased from 39.37 V before cleaning to 42.01 V after cleaning, representing an average improvement of 6.52%. Results confirm that the developed cleaning machine effectively enhances solar panel electricity generation efficiency at a low operating cost of approximately 105.6 THB per month for 8 hours of daily use.

Keywords: Cleaning Machine, Solar Panel, Electricity Generation Efficiency, DC Motor.

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งในประเทศไทยและทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถหมุนเวียนใช้ได้ไม่จำกัด เทคโนโลยีแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าบนหลังคา (Solar Rooftop) โซล่าฟาร์ม (Solar Farm) และโซล่าฟาร์มลอยน้ำ (Floating Solar Farm) เป็นต้น [1]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องติดตั้งในพื้นที่โล่งแจ้ง จึงมักเผชิญกับปัญหาสิ่งสกปรกสะสมบนพื้นผิว ทั้งฝุ่นละออง มูลนก และเขม่าควันจากการเผาป่า สิ่งสกปรกเหล่านี้จะบดบังแสงที่ตกกระทบแผง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง [2-4] จากการศึกษาพบว่า ฝุ่นที่สะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจทำให้กำลังการผลิตลดลงได้สูงสุดถึงร้อยละ 40 [5] นอกจากนี้ การสะสมของฝุ่นในระยะเวลา 30 วันและ 60 วัน ส่งผลให้การส่องผ่านแสงลดลงร้อยละ 3.71 และ 11.15 ตามลำดับ [6]

การทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังคงพึ่งพาแรงงานคนเป็นหลัก สำหรับระบบขนาดใหญ่นิยมใช้หุ่นยนต์อัตโนมัติ แต่มีต้นทุนสูง ในขณะที่ระบบขนาดกลางยังขาดแคลนอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพและต้นทุน คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความยืดหยุ่น ใช้งานง่าย และมีต้นทุนเหมาะสมกับระบบขนาดกลาง โดยสามารถควบคุมแปรงหมุนควบคู่กับการจ่ายน้ำผ่านระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย (1) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (2) ออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแปรงหมุนร่วมกับการจ่ายน้ำ (3) ทดสอบสมรรถนะของเครื่องที่สร้างขึ้น และ (4) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการทำความสะอาด

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพัฒนาอุปกรณ์ทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ภานุพงศ์ ศรีรัตนพงษ์ และคณะ [1] ได้ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ตามราง โดยใช้สวิตช์จำกัดระยะกำหนดตำแหน่งกลับทิศทาง จ่ายแรงดันกระแสตรง 5V สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนและมอเตอร์หมุนแปรง และ 12V สำหรับวาล์วโซลินอยด์ควบคุมการจ่ายน้ำ ระบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 11 เซนติเมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่า สิ่งสกปรกประเภทคราบฝุ่นระดับน้อยและมากใช้จำนวนรอบทำความสะอาด 1 และ 4 รอบตามลำดับ ส่วนคราบดินสอพองซึ่งใช้จำลองมูลนกต้องใช้ 4 และ 7 รอบตามลำดับ

ขจรเดช ปะทะพันธ์ และคณะ [5] ได้พัฒนาเครื่องล้างแผงโซล่าเซลล์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน ซึ่งสามารถทำความสะอาดแผงได้ 1 แผงต่อ 40 วินาที เปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคน 2 คนในระยะเวลาเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่าเครื่องนี้ช่วยลดกำลังคนและต้นทุนได้ถึงร้อยละ 50 และสามารถล้างแผงได้มากกว่าการใช้แรงงานคนถึง 2 เท่าในเวลาเดียวกัน

2.2 ผลกระทบของฝุ่นต่อประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

นิพนธ์ เกตุจ้อย และ มรุพงศ์ กอนอยู่ [6] ศึกษาผลกระทบของฝุ่นที่สะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามชนิด ได้แก่ ซิลิคอนอสัณฐาน ผลึกเดี่ยวซิลิคอน และผลึกผสมซิลิคอน โดยวัดปริมาณฝุ่นสะสมในพื้นที่ติดตั้งพบว่า ในระยะเวลา 7 วัน 14 วัน 30 วัน และ 60 วัน มีปริมาณฝุ่นเฉลี่ย 55, 144, 260 และ 426 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวันตามลำดับ ผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงซิลิคอนอสัณฐานลดลงร้อยละ 3.50 และ 7.28 ที่ 30 และ 60 วัน ในขณะที่แผงผลึกเดี่ยวซิลิคอนลดลงร้อยละ 2.96 และ 5.79 และแผงผลึกผสมซิลิคอนลดลงร้อยละ 2.83 และ 6.03 ตามลำดับ

นอกจากนี้ งานวิจัยของ บุญญฤทธิ์ วังงอน และคณะ [7] รายงานว่าการทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ยถึงร้อยละ 17.58 เมื่อเปรียบเทียบในวันที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งยืนยันความสำคัญของการบำรุงรักษาความสะอาดแผงอย่างสม่ำเสมอ

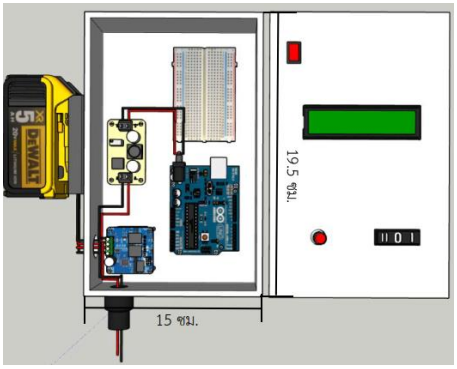
งานวิจัยที่กล่าวมาชี้ให้เห็นว่า การพัฒนาอุปกรณ์ทำความสะอาดสำหรับระบบขนาดกลางยังคงเป็นช่องว่างที่ต้องการการพัฒนาต่อ โดยเฉพาะในด้านความยืดหยุ่นในการใช้งานและต้นทุนที่เหมาะสม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ ชุดควบคุม (Control Unit) และชุดแปรงทำความสะอาด (Cleaning Unit)

3.1 ชุดควบคุม (Control Unit)

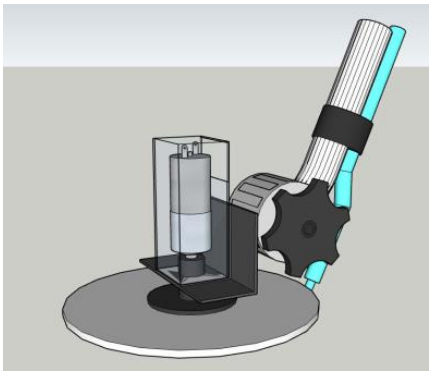
ชุดควบคุมเครื่องทำความสะอาด มีขนาด กว้าง 15 ซม. ยาว 19.5 ซม. ดังแสดงในรูที่ 1 ประกอบด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมขนาด 20V 5Ah จ่ายพลังงานผ่านสวิตช์เปิด-ปิดไปยังวงจรแปลงแรงดัน Stepdown XL4015 ซึ่งลดแรงดันเหลือ 12V สำหรับเลี้ยงวงจร Arduino UNO R3 จากนั้น Arduino รับสัญญาณจากตัวต้านทานปรับค่าได้และสวิตช์เลือกทิศทาง แล้วส่งสัญญาณ PWM ไปยังตัวขับ BTS7960 เพื่อควบคุมมอเตอร์ DC 24V ที่ขับแปรงหมุนทำความสะอาด พร้อมแสดงผลความเร็วและทิศทางบนจอ LCD I2C ขนาด 16×2 (16 ตัว 2 บรรทัด)



รูปที่ 1 ชุดควบคุมเครื่องทำความสะอาด

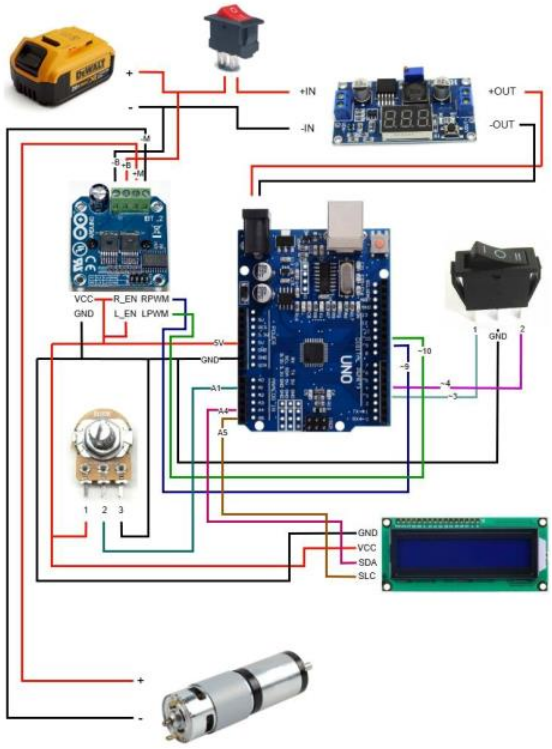
3.2 ชุดแปรงทำความสะอาด (Cleaning Unit)

ชุดตัวแปรงทำความสะอาดมีความยาวด้ามจับ 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยมอเตอร์เกียร์ DC 24V รุ่น 42GP-775 ที่มีแรงบิด 6 kg-cm (0.588 N-m) และความเร็วพิกัด 377 RPM ขณะมีโหลด ติดตั้งภายในตัวครอบอะคริลิคกันน้ำ พร้อมสายส่งน้ำและตัวปรับมุมของด้ามจับ



รูปที่ 2 ตัวแปรงทำความสะอาด

3.3 การออกแบบวงจรควบคุม



รูปที่ 3 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3 ทำงานโดยแบตเตอรี่ลิเธียมขนาด 20V 5Ah จ่ายพลังงานผ่านสวิตช์เปิด-ปิดไปยังวงจรแปลงแรงดัน Stepdown XL4015 ซึ่งลดแรงดันเหลือ 12V สำหรับเลี้ยงวงจร Arduino UNO R3 จากนั้น Arduino รับสัญญาณจากตัวต้านทานปรับค่าได้และสวิตช์เลือกทิศทาง แล้วส่งสัญญาณ PWM ไปยังตัวขับ BTS7960 เพื่อควบคุมมอเตอร์ DC 24V ที่ขับแปรงหมุนทำความสะอาด พร้อมแสดงผลความเร็วและทิศทางบนจอ LCD

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ต้นแบบเครื่องล้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการออกแบบและประกอบเสร็จสมบูรณ์ ในขณะดำเนินทดสอบการใช้งานจริงในภาคสนามโดยผู้ปฏิบัติงาน แสดงดังรูปที่ 4



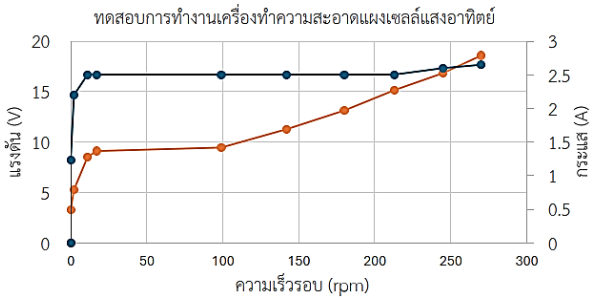
รูปที่ 4 เครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบและสร้าง

4.1 การทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมมอเตอร์

ผลการทดสอบสมรรถนะที่ระดับความต้านทานต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทาน (kΩ)	ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	ค่าแสดงผล LCD (%)
0	270	18.58	2.65	100
10	245	16.84	2.60	90
20	213	15.15	2.50	80
30	180	13.14	2.50	70
40	142	11.27	2.50	60
50	99	9.45	2.50	50
60	17	9.10	2.50	40
70	11	8.52	2.50	30
80	2	5.27	2.20	20
90	0	3.26	1.23	10
100	0	0	0	0

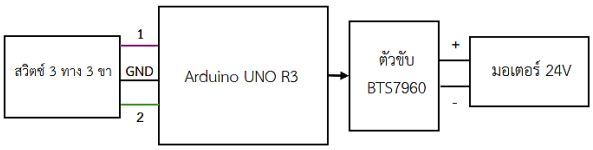


รูปที่ 5 การทดสอบสมรรถนะที่ระดับความต้านทานต่างๆ ของเครื่องทำความสะอาดฯ

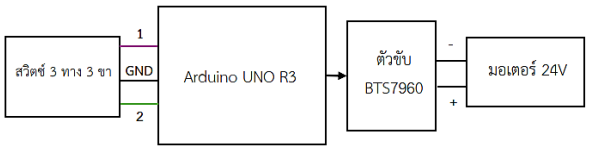
จากผลการทดสอบ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความเร็วรอบมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วง 100–270 รอบต่อนาที (ค่าความต้านทาน 0–50 kΩ) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีมอเตอร์ที่ระบุว่าความเร็วมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันที่ป้อนเข้า ($N \propto Eb/\phi$) ดังนั้นช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพของเครื่องจึงอยู่ที่ระดับ 50–100% ของความเร็วสูงสุด ซึ่งให้ความเร็วรอบ 99–270 รอบต่อนาที

4.2 การทดสอบการหมุนกลับทิศทาง

การทดสอบการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์โดยใช้สวิตช์ 3 ทาง ร่วมกับตัวขับ BTS7960 ดังรูปที่ 6 พบว่าสามารถกลับทิศทางการหมุนได้อย่างราบรื่น โดยการสลับสัญญาณที่ขา IN1 และ IN2 ทำให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาเมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง S1 และหมุนทวนเข็มนาฬิกาเมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง S2



(ก) มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



(ข) มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 6 ไดอะแกรมการกลับทางหมุนของมอเตอร์

4.3 ระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่

เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่ 4.1 สามารถปรับความเร็วได้ 50-100% จึงทำการทดสอบแรงดันแบตเตอรี่ก่อนและหลังใช้งาน 15 นาที ที่ระดับความเร็วต่างๆ ดังแสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันแบตเตอรี่ก่อนและหลังใช้งาน 15 นาที ที่ระดับความเร็วต่าง ๆ

ระดับความเร็ว (%)	ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดันก่อนทดสอบ (V)	แรงดันหลังทดสอบ (V)	แรงดันที่ลดลง (V)
100	270	20	18.50	1.50
90	245	20	18.83	1.17

ระดับความเร็ว (%)	ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดันก่อนทดสอบ (V)	แรงดันหลังทดสอบ (V)	แรงดันที่ลดลง (V)
80	213	20	18.98	1.02
70	180	20	19.01	0.99
60	143	20	19.52	0.48
50	99	20	19.86	0.14

จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อใช้งานที่ความเร็วสูงขึ้น แบตเตอรี่จะสูญเสียแรงดันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้งานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานของวงจรและแรงดันที่จ่าย เมื่อใช้งานที่ความเร็ว 100% (270 rpm) ต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที แรงดันแบตเตอรี่จะลดลงเหลือ 17V ซึ่งต่ำกว่าแรงดันใช้งานปกติ ดังนั้นการปรับความเร็วให้เหมาะสมกับระดับความสกปรกของแผงจะช่วยยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.4 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังทำความสะอาด

นำเครื่องทำความสะอาดฯ ไปทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 300W 46.9V จำนวน 8 แผง ดังรูปที่ 7



(ก) ก่อนทำความสะอาด

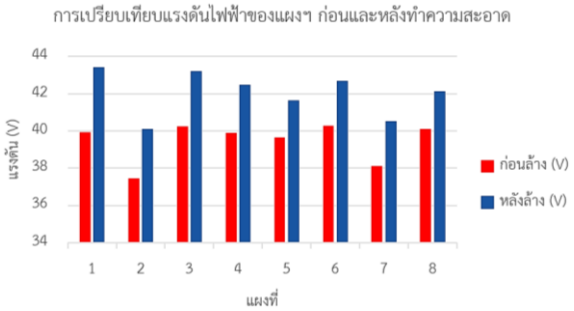


(ข) หลังทำความสะอาด

รูปที่ 7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนและหลังทำความสะอาด

แผงที่	พิกัด (V)	แรงดันก่อนล้าง (V)	แรงดันหลังล้าง (V)	แรงดันที่เพิ่มขึ้น (%)
1	46.9	39.92	43.44	8.82
2	46.9	37.44	40.12	7.16
3	46.9	40.25	43.23	7.40
4	46.9	39.91	42.49	6.46
5	46.9	39.64	41.63	5.02
6	46.9	40.27	42.69	6.01
7	46.9	38.13	40.51	6.24
8	46.9	40.11	42.14	5.06
เฉลี่ย	46.9	39.37	42.01	6.52



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนและหลังทำความสะอาด

จากผลการทดสอบ พบว่าการทำความสะอาดด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นในทุกแผง อยู่ในช่วงร้อยละ 5.02–8.82 โดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.52 ความแปรปรวนของการเพิ่มขึ้นในแต่ละแผงมีสาเหตุมาจากระดับความสกปรกที่แตกต่างกัน โดยแผงที่ 1 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 8.82 มีแนวโน้มว่ามีการสะสมของสิ่งสกปรกมากกว่าแผงอื่นๆ

ผลที่ได้อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรายงานว่าการทำความสะอาดด้วยเครื่องจักรสามารถเพิ่มแรงดันได้ร้อยละ 2–3 [2] และกำลังการผลิตได้ร้อยละ 17.58 ในกรณีที่แผงมีความสกปรกสูง [4] การที่ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้อยู่ที่ร้อยละ 6.52 บ่งชี้ว่าแผงที่ใช้ทดสอบมีระดับความสกปรกในช่วงปานกลาง และเครื่องทำความสะอาดสามารถกำจัดสิ่งสกปรกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียม 20V 5Ah ที่ใช้ สามารถคำนวณต้นทุนการดำเนินงานได้ดังนี้ โดยกำหนดค่าไฟฟ้าที่ 4 บาทต่อหน่วย และประสิทธิภาพของที่ชาร์จร้อยละ 85

พลังงานเฉลี่ยที่ต้องชาร์จต่อครั้ง คำนวณจากแรงดันเฉลี่ยระหว่างเต็มและหมด:

แรงดันเฉลี่ย = (20 + 17) / 2 = 18.5 V

พลังงานที่ต้องชาร์จ = 18.5 × 5 = 92.5 Wh

พลังงานจากแหล่งจ่ายหลักที่ต้องใช้

= 92.5 / 0.85 = 108.82 Wh ≈ 0.109 kWh

ค่าไฟต่อการชาร์จ 1 ครั้ง

= 0.109 × 4 = 0.44 บาท

สำหรับการใช้งาน 8 ชั่วโมงต่อวัน (ต้องชาร์จ 8 ครั้ง) ดังนั้น ค่าไฟต่อวัน = 8 × 0.44 = 3.52 บาท และค่าไฟต่อเดือน (30 วัน) = 105.6 บาท ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับผลประโยชน์ที่ได้รับจากการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าร้อยละ 6.52

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบขนาดกลาง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ร่วมกับตัวขับมอเตอร์ BTS7960 ควบคุมมอเตอร์ DC ขนาด 24V ผ่านการปรับสัญญาณ PWM เครื่องต้นแบบมีคุณสมบัติสำคัญดังนี้

(1) ช่วงความเร็วการทำงาน: สามารถปรับความเร็วรอบในช่วงที่มีประสิทธิภาพ 99–270 รอบต่อนาที (ระดับ 50–100%) โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างสัญญาณควบคุมและความเร็วรอบ

(2) การเปลี่ยนทิศทาง: รองรับการหมุนทั้งตามและทวนเข็มนาฬิกา ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

(3) ประสิทธิภาพการทำความสะอาด: การทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 แผงพบว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 6.52 หลังทำความสะอาด ยืนยันว่าเครื่องสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้จริง

สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไป คณะผู้วิจัยเสนอให้ (1) เพิ่มชุดแปรงทำความสะอาดอีก 1 ชุด เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพการทำความสะอาด (2) ติดตั้งระบบปั๊มน้ำในตัวเพื่อรองรับการใช้งานในระบบโฟลตติ้งที่ขาดแคลนแหล่งน้ำ และ (3) เพิ่มชุดรีดน้ำเพื่อกำจัดคราบที่เหลือภายหลังการล้างให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการสร้างสรรค์สู่งานวิจัยถ่ายทอดเทคโนโลยีนักศึกษาระดับปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2568 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ภานุพงศ์ ศรีรัตนพงษ์, ธนาเทพ เทียนขาว และวัชระ คนรักษา. (2557). "การควบคุมชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์." ปริญญานิพนธ์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[2] Dixit, P., Shah, V., Mehta, P., Patel, H., Sathyamurthy, R., Kabeel, A. E., & Santhosh, A. J. (2026). “Systematic review of soiling mitigation strategies for solar photovoltaic panels.” Discover Sustainability 7, 1 (February).

[3] Ahmad, S., Rashid, A., Awan, A. B., & Butt, U. J. (2026). “Digital Transformations in the Renewable Energy Sector for Net-Zero Targets on the Path to a Sustainable Future.” Energies 19, 12 (June): 2742.

[4] Ali, B., FATIMA, K., IQBAL, A., ALI, S. S., & NADEEM, M. (2024). “Experimental investigation of bird dropping and soiling on PV panel power output in a humid and dusty environment.” Sukkur IBA Journal of Emerging Technologies 7, 1 (May): 1–14.

[5] ขจรเดช ปะทะพันธ์ วิรัช หมั่นบรรจง ประสานพันธ์ สายสิญจน์ กฤตเมธ สายสิญจน์ และกรรณิกา สายสิญจน์. (2564). "เครื่องล้างแผงโซล่าเซลล์ผ่าน Application." ปริญญานิพนธ์สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย.

[6] นิพนธ์ เกตุจ้อย และมรุพงศ์ กอนอยู่. (2555). "ผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้า." ปริญญานิพนธ์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

[7] บุญญฤทธิ์ วังงอน กิตติศักดิ์ คงศรีไพร และสมพร เรืองสินชัยวานิช. (2025) " การพยากรณ์การทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาด้วยสมการการถดถอย." วารสารวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าไทย 2, 2 (May - August): pp. 6–9.

แบบจำลองการควบคุมโดรนทิศทางแนวตั้ง 4 ใบพัด

Model for Vertical Drone Directional Control

กิตติศักดิ์ ทองดา[1], เอกชัย พือสันเทียะ[2] และ ยุกติทัศน์ ชวานนน์พิทักษ์[3]

[1,2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
[1] E-mail: kittisak.tg@rmuti.ac.th, [2] aekachai.pu@rmuti.ac.th, [3] yuktitath.ch@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 0-4423-3000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการควบคุมโดรนหรืออากาศยานไร้คนขับ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายหลากหลายรูปแบบ เช่น การเกษตรกรรม, การขนส่ง, การถ่ายภาพ, การสำรวจ, ความปลอดภัยและความมั่นคงเป็นต้น อีกทั้งได้รับความนิยมจากทั้งภาครัฐและภาคเอกชนจัดหามาใช้งานเรื่อยๆ ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยลดต้นทุนการทำงานของมนุษย์ในพื้นที่เลี่ยงภัยให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

แบบจำลองการควบควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด ใช้รีโมทบังคับวิทยุความถี่ 2.4 GHz ในการบังคับทิศทาง ส่วนบอร์ด Microcontroller ในการสั่งการทำงานทั้งหมดของระบบและใช้ภาษา C ในการพัฒนา จากผลการทดลองการควบควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด สามารถบินขึ้น – ลง ตามความสูงที่กำหนดไว้ คือ 1 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 2.46 วินาที, 2 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 4.22 วินาที, 3 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 6.66 วินาทีและ 4 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 8.31 วินาที ได้ตามลำดับ

คำสำคัญ: รีโมทบังคับวิทยุ, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาษา C

Abstract

Currently, there is technology for controlling drones or unmanned aerial vehicles. It can be applied in a wide variety of industrial applications. Examples include agriculture, transportation, photography, surveying, and security etc. Furthermore, it has gained popularity and is continuously procured for use by both the public and private sectors. This makes things more efficient and helps reduce human labor costs in hazardous areas.

A model for vertical drone directional control. A 2.4 GHz radio remote control will be used for directional control. The Arduino Mega 2560 microcontroller board is used to control all the functions of the system and development was done using the C programming language. From the results of Vertical drone directional control. It can take off and land at a specified altitude at 1 meters gave an average of 2.46 seconds, 2 meters gave an average of 4.22 seconds, 3 meters gave an average of 6.66 seconds and 4 meters gave an average of 8.31 seconds, respectively.

Keywords: Remote Receiver, Microcontroller and C Programming Language

1. บทนำ

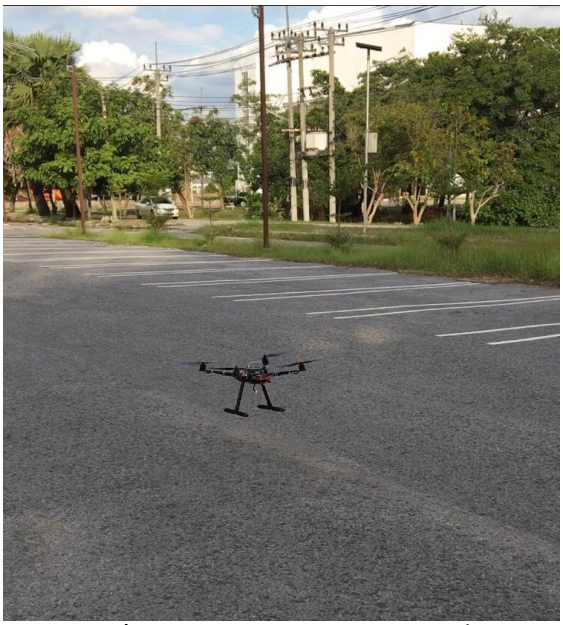
ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการควบคุมโดรน (Drone) หรืออากาศยานที่ไร้คนขับ แต่สามารถควบคุมการบินต่างๆ ได้จากระยะไกลผ่านระบบควบคุมภาคพื้นดินหรือบินอัตโนมัติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายหลากหลายรูปแบบ เช่น การเกษตรกรรม ปลูกพืช เลี้ยงสัตว์ การประมง, การขนส่งและโลจิสติกส์, การถ่ายภาพและภาพยนตร์, การสำรวจและทำแผนที่ [1-2], ความปลอดภัยและโครงสร้างพื้นฐาน [3], การบรรเทาสาธารณภัยและความมั่นคงเป็นต้น อีกทั้งได้รับความนิยมจากทั้งภาครัฐและภาคเอกชนจัดหามาใช้งานเรื่อยๆทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้ทรัพยากรน้อยลง ช่วยลดต้นทุนการทำงานของมนุษย์ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่างๆ และมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

บทความนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาออกแบบและสร้างแบบจำลอง [4] การควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด โดยใช้รีโมทบังคับวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz มี 6 ช่องสัญญาณและบอร์ด Microcontroller ใช้สั่งการทำงานทั้งหมดของระบบ ส่วนในการพัฒนาจะใช้ภาษา C เนื่องจากเป็นภาษาที่ใช้งานง่าย อีกทั้งได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นที่รู้จักในด้านความเรียบง่ายและยังยืดหยุ่นสูงอีกด้วย ทำให้เป็นตัวเลือกยอดนิยมในหมู่ผู้เริ่มต้นศึกษาหรือนักพัฒนาภาษาคอมพิวเตอร์ระดับกลางและสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสหกรรมต่างๆ ทั้งในและนอกประเทศ เป็นต้น ดังที่เห็นในรูปที่ 1. การควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด ที่ควบคุมด้วย Microcontroller

ส่วนการควบคุมใบพัดทั้ง 4 ใบพัด ใช้รีโมทบังคับวิทยุความถี่ 2.4 GHz ในการบังคับทิศทางการขึ้น – ลง ส่วนบอร์ด Microcontroller Arduino Mega 2560 ใช้ในการสั่งการทำงานทั้งหมดของระบบและภาษา C ในการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ความเข้าใจสำหรับผู้ศึกษาทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ และสามารถพัฒนาเป็นส่วนหนึ่งของเอกสารประกอบการสอนรายวิชาการวิชาไมโครคอนโทรล-เลอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมาได้

จากผลการทดลองแบบจำลองการควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด สามารถกำหนดให้บินขึ้น – ลงแนวดิ่งตามความสูงที่กำหนดไว้ คือ 1 เมตร, 2 เมตร, 3 เมตรและ 4 เมตรตามลำดับ

ในส่วนต่างๆ ของบทความวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยการสร้างและออกแบบทั้งด้าน Software และ Hardware ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองตามลำดับ



รูปที่ 1 การควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง

2. การสร้างและออกแบบ

2.1 Hardware

รูปที่ 2 ก. แสดงด้านบนกับรูปที่ 2 ข. แสดงด้านล่างและรูปที่ 2 ค. แสดงด้านข้างของโครงสร้างจริงที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นของแบบจำลองการควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด



ก. ด้านบน



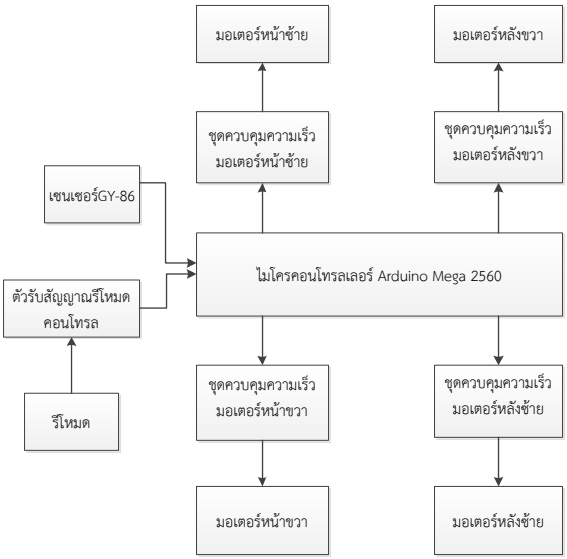
ข. ด้านล่าง



ค. ด้านข้าง

รูปที่ 2 โครงสร้างจริงของแบบจำลอง

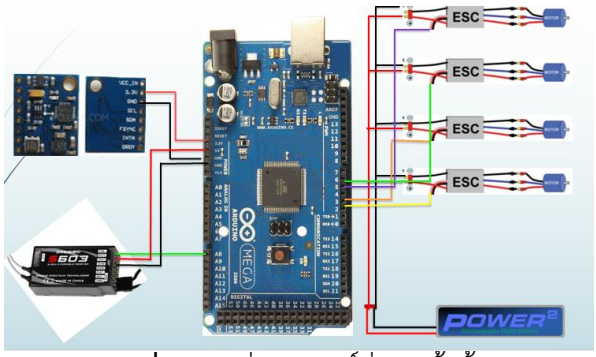
2.2 Software



รูปที่ 3 แผนผังการทำงาน

จากรูปที่ 3 แผนผังการทำงานแบบจำลองการควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด โดยใช้โปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ Android IDE และใช้ภาษา C ในการพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตัวรับสัญญาณรีโมท (Remote Receiver), เซนเซอร์ (Sensor) และมอเตอร์ (Motor) ทั้ง 4 ตัว เป็นต้น

จากรูปที่ 4 เปรียบเทียบแผนผังการทำงานกับการต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันของการควบคุมทิศทางโดรน ประกอบไปด้วย ตัวรับสัญญาณรีโมท, เซนเซอร์, มอเตอร์ใบพัดทั้ง 4 ตัว และบอร์ด Microcontroller เป็นต้น



รูปที่ 4 การต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน

3. ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแบบจำลอง

ครั้งที่	1 m	2 m	3 m	4 m
1	2.45	3.59	6.84	8.75
2	2.41	4.24	6.48	7.88
3	2.58	4.56	6.58	8.26
4	2.52	4.05	7.08	8.07
5	2.40	4.12	7.46	8.28
6	2.38	3.98	6.88	7.94
7	2.42	3.94	6.42	8.74
8	2.54	4.22	5.98	8.65
9	2.39	4.68	6.24	8.06
10	2.55	4.88	6.66	8.53
ค่าเฉลี่ย	**2.46 s**	**4.22 s**	**6.66 s**	**8.31 s**

รูปแบบการทดสอบแบบจำลองการควบคุมทิศทางโดรนนั้น ใช้วิธีทำสัญลักษณ์ที่เสาไฟฟ้าที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 เมตร ตามลำดับ จากนั้นทำการควบคุมรีโมทบังคับวิทยุ แล้วเริ่มจับเวลา เมื่อโดรนได้ความสูงตามที่กำหนดแล้ว จึงหยุดเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา

4. สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่1 จากผลการทดลองแบบจำลองการควบคุมทิศทางโดรนแนวตั้ง 4 ใบพัด กำหนดให้บินขึ้น – ลง ตามความสูงที่กำหนดไว้ คือ 1 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 2.46 วินาที, 2 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 4.22 วินาที, 3 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 6.66 วินาทีและ 4 เมตร ได้ค่าเฉลี่ย 8.31 วินาที ได้ตามลำดับ เพื่อพัฒนาองค์ความรู้และความเข้าใจสามารถที่พัฒนาเป็นส่วนหนึ่งของเอกสารประกอบการสอนรายวิชาการวิชาไมโครคอนโทรล-เลอร์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และสถาบันอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและหุ่นยนต์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือต่างๆ อีกทั้งยังให้คำแนะนำปรึกษา ที่เป็นประโยชน์ต่อคณะผู้ทำวิจัยอีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธีระ ลาภิศชยางกูล, อภิสิทธิ์ ภาสดาและคมศิลป์ วังยาว“การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับราคาถูกในการทำแผนที่ความละเอียดสูงกรณีศึกษาการทำแผนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี” วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่

43 KMUTT Research and Development Journal (Kmutt 43, ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2563 หน้า 311 - 323

[2] พลปรีชา ชิดบุรี, กรกฎ นุสิทธิ์, ธนภัทร วิสิทธิเขต, ฐิติชญา สระทองแมว, ศิวกร ทองคุ้มญาติและภานุพงศ์ เขื่อนมณี "การประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับเพื่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงของ งานป้องกันทางลาดไหล่: กรณีศึกษาเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก"การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 The 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE 27), วันที่ 24-26 สิงหาคม 2565 จ.เชียงราย ประเทศไทย หน้า SGI11-1 ถึง SGI11-7

[3] รจณา คูณพูล, พรนรายณ์ บุญราศรี, สมใจ หมื่นจร, ปวิตร ฏิระวณิชย์กุลและจิรวัฒน์ จันทองพูน "การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรมในการสร้างแบบจำลองสิ่งปลูกสร้าง" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 (The 25th National Convention on Civil Engineering) วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563 จ.ชลบุรี ประเทศไทย หน้า SGI02-1 ถึง SGI02-7

[4] พลากร พรหมเมศร์, สุวินันท์ จันทอุไร, เมธพัฒน์ หอทองและวิษณุ กิตติพงศ์วรการ "กระบวนการควบคุมอากาศยานไร้คนขับอัตโนมัติด้วยโปรแกรมจำลองการบิน Parrot Sphinx" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48 The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48) วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย

ระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย

A Wireless System for Measuring Light Intensity

ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล[1]*,นายศตายุ นิลทองหลาง[1] , สุรินทร์ อ่อนน้อม[1] ,ทนงศักดิ์ มากทอง[1],อนันตชัย โยนะพันธ,[1]
กิตติศักดิ์ ทองดา[1],เอกชัย พือสันเทียะ[1] และ วิญญู ศิลาบุตร [1]

[1] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
*ผู้ติดต่อ: ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล,Phatsakul_th@rmuti.ac.th, 065-6262463

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการวัดความเข้มแสงสว่างแบบไร้สายบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงานประเมินความสว่างของถนนในเวลากลางคืน ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแสงแบบตัวต้านทานแปรค่าตามแสง (LDR) ต้นทุนต่ำ และโมดูลระบุพิกัดตำแหน่ง (GPS) ติดตั้งบนหุ่นยนต์ที่ควบคุมระยะไกลผ่านสมาร์ทโฟน ข้อมูลการวัดจะถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังฐานข้อมูลคลาวด์ (Cloud Database) เพื่อนำมาประมวลผลทางสถิติและสร้างแผนที่ความสว่าง (Brightness Map) ด้วยโปรแกรม MATLAB การคำนวณค่าความเข้มแสง (Lux) ดำเนินการโดยใช้สมการพหุนามกำลังสองที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเซนเซอร์ LDR ผลการทดสอบประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดแสง (Lux Meter) มาตรฐาน พบว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 13.68 – 18.37 ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริง สำหรับการสำรวจและสร้างแผนที่ความสว่างบนท้องถนนในเวลากลางคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วงจรตรวจจับความเข้มของแสง, GPS, แอพพลิเคชั่น Blynk , GUI MATLAB

Abstract

This research article presents the development of a prototype wireless light intensity measurement system integrated into a mobile robot to mitigate occupational risks during nighttime road brightness assessments. The proposed system comprises low-cost Light Dependent Resistor (LDR) sensors and a Global Positioning System (GPS) module mounted on a robot, which is remotely operated via a smartphone. The acquired measurement data is transmitted through a wireless network to a cloud database for statistical processing and the subsequent generation of a Brightness Map utilizing MATLAB. The calculation of light intensity values (in lux) employs a second-order polynomial equation derived from a regression analysis of the voltage drop across the LDR sensor. Performance evaluations, when compared against a standard lux meter, indicate an average measurement error ranging from 13.68% to 18.37%. These findings demonstrate that the developed prototype possesses significant practical potential for efficiently surveying and mapping nighttime road brightness.

Keywords: A Wireless System for Measuring Light Intensity, GPS, Application Blynk , GUI MATLAB

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ระบบส่องสว่างบนท้องถนนและพื้นที่สาธารณะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยและทัศนวิสัยในการขับขี่เวลากลางคืน หากปริมาณการส่องสว่างไม่เพียงพอ ย่อมส่งผลให้ความสามารถในการมองเห็นวัตถุหรือคนข้ามถนนลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ในทางปฏิบัติ การประเมินคุณภาพระบบส่องสว่างจะอ้างอิงตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและมาตรฐานสากล[1] อาทิ กรรมาธิการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง หรือสมาคมวิศวกรรมความส่องสว่างแห่งอเมริกาเหนือ (Illuminating Engineering Society of North America: IESNA) โดยใช้ ค่าความส่องสว่าง (Illuminance) ซึ่งเป็นปริมาณฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นดัชนีชี้วัดหลัก การควบคุมค่าความส่องสว่างให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการส่องสว่างที่มากเกินไป (Over-illumination) นอกจากจะก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานแล้ว ยังอาจสร้างแสงบาดตา (Glare) ซึ่งบั่นทอนประสิทธิภาพการมองเห็นของผู้ขับขี่

ปัจจุบัน การตรวจวัดค่าความส่องสว่างบนท้องถนนยังคงเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วิธีการตรวจวัดแบบดั้งเดิมที่ต้องอาศัยบุคลากรลงพื้นที่สำรวจ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลานาน มีต้นทุนการดำเนินงานสูง และมีความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากข้อจำกัดทางสายตาหรือการสุ่มวัดที่ไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด อุปสรรคเหล่านี้ส่งผลให้การบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าส่องสว่างให้ได้มาตรฐานอย่างสม่ำเสมอเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการบริหารจัดการ

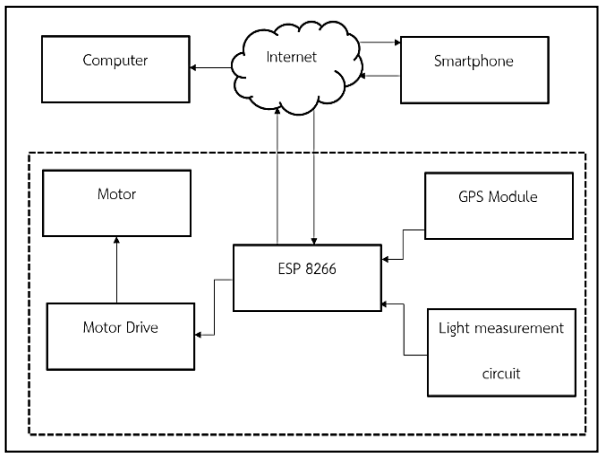
จากข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดความเข้มแสงแบบไร้สาย (Wireless Light Intensity Measurement System) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินคุณภาพแสงสว่างบนท้องถนน ระบบดังกล่าวประกอบด้วยหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติซึ่งบูรณาการเข้ากับเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงและระบบระบุตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลก (GPS) หุ่นยนต์จะทำหน้าที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าความส่องสว่างเชิงพื้นที่ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านระบบเครือข่ายไร้สายไปยังโปรแกรมประยุกต์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อดำเนินการประมวลผล วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน การพัฒนาระบบนี้มุ่งหวังที่จะยกระดับความแม่นยำ ลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน และส่งเสริมการปรับปรุงระบบไฟส่องสว่างสาธารณะให้มีความปลอดภัยและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ที่วัดค่าความเข้มของแสงแบบไร้สายได้
- เพื่อศึกษาการวัดค่าความเข้มของแสงด้วยตัวตรวจจับวัดความเข้มแสง
- เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับแสดงกราฟความสว่างของแสงและตรวจสอบมาตรฐานของแสงสว่างบนท้องถนนเวลาค่ำคืน

3. การออกแบบ

การทำงานของระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สายจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้อินเทอร์เน็ตเป็นสื่อกลาง



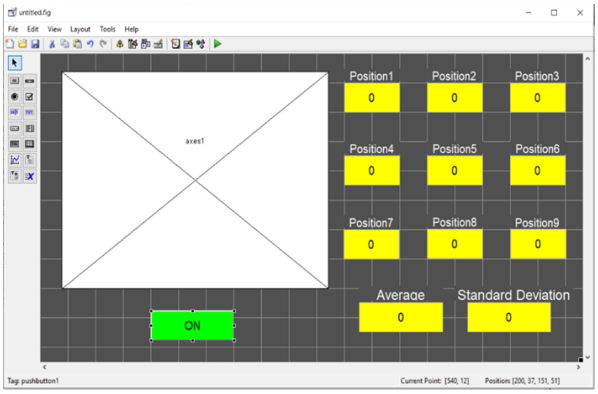
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรม ระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

สถาปัตยกรรมการทำงานของระบบวัดความเข้มแสงด้วยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ที่ทำงานประสานกันอย่างเป็นระบบ เริ่มจากส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านสมาร์ทโฟน ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบระยะไกล (เดินหน้า เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และถอยหลัง) พร้อมทั้งแสดงพิกัดตำแหน่งปัจจุบันและมีปุ่มคำสั่งสำหรับบันทึกข้อมูล ส่วนที่สองคือหน่วยประมวลผลและขับเคลื่อนบนตัวหุ่นยนต์ ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP8266 เป็นศูนย์กลาง ทำหน้าที่รับข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์จากโมดูล GPS ควบคู่กับการอ่านสัญญาณจากวงจรเซนเซอร์วัดแสง เพื่อนำค่าความเข้มแสงและค่าความต้านทานไปแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟน โดยเมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มสั่งบันทึกข้อมูล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งชุดข้อมูลดังกล่าวไปจัดเก็บยังคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ (Cloud Server) []รวมทั้งทำหน้าที่รับคำสั่งการเคลื่อนที่จากสมาร์ทโฟนเพื่อส่งสัญญาณไปควบคุมโมดูลขับมอเตอร์ L298N สำหรับขับเคลื่อนกลไกของหุ่นยนต์ และในส่วนสุดท้ายคือหน่วยวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ในการดึงข้อมูลชุดการวัดจากคลาวด์เซิร์ฟเวอร์มาประมวลผล โดยระบบจะแสดงพิกัดตำแหน่งที่หุ่นยนต์ทำการตรวจวัด ระดับความเข้มแสง ณ จุดพิกัดนั้นๆ รวมถึงการวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยความเข้มแสง และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.)

3.2 การออกแบบซอร์ฟแวร์

การออกแบบโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการแสดงผลแผนที่ทางแสดง ซึ่ง ในส่วนนี้จะถูกติดตั้งลงใน คอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแผนที่ทางแสง โดยโปรแกรมจะสร้างโดยใช้ MATLAB GUIDE เพื่อดึงข้อมูลผ่านทาง Think Speak ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการเก็บข้อมูลบนคลาวด์ ซึ่งโปรแกรมแสดงผลแผนที่ทางแสงแสดงดังรูปที่ 2 ในส่วนที่ 2 จะเป็น ส่วนที่ใช้ในการควบคุมตัวหุ่นยนต์จะใช้แพลตฟอร์ม Blynk ที่จะทำหน้าที่ แสดงตำแหน่งของหุ่นยนต์ และ ความคุมหุ่นยนต์ โดย Blynk จะทำการสื่อสารกับตัวหุ่นผ่านทาง ESP32 ที่อยู่บนตัวหุ่นซึ่งแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การออกแบบและการแสดงผลของโปรแกรม

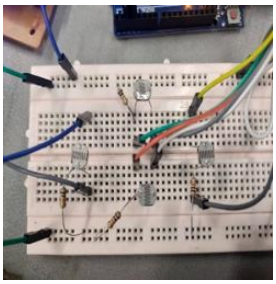
3.3 การออกแบบตัววัดแสง

การประเมินค่าความเข้มแสงในงานวิจัยนี้ อาศัยการตรวจวัดผ่านชุดเซนเซอร์ความต้านทานแปรตามแสง (Light Dependent Resistor: LDR) เบอร์ GL5528 จำนวน 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งถูกจกระจายตัวเพื่อรับแสง



รูปที่ 3 สร้างแอพพลิเคชั่นควบคุมหุ่นยนต์

การทดสอบกระทำภายในกล่องจำลองสภาพแวดล้อมที่ควบคุมความสว่างด้วยหลอด LED โดยใช้เครื่องวัดแสงมาตรฐาน (Light meter) เป็นเครื่องมืออ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าความสว่างที่ระดับ 0 ถึง 500 ลักซ์ (lux) สัญญาณความต้านทานที่อ่านได้จากเซนเซอร์ทั้ง 4 ตัวจะถูกนำมาประมวลผลหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณแปลงค่า

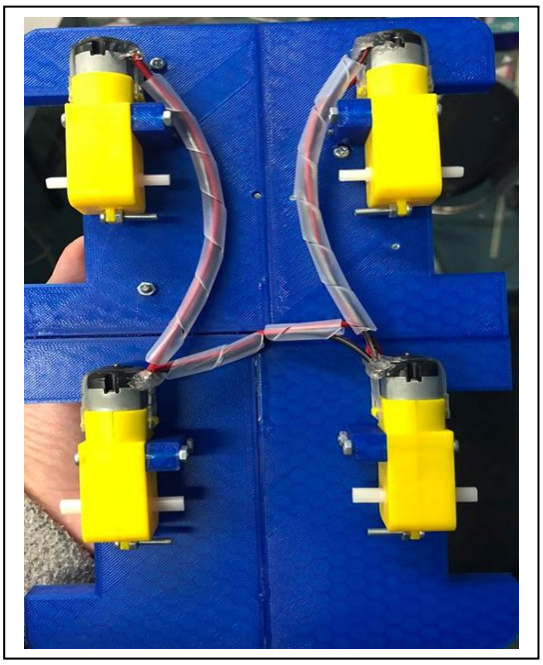


รูปที่ 4 การวางตำแหน่งของตัวตรวจจับทางแสง

จากการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่อ่านได้จากวงจรและค่าความเข้มแสงจริงมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้แบบจำลองสมการถดถอยพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial regression) [3] ในรูปแบบ $y = ax^2 + bx + c$ เพื่อแปลงค่าความต้านทานให้ออกมาเป็นหน่วยลักซ์ ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า ข้อมูลจากการทดลองได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแบ่งช่วงการสร้างสมการออกเป็น 4 ช่วงย่อย คือ ช่วง 0-125 lux,126-250 lux,251-375 lux และ 376-500 lux

4. การสร้างหุ่นยนต์และออกแบบการทดสอบระบบ

ทำการออกแบบและสร้างชุดฐานและฝาครอบของหุ่นยนต์ สำหรับระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สายโดยใช้วัสดุ Polylactic Acid (PLA) เพื่อสร้างชุดฐานของหุ่นยนต์ของระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สายที่มีน้ำหนักเบา โดยมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ทั้ง 4 ล้อของหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูป 2 โครงสร้างหุ่นยนต์ชุดฐานเจาะรูยึดกับมอเตอร์ขนาด 2x7 เซนติเมตร



รูปที่ 5 โครงสร้างหุ่นยนต์ชุดฐานเจาะรูยึดกับมอเตอร์ขนาด 2x7 เซนติเมตร

นอกจากนี้ได้ทำการประกอบชุดตัวฝาครอบของหุ่นยนต์ของระบบการวัดความเข้มของแสงแบบไร้สายที่ Print 3D ด้วยวัสดุ PLA ขนาด 18x26x7.3 เซนติเมตร โดยมีตัวตรวจจับทางแสงอยู่บนฝาครอบด้านบนตัวหุ่นยนต์ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงชุดฝาครอบที่ประกอบเข้ากับโครงหุ่นยนต์ และรูปที่ 6 แสดงชุดฝาครอบที่ใส่ตัวตรวจจับทางแสงตามลำดับ



รูปที่ 6 ชุดฝาครอบที่ประกอบเข้ากับโครงหุ่นยนต์



รูปที่ 7 ชุดฝาครอบที่ใส่ตัวตรวจจับทางแสง

5. การทดลองระบบ

ทำการทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน หน้าอาคาร 25 โดยใช้ระยะในการวัดตามมาตรฐานการตรวจวัดความเข้มของแสงเป็นระยะขนาด 2x2 เมตร ทั้งหมด 9 ตำแหน่ง แล้ววัดค่าความเข้มของแสงโดยใช้เครื่องวัด light meter ในการวัดเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

5.1 การทดลองในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

จากการสร้างแบบจำลองของสมการถดถอย ผู้วิจัยได้สมการถดถอยที่เหมาะสมกับการประมาณค่าของข้อมูล ทั้ง 4 ช่วงดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1: $y = 0.000088715x^2 + 0.002x - 0.0863$

ช่วงที่ 2: $y = 0.0018x^2 - 2.0527x + 618.8359$

ช่วงที่ 3: $y = 0.0146x^2 - 22.7226x + 8984.5$

ช่วงที่ 4: $y = 0.0049x^2 - 4.0466x - 7.9663$

เมื่อ y คือค่าความเข้มแสดงที่ประมาณได้ และ x คือค่าแรงดันตกคร่อม LDR

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ อุปกรณ์วัดแสงที่ประมาณค่าด้วยสมการถดถอยเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนหน้าอาคาร 25 หน้าอาคาร 34 และหน้าอาคาร 12 ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่1-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนหน้าอาคาร 25 ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ตำแหน่งที่	ค่าจากระบบวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย	ค่าจากเครื่องวัด light meter	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	77.1450	71.4	8.0446
2	81.5911	88.1	7.3880
3	69.7419	73.5	5.1130
4	46.4019	52.4	11.4467
5	45.0369	53.7	16.1324
6	45.3660	44.8	1.2633
7	16.4871	22.1	25.3977
8	14.9089	26.3	43.3121
9	18.4661	24.4	24.3192

ค่าเฉลี่ย	46.1272	50.7444	15.8241

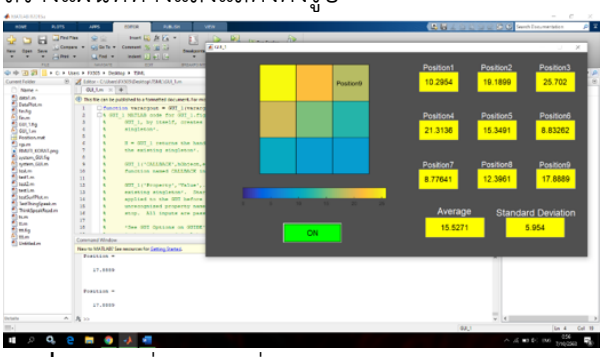
ตารางที่ 2 การทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนหน้าอาคาร 34 ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ตำแหน่งที่	ค่าจากระบบวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย	ค่าจากเครื่องวัด light meter	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	10.2954	11.95	13.8460
2	19.1899	19.62	2.1921
3	25.7020	33	22.1151
4	21.3136	25.7	17.0677
5	15.3491	17.74	13.4774
6	8.83262	12.32	28.3066
7	8.77641	10.56	16.8900
8	12.3961	12.96	4.3510
9	17.8889	18.81	4.8968
ค่าเฉลี่ย	15.5271	18.1844	13.6825

ตารางที่ 3 การทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนหน้าอาคาร 12 ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ตำแหน่งที่	ค่าจากระบบวัดความเข้มของแสงแบบไร้สาย	ค่าจากเครื่องวัด light meter	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	22.0166	24.5	10.1363
2	28.1496	32.1	12.3065
3	38.6359	49.4	21.7896
4	26.3761	32.2	18.0866
5	21.8398	28.2	22.5539
6	17.0989	20.3	15.7689
7	9.05921	12.01	24.5694
8	13.5537	15.8	14.2170
9	16.6334	18.51	10.1383
ค่าเฉลี่ย	21.4848	25.8911	18.3706

จากการทดลองวัดค่าความเข้มของแสงบริเวณถนนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานทั้งสามสถานที่ โดยแต่ละสถานที่มีความเข้มของแสงที่แตกต่างกันตามตารางการทดลอง จะพบว่าหลังจากการตรวจวัดแสดง 9 จุดเพื่อสร้างแผนที่ทางแสงค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย จะอยู่ที่ร้อยละ 13-18 ซึ่งความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณ อาคาร 12 มีค่าร้อยละ 18.4 และต่ำสุดร้อยละ 15.8 ซึ่งจะสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในการสร้างแผนที่ทางแสงสำหรับกรณีที่ต้องการค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งผลจากการวัดค่าของหุ่นยนต์วัดแสงแบบไร้สาย โดยหุ่นส่งค่าไปยังส่วนแสดงผลที่อยู่บนคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างการแสดงผลการทำงานในการสร้างแผนที่ทางแสงแสดงดังรูป



รูปที่ 9 แผนที่ทางแสงที่ปรากฏในส่วนแสดงผล

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการวัดความเข้มแสงสว่างแบบไร้สายบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อสร้างแผนที่ความสว่าง โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานพบว่า ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 13.68 ถึง 18.37 เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดแสงมาตรฐาน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ในกรณีที่ยอมรับความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม ในบางตำแหน่งของการทดลองพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 43.31 ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ LDR ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการวัด รวมถึงอิทธิพลของแสงเงาขณะเคลื่อนที่ที่

ส่งผลต่อการประมวลผลสมการถดถอยพหุนามกำลังสอง เพื่อให้การพัฒนาระบบมีความสมบูรณ์และแม่นยำยิ่งขึ้นในอนาคต ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนจากเซนเซอร์ LDR ไปเป็นเซนเซอร์วัดแสงแบบดิจิทัล เช่น BH1750 หรือ TSL2561 เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงในการตรวจวัดและลดความผิดพลาดจากการสอบเทียบ นอกจากนี้ ควรมีการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติ (Autonomous Navigation) เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถสำรวจพื้นที่ได้ด้วยตนเองอย่างเป็นระบบแทนการควบคุมด้วยมนุษย์ พร้อมทั้งยกระดับความแม่นยำของตำแหน่งพิกัดด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RTK-GPS เพื่อให้แผนที่ความสว่างมีความถูกต้องแม่นยำในระดับเซนติเมตร ตลอดจนการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพแสงสว่างเชิงลึกเพื่อยกระดับประสิทธิภาพของระบบไฟส่องสว่างสาธารณะให้มีความปลอดภัยและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง, **"แนวทางปฏิบัติสำหรับงานออกแบบและติดตั้งไฟฟ้าแสงสว่างบนทางหลวง ชนิดโคมไฟแอลอีดี,"** กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 2565.

[2] MathWorks. (2026). **ThingSpeak IoT platform**. https://thingspeak.com/.

[3] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2020). **Numerical Methods for Engineers (8th ed.).** McGraw-Hill Education.

ESTACON 2026 | 17th

ระบบตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักรด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์

Artificial Intelligence-Integrated Microwave System for Equipment Anomaly Detection

เสกสรรค์ พลศรี[1] วัชรพล นาคทอง[1,*] ปิยดนัย บุญไมตรี[1] มงคล คูพิมาย[1] อุบล สุริพล[1] ธัชชัย พุ่มพวง[1] ภัคธีมา ผินงูเหลือม[1] พลเทพ เวงสูงเนิน[2] จาริณี จงปลื้มปิติ[2] ปรเมศวร์ สุทธิประภา[2] ศราวุธ ศรีวิไล[3], อุมาพร บ่อพิมาย[3]และดำรัส คำเมืองใหม่[4]

[1] สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[2] สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[3]สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา1508 ถ.สุรนารี ต.ในเมือง อ.นครราชสีมา จ.นครราชสีมา30000
[4]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทโธ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 999 หมู่ 6 ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
ผู้ติดต่อ:E-mail: Watcharaphon.na@rmuti.ac.th 044-233000 ต่อ 3140, โทรศัพท์: 086-8698253

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักร ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์เป็นเทคนิคการตรวจติดตามสภาพเครื่องจักรแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายเครื่องจักร เพื่อช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดของเซนเซอร์แบบติดตั้ง เช่น เซนเซอร์วัดความสั่นสะเทือนได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบทางกล โดยระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากสายอากาศไมโครสตริปรูปวงกลม ในการส่งและรับสัญญาณสะท้อนใช้งานที่ความถี่ 2.45GHz สร้างบนแผ่นวัสดุฐานรอง FR4 นำมาวัดค่าจากชิ้นส่วนกลไกที่เคลื่อนที่ภายในเครื่องจักร ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกายภาพในระดับไมโครเมตร จากนั้นสัญญาณสะท้อนที่มีความซับซ้อนแปลงสัญญาณเป็นพลังงานก่อนจะส่งต่อให้ชุดอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ ทำหน้าที่เรียนรู้และจำแนกรูปแบบความผิดปกติ โดยผลจากการทดลองพบว่าระบบที่นำเสนอสามารถตรวจพบสัญญาณความผิดปกติจากการสั่นสะเทือนของตัวเครื่องจักรที่ระยะห่าง R ที่เหมาะสมกับงานใช้งานมากที่สุดระยะห่างเท่ากับ 16 cm มีค่าพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ -34.70 dBm หรือ 0.00033 mW ที่เครื่องจักรที่รอบต่ำเฉลี่ยไม่เกิน 1200 RPM ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับรอบที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ในการจำแนกประเภทความผิดปกติสูงถึงร้อยละ 82%

คำสำคัญ: เครื่องจักร, สั่นสะเทือน, เซนเซอร์สายอากาศ, คลื่นไมโครเวฟ, ปัญญาประดิษฐ์

Abstract

This research presents the development of a system for detecting machine malfunctions using microwave frequency combined with Artificial Intelligence (AI) processing. It is a non-contact, non-destructive machine monitoring technique that helps overcome the limitations of mounted sensors. For example, vibration sensors are affected by mechanical noise. The developed system uses a sensor constructed from a circular microstrip antenna to transmit and receive reflected signals, operating at a frequency of 2.45GHz. It is built on a FR4 base material plate and measures value from moving mechanical parts in machinery, detecting changes in physical behavior at the micrometer level. The complex reflected signals are then converted into energy before being passed on to a set of Artificial

Intelligence (AI) algorithms, which learn and classify patterns of malfunctions. The experimental results showed that the proposed system can detect abnormal signals from the machine vibration at the optimal application distance R of 16 cm, with an average power value of -34.70 dBm or 0.00033 mW at low machine speeds averaging no more than 1200 RPM. The changes in the microwave frequency signal are independent of different cycles, and the Artificial Intelligence (AI) model provides an accuracy of up to 82% in classifying malfunctions.

Keywords: Machinery, Vibration, Antenna Sensor, Microwave, Artificial Intelligence (AI).

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลสำหรับใช้งานในกระบวนการผลิตนั้น ได้ปรับเปลี่ยนจากการบำรุงรักษาตามรอบเวลา ไปสู่การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ [1-5] ซึ่งมุ่งเน้นการตรวจติดตามวิเคราะห์สภาพเครื่องจักรในเวลาจริง เพื่อลดความเสี่ยงจากการหยุดทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตอย่างกะทันหัน ที่ทำก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ซึ่งความผิดปกติของชิ้นส่วนกลไกภายในเครื่องจักร เช่น การสึกหรอของมอเตอร์เครื่องจักร ตลับลูกปืนที่เสียหาย เพลาทำงานผิดปกติ และการเสียสมดุลของเครื่องจักร เป็นต้น จากที่กล่าวมานั้น การตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีการวัดผลของระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปจากจุดศูนย์กลางนิยมใช้วัดสำหรับเครื่องจักรที่รอบต่ำมากๆ (ไม่เกิน 1200 RPM) [6] ซึ่งระบบตรวจตอบความผิดปกติของเครื่องจักรในเวลาทำงานนั้น ยังมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานจริง คือ ในสภาพแวดล้อมการผลิตที่มีสัญญาณรบกวนทางเครื่องจักรมีอุณหภูมิต่ำอุณหภูมิสูง หรือในกรณีที่โครงสร้างภายนอกของเครื่องจักรมีความหนาและซับซ้อน จนทำให้เซนเซอร์แบบสัมผัสไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณจากชิ้นส่วนเคลื่อนไหวภายในได้อย่างแม่นยำ

จากปัญหาที่กล่าวมานั้นคณะผู้วิจัยจึงได้สนใจพัฒนาระบบตรวจสอบด้วยเทคโนโลยีคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Technology) [7,8] เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากเป็นเทคนิคการตรวจวัดแบบไม่สัมผัส (Non-contact) และไม่ทำลาย (Non-destructive Testing) คลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถสะท้อนกลับพลังงานคลื่นได้ จากการเคลื่อนไหวของเครื่องจักร คลื่นความถี่ที่กล่าวมานั้นมีค่าการส่งสัญญาณที่มีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงระยะห่างทางกายภาพหรือคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถตรวจจับความผิดปกติในระดับไมโครเมตรได้จากระยะห่างแบบไม่สัมผัส ซึ่งการวัดผลด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟนั้นถูกนำมาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) โดยเฉพาะการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหานี้อัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ของข้อมูลตัวเลขมีความสามารถในการสกัดคุณลักษณะเด่น (Feature Extraction) จากสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ซับซ้อนและเรียนรู้รูปแบบพฤติกรรมที่ผิดปกติ (Anomaly Patterns) ได้โดยอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบูรณาการข้อดีของการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสด้วยคลื่นไมโครเวฟ เข้ากับความแม่นยำของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษา ความ สามารถในการเฝ้าระวังเครื่องจักร และเพิ่มความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น แต่ยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้ของเซนเซอร์ด้วยสายอากาศไมโครสตริป [8,9] จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับวิทยาการข้อมูลสำหรับงานวิศวกรรมอุตสาหการต่อไป

2. การออกแบบและวัดผลคุณสมบัติของสายอากาศ

การศึกษาเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักร คณะผู้วิจัยเลือกออกแบบ

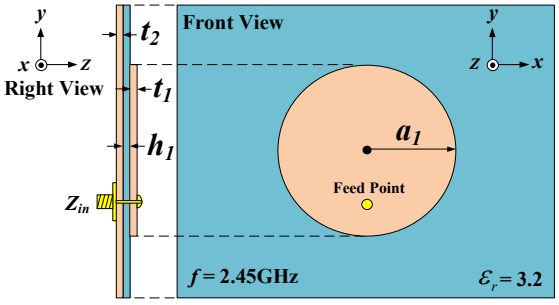
จำลองผลออกแบบโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปวงกลม (Circular Microstrip Patch Antenna) [7] โดยออกแบบที่ย่านความถี่เรโซแนนซ์ใช้งาน f_r = 2.45GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific, and Medical) สร้างบนแผ่นวัสดุฐานรอง FR4 โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ε_r = 4.4 ค่าความหนาทองแดง t_1 และ t_2 = 0.035 mm และมีค่าความหนา h_1 = 1.6 mm โดยโครงสร้างสายอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1-4 [7] และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ตัวแผ่พลังมีค่ารัศมีเท่ากับ 17 mm ค่าความกว้าง W_1 = 50 mm และค่าความยาว L_1 = 65 mm จากการออกแบบ ดังรูปที่ 1(ก) จำลองผลโครงสายอากาศพบว่า 8.73% (2.30-2.51GHz) มีอัตราขยายเท่ากับ 6.04 dBi รูปแบบการแผ่พลังงานเป็นแบบเจาะจงทิศทาง ดังรูปที่ 1(ข)

$$F = \frac{8.791\times10^{9}}{f_r\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

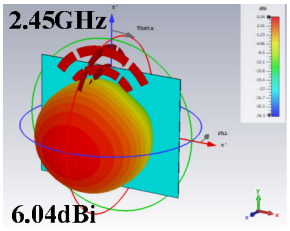
$$a_1 = \frac{F}{\left\{1+\frac{2h}{\pi\varepsilon_r F}\left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right)+1.7726\right]\right\}^{1/2}} \quad (2)$$

$$W_1 = 0.408\lambda \quad (3)$$

$$L_1 = 0.530\lambda \quad (4)$$



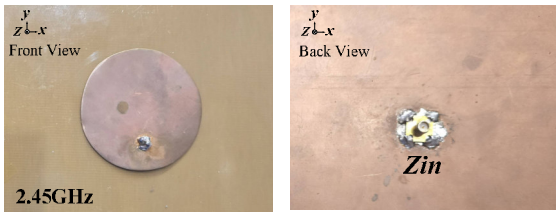
(ก) โครงสร้างสายอากาศ



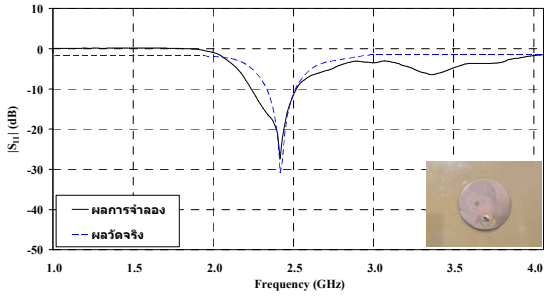
(ข) แบบรูปการแผ่พลังงาน 3D

รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปวงกลม

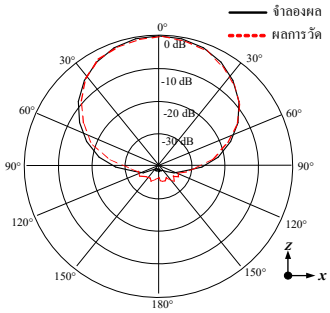
จากการจำลองแบบและสร้างโครงสร้างสายอากาศตามที่ระบุในรูปที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) รุ่น E5071C [9] ดังรูปที่ 2(ก) ผลการวัดพบว่าสายอากาศมีช่วงความถี่ใช้งานที่ตอบสนองต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$(dB) ตั้งแต่ความถี่ 11.36% (2.24-2.51GHz) ดังรูปที่ 3 สายอากาศมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 5.62 dBi รูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) สายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานแบบกึ่งมีทิศทาง (Directional Pattern) ดังรูปที่ 4



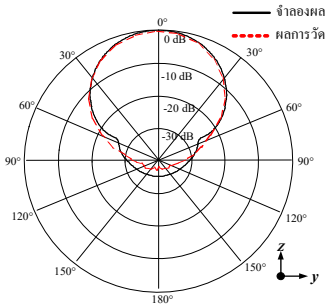
รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปวงกลมสร้างจริง



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบผลวัดค่า $|S_{11}|$(dB) ของสายอากาศไมโครสตริปรูปกลม



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4 รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ

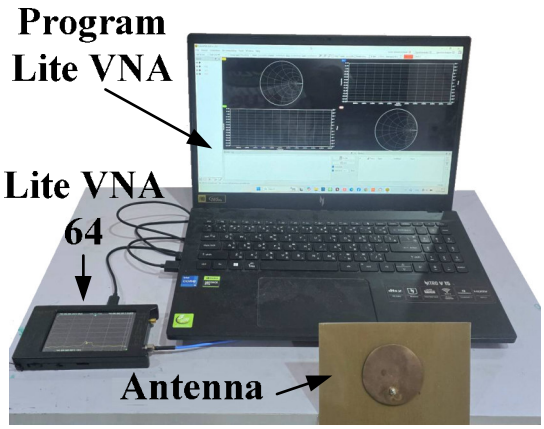
ในส่วนของคุณสมบัติทางเทคนิคทั้งหมดของสายอากาศที่ได้จากการวัดผลนั้น นำมาเปรียบเทียบในดังตารางที่ 1 เพื่อแสดงผลที่ชัดเจนในการวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศ

สายอากาศ 2.50GHz	$\lvert S_{11} \rvert$ (dB)	Z_{in} (Ω)	Bandwidth (GHz)	Gain (dBi)
จำลองผล	-30.86	47.34+j15.28	8.73% (2.30-2.51)	6.04
ผลการวัด	-27.45	56.18+j23.41	11.36% (2.24-2.51)	5.62

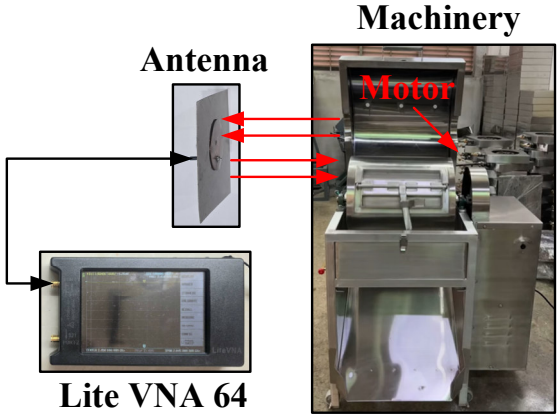
3. การทดลองตรวจจับความผิดของปกติเครื่องจักร

การทดลองประสิทธิภาพการตรวจจับความผิดปกติของเครื่องจักร ดำเนินการผ่านกระบวนการตรวจวัดวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA) รุ่น Libre VNA ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือหลักในการเก็บรวบรวมข้อมูลคลื่นไมโครเวฟทางไฟฟ้า ในการควบคุมการทำงานและประมวลผลข้อมูล คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ Libre VNA Control Software ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Libre VNA ใช้งานร่วมกับโปรแกรม Libre VNA

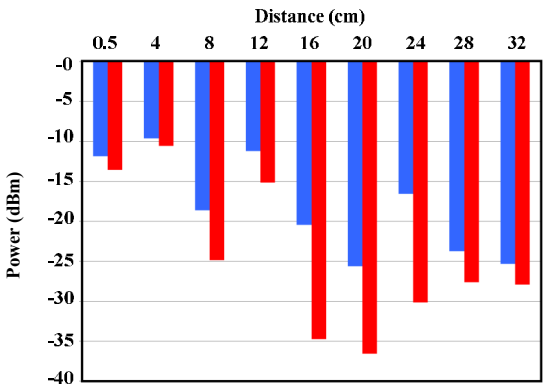
ในส่วนของการทดลองประสิทธิภาพการตรวจจับความผิดปกติของเครื่องจักรร่วมกับการจัดเก็บผลการทดสอบการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์ใช้สายอากาศไมโครสตริปรูปกลมทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.45 GHz จัดเก็บข้อมูลจำนวน 100 ครั้ง จากการวัดการสะท้อนกลับพลังงานคลื่นไมโครเวฟจากเครื่องจักรตัวอย่าง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวัดผลตรวจจับการทำงานของเครื่องจักรโครงสร้างสายอากาศผ่านคลื่นไมโครเวฟ

ESTACON 2026 | 17th

ในส่วนของการทดลองการวัดเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนกลับของคลื่น เลือกตรวจจับการทำงานของเครื่องจักร ที่ระยะห่าง R ตั้งแต่ 0.5 - 32 cm ที่ระยะความยาวคลื่น ($0.04\lambda < R < 2.66\lambda$) ทดสอบที่ละ 4 cm (0.321 λ) เนื่องจากเป็นระยะที่ส่งผลมากที่สุดจากการทดลอง โดยมีไม่เครื่องจักรมีค่าพลังงาน –28dB หรือ 0.00147mW จากทดลองที่ระยะห่างตั้งแต่ 0.5, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 และ 32cm เลือกใช้มอเตอร์ปรับค่าความเร็วตั้งแต่ 100 – 1200 รอบต่อนาที วัดผ่านการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟจากตัวเครื่องที่มีมอเตอร์หมุนอยู่ด้านใน เพื่อจำลองการสะท้อนของผนังด้านข้างของเครื่องจักร ดังรูปที่ 6 ที่สามารถส่งผลที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันทุกระยะห่างตั้งแต่ 0.5 - 32 cm ดังกล่าว จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะห่างเริ่มต้นถึงระยะห่างสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -11.8, -9.6, -18.6, -11.2, -20.4, -25.6, -16.5, -23.7 และ -25.3dB ในส่วนของการทำงานของเครื่องจักรที่ผิดปกติ -13.5, -10.5, -25.8, -15.1, -34.7, -36.5, -30.1, -27.6 และ -27.9dB ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 จากค่าวัดผลที่ได้มานั้นทำการประมวลผลร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ AI สำหรับประมวลผลข้อมูล (Artificial Neural Network: ANN) จัดเก็บข้อมูลจำนวน 100 ครั้ง ต่อการวัดผลของค่าระยะห่างดังกล่าว ซึ่งแสดงผลที่ชัดเจนดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 กราฟผลตรวจจับการทำงานของเครื่องจักรที่ระยะห่างตั้งแต่ 0.5 - 32 cm

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลตรวจจับการทำงานของเครื่องจักร

ระยะห่าง R (cm)	การวัดการสะท้อนกลับพลังงาน			
	ทำงานปกติ		ทำงานผิดปกติ	
	(dBm)	(mW)	(dBm)	(mW)
0.5	-11.8	0.00147	-13.5	0.04466
4	-9.6	0.10964	-10.5	0.08912
8	-18.6	0.01380	-25.8	0.00263
12	-11.2	0.07585	-15.1	0.03090
16	**-20.4**	**0.00912**	**-34.7**	**0.00033**
20	-25.6	0.00275	-36.5	0.00022
24	-16.5	0.02238	-30.1	0.00097
28	-23.7	0.00426	-27.6	0.00173
32	-25.3	0.00295	-27.9	0.00162

การทดลองเปรียบเทียบผลตรวจจับการทำงานของเครื่องจักร ที่ระยะห่าง R ตั้งแต่ 0.5 - 32 cm แสดงดังรูปที่ 7 ดังกล่าวนั้น พบว่าที่ระยะห่าง R ที่เหมาะสมกับงานใช้งานมากที่สุดระยะห่างเท่ากับ 16 cm โดยเริ่มวัดจากเครื่องจักรที่ทำงานปกติจะไม่มีการสั่นสะท้อนของเครื่องจักรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -20.4 dBm หรือ 0.00912 mW และทำงานปกติจากการสั่นสะท้อนของเครื่องจักรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -34.7 dBm หรือ 0.00033 mW เนื่องจากระยะความยาวคลื่น (1.33λ)มีค่าประสิทธิภาพ 82% เนื่องจากมีค่าของการสะท้อนกลับพลังงานมากที่สุดเท่ากับ -14.3 dBm หรือ 0.03715 mW ที่ระยะ16 cm ดังตารางที่ 2 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับเครื่องจักร ที่มีขนาดที่แตกต่างกันและพื้นที่ที่ถูกจำกัดการติดตั้งเซนเซอร์ในจัดวาง

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการใช้คลื่นไมโครเวฟวัดผลผ่านเซนเซอร์สายอากาศสายอากาศไมโครสตริปรูปกลมวัดการทำงานของเครื่องจักรที่ผิดปกติด้วยผลจากการวัดที่ได้นั้นนำมาประมวลผลร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ AI พบว่าที่ระยะห่างตั้งแต่ 0.5 – 32 cm ของความยาวคลื่นที่ส่งผลมากที่สุด ($0.04\lambda < R < 2.66\lambda$) ซึ่งในวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านของเครื่องจักรที่มีรูปทรง

โครงสร้างที่แตกต่างกันและพื้นที่ถูกจำกัดซึ่งจะส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นที่มีระยะห่างที่แตกต่างรวมไปถึงการสะท้อนคลื่นกันตามไปด้วยและยังมีข้อกำจัดที่ต่อพัฒนาต่อไปในด้านของตรวจสอบอาการจากความผิดปกติประเภทต่าง ๆ เช่น การเสียสมดุลของเพลาหมุน และการสึกหรอของตลับลูกปืน เป็นต้น จากที่กล่าวมานั้น ส่งผลดีต่อการพัฒนานำไปใช้ระบบตรวจจับความผิดปกติของเครื่องจักรโครงสร้างอื่นๆ และสามารถตรวจจับได้โดยไม่ต้องสัมผัสชิ้นส่วนเครื่องจักรและทำงานได้แบบเรียลไทม์ พบว่าได้ต่อไปในอนาคตและในส่วนของการประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์ AI สามารถพัฒนาให้รู้จำกับงานวิจัยส่วนอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไปได้ในอนาคตเช่นด้วยกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรมจำลองแบบและให้ความอนุเคราะห์ใช้งานเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดผลคุณสมบัติ

6. ทุนวิจัยที่ได้รับ

โครงการวิจัย เรื่อง ระบบตรวจจับความผิดปกติการทำงานของเครื่องจักรด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการประมวณผลด้วยปัญญาประดิษฐ์ ตามคำรับรองการปฏิบัติตามเงื่อนไขของการอนุมัติงบประมาณ โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ FET010/69

6. เอกสารอ้างอิง

[1] จักรกฤษณ์ ขันทอง, ขวัญชัย หนาแน่น, พิเชฐ นิลดวงดี และ อนุชา สายสร้อย. (2024). “การประยุกต์ ใช้ระบบการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล” มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี: Application of Management Information System for Machinery Maintenance of The Mechanical Engineering Department, Phetchaburi Rajabhat University. วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ, 10(2), 62-78.

[2] เกตุ ไสว และ ชาญฤทธิ์. (2024). การจัดการด้านการบำรุงรักษาระบบประกอบอาคารและระบบเครื่องกลที่เกี่ยวข้องของอาคารศูนย์บริการรถยนต์.

[3] Phieboolsilapa, S., Chongchaem, G., Rassameesoraj, N., and Klomjit, P. (2025). “การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบเพื่อปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเครื่องตีเกลียวเส้นด้ายกรณีศึกษาบริษัทผลิตเส้นด้าย” Journal of Advanced Development in Engineering and Science, 15(43), 81-101.

[4] Sungsaophat, N., and Phosaard, S. (2025). “การศึกษาประสิทธิภาพรูปแบบการนำเสนอของระบบธุรกิจอัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาเครื่องจักร” Journal of Applied Informatics and Technology, 7(1), 174-192.

[5] Rawungyot, S., Wiwekwan, P., Chaiwong, N., Takhom, N., Sooksomsatarn, K., Thamma, T., and Tantisantisom, K. (2026). “การออกแบบและพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลระดับชุมชนเพื่ แก้ปัญหาการจองเครื่องจักรกลและแรงงานทางการเกษตรกลุ่มทำนาในระดับชุมชน” The Journal of Spatial Innovation Development, 7(2), 137-153.

[6] Roy, P., Bandyopadhyay, A., Kurre, M., Charan, N. H., Ramakrishna, P., and Kant, P. (2026). “Development of Three-level F-Type Inverter fed PMSM Drive with ANN-assised α' β'-Framed Virtual SVPWM for Electric Propulsion” IEEE Transactions on Industry Applications.

[7] Balanis, C. A., (1997). Antenna Theory and Design, John Willey and Sons, NY, USA, ISO 3944, Fertilizers.

[8] Watcharaphon, N., and Natchayathorn, W., “Dipole Antenna with 18 × 5 Square Electromagnetic Band Gap for Applications Used in Monitoring Children Trapped in Cars” Progress in Electromagnetice Research M (PIERM), Vol. 112, page 163-176, 2022.

[9] สาวิตรี ประภาการ วารี ศรีสอน นัยวัฒน์ สุขทั่ง วัชรพล นาคทอง และณัฐพงษ์ ประภาการ (2567). “การทดสอบประสิทธิภาพระบบไมโครเวฟอากาศแห้ง”การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ (ESTACON 2023) ครั้งที่ 14, ณ อาคาร 50 ปี เทคนิคไทย-เยอรมัน ขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น, ไทย.

ระบบวัดปริมาณแอลกอฮอล์ร่วมกับ AI สำหรับติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักร

An AI-powered alcohol measurement system for installation in per cars and motorcycles

ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล[1] วัชรพล นาคทอง[2,*] ปิยดนัย บุญไมตรี[2,*] ปัณณวิชญ์ นาคทอง[2] ณัฐพงษ์ ประภาการ[3] สาวิตรี ประภาการ[3] วารี ศรีสอน[3] ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์[3] พีรณัฐ อันสุรีย์[3] ศราวุธ ศรีวิไล[4] และดำรัส คำเมืองใหม่[5]

[1] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

[2]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

[3]สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

[4]สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา1508 ถ.สุรนารี ต.ในเมือง อ.นครราชสีมา จ.นครราชสีมา30000

[5]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทโธ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 999 หมู่ 6 ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210

ผู้ติดต่อ:E-mail: Watcharaphon.na@rmuti.ac.th 044-233000 ต่อ 3140, โทรศัพท์: 086-8698253

ผู้ติดต่อ: Piyadanai.bo@rmuti.ac.th, 044-233000 ต่อ 3140, 083-7351234

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการหาประสิทธิภาพการทดลองที่ตำแหน่งการวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ โดยทดลองในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ เพื่อให้เกิดการเตือนภัยก่อนการขับขี่ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเซ็นเซอร์ที่นิยม TGS2620 จากการทดลองวัดประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์วัดปริมาณแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ระยะห่างที่เหมาะสม 10 เซนติเมตร พบว่าเซ็นเซอร์ TGS2620 มีความถูกต้องในการวัด 89.62% ร่วมกับ AI เมื่อนำไปติดตั้งในรถยนต์ทดลองที่ตำแหน่งด้านผู้ขับขี่พิจารณาทั้งหมด 2 ตำแหน่ง เป็นจุดที่สามารถทดสอบงานใช้งานได้มีประสิทธิภาพ คือ ตำแหน่งที่ 1 ด้านประตูรถขวามือของผู้ขับขี่ และตำแหน่งที่ 2 ด้านหน้าติดตั้งที่พวงมาลัยของผู้ขับขี่ จากทดลองพบว่าเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพประมาณ 85 - 87% และ 82 - 86% ตามลำดับ ในส่วนของการติดตั้งจักรยานยนต์ ทดลองที่ตำแหน่งด้านผู้ขับขี่พิจารณาทั้งหมด 2 ตำแหน่ง เป็นจุดที่สามารถทดสอบงานใช้งานได้มีประสิทธิภาพ คือ ตำแหน่งที่ 1 กระจกมองด้านข้างขวามือ และตำแหน่งที่ 2 ด้านหน้าบนเหนือจอเรือนไมล์ จากทดลองพบว่าเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพประมาณ 86 - 88% และ 84 - 87% ตามลำดับ จากการทดลองติดตั้งที่ตำแหน่งต่างนั้นพบว่า เซ็นเซอร์สามารถวัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ได้จริงตามที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างเนื่องจากระยะห่างตำแหน่งและมุมในการวัดผล

คำสำคัญ: ตำแหน่ง, ค่าประสิทธิภาพ, เซ็นเซอร์, แอลกอฮอล์

Abstract

This research studies how to effectively measure alcohol levels in cars and motorcycles to provide safety warnings before driving. The study focuses on the popular TGS2620 sensor. When compared to standard measuring tools at an optimal distance of 10 cm., this sensor combined with AI reached an accuracy of 89.62%. In car tests, two positions near the driver were evaluated: the right-hand door (85–87% efficiency) and the steering wheel (82–86% efficiency). In motorcycle tests, two positions were also evaluated: the right side mirror (86–88% efficiency) and above the dashboard (84–87%

efficiency). The results show that the sensor can successfully measure alcohol levels as intended, with some differences in performance due to the distance and the angle of the measurement.

Keywords: Positioning, Efficiency, Sensor, Alcohol.

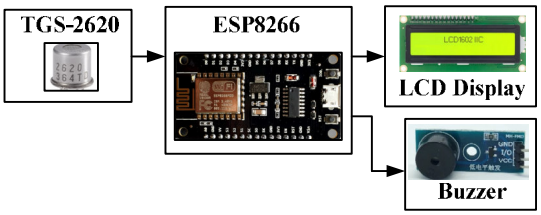
1. บทนำ

ในสังคมไทยปัจจุบัน การบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์มักถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักในการเข้าสังคมเพื่อสร้างความสัมพันธ์และเอื้อประโยชน์ต่อการดำเนินธุรกิจ อย่างไรก็ตาม การบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ทำให้ส่งผลเสียโดยตรงต่อสุขภาพทางร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำลายระบบประสาท สมอง และเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคตับแข็ง นอกเหนือจากปัญหาสุขภาพแล้ว พฤติกรรมการดื่มแอลกอฮอล์ยังส่งผลกระทบเชิงลบต่อสัมพันธภาพภายในครอบครัวและประสิทธิภาพการทำงาน [1-6] ที่ร้ายแรงไปกว่านั้นคือ ผลกระทบต่อสังคมวงกว้าง โดยเฉพาะอุบัติเหตุทางถนนจากการขับขี่ขณะมึนเมา ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิต ทรัพย์สินของผู้ขับขี่และเพื่อนร่วมทาง รวมถึงความเสียหายของทรัพย์สินสาธารณะ [5-6] จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเครื่องตรวจวัดระดับแอลกอฮอล์ในเลือดจากลมหายใจ (Breathalyzer) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือป้องปรามและตรวจสอบผู้ขับขี่ก่อนการปฏิบัติหน้าที่ [7-8] โดยทั่วไปอุปกรณ์นี้มักถูกใช้งาน โดยเจ้าหน้าที่บังคับใช้กฎหมาย ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความรวดเร็วและแม่นยำสูง แม้ว่าเครื่องตรวจวัดแอลกอฮอล์จากลมหายใจจะเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้งานได้ง่ายกว่าการตรวจวัดด้วยวิธีทางเคมีในห้องปฏิบัติการ แต่เครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันกลับมีข้อจำกัดด้านต้นทุนเนื่องจากมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญในการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ที่มีต้นทุนต่ำ แต่คงประสิทธิภาพสูง โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซหลายชนิด เช่น MQ-3, MQ303A, TGS822 และ TGS2620 [9,14-16] ซึ่งมีรายงานว่าเซนเซอร์รุ่น TGS2620 มีประสิทธิภาพความถูกต้องในการวัดสูงและความแม่นยำสูง/มาตรฐานอุตสาหกรรม

จากที่กล่าวมาคณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนา ระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์สำหรับติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ เพื่อศึกษา เครื่องตรวจวัดระดับแอลกอฮอล์เซนเซอร์รุ่น TGS2620 ดังกล่าวร่วมกับการประมวลผลผ่านโมดูล ESP8266 สำหรับรับสัญญาณข้อมูลแสดงผลลัพธ์ผ่านหน้าจอ OLED และสัญญาณเสียงแจ้งเตือน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาร่วมกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะถูกอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2. การออกแบบระบบการวัดแอลกอฮอล์

การออกแบบระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โมดูลควบคุมหลักคือ ESP8266 ทำหน้าที่ประมวลผลของสัญญาณข้อมูลหลักที่ได้รับสัญญาณมาจากเซนเซอร์รุ่น TGS2620 [9,13] ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองและการทำงานของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างและตำแหน่งการติดตั้งที่แตกต่างกัน โดยบล็อกไดอะแกรม ระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 1

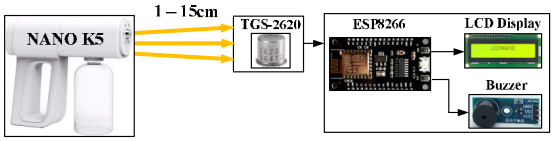


รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์

3. การทดลองวัดปริมาณแอลกอฮอล์

3.1 การทดลองหาระยะเซนเซอร์

การทดลองหาระยะเซนเซอร์รุ่น TGS2620 เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของระยะตรวจจับก๊าซแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ตั้งแต่ 1, 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ทำการทดลองจำนวน 100 ครั้ง นำมาวิเคราะห์ผลร่วมกับ AI สำหรับประมวลผลข้อมูล (Artificial Neural Network: ANN) เพื่อความแม่นยำทางสถิติ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์ TGS2620 วัดผลที่ระยะดังกล่าวเฉลี่ยเท่ากับ 95, 91, 89 และ 84% ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 2 การทดลองหาระยะเซนเซอร์



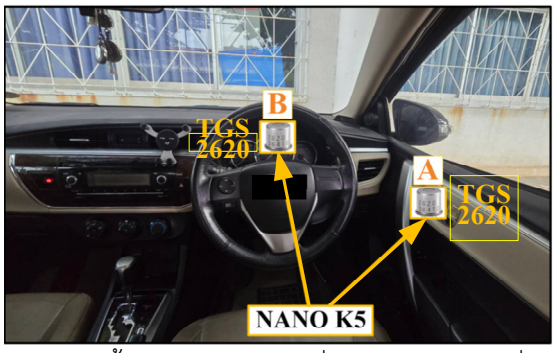
รูปที่ 2 การทดลองหาระยะเซนเซอร์

จากระยะเซนเซอร์ที่ได้ทำการทดสอบตั้งแต่ 1, 5, 10 และ 15 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Distance) คือ ระยะ 10 เซนติเมตร ติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ ในการนำไปใช้งานจริง แม้สรีระของผู้ขับขี่แต่ละคนจะมีความแตกต่างกัน แต่ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์คือประมาณ 10 เซนติเมตร โดยหากระยะห่างเพิ่มขึ้นเกินกว่า 15 เซนติเมตร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการวัดลดลงตามลำดับ

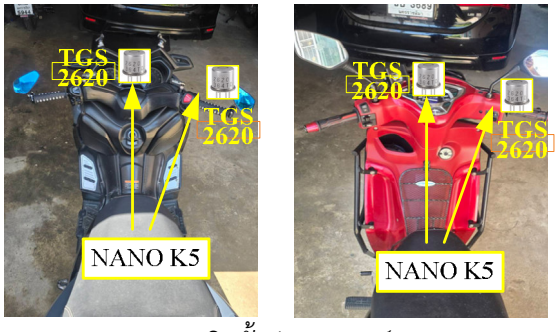
3.2 การทดลองหาตำแหน่งในการติดตั้ง

จากการทดลองหาระยะจากที่กล่าวมา นำมาทดลองติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ เมื่อนำไปติดตั้งในรถยนต์ทดลองที่ตำแหน่งด้านผู้ขับขี่พิจารณา 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งแรกด้านขวามือประตูรถและตำแหน่งที่สองด้านพวงมาลัย แสดงดังรูปที่ 3(ก) จากการทดลองพบว่าตำแหน่งแรกมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 85 - 87% และตำแหน่งที่สองมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 82 - 86% ตามลำดับ

ในส่วนการติดตั้งจักรยานยนต์ด้านผู้ขับขี่พิจารณา 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งแรกด้านขวามือกระจกมองด้านข้างขวามือ และตำแหน่งสองด้านหน้าบนเหนือจอเรือนไมล์ แสดงดังรูปที่ 3(ข) จากการทดลองพบว่าตำแหน่งแรกมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 86 - 88% และตำแหน่งที่สองมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 84 - 87% ตามลำดับ



(ก) ติดตั้งในรถยนต์ทดลองที่ตำแหน่งด้านผู้ขับขี่



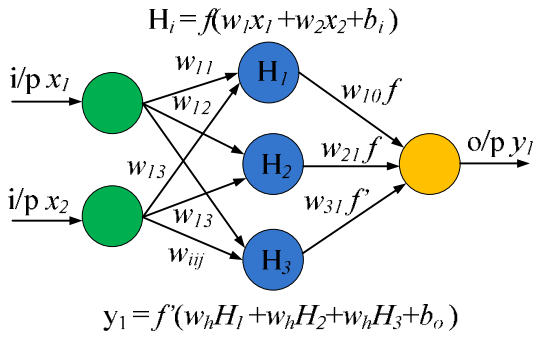
(ข) ติดตั้งจักรยานยนต์

รูปที่ 3 การทดลองหาค่าประสิทธิภาพ 2 ตำแหน่ง

3.3 อัลกอริทึม AI

จากการเปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งสำหรับประมวลผลข้อมูลจากการวัดผลเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ดังรูปที่ 4 เป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่จำลองโดยอาศัยหลักการทำงานของสมองมนุษย์ เป็นเทคนิคการเรียนรู้โดยใช้เครื่อง (Machine Learning) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานจำแนก ประเภท

โครงข่ายประสาทเทียมจะเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อย (Node) เมื่อมีข้อมูลอินพุต (Input Data) เข้ามายังโครงข่าย ข้อมูลอินพุตแต่ละค่าจะถูกนำมาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ 0.5 นำมารวมกัน เพื่อส่งผ่านไปยังฟังก์ชันการแปลง (Transfer Function) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) และส่ง ข้อมูลผลลัพธ์ไปยังหน่วยประมวลผลย่อยถัดไป โดยโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multi - Layer Perceptron: MLP) จัดเป็นตัวแบบ ANN ที่นิยมใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา [17-19] โครงสร้างของตัวแบบมีทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ Input Layer, Hidden Layer และ Output Layer พบว่าบริเวณด้านหน้าผู้ขับขี่เป็นตำแหน่งที่ให้ผลการวัดมีประสิทธิภาพมากที่สุด และเป็นตำแหน่งที่ไม่กีดขวางการทำงานของเซนเซอร์รุ่น TGS2620 ขณะใช้งานจริง นอกจากนี้ตำแหน่งด้านขวามือของผู้ขับขี่ให้ประสิทธิภาพผลการวัดรองลงมา จากผลการศึกษานี้ทำให้เห็นถึงศักยภาพของนวัตกรรมที่สามารถนำไปต่อยอดใช้กับยานยนต์ทุกประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต



รูปที่ 4 ประมวลผลข้อมูลจากการวัดผล ANN

4.สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นกรณีการศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในรถยนต์ส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์ ด้วยเซ็นเซอร์ TGS2620 ร่วมกับ AI เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน สามารถตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในยานพาหนะได้จริง โดยประสิทธิภาพความแม่นยำที่ผันแปรในแต่ละจุดติดตั้ง (อยู่ในช่วง 82% – 88%) ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านระยะห่าง ตำแหน่งเชิงพื้นที่ และมุมในการตรวจวัดเป็นสำคัญ จากที่กล่าวมานั้น งานวิจัยนี้มีเพื่อพัฒนาระบบแจ้งเตือนและป้องกันก่อนการขับขี่และมุงเน้นพัฒนาสร้างเป็นนวัตกรรมใช้งานในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ทุนอุปกรณ์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการทดลองในการทดลอง

6. ทุนวิจัยที่ได้รับ

โครงการวิจัยเรื่อง เครื่องวัดปริมาณแอลกอฮอล์สำหรับติดตั้งในรถยนต์ส่วนบุคคล ตามคำรับรองการปฏิบัติตามเงื่อนไขของการอนุมัติงบประมาณ โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2569 เลขที่ FF69/NKR/042

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Chaimayo, O., &Suthakorn, W. (2021). พฤติกรรม การ ดื่ม เครื่อง ดื่ม แอลกอฮอล์ ใน ผู้สูงอายุ และ ผล กระทบ. Nursing Journal, 48(3), 404-416.

[2] เพชรรัตน์ กิจ ส นา โยธิน. (2021). การ ศึกษา พฤติกรรม การ บริโภค เครื่อง ดื่ม แอลกอฮอล์ ผล กระทบ จาก การ ดื่ม แอลกอฮอล์ และ คุณภาพ ชีวิต ของ ประชาชน จังหวัด สุโขทัย. วารสาร วิจัย และ พัฒนา ระบบ สุขภาพ, 14(3), 275-287.

[3] Injumpa, C., &Wongpimoln, B. (2022). ปัจจัย ทำนาย ความ ตั้งใจ ใน การ หลีก เลี่ยง การ

ดื่ม แอลกอฮอล์ ของ นักศึกษา มหาวิทยาลัย จังหวัด ร้อยเอ็ด. Thai Red Cross Nursing Journal, 15(1), 64-76.

[4] จารุ วรรณ ขำ เพชร, อดิศร เส ม แย้ม, &พง ษ์ ศักดิ์ ขำ เพชร (2019). การ ศึกษา นโยบาย ที่ เหมาะสม เพื่อ ลด ภาระ และ เพิ่ม ศักยภาพ ของ กรม คุม ประพฤติ จาก คดี ความ ผิด ฐาน ขับ รถ ใน ขณะ เมา สุรา.

[5] เฉลิม ฤทธิ์ สา มา ดี, บัณฑิต ขวา โยธา, &ปรีชา พันธ์ สี ดา. (2021). มาตรการ ใน การ บังคับ ใช้ ทาง กฎหมาย กรณี ศึกษา เมา สุรา แล้ว ขับ รถ บน ท้อง ถนน เป็น เหตุ ให้ บุคคล อื่น ถึงแก่ ความ ตาย ตาม พระราชบัญญัติ จราจร ทาง บก พ. ศ. 2522. ปัญญา ปณิธาน, 6(1), 147-160.

[6] กัน ต พัฒน์ สุข พา นิ ช, &สั ญ ญู พงศ์ ลิ่ม ประเสริฐ. (2023). ปัญหา บท ลงโทษ ของ การ เมา แล้ว ขับขี่ ยาน พาหนะ กรณี ขับ รถ เมา แอลกอฮอล์ เป็น เหตุ ให้ ผู้ อื่น ถึงแก่ ความ ตาย. วารสาร ม จร อุบล ปริทรรศน์, 8(3), 105-118.

[7] จิร พรรณ บุญ สูง, &ธรรมรัตน์ บุญ สูง. (2020). การ เตรียม สารละลาย มาตรฐาน เอ ทาน อ ล สำหรับ สอบ เทียบ เครื่อง วัด แอลกอฮอล์ จาก ลม หายใจ. วารสาร กรม วิทยาศาสตร์ การ แพทย์, 62(2), 96-105

[8] Rujirojkul, W., Sukkasem, S., &Chonumpai, V. (2023). การ ทดลอง ความ ถูก ต้อง ของ วิธี วิเคราะห์ ระดับ แอลกอฮอล์ ใน เลือด โดย วิธี แก๊ส โค ร มา โท ก รา ฟี-เฮ ด ส เป ซ แบบ ต่อ คอลัมน์ คู่. Journal of Criminology and Forensic Science, 9(1), 91-107.

[9] Rahmawati, D., Joni, K., Febriana, R. S., & Setiawan, H. (2020, September). Design of alcohol detection and classification devices in traditional legen/tuak drinks using an IoT-based MQ-3 sensor. In Proceedings of the International Conference on Health Informatics, Medical, Biological Engineering and Pharmaceutical, Medan, Indonesia (pp. 23-25).

[10] George, M. L., Singh, N., & Innocent-George, N. (2020). DEVELOPMENT OF A BREATHALYZER-ENABLED IGNITION SYSTEM FOR REDUCTION OF ROAD FATALITIES IN THE CARIBBEAN. Journal on Electrical Engineering, 13(4).

[11]Aditama, F. A., Zulfikri, L., Mardiana, L., Mulyaningsih, T., Qomariyah, N., & Wirawan, R. (2020). Electronic nose sensor development using ANN backpropagation for Lombok Agarwood classification. Research in Agricultural Engineering, 66(3), 97-103.

[12] Hernández, E., Pelegrí-Sebastiá, J., Sogorb, T., & Chilo, J. (2023). Evaluation of red wine acidification using an E-nose system with Venturi tool sampling. Sensors, 23(6), 2878.

[13] พร นภา สงวน ศร. (2022). การ พัฒนา เครื่อง วัด แอลกอฮอล์ โดย ใช้ โฟ โต เพล ทิ สม อก รา ฟี (Doctoral dissertation, เชียงใหม่: บัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัย เชียงใหม่).

[14] Choomsawat, K., &Bordeerat, N. K. (2023). การ ประยุกต์ ใช้ สาร ควบคุม คุณภาพ ใน การ ตรวจ วัด ประสิทธิภาพ การ ทำงาน ของ เครื่อง ตรวจ วัด แอลกอฮอล์ จาก ลม หายใจ ที่ ใช้ ใน สถานี ตำรวจนครบาล เขต พื้นที่ กรุงเทพมหานคร. Thai Journal of Toxicology, 38(2), 22-33.

[15] ก ฤ ติ น ชุม สวัสดิ์, น ริ สา เก่ง ตรง บ ดี รัฐ, & อาจารย์ ที่ ปรึกษา. (2022). การ พัฒนา สาร ควบคุม คุณภาพ สำหรับ เครื่อง ตรวจ วัด แอลกอฮอล์ จาก ลม หายใจ และ การ ประยุกต์ ใช้ ใน สถานี ตำรวจ นครบาล เขต กรุงเทพมหานคร (No. 306605). มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์.

[16]จิร พรรณ บุญ สูง, &ธิติ กานต์ คำ ตุ่น. (2019). การ ทดลอง ความ ชำนาญ การ ตรวจ วัด ปริมาณ แอลกอฮอล์ จาก ลม หายใจ โดย วิธี จำลอง ไอ สารละลาย แอลกอฮอล์. วารสาร กรม วิทยาศาสตร์ การ แพทย์, 61(4), 161-172.

[17] W. Liu, W.D. Liu and J. Gu, (2020).Forecasting oil production using ensemble empirical model decomposition based Long Short-Term Memory neural network, Journal of Petroleum Science and Engineering, 189, 107013.

[18] M. Niu, S. Sun, J. Wu, L. Yu and J. Wang, (2016)An innovative integrated model using the singular spectrum analysis and nonlinear multi-layer perceptron network optimized by hybrid intelligent algorithm for short-term load forecasting, Applied Mathematical Modelling, 40(5-6), 4079-4093.

[19] Hernández, E., Pelegrí-Sebastiá, J., Sogorb, T., & Chilo, J. (2023). Evaluation of red wine acidification using an E-nose system with Venturi tool sampling. Sensors, 23(6), 2878.

การศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลปรับจูนร่วมกับยากิ-อูดะ สำหรับประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่ในระบบ 4G/5G

A Study of Tuned Monopole Antenna Structure Combined with Yagi-Uda for Dual-Band Applications in 4G/5G Systems

วัชรพล นาคทอง[1], ปิยดนัย บุญไมตรี[1,*], ปัณณวิชญ์ นาคทอง[1], มงคล คูพิมาย[1], อุบล สุริพล[1], ธัชชัย พุ่มพวง[1], เสกสรรค์ พลศรี[1], อภิญญา ดีค่ายคำ[1], สุภาธิณี กรสิงห์[1],ธนินทร์ ระเบียบโพธิ์[2], ศราวุธ ศรีวิไล[3],ดำรัส คำเมืองใหม่[4]และ ธีรพล ยอดโรจน์[5]

[1] สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[2]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์
[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา508 ถ.สุรนารี ต.ในเมือง อ.นครราชสีมา จ.นครราชสีมา30000
[4]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทโธ 999 หมู่ 6 ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
[5]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ถ.เพชรเกษม กม. 242 ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110
ผู้ติดต่อ: Piyadanai.bo@rmuti.ac.th, 044-233000 ต่อ 3140, 083-7351234

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและการจำลองผลโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ สำหรับรองรับการใช้งานที่ความถี่ 2.50 GHz โดยมีการเพิ่มสตับปรับจูนรูปวงกลม บริเวณด้านหลังของตัวแผ่พลังงานรูปตัวไอเพื่อรองรับการใช้งานที่ความถี่ 5.20 GHz จากนั้นนำมาปรับจูนร่วมกับโครงสร้างยากิ-อูดะ เพื่อเพิ่มอัตราขยายและปรับเปลี่ยนรูปแบบการแผ่พลังงานให้มีความเจาะจงทิศทาง สำหรับประยุกต์ใช้งานแบบสองย่านความถี่ ในระบบสื่อสาร 4G และ 5G โครงสร้างสายอากาศดังกล่าวถูกจำลองผลบนวัสดุฐานรอง FR4 h เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ε_r เท่ากับ 4.4 โดยแผ่นทองแดงมีค่าความหนา t เท่ากับ 0.035 mm และมีค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุตัวนำทองแดง σ เท่ากับ 3.56×10^7 S/m การจำลองผลการทำงานดำเนินการด้วยโปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) จากผลการออกแบบและจำลองโครงสร้างสายอากาศ พบว่าในย่านความถี่ต่ำมีแถบความถี่ใช้งานร้อยละ 16.80 (2.29–2.71 GHz) และในย่านความถี่สูงมีแถบความถี่ใช้งานร้อยละ 8.39 (5.02–5.46 GHz) ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 2.22 dBi และ 3.40 dBi ตามลำดับ โดยมีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ในส่วนของการปรับจูนร่วมกับโครงสร้างสายอากาศแบบยากิ-อูดะ พบว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นเป็น 4.54 dBi และ 4.61 dBi ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นในย่านความถี่ต่ำร้อยละ 51.10 และย่านความถี่สูงร้อยละ 26.24 พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนลักษณะการแผ่พลังงานให้เป็นแบบเจาะจงทิศทาง (Directional radiation pattern) ทั้งในย่านความถี่ต่ำ 2.50 GHz และย่านความถี่สูง 5.20 GHz

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, สตับรูปวงกลม, ยากิ-อูดะ, สองย่านความถี่, ระบบสื่อสารไร้สาย

Abstract

This article presents the design and simulation of an I-shaped monopole antenna structure designed for operation at a frequency of 2.50 GHz. A circular tuning stub is integrated into the back of the I-shaped radiator to enable operation at a frequency of 5.20 GHz, which is subsequently combined

with a Yagi-Uda structure to enhance the gain and achieve a directional radiation pattern for dual-band applications in 4G/5G systems.

The antenna structure is simulated on an FR-4 substrate with a dielectric constant of 4.4 and a thickness of 1.6 mm. The copper layer has a thickness of 0.035 mm, with an electrical conductivity of 3.56×10^7 S/m. The simulation is conducted using Computer Simulation Technology (CST) software.

From the structural design and simulation results, it is found that the antenna yields a lower-band bandwidth of 16.80% (2.29–2.71 GHz) and an upper-band bandwidth of 8.39% (5.02–5.46 GHz), providing gains of 2.22 dBi and 3.40 dBi, respectively, with an omnidirectional radiation pattern. Regarding the integration with the Yagi-Uda antenna structure, the results demonstrate an increase in gain to 4.54 dBi and 4.61 dBi, respectively. This represents a gain enhancement of 51.10% in the lower frequency band and 26.24% in the upper frequency band, successfully transforming the radiation pattern into a directional characteristic for both the 2.50 GHz lower frequency and 5.20 GHz upper frequency bands.

Keywords: Monopole Antenna, Circular Tuning Stub, Yagi-Uda, Dual-Band, Wireless Communication Systems

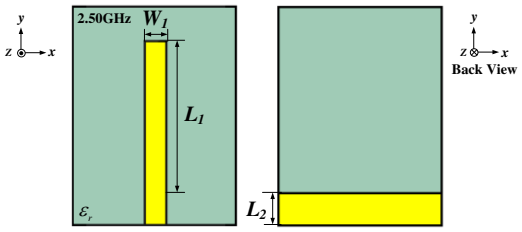
1. บทนำ

ในการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายจากยุค 4G สู่ยุค 5G [1-5] การปรับเปลี่ยนและเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรับส่งสัญญาณถือเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐาน ซึ่งสายอากาศจัดเป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นอุปกรณ์สำคัญต่อเครื่องรับ-ส่งสื่อสารไร้สาย โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเปลี่ยนผ่านพลังงานในการรับและส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นลำดับสุดท้าย [10] สายอากาศประเภทนี้จึงนิยมนำไปประยุกต์ติดตั้งใช้งานร่วมกับอุปกรณ์และระบบสื่อสารไร้สายหลากรูปแบบ อาทิ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา เช่น สถานีผู้ใช้บริการเคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์ ระบบสื่อสารวิทยุและกระจายเสียง อุปกรณ์เชื่อมต่อพิสัยใกล้ (Short-range devices) ยานยนต์ไร้คนขับ (UAV) ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) ตลอดจนระบบอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น จากประโยชน์การนำไปใช้งานต่างๆ ของสายอากาศดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศรูปแบบใหม่ เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานร่วมกับระบบการสื่อสารไร้สายยุค 4G และ 5G ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับย่านความถี่ที่กำหนด คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ [6-9] จำลองผลบนวัสดุฐานรองชนิด Fr4 และปรับจูนให้รองรับการทำงานแบบสองย่านความถี่ โดยใช้เทคนิคการปรับจูนด้วยสตับที่ด้านหลังตัวแผ่พลังงาน [6, 8, 9] นำมาปรับจูนร่วมกับยากิ-อูดะ [11-14] เพื่อเพิ่มอัตราขยาย โดยใช้สายอากาศยากิ-อูดะ ปรับปรุงประสิทธิภาพการตอบสนองเชิงความถี่สองย่าน ให้เป็นไปตามเกณฑ์ โดยผลการศึกษาและการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวจะเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาสายอากาศให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายต่อไป

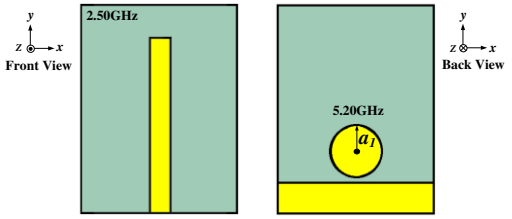
2. การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลรูปตัวไอพื้นฐาน [8-10] โดยออกแบบที่ความถี่ f_1 เท่ากับ 2.50GHz ดังรูปที่ 1(ก) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1-5 [8,9] ปรับจูนด้วยเทคนิคการเพิ่มสตับ

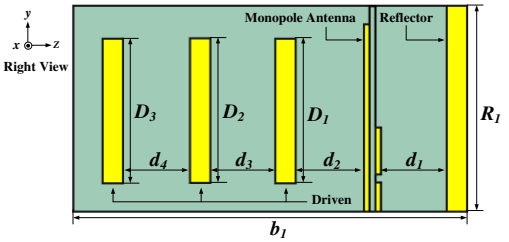
รูปวงกลมที่ด้านหลังตัวแผ่พลังงานรูปตัวไอสำหรับใช้งานความถี่ 5.20GHz ดังรูปที่ 1(ข) นำมาปรับจูนร่วมกับยากิอูดะ ดังรูปที่ 1(ค) เพื่อเพิ่มอัตราขยายและปรับเปลี่ยนการแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทาง จากที่กล่าวมานั้น จำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยแผ่นวัสดุฐานรอง FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ε_r เท่ากับ 4.4 มีค่าความหนา h เท่ากับ 1.6 mm และแผ่นทองแดงมีค่าความหนา t เท่ากับ 0.035 mm ค่าความนำของวัสดุตัวนำทองแดง σ เท่ากับ 3.56 x 10^7 S/m โดยการปรับจูนการจำลองค่า S_{11}(dB) เพื่อให้ตอบสนองย่านความถี่ใช้งานในระบบ 4G/5G นำเสนอในขั้นตอนต่อไป



(ก) ขั้นตอนที่ 1



(ข) ขั้นตอนที่ 2



(ค) ขั้นตอนที่ 3

รูปที่ 1 ขั้นตอนการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศ

$$W_1 = \frac{0.066 \times c}{f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left(1 + 0.3h\right) \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{0.275c}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

$$L_2 = 0.05\lambda \quad (4)$$

ε_{eff} = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

c = ความถี่เรโซแนนซ์

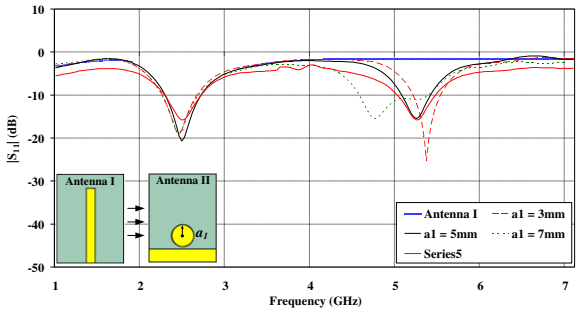
f_r = ความเร็วแสง

การคำนวณพบว่าค่าความกว้าง W_1 เท่ากับ 4mm ค่าความยาว L_1 เท่ากับ 33mm และค่าความยาวระนาบกราว L_2 เท่ากับ 6mm

จากที่ได้ออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ ดังรูปที่ 1(ก) พบว่าได้ย่านความถี่ใช้งาน 15.93% (2.31 – 2.71GHz) จากนั้นทำการเพิ่มสตับปรับจูนรูปวงกลมที่ด้านหลังตัวแผ่พลังงานรูปตัวไอออกแบบที่ย่านความถี่ 5.20GHz สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5-6 [17] ดังรูปที่ 1(ข) ปรับค่ารัศมี a_1 ตั้งแต่ 3, 5 และ 7mm พบว่าค่า พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการปรับจูน a_1 เท่ากับ 5mm โดยได้ช่วงความถี่ต่ำ 16.80% (2.29 – 2.71GHz) และช่วงความถี่สูง 6.30% (5.07 – 5.40GHz) ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2

$$\lambda_{f_2} = \frac{c}{f_2} \quad : f_2 = 5.20\text{GHz} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{0.272\lambda_{f_2}}{\pi} \quad (6)$$



รูปที่ 2 ผลการจำลองค่า|S_{11}| (dB) เมื่อปรับรัศมี r_1

ขั้นตอน 2 นำมาปรับจูนร่วมกับยากิ-อูดะ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7-10 [16] ดังรูปที่ 1(ค) เพื่อศึกษาค่าอัตราขยายและการเปลี่ยนแปลงการแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทาง โดยการปรับจูน

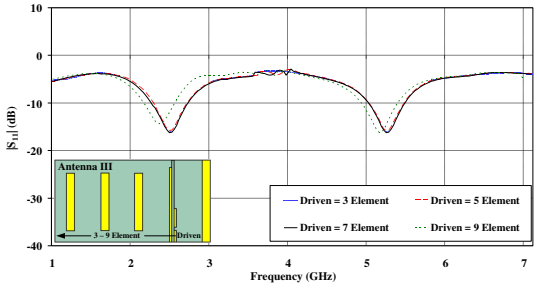
โครงสร้างที่ไม่มีผลต่อทั้งสองช่วงความถี่ต่ำ 2.50GHz และช่วงความถี่สูง 5.20GHz โดยมีตัวสะท้อนคลื่นสัญญาณ (Reflector) ค่าความยาว R_1 เท่ากับ 40mm และตัวแผ่พลังงาน (Driven) ค่าความยาว $D_{(1,2,3)}$ เท่ากับ 32mm ระยะห่าง $d_{(1,2,3,4)}$ เท่ากับ 18mm และค่าความยาวแผ่น b_1 เท่ากับ 78mm ทำงานเพิ่มจำนวนตัวแผ่พลังงานตั้งแต่ 1, 5, 7 และ 9 Element พบว่าที่ความถี่ต่ำ 2.50GHz ค่าอัตราขยาย 3.87, 4.54, 3.79 และ 3.84dBi ที่ความถี่สูง 5.20GHz ค่าอัตราขยาย 4.63, 4.61, 4.58 และ 4.60dBi ซึ่งที่มีตัวแผ่พลังงาน (Driven) จำนวน 5 Element ตามลำดับ โดยได้ช่วงความถี่ต่ำ 16.80%(2.29 – 2.71GHz) และช่วงความถี่สูง 8.39%(5.02 – 5.46GHz) ที่ดีที่สุด 4.54dBi และ 4.61dBi ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 3

$$R_1 = 0.326\left(L_1 + \left(L_1 \times 0.02\right)\right) \quad (7)$$

$$D_{(1,2,3)} = 0.238\left(L_1 - \left(L_1 \times 0.02\right)\right) \quad (8)$$

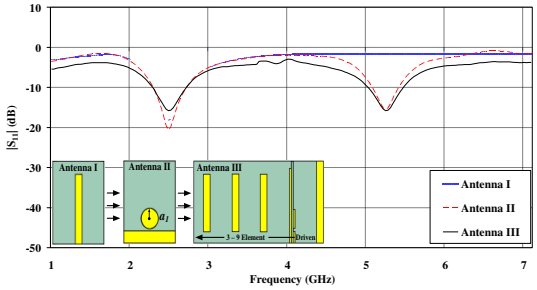
$$d_{(1,2,3,4)} = 0.15\lambda \quad (9)$$

$$b_1 = 4.33d_{(1,2,3,4)} \quad (10)$$



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับเพิ่ม Driven จำนวน 3 - 9 Element

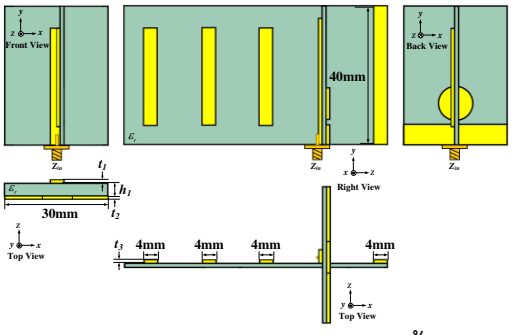
การเปรียบเทียบผลจากการโครงสร้างสายอากาศปรับจูนทั้ง 3 ขั้นตอน คือ สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ มีย่านความถี่ใช้งาน 2.50GHz เพิ่มสตับรูปทรงกลมมีย่านความถี่ใช้งาน 5.20GHz นำมาปรับจูนร่วมกับ ยากิ-อูดะซึ่งมีจำนวน 5 Element มีย่านความถี่ต่ำ 2.50GHz และย่านความถี่สูง 5.20GHz ค่ามีค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 4.54dBi และ 4.61dBi ตามลำดับ สามารถแสดลผลกราฟที่ชัดเจนดังรูปที่ 4 และค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 1 โดยจากการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยเทคนิคที่กล่าวมาการเปรียบเทียบผลการจำลองแสดงให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากที่สุด ดังรูปที่ 5 และดังตารางที่ 2



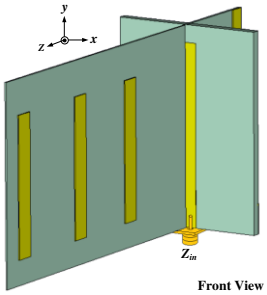
รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$(dB) ทั้ง 3 ขั้นตอน

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ค่าพารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (mm)
W_1	ค่าความกว้างของสายอากาศ	4
L_1	ค่าความยาวของสายอากาศ	33
L_2	ค่าความยาวระนาบกราวด์	6
a_1	ค่ารัศมีสตรับรูปวงกลม	5
R_1	ค่าความยาวตัวสะท้อนคลื่น	40
D_1	ค่าความยาวตัวแผ่พลังงานตัวที่ 1	32
D_2	ค่าความยาวตัวแผ่พลังงานตัวที่ 2	32
D_3	ค่าความยาวตัวแผ่พลังงานตัวที่ 3	32
d_1	ค่าระยะห่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่น	18
d_2	ค่าระยะห่างตัวที่ 1 และสายอากาศ	18
d_3	ค่าระยะห่างตัวที่ 2 และตัวที่ 1	18
d_4	ค่าระยะห่างตัวที่ 2 และตัวที่ 3	18
b_1	ค่าความยาวสายอากาศ	78



(ก) สายอากาศร่วมกับยากิอูดะทั้ง 4 ด้าน



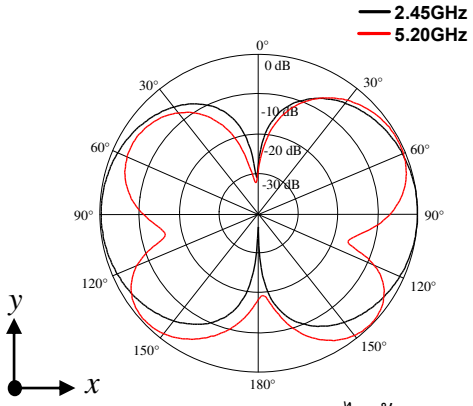
(ข) สายอากาศร่วมกับยากิอูดะ 3D

รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศ

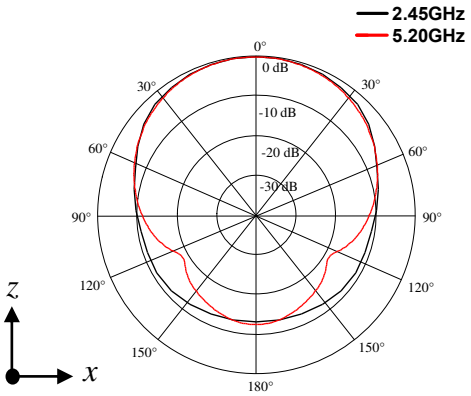
ตารางที่ 2 ผลการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศ

Antenna	Frequency (GHz)	S_{11} (dB)	BW (%)	Gain (dBi)
Antenna I	2.50	-18.15	15.93%(2.31 – 2.71GHz)	2.19
Antenna II	2.50	-30.06	16.80%(2.29 – 2.71GHz)	2.22
	5.20	-14.98	6.30%(5.07 – 5.40GHz)	3.40
Antenna III	2.50	-15.80	16.80%(2.29 – 2.71GHz)	4.54
	5.20	-15.82	8.39%(5.02 – 5.46GHz)	4.61

ส่วนสุดท้ายทำการจำลองแบบของการแผ่พลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้า(E-plane) ระนาบx-z ดังรูปที่ 6 (ก) และรูปแบบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ระนาบ y-z ดังรูปที่ 6(ข) ที่ความถี่ 2.50GHz และ5.20GHz พบว่าสายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าแบบสองทิศทาง และการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กแบบเจาะจงทิศทาง ดังรูปที่ 6 ตามมาตรฐาน ตามที่ต้องการ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 6 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.50 GHz และ 5.20 GHz

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการออกแบบและจำลองผลของโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอปรับจูนการเพิ่มสตับรูปวงกลมทำให้มีย่านความถี่ใช้งาน 2 ย่าน คือ ความถี่ต่ำ 2.50GHz และความถี่สูง 5.20GHz ตามที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้ายทำการเพิ่มโครงสร้างสายอากาศแบบยากิอูดะ ทำให้มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 4.54dBi และ 4.61dBi ตามลำดับ ซึ่งมีจำนวน 5 Element มีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอนั้น มีข้อดีด้านโครงสร้างออกแบบง่ายไม่ซับซ้อน น้ำหนักน้อย มีราคาถูก เมื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงจะสามารถพัฒนาใช้งานติดตั้งกับอุปกรณ์ระบบการสื่อสารไร้สายและปรับโครงสร้างให้ใช้งานในระบบไมโมต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Skosana, S., S. Mlambo, T. Madiope, and B. Thango. (2024). Evaluating wireless network technologies (3G, 4G, 5G) and their infrastructure: A systematic review. Available from SSRN 4992432.

[2] Rastoceanu, F., C. Grozea, M. Enache, R. Nelega, G. Kovacs, and E. Puschita. (2025). Mission-critical Services in 4G/ 5G and beyond: standardization, key challenges, and future perspectives. Sensors (Basel, Switzerland), 25(16), 5156.

[3] Rafi, M. S. M., M. Behjati, and A. S. Rafsanjani. (2025). Reliable and cost-efficient IoT connectivity for smart agriculture: A comparative study of LPWAN, 5G, and hybrid connectivity models. In International Conference on Smart Computing and Informatics, pp. 389-411. Cham: Springer Nature Switzerland.

[4] Deshpande, A. Y., M. Bhong, A. P. Raj, Y. B. Thakare, and K. P. Ray. (2026). A Comprehensive Review on Frequency Reconfigurable Antennas for 4G, 5G and sub-6 GHz Systems with Emerging Techniques. Journal of Electronics and Electrical Engineering, 144-180.

[5] Maduranga, M. W. P., D. Nandan, and S. Jayasinghe. (2026). Federated Learning for Privacy-Preserving Network Congestion Prediction in 4G/ 5G Multi-Carrier Environments. In 2026 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI), Vol. 4, pp. 1-6. IEEE.

[6] สุวัฒน์ สกุลชาติ, ตฤณภพ บุญเส็ง, นิยวดี ศรีสุวรรณ, สมมาตร พรหมพุฒ, วัชรพล นาคทอง, และภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล. (2568). สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอปรับจูนด้วยสตับรูปวงแหวนและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานสามย่านความถี่ในระบบ 4G/5G. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17* (EENET-17) (หน้า 177-180). หนองคาย.

[7] Danuor, P., K. Anim, and Y. B. Jung. (2022). Monopole antenna with enhanced bandwidth and stable radiation patterns using metasurface and cross-ground structure. Sensors, 22(21), 8571.

[8] วัชรพล นาคทอง, เสกสรร ผลศรี, วารี ศรีสอน, สาวิตรี ประภาการ, สุวัฒน์ ประภาการ, และอำนวย เรืองวารี. (2564). สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอสำหรับประยุกต์ใช้งานตรวจสอบเด็กติดในรถยนต์. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ (ESTACON 2021) ครั้งที่ 12*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[9] วัชรพล นาคทอง, อภิญญา อินทร์นอก, มงคล คูพิมาย, เสกสรรค์ พลศรี, ปิยดนัย บุญไมตรี, ธัชชัย พุ่มพวง, อุกฤษ สินประเสริฐ, ชญานนท์ มานิตย์นาค, สมมาตร พรหมพุฒ, และอำนวย เรืองวารี. (2565). การศึกษาสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่จัดวางแบบรอบทิศทางสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ MIMO. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ (ESTACON 2022) ครั้งที่ 13* (หน้า 371–376). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.

[10] Balanis, Constantine A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[11] Nurzhaubayeva, G., N. Haris, and K. Chezhimbayeva. (2024). Design of the Wearable Microstrip Yagi-Uda Antenna for IoT Applications. International Journal on

Communications Antenna and Propagation (IRECAP), 14(1), 24.

[12] Jahan, N. A., Z. Zafar, and M. A. Hossain. (2024). Design, fabrication and performance analysis of a compact unidirectional quasi-Yagi antenna for high gain and high directivity at 6. 2 GHz. International Journal of Electrical and Electronics Research, 12(2), 581-589.

[13] Naguboina, G. C., and A. Krishnamurthi. (2025). A compact MIMO antenna design using Yagi-uda antenna inspired elements for 5G sub 6 GHz balanced band applications. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 123(1), 12.

[14] Korres, A., and Y. Papananos. (2025). A broadside yagi-uda antenna with enhanced gain for mm-wave applications. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 46(3), 17.

[15] Constantinescu, C., C. Pacurar, A. Giurgiuman, C. Munteanu, S. Andreica, M. Gliga, and L. Grindei. (2025). From antenna optimization to mimo structures: A unified design framework. Technologies, 13(4), 153.

[16] วัชรพล นาคทอง. (2568). *คู่มือประกอบการทดลองประจำรายวิชา "Antenna Engineering Laboratory"* (หน้า 117–118). สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[17] วัชรพล นาคทอง, ธัชชัย พุ่มพวง, กชิดิศ กกขุนทด, กฤษณะ นิลวิเวก, และอำนวย เรืองวารี. (2561). สายอากาศไดโพลรูปตะขอสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่านความถี่คู่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ GSM/ WLAN. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (ESTACON 2018) ครั้งที่ 9* (หน้า 366–370). ขอนแก่น.

การศึกษาการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอสำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบ WLAN
A Study of Gain Enhancement of an I-Shaped Monopole Antenna for WLAN Applications

วัชรพล นาคทอง[1], ปิยดนัย บุญไมตรี[1,*], ภัคธีมา ผินงูเหลือม[1], มงคล คูพิมาย[1], อุบล สุริพล[1], ธัชชัย พุ่มพวง[1], เสกสรรค์ พลศรี[1], อภิญญา ดีค่ายคำ[1], สุภาธิณี กรสิงห์[1], สมมาตร พรหมพุฒ[2], ศราวุธ ศรีวิไล[3] และดำรัส คำเมืองใหม่[4]

[1]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
43 หมู่ 6 ตำบลบางพระอำเภอศรีราชาจังหวัดชลบุรี 20110
[3]สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา508 ถ.สุรนารี ต.ในเมือง อ.นครราชสีมา จ.นครราชสีมา30000
[4]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อคูณ ปริสุทโธ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 999 หมู่ 6 ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
ผู้ติดต่อ: Piyadanai.bo@rmuti.ac.th, 044-233000 ต่อ 3140, 083-7351234

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและการจำลองผลสายอากาศโมโนโพลสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ Wi-Fi ที่ย่านความถี่ใช้งาน 5.20 GHz โครงสร้างหลักของสายอากาศประกอบด้วยแผ่นตัวนำแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโลหะรูปตัวไอ และฐานรองวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดไมลาร์ฟิล์ม โดยสายอากาศมีขนาดโครงสร้างรวมเท่ากับ 20 × 34 × 0.8 mm³ และมีระนาบกราวด์รูปตัวไอติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของฐานรองร่วมกับจุดป้อนสัญญาณ ในส่วนของการศึกษาการเพิ่มอัตราขยาย ได้ทำการพิจารณาโครงสร้างเรขาคณิตรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปตัวไอ รูปวงแหวน รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปวงแหวนเจาะรูวงกลม เพื่อนำมาจัดวางล้อมรอบตัวแผ่พลังงานหลัก ซึ่งมีข้อดีคือสามารถปรับจูนพารามิเตอร์ได้ง่ายและไม่มีความซับซ้อน สำหรับการจำลองผลโครงสร้างสายอากาศดำเนินการผ่านโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) จากผลการจำลองชี้ให้เห็นว่า สายอากาศสามารถรองรับการทำงานครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 4.7 ถึง 5.7 GHz โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} ต่ำกว่า -27 dB ซึ่งแสดงลักษณะการแผ่พลังงานคลื่นแบบรอบทิศทาง และจากการศึกษาการเพิ่มอัตราขยายพบว่า โครงสร้างรูปวงแหวนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราขยายได้ 48.127% เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศโมโนโพลพื้นฐาน โดยที่ยังคงคุณลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางไว้ได้ตามวัตถุประสงค์

คำสำคัญ: การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ, การแผ่รังสีแบบรอบทิศทาง, สายอากาศโมโนโพล, โครงสร้างพาราซิติกแบบวงแหวน, ระบบ Wi-Fi

Abstract

This research article presents the design and simulation of a monopole antenna for Wi-Fi applications at the operating frequency of 5.20 GHz. The main structure of the antenna consists of an I-shaped metallic electromagnetic radiating patch and a Mylar film substrate. The antenna has a total structural dimension of 20 × 34 × 0.8 mm³, featuring an I-shaped ground plane located at the bottom of the substrate, with the feed point also positioned at the bottom. Regarding the study of gain enhancement, geometric structures-namely I-shaped, ring, square ring, and circular-slot ring shapes

were selected to be placed around the I-shaped radiator, offering the advantage of simple tuning and low complexity. For the structural simulation of the antenna, Computer Simulation Technology (CST) software was utilized. From the simulation results, it was found that the antenna can support operation covering a frequency range from 4.7 to 5.7 GHz, with a reflection coefficient S_{11} below -27 dB, which exhibits an omnidirectional radiation pattern characteristic. Additionally, the gain enhancement study demonstrated that the proposed ring-shaped structure achieved a 48.127% improvement in antenna gain compared with the conventional monopole antenna while maintaining the desired omnidirectional radiation characteristics.

Keywords: Gain enhancement, Omnidirectional radiation pattern, Monopole antenna, ring-shaped parasitic structure, Wi-Fi antenna.

1. บทนำ

สายอากาศที่ย่านความถี่ 5.20 GHz ซึ่งนิยมประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย Wi-Fi [1-3] โดยทั่วไปในท้องตลาดมักมีค่าอัตราขยายค่อนข้างต่ำอยู่ที่ประมาณ 2-3 dBi [4] ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นแบบรอบทิศทาง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการจำกัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ จากข้อจำกัดดังกล่าวผู้ผลิตและบริษัทต่าง ๆ จึงได้พัฒนาสายอากาศสำหรับย่านความถี่ 5.20 GHz ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราขยายได้สูงขึ้นเป็นประมาณ 3-5 dBi [5,6] อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ยังมีข้อด้อยในเรื่องของราคาที่ค่อนข้างสูง รวมถึงมีโครงสร้างที่ยาวและมีขนาดใหญ่



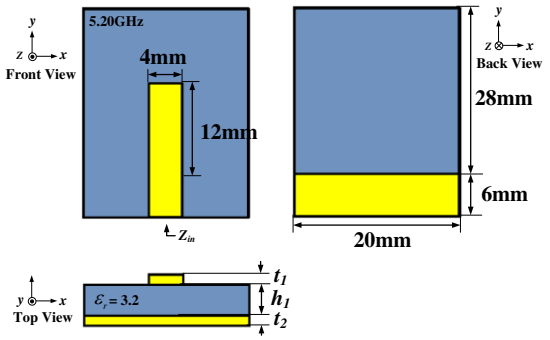
รูปที่ 1 สายอากาศที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด

จากปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาการเพิ่มค่าอัตราขยายให้กับโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ [7-9] โดยดำเนินการออกแบบและจำลองผลโดยไม่ดัดแปลงโครงสร้างหลัก ทั้งนี้ได้เลือกศึกษาการเพิ่มสตับ (Stub) ปรับจูนด้วยโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิต 4 รูปแบบ [10-15] ได้แก่ รูปตัวไอ รูปวงแหวน รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปวงแหวนเจาะรูวงกลม ซึ่งจะถูกนำมาจัดวางในแนวนอนล้อมรอบตัวนำแผ่พลังงาน สำหรับการปรับจูนโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตเพื่อเพิ่มค่าอัตราขยายให้กับสายอากาศนั้น คณะผู้วิจัยได้ศึกษาพารามิเตอร์การปรับจูนใน 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ขนาด รัศมี และจำนวนของสตับปรับจูน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าอัตราขยายดังกล่าว โดยขั้นตอนและรายละเอียดการปรับจูนโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตทั้งหมดจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

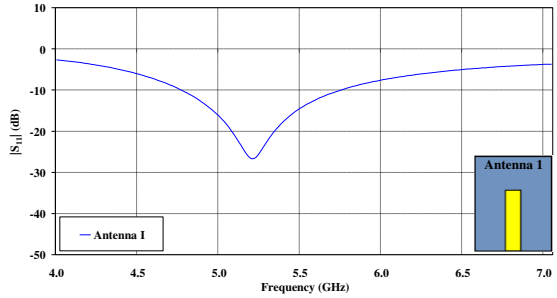
2. การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบโครงสร้างจำลองผล ผู้วิจัยใช้งานที่ย่านความถี่ f_r = 5.20GHz โดยเลือกใช้โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอพื้นฐาน [7-9] ดังรูปที่ 2 แผ่นวัสดุฐานรองไมล่าฟิล์ม มีค่าความหนา h = 0.5 mm ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ε_r = 3.2 และแผ่นทองแดงมีความหนา t = 0.03 mm ค่าความ

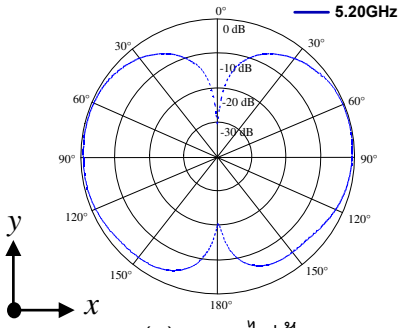
นำของวัสดุตัวนำทองแดง σ = 5.8 x 10^7 S/m ในส่วนของการจำลองค่า S_{11}(dB) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 19.29% (4.73 – 5.74GHz) ดังรูปที่ 3 ค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 2.456dBi ซึ่งมีการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้ามีการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง และสนามแม่เหล็กมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ดังรูปที่ 4



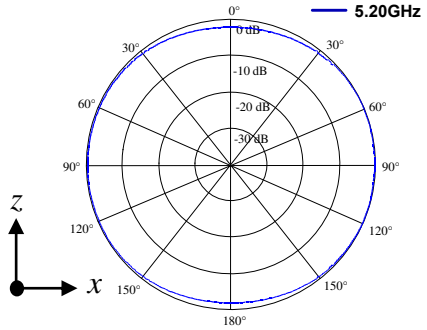
รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$(dB) ของสายอากาศ



(ก) สนามไฟฟ้า



(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4 ผลการจำลองการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.20GHz

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาเทคนิคการเพิ่มค่าอัตราขยายให้กับโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอ โดยเลือกใช้โครงสร้างเลขาคณิต คือ รูปตัวไอ รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปวงแหวนเจาะรูวงกลม จัดวางแบบแนวตั้งและแบบแนวนอน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1-4 ดังรูปที่ 5

$$I_1 = 0.133\lambda \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{0.524\lambda}{\pi} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{1.867\lambda}{4} \quad (3)$$

$$r_1 = \frac{0.053\lambda}{\pi} \quad (4)$$

โดย

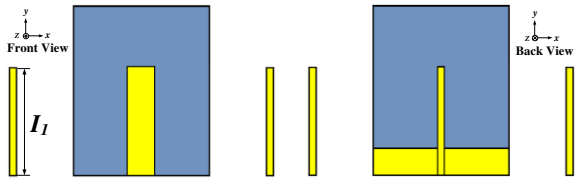
λ = ความยาวคลื่น

I_1 = ความยาวโมโนโพลรูปตัวไอ

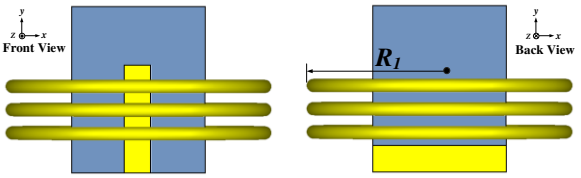
R1 = รัศมีวงแหวน

L1 = เส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวน

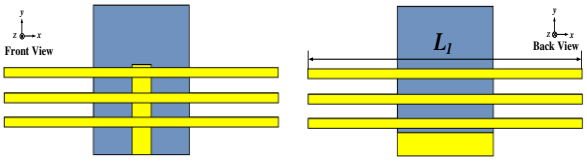
r1 = รัศมีร่องรูปวงกลม



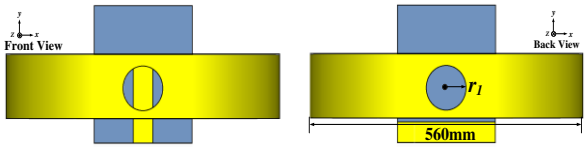
(ก) รูปตัวไอ



(ข) รูปวงแหวน



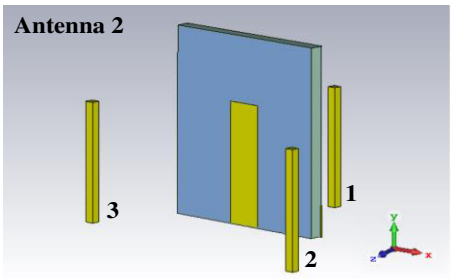
(ค) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



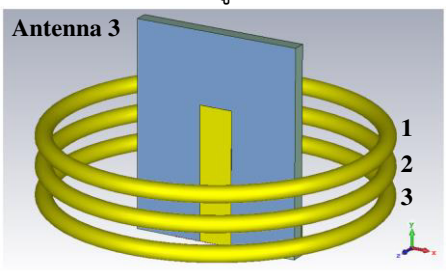
(ง) รูปวงแหวนเจาะรูวงกลม

รูปที่ 5 โครงสร้างเลขาคณิตสำหรับเพิ่มค่าอัตราขยาย

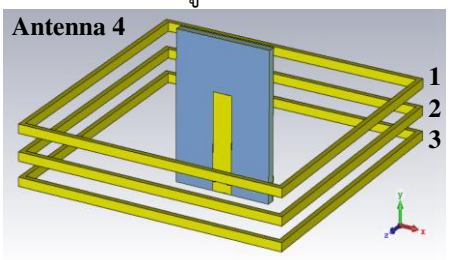
จากการคำนวณดังสมการที่ 1-4 ดังกล่าวมีพารามิเตอร์ดังนี้ โครงสร้างรูปตัวไอมีค่าความยาว I_1 = 16 mm ทำการเพิ่มรูปตัวไอตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 Element พบว่าจำนวนรูปตัวไอ 3 Element มีค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 3.638dBi ดังรูปที่ 5(ก) รูปวงแหวนมีค่ารัศมี R_1 = 20 mm ทำการเพิ่มรูปวงแหวนตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 Element พบว่าจำนวนรูปวงแหวน 3 Element มีค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 2.530dBi ดังรูปที่ 5(ข) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าความยาว L_1 = 56 mm ทำการเพิ่มรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 Element พบว่าจำนวนรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 Element มีค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 2.534dBi ดังรูปที่ 5(ค) และรูปวงแหวนที่มีรูวงกลมมีค่ารัศมี r_1 = 2 mm ทำการเพิ่มรูปวงแหวนตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 รู พบว่าจำนวนรูวงกลม 2 รู มีค่าอัตราขยายที่ดีที่สุด 3.420dBi ดังรูปที่ 5(ง) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลโครงสร้างเลขาคณิตสำหรับเพิ่มค่าอัตราขยายทั้ง 4 แบบ คือ รูปตัวไอมีค่าอัตราขยายดีที่สุด 3.638dBi รองลงมารูปวงแหวนเจาะรูวงกลม มีค่าอัตราขยายดีที่สุด 3.420dBi รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าอัตราขยายดีที่สุด 2.534dBi และรูปวงแหวนมีค่าอัตราขยายดีที่สุด 2.530dBi ตามลำดับ ด้วยเทคนิคที่กล่าวมาการเปรียบเทียบผลการจำลองแสดงให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากที่สุด ดังรูปที่ 6 และดังตารางที่ 1



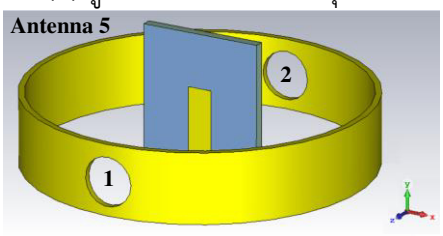
(ก) รูปตัวไอ



(ข) รูปวงแหวน



(ค) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



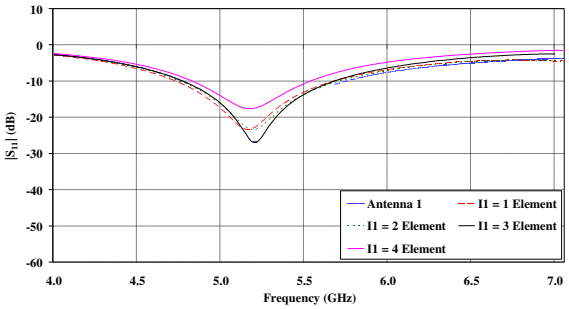
(ง) รูปวงแหวนเจาะรูวงกลม

รูปที่ 6 โครงสร้างเลขาคณิตสำหรับเพิ่มค่าอัตราขยาย

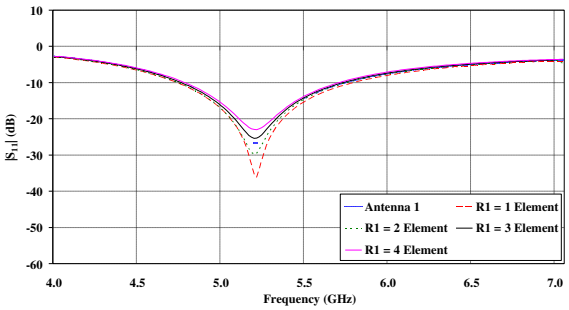
ตารางที่ 1 ผลการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศที่ความถี่ 5.20GHz

โครงสร้างเลขาคณิต	$\|S_{11}\|$ (dB)	Gain (dBi)				
		ไม่มี	1	2	3	4
ตัวไอ	-27.02	2.456	3.495	3.131	**3.638**	2.599
วงแหวน	-25.33	2.456	2.461	2.480	**2.530**	2.518
วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส	-35.82	2.456	2.503	2.437	**2.534**	2.425
วงแหวนเจาะรูวงกลม	-34.92	2.456	3.386	**3.420**	3.359	3.393

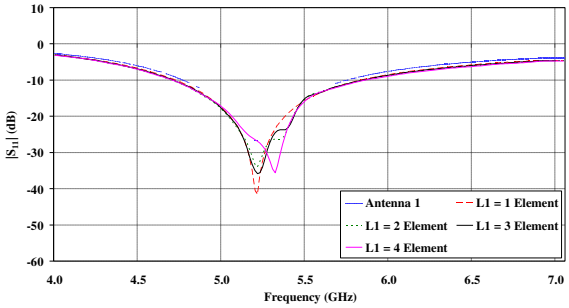
ในส่วนของการมาเปรียบเทียบผลการจำลองค่า $|S_{11}|$(dB) โครงสร้างทั้ง 4 แบบ คือ รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่งผลต่อช่วงความถี่ใช้งานกว้างมากยิ่งขึ้น รองลงมารูปตัวไอ รูปวงแหวนและรูปวงแหวนเจาะรูวงกลม ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 ด้วยเทคนิคที่กล่าวมาการเปรียบเทียบผลการจำลองแสดงให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากที่สุด ดังรูปที่ 8 และดังตารางที่ 2 และการแผ่พลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 9 (ก) และแบบรูปสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 9(ข) พบว่าสายอากาศมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง



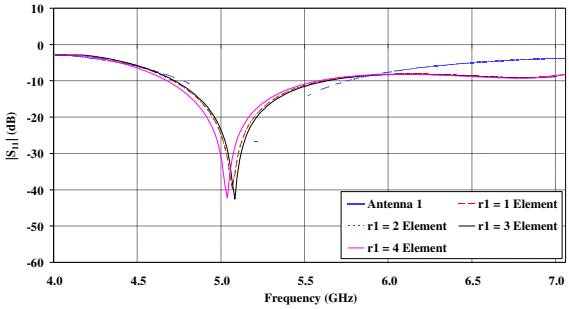
(ก) รูปตัวไอ



(ข) รูปวงแหวน

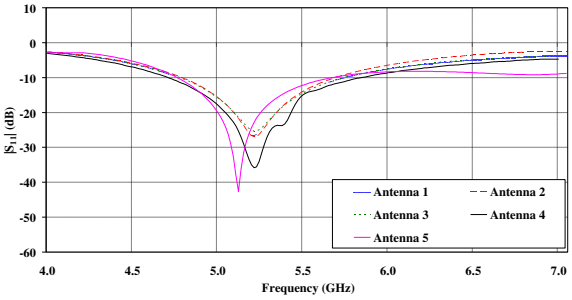


(ค) รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส



(ง) รูปวงแหวนเจาะรูวงกลม

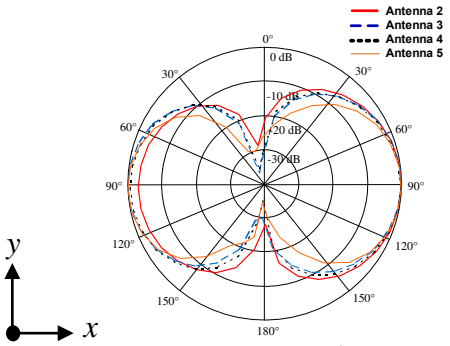
รูปที่ 7 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$(dB) ทั้ง 4 แบบ



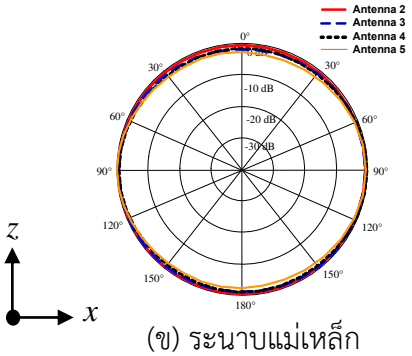
รูปที่ 8 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$(dB) ทั้ง 5 ขั้นตอน

ตารางที่ 2 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$(dB)

Antenna	$\|S_{11}\|$ (dB)	BW (%)	Gain (dBi)
Antenna 1	-27.01	19.29% (4.73 – 5.74GHz)	2.456
Antenna 2	-27.02	18.04% (4.74 – 5.68GHz)	3.638
Antenna 3	-25.33	18.04% (4.74 – 5.68GHz)	2.530
Antenna 4	-35.82	21.29% (4.70 – 5.82GHz)	2.534
Antenna 5	-42.60	19.29% (4.73 – 5.74GHz)	3.420



(ก) ระนาบแม่เหล็ก



(ข) ระนาบแม่เหล็ก

รูปที่ 9 ผลการจำลองแบบการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.20 GHz

จากการจำลองผลโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลเรขาคณิตสำหรับเพิ่มค่าอัตราขยายทั้ง 4 ขั้นตอน ที่ได้กล่าวมาขั้นตอนนั้น สามารถช่วยเพิ่มค่าอัตราขยายได้จริง เพิ่มขึ้น 48.127% จากตารางที่ 1 ซึ่งรูปแบบที่ดีที่สุด คือ รูปวงแหวน รองลงมารูปตัวไอ รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปวงแหวนเจาะรูวงกลมตามลำดับ

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองได้นำเสนอ การศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลปรับจูนร่วมกับการเพิ่มสตับทั้ง 4 รูปแบบ จัดวางล้อมรอบตัวแผ่พลังงาน เพื่อเพิ่มค่าอัตราขยายให้มากยิ่งขึ้นแบบไม่ทำลายโครงสร้างสายอากาศ นอกจากความโดดเด่นของค่าอัตราขยายแล้ว โครงสร้างเหล่านี้ยังมีจุดเด่นด้านการออกแบบ ที่โครงสร้างไม่ซับซ้อน ออกแบบง่าย และประหยัดต้นทุนในการผลิตแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ ในการเพิ่มค่าอัตราขยายอย่างมีนัยสำคัญและคงคุณลักษณะการแผ่พลังงานรอบทิศทาง โดยการจำลองผลโครงสร้างรูปตัวไอที่มีค่าอัตราขยายสูงที่สุดเพิ่มขึ้นเป็น 3.638dBi จากโครงสร้างเดิม 2.456dBi หรือคิดเป็น 48.127% โครงสร้างดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาออกแบบและจำลองผลใช้งานกับโครงสร้างสายอากาศชนิดอื่นๆ ได้ร่วมไปถึงสายอากาศที่ต้องการรับ-ส่งสัญญาณสื่อสารไร้สายในหรือนอกตัวอาคาร ได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Rathor, A. K., and M. D. Nair. (2024). “Dual-Band Polarization Converting Metasurface for Enhanced 5G and wi-fi Communication.” Paper presented at 2024 27th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp. 1-4, November.

[2] Guo, J., W. Liao, D. Guo, Y. Liu, and Q. Sun. (2025). “A dual-band wide angle coverage cavity-backed slot antenna.” Journal of Information and Intelligence.

[3] Samuel, P. J. C., N. V. Langhnoja, T. Islam, S. A. N. Arockiam, and S. Das. (2026). “Modelling and Analysis of Parasitic Metamaterial Loaded Inverted Antenna With Various Substrate Materials for Sub 6 GHz 5G, WLAN, WiMAX, and LTE bands (B42 and B43).” International Journal of Communication Systems 39,9: e70507.

[4] Balanis, C. A. (1997). Antenna theory and design. NY, USA: John Willey and Sons.

[5] สุวัฒน์ สกุลชาติ, ตฤณภพ บุญเส็ง, นิยวดี ศรีสุวรรณ, สมมาตร พรหมพุฒ, วัชรพล นาคทอง และภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล. (2568). “สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอปรับจูนด้วยสตับรูปวงแหวนและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานสามย่านความถี่ในระบบ 4G/5G.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET-17), หนองคาย, หน้า 177 - 180, 28 – 30 พฤษภาคม.

[6] วัชรพล นาคทอง. (2568). “งานประกอบการทดลองประจำรายวิชา Antenna Engineering Laboratory.” สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, หน้า 1-149.

[7] Fadhel, Y. A., M. Ataş, and R. M. Abdulhakim. (2017). “MINIATURIZATION OF A PLANAR STRIP-SHAPED MONOPOLE ANTENNA FOR WLAN APPLICATION.” Journal of Duhok University: 77-89.

[8] Danuor, P., K. Anim, and Y. B. Jung. (2022). “Monopole antenna with enhanced bandwidth and stable radiation patterns using metasurface and cross-ground structure.” Sensors 22,21: 8571.

[9] Lavadiya, S., T. Kamani, D. Jansari, H. B. Albargi, M. Jalalah, A. H. Almawgani, and S. K. Patel. (2024). “Plasmonics antenna design using a metamaterial-based resonating structure with I-shaped ground for 5G communication.” Plasmonics 19,6: 3101-3118.

[10] Ramya, P., G. S. Kumar, G. V. H. Prasad, B. F. Stanley, C. A. Palagan, V. S. Kesav, and N. Rajeswaran. (2025). “Enhancing 5g performance: A study of an mimo antenna with elliptical ring polarization.” Engineering, Technology & Applied Science Research 15,1: 19782-19787.

[11] Santhanam, S., G.Thangavel, B. Rajangam, V. M. Ramachandran, R. Ganapathi, and M. Alagarsamy. (2025). “Multiresonant Artificial Magnetic Conductor Impacted Monopole Antenna for WBAN Applications.”

[12] Algburi, M. Q., M. Ghanim, and A. N. Muhi. (2025). “A Dual Band Monopole Antenna with Slots for Wireless Applications.” Engineering, Technology & Applied Science Research 15,5: 26148-26155.

[13] Kim, J., T. Jang, and S. Lim. (2025). “Ultra-Wideband Double-Pentagonal Fractal Antenna for C-, X-, Ku-and K-Band Wireless Applications.” Micromachines 16,11: 1237.

[14] Gaid, A. S., M. M. Qaid, M. A. Abdullah, and M. A. Alomari. (2025). “A wideband microstrip antenna employing ring and hexadecagonal slots with parasitic elements for W-band applications.” TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control) 23,2: 316-328.

[15] Azmi, M., K. P. D. Zaam, H. H. Ryanu, M. R. Perdana, and A. I. Marsuki. (2025). “Design and Analysis of Triangular Patch UWB Antenna with Band Notch.” Paper presented at 2025 5th International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS), pp. 60-65, August.

[16] วัชรพล นาคทอง, อำนวย เรืองวารี และธัชชัย พุ่มพวง. (2563). “การศึกษาการปรับจูนสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด.” วารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร 15,1 (มกราคม-มิถุนายน).

สายอากาศโมโนโพลแถบความถี่คู่รูปสามเหลี่ยมเซาะร่องสำหรับประยุกต์ใช้งาน WLAN

A Slotted Triangle-shaped Dual-Band Monopole Antenna for WLAN Applications

สมภพ พิมพล[1], นรินทร์ ศรีอุดร[2] และ ภานุวัฒน์ นามขำ[3]

[1,2,3,4] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*ผู้ติดต่อ: E-mail: sompop.pi@rmuti.ac.th โทรศัพท์ 0-43-283700-2

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายย่านความถี่ 2.45 GHz (2.40-2.48 GHz) และ 5.2 GHz (5.13-5.35 GHz) โดยการเซาะร่องบนแผ่นตัวนำรูปสามเหลี่ยม เพื่อควบคุมแถบความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองแถบความถี่ พร้อมกับการลดขนาดระนาบกราวด์ไม่เต็มแผ่น สายอากาศที่ออกแบบและสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ความหนา (h) เท่ากับ 1.6 มม. และสายอากาศมีขนาด 60x80 มม.^{2} โดยสายอากาศที่ออกแบบมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำกว่า -10 dB ทั้งสองแถบความถี่ได้แก่ ช่วงแถบความถี่ที่ 1 ตั้งแต่ 1.80 GHz ถึง 2.88 GHz และช่วงแถบความถี่ที่ 2 ตั้งแต่ 4.86 GHz ถึง 6.21 GHz ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ จากผลที่ได้มีความสอดคล้องกับช่วงความถี่ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล สายอากาศแถบความถี่คู่ สายอากาศรูปสามเหลี่ยมเซาะร่อง ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Abstract

This paper presents design and fabrication of a dual-band monopole antenna for wireless local area network (WLAN) applications operating at 2.45 GHz (2.40-2.48 GHz) and 5.2 GHz (5.13-5.35 GHz). To control both resonant frequencies, a slotting technique is applied to a triangular patch along with a reduced, partial ground plane. The proposed antenna is designed and fabricated on an FR-4 printed circuit board (PCB) substrate with a dielectric constant (ε_r)=4.3, a thickness (h) of 1.6 mm, and an overall dimension of 60x80 mm^2. The experimental results demonstrate that the designed antenna achieves a reflection coefficient below -10 dB across two operating bands: the first band spans from 1.80 GHz to 2.88 GHz, and the second band covers 4.86 GHz to 6.21 GHz, centered at 2.45 GHz and 5.2 GHz, respectively. The obtained results show excellent agreement with the required frequency bands for WLAN applications.

Keywords: Monopole antenna, dual-band antenna, slotted triangular antenna, WLAN applications.

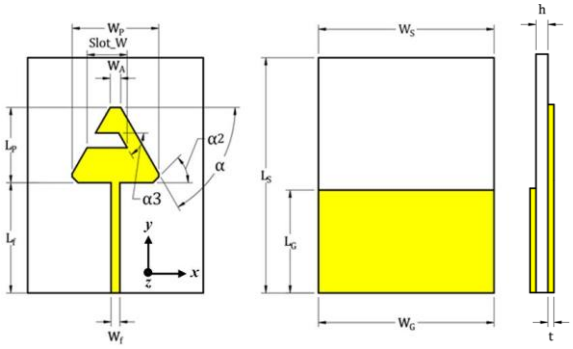
ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

สายอากาศ เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการสื่อสารไร้สาย ซึ่งปัจจุบันการสื่อสารนับได้ว่ามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) เนื่องจากเป็นการสื่อสารที่ตอบสนองความต้องการใช้งานรับ-ส่งข้อมูลได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถเพิ่มความรวดเร็วในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้โดยสะดวก ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศได้แก่ ขนาดเล็กกะทัดรัดเพื่อให้ง่ายต่อการพกพา และออกแบบให้สามารถใช้งานได้หลากหลายช่วงแถบความถี่ตามมาตรฐานการใช้ความถี่ได้แก่ ความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐาน Institute of Electrical and Electronics Engineer: IEEE ของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g/a ที่ใช้งานในช่วงความถี่ 2.45 GHz (2.4–2.484 GHz) และ 5.2 GHz (5.15-5.35 GHz) [1, 2] สายอากาศที่นำมาใช้งานก็มีความหลากหลายเช่นกัน หนึ่งในนั้นคือสายอากาศโมโนโพลที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำและสามารถออกแบบให้เกิดการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์หลายแถบความถี่ได้ง่าย สายอากาศโมโนโพล [3, 4] นำเสนอสายอากาศโมโนโพลพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ร่วมกับการลดขนาดระนาบกราวด์ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศมากขึ้น และได้มีการนำเทคนิคการเซาะร่องบนแขนของสายอากาศส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศเพิ่มมากขึ้นและการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศดียิ่งขึ้น ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคควบคุมช่วงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศโดยการเซาะร่อง (Notching) โดยที่ [5] นำเสนอสายอากาศโมโนโพลที่มีการเซาะร่องเป็นรูปเลข 2 (2-shaped) โดยทำงานที่สองย่านความถี่พร้อมกัน (Dual-band) คือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ต่อมา [6] ได้นำเสนอเทคนิคการเซาะร่องเป็นรูปวงแหวนนำเสนอสายอากาศที่รองรับโพลาไรเซชันวงกลมคู่ ทำงานในย่าน 2.45 GHz และ 4.0 - 4.62 GHz ร่วมกับการลดขนาดของระนาบกราวด์เพื่อประยุกต์ใช้งาน WLAN ต่อจากนั้น [7] ได้นำเสนอนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบแถบความถี่คู่ที่พัฒนาจากโครงสร้างโมโนโพลระนาบดั้งเดิม โดยเพิ่มโครงสร้างเป็นรูปตัว L สองชิ้นเพื่อให้รองรับการรับ-ส่งคลื่นสองความถี่ ต่อมา [8] นำเสนอสายอากาศร่องแบบสเต็ปอิมพีแดนซ์ โพลาไรเซชันคู่โครงสร้างบางที่มีแบนด์วิดท์กว้าง [9] นำเสนอเทคนิคการเซาะร่องปรับปรุงรูปทรงร่วมกับระนาบกราวด์แบบมีรอยตำหนิ สำหรับงานย่านความถี่ X-band โครงสร้างเด่นคือการใช้หมุดลัดวงจร (Shorting Via) บริเวณกึ่งกลางร่วมกับการเจาะร่องรูปไดโพล (Dipole-shaped slots) บนกราวด์เพื่อเพิ่มอัตราขยาย และ [10] ได้นำเสนอเทคนิคการเซาะร่องสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยได้ทำการเพิ่มจำนวนการเซาะร่องเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ส่งผลให้ความกว้างแถบของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม (Triangle-shaped) ร่วมกับเทคนิคการเซาะร่อง เพื่อควบคุมช่วงแถบความถี่ 2 ย่านความถี่ โดยมีการป้อนแบบไมโครสตริปไลน์ พร้อมทั้งมีการลดขนาดระนาบกราวด์ ซึ่งส่งผลให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศตลอดทั้ง 2 ย่านความถี่ ดีขึ้น

2. การออกแบบและการจำลองสายอากาศ



(ก) (ข) (ค)

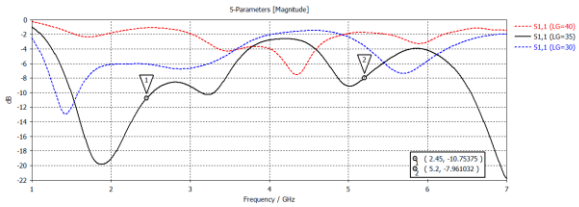
รูปที่ 1 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง และ (ค) ด้านข้าง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบ : ขนาด (หน่วย : มม.)

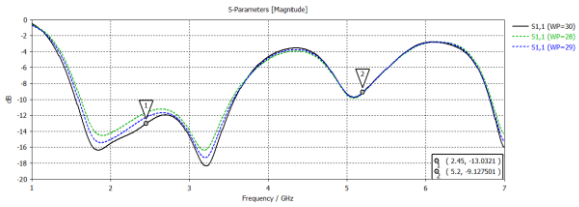
พารามิเตอร์	ขนาด	พารามิเตอร์	ขนาด
W_S	60	L_f	37
L_S	80	α (30°)	22.5
W_G	60	$\alpha 2$ (45°)	2
L_G	35	$\alpha 3$ (30°)	5
W_p	30	*Slot_L*	4
L_p	25	*Slot_W*	19
W_f	3	W_A	4

โครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 1 การออกแบบสายอากาศสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยป้อนสัญญาณทางเข้าด้วยไมโครสตริปไลน์ที่มีความกว้าง (W_f)=3 มม. และความยาวของไมโครสตริปไลน์ (L_f)=37 มม. ให้มีอินพุตอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_r=4.3) ค่าการสูญเสียบนผิว (tan δ:Loss tangent) เท่ากับ 0.02 ความสูงของวัสดุฐานรอง (h)=1.6 มม. ความหนาของวัสดุตัวนำ (t)=0.035 มม. ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบสายอากาศและปรับขนาดให้เหมาะสมที่สุด ตลอดช่วงแถบความถี่ 2 ย่านความถี่ มีค่าแสดงได้ดังตารางที่ 1

เริ่มต้นทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการลดขนาดระนาบกราวด์ของสายอากาศ เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_G ที่ขนาด 30 มม. 35 มม. และ 40 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ L_G เท่ากับ 35 มม. แสดงดังรูปที่ 2



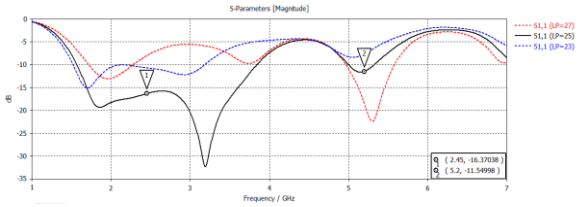
รูปที่ 2 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า L_G



รูปที่ 3 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า W_p

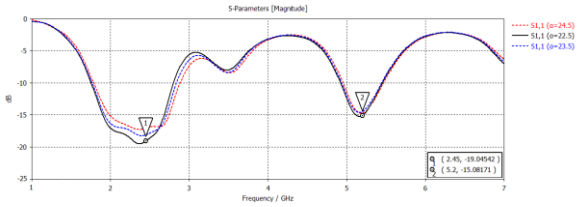
ในขั้นตอนต่อมาหาขนาดความกว้าง (W_p) ของสายอากาศ โดยกำหนดความยาว (L_p) คงที่ไว้ 30 มม. เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_p ที่ขนาด 28 มม. 29 มม. และ 30

มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ W_p เท่ากับ 30 มม. ดังรูปที่ 3



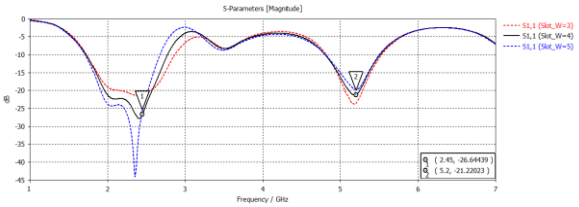
รูปที่ 4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า L_p

จากรูปที่ 4 หาขนาดความยาว (L_p) ของสายอากาศ โดยกำหนดความกว้าง (W_p) คงที่ไว้ 30 มม. เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_p ที่ขนาด 23 มม. 25 มม. และ 27 มม. ตามลำดับ เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ L_p เท่ากับ 25 มม.



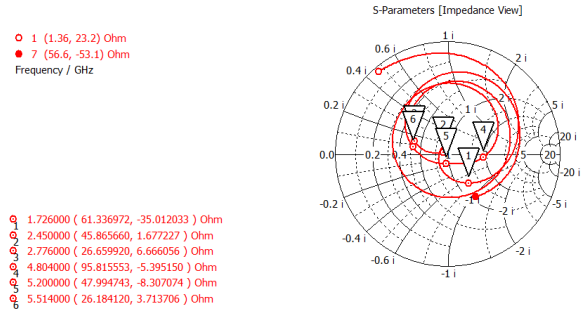
รูปที่ 5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า α

จากรูปที่ 5 ผลการจำลองผลหาขนาดของสายอากาศเมื่อปรับค่า α โดยมีการตัดขอบด้านบนของแผ่นตัวนำเป็นมุม 30 องศา ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนขนาด 22.5 มม. 23.5 มม. และ 24.5 มม. ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดระยะที่เกิดจากการตัดมุมที่ α เท่ากับ 22.5 มม.



รูปที่ 6 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อปรับเปลี่ยนค่า *Slot_W* α2 และ α3

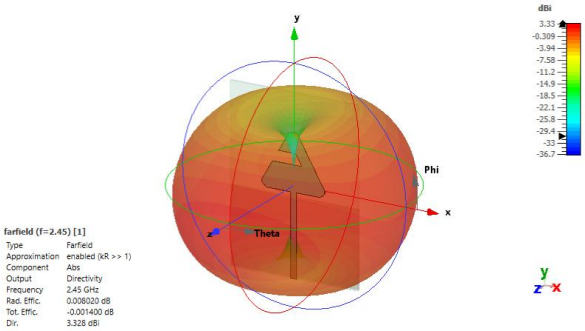
จากรูปที่ 6 ผลการจำลองหาขนาดเมื่อปรับค่า *Slot_W* α2 และ α3 มีการตัดขอบด้านล่างและร่องด้านใน พร้อมทั้งปรับค่า *Slot_W* ที่ขนาด 3.0 มม. 4.0 มม. และ 5.0 มม. เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งพบว่าการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ เลือกใช้ความกว้างของร่องเซาะที่ *Slot_W* เท่ากับ 4.0 มม. และผลการจำลองอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ ดังรูปที่ 7



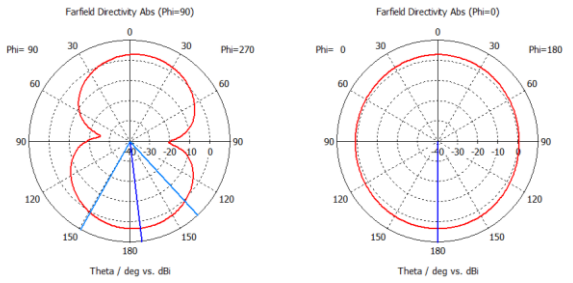
รูปที่ 7 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังในแต่ละความถี่ใช้งาน แบบรูปการแผ่กำลังแบบโพลาไรซ์เดียวกัน (Co-Polarization) ของสายอากาศต้นแบบ

ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ พบว่าสายอากาศต้นแบบที่ได้ออกแบบนี้ มีแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัวในระนาบสนามแม่เหล็กและมีแบบรูปการแผ่กำลังแบบ 2 ทิศทาง (Bi-Directional) ในระนาบสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 8 และ 9

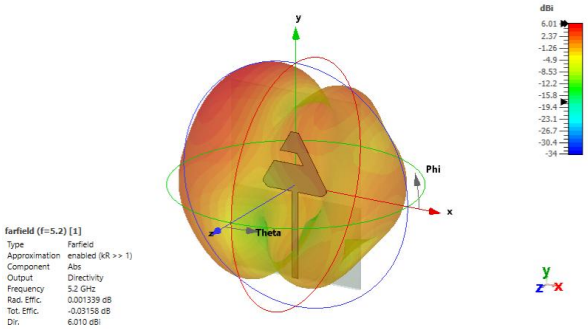


(ก) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ

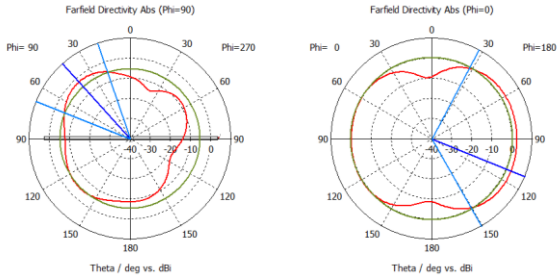


(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 8 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz



(ก) แบบรูปการแผ่กำลังแบบ 3 มิติ

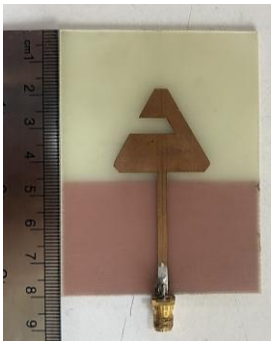


(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก

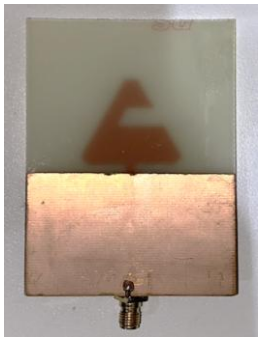
รูปที่ 9 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz

3. การสร้างและการทดสอบสายอากาศ

สายอากาศต้นแบบที่ได้จากการจำลองแบบโครงสร้าง ทำการสร้างสายอากาศตามขนาดโครงสร้างดังรูปที่ 1 ทำการบัดกรีขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์ม ซึ่งชิ้นงานสายอากาศต้นแบบที่ได้สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว แสดงดังรูปที่ 10



(ก) ด้านหน้า



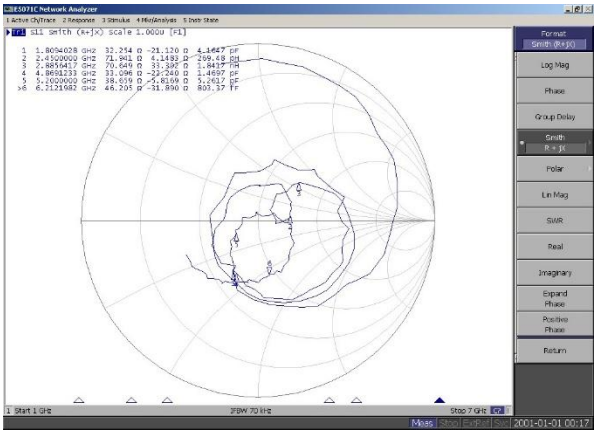
(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 10 สายอากาศต้นแบบที่ทำการสร้าง

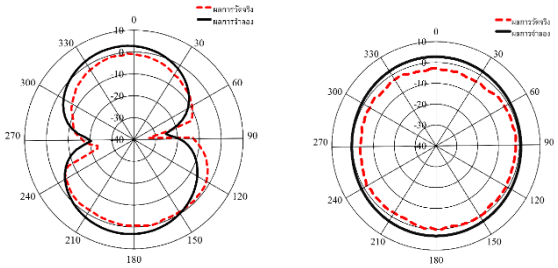
ผลการวัดทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent รุ่น E501C พบว่าผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ (dB) ทั้ง 2 แถบความถี่ ครอบคลุมในช่วงความถี่ของการออกแบบใช้งาน ได้แก่ ช่วงแถบความถี่ที่ 1 ครอบคลุมช่วงความถี่ 1.80 GHz ถึง 2.88 GHz และช่วงแถบความถี่ที่ 2 ครอบคลุมช่วงความถี่ 4.86 GHz ถึง 6.21 GHz ซึ่งครอบคลุมที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 11 และการวัดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ

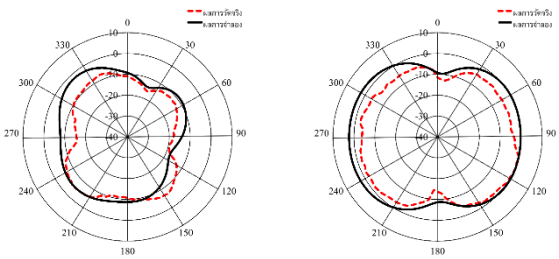


รูปที่ 12 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศต้นแบบ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 13 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 14 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศที่ความถี่ 5.2 GHz

จากรูปที่ 13 และ 14 การวัดแบบรูปการแผ่กำลังในแต่ละความถี่ใช้งาน โดยมีการหมุนรอบแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่ง ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 360 องศา โดยมีระยะห่างสายอากาศทั้งสองตัว เท่ากับ 0.5 เมตร ซึ่งเป็นสนามระยะไกล (Far-Field) ผลจากการวัดแบบรูปการแผ่กำลังแบบโพลาไรซ์เดียวกัน (Co-Polarization) ของสายอากาศต้นแบบ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ พบว่าสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ มีแบบรูปการแผ่กำลังมีความสอดคล้องกับผลการจำลองทั้งระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า

ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่สร้าง พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz มีค่าเท่ากับ 2.134 dBi และ 5.537 dBi ตามลำดับ และอัตราขยายที่ได้จากผลการจำลอง ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz มีค่าเท่ากับ 3.328 dBi และ 6.01 dBi ตามลำดับ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมขนาดกะทัดรัด 60x80 มม.^{2} ที่ใช้เทคนิคการเซาะร่องและระนาบกราวด์ไม่เต็มแผ่น เพื่อควบคุมการทำงานสองย่านความถี่ (Dual-band) สำหรับระบบ WLAN ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแมตช์อิมพีแดนซ์ เหมาะสำหรับอุปกรณ์สื่อสารทั้งแบบประจำที่และเคลื่อนที่

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยและโครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Moeikham P., Mahatthanajatuphat C. and Akkaraekthalin P. (2012). A Triple Band Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications. International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP), pp. 295-298.

[2] Moeikham P. and Akkaraekthalin P. (2013). PrintedSlot Antenna for WLAN/WiMAX and UWB Applications," International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP), pp.88-91.

[3] Alshammari W.T. (2014). UWB Square Microstrip Patch Antenna for C-Band Applications. International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 5, issue 11, pp. 191-193.

[4] Naveen S. M., Vani R. M. and Hunagund P. V. (2012). Compact Wideband Rectangular Monopole Antenna for Wireless Applications. Wireless Engineering and Technology, vol. 3, pp. 240-243.

[5] Rani H., Kawsari H., Kakon S., Rahman M. and Hossain Md. M. (2023). A Printed 2-Shaped Dual Band Microstrip Antenna for RFID/WLAN/ISM Band Applications. International Conference on Electrical

Information and Communication Technology (EICT), pp. 1-5.

[6] Jyoti., Kumar A. and Birwal A. (2025). Compact Dual Band Dual Polarized Triangular Split Ring Antenna. International Conference on Microwave, Antennas and Communication (MAC), pp. 1-4.

[7] Feng L. A., Heng Z. Y., Jun W. Z. and Chao L. Z. (2021). Design of a Broadband Dual-Band Antenna Based on WLAN Communication Protocol. International Conference on Computer and Communication Systems, pp. 856-860.

[8] Lian R., Wang Z., Yin Y., Wu J. and Song X. (2016). Design of a Low-Profile Dual-Polarized Stepped Slot Antenna Array for Base Station. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 15, 2016, pp. 362-365.

[9] Samantaraya D., Bhattacharyyab S. and Srinivasc K. V. (2018). Modified Fractal-shaped Slotted Patch Antenna with Dipole-shaped Slotted Ground Plane with Enhanced Gain for X-band Applications. IEEE Indian Conference on Antenna and Propogation (InCAP), pp.1-4.

[10] Pimpol S. and Wongsan R. (2013). Bandwidth Improvement of Band-Notched Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception. International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), pp. 138-142.

การพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติโดยใช้ PLC หุ่นยนต์อุตสาหกรรม และCC-Link

Development of a PLC-Based Automated Sorting Using Industrial Robot and CC-Link

อนันตชัย โยนะพันธ์[1], สุรินทร์ อ่อนน้อม[1], ภากร นาคศรี[2] และทนงศักดิ์ มากทอง[1]

[1] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและหุ่นยนต์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[2] โปรแกรมวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 77 หมู่ 7 ต.หนองระเวียง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*อนันตชัย โยนะพันธ์: anantachai.yo@rmuti.ac.th, 0982802586

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านเครือข่ายสื่อสาร CC-Link สำหรับการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยใช้ FX5U PLC เป็นตัวควบคุมหลัก ร่วมกับโมดูล CC-Link NZ2MFB1-32DT สำหรับการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ระบบสายพานลำเลียงใช้เซนเซอร์ตรวจจับ 3 ประเภท ได้แก่ เซนเซอร์อินดัคทีฟ เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริก และเซนเซอร์คาปาซิทีฟ เพื่อจำแนกชิ้นงานประเภทโลหะ พลาสติกสีดำ และพลาสติกสีเหลือง จากนั้นทำการคัดแยกชิ้นงานด้วยระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรม DOBOT MG400 นอกจากนี้ยังได้พัฒนาระบบติดตามและควบคุมการทำงานผ่าน Node-RED Dashboard โดยเชื่อมต่อข้อมูลจาก PLC ผ่านโปรโตคอล Modbus TCP/IP พร้อมจัดเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่าน Grafana ตามแนวคิด Industrial Internet of Things (IIoT) ผลการทดลองการคัดแยกชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยใช้ระยะเวลาในการทำงานรวม 277 วินาที หรือมีอัตราการคัดแยกเฉลี่ย 2.77 วินาทีต่อชิ้น ระบบสามารถติดตามและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความใหม่ของงานวิจัยนี้อยู่ที่การบูรณาการ PLC, CC-Link หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ระบบนิวเมติกส์ แพลตฟอร์ม IIoT สำหรับการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ไว้ในระบบต้นแบบเดียว เพื่อรองรับการเรียนการสอนและการพัฒนาระบบ Smart Factory ตามแนวคิด Industry 4.0

คำสำคัญ: ระบบอัตโนมัติ, สายพานลำเลียง, หุ่นยนต์อุตสาหกรรม, CC-Link, Industrial Internet of Things (IIoT)

Abstract

This research presents the development of an automated conveyor-based sorting system integrated with pneumatic actuators and an industrial robot through a CC-Link industrial communication network for automatic workpiece classification and sorting. The system employs a Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U PLC as the main controller together with a CC-Link NZ2MFB1-32DT module for data communication among field devices. Three types of sensors, namely inductive, photoelectric, and capacitive sensors, were utilized to identify and classify metal, black plastic, and yellow plastic

workpieces. The sorting process was subsequently performed using a pneumatic system and a DOBOT MG400 industrial robot. In addition, a real-time monitoring and control platform was developed using Node-RED Dashboard. Data from the PLC were acquired via the Modbus TCP/IP protocol, stored in an InfluxDB database, and visualized through Grafana dashboards based on the Industrial Internet of Things (IIoT) concept. The proposed system integrates industrial control, robotic automation, industrial communication networks, and IIoT technologies within a single platform, providing a practical prototype for Smart Factory and Industry 4.0 applications as well as engineering education and research. Experimental results obtained from 100 sorting operations demonstrated that the developed system operated continuously and reliably, achieving a total processing time of 277 seconds with an average sorting time of 2.77 seconds per workpiece. Furthermore, the system successfully provided efficient real-time monitoring, data logging, and visualization capabilities. The results indicate that the proposed system can serve as an effective prototype for automated manufacturing systems, industrial automation training, and smart factory development.

Keywords: Industrial Automation, Conveyor Sorting System, Industrial Robot, CC-Link Network, Industrial Internet of Things (IIoT)

1. บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการนำเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติและระบบโรงงานอัจฉริยะ (Smart Factory) มาใช้อย่างแพร่หลาย [3-5] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ลดความผิดพลาดจากการปฏิบัติงานของมนุษย์ และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม โดยระบบสายพานลำเลียง หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ระบบนิวเมติกส์ และระบบเครือข่ายสื่อสารทางอุตสาหกรรม ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของสายการผลิตอัตโนมัติในโรงงานสมัยใหม่ [2]

นอกจากนี้แนวคิด Industrial Internet of Things (IIoT) ยังเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์ภาคสนามเข้าสู่ระบบติดตาม วิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ [3-5] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการกระบวนการผลิตและการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller: PLC) เ ป็ น อุปกรณ์ควบคุมหลักที่นิยมใช้งานในระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเสถียรสูง รองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภาคสนามผ่านเครือข่ายสื่อสารอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] โดยเฉพาะระบบเครือข่าย CC-Link ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการสื่อสารข้อมูลระหว่าง PLC และอุปกรณ์ Remote I/O ในระบบควบคุมอัตโนมัติ [9-10] ทำให้สามารถลดความซับซ้อนของการเดินสายสัญญาณ เพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบควบคุม

นอกจากนี้ ระบบนิวเมติกส์ยังถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานคัดแยกและลำเลียงชิ้นงาน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ตอบสนองรวดเร็ว มีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ [2] ขณะที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรมถูก

นำมาใช้ในงานหยิบจับ จัดเรียงชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดระยะเวลาในการทำงานร่วมกับสายการผลิตอัตโนมัติ [11] อีกทั้งการพัฒนาระบบติดตาม ควบคุมผ่านแพลตฟอร์ม Node-RED ร่วมกับฐานข้อมูล InfluxDB และระบบแสดงผล Grafana ยังช่วยให้สามารถติดตามสถานะการทำงาน วิเคราะห์ข้อมูล จัดเก็บข้อมูลการทำงานของระบบได้แบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต [12]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านเครือข่าย CC-Link สำหรับการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยใช้ Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U PLC เป็นตัวควบคุมหลัก ใช้ DOBOT MG400 ในการหยิบจับ คัดแยกชิ้นงาน [6-8] พร้อมทั้งพัฒนาระบบติดตาม ควบคุมการทำงานผ่าน Node-RED Dashboard จัดเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ด้วย Grafana เพื่อใช้เป็นต้นแบบระบบอัตโนมัติและชุดฝึกปฏิบัติการด้านเทคโนโลยีโรงงานอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนทางวิศวกรรมระบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบเพื่อการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติที่สามารถบูรณาการเทคโนโลยี PLC ระบบเครือข่ายอุตสาหกรรม หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ระบบนิวเมติกส์ และแพลตฟอร์ม IIoT ภายในระบบเดียวกันยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะระบบที่สามารถติดตามวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับใช้ในการเรียนการสอน การวิจัยด้านระบบอัตโนมัติและโรงงานอัจฉริยะ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติส่วนใหญ่มักพัฒนาด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เช่น การใช้ PLC ควบคุมสายพานลำเลียง การใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการหยิบจับชิ้นงาน หรือการใช้ระบบ Internet of Things สำหรับติดตามข้อมูลการผลิต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่บูรณาการเทคโนโลยีทั้ง PLC หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ระบบนิวแมติกส์ และ Industrial Internet of Things (IIoT) เข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ยังมีจำนวนจำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติที่สามารถบูรณาการ PLC หุ่นยนต์ DOBOT MG400 ระบบนิวแมติกส์ และเทคโนโลยี IIoT เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถควบคุม ตรวจสอบ และติดตามสถานะการทำงานของระบบได้แบบเวลาจริง ซึ่งถือเป็นแนวทางที่ช่วยลดช่องว่างของงานวิจัยเดิมและสนับสนุนการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัจฉริยะในอนาคต

1.1 ขอบเขตการศึกษา

1.1.1. ศึกษาและพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติโดยใช้ PLC เป็นหน่วยควบคุมหลักร่วมกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม DOBOT MG400

1.1.2. ระบบต้นแบบใช้สายพานลำเลียง เซนเซอร์ตรวจจับ ระบบนิวแมติกส์ และเครือข่าย IIoT สำหรับการรับส่งข้อมูลและติดตามสถานะการทำงาน

1.1.3. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาดและน้ำหนักอยู่ภายในขอบเขตที่หุ่นยนต์ DOBOT MG400 สามารถรองรับได้ โดยน้ำหนักไม่เกินพิกัดการรับน้ำหนักของหุ่นยนต์

1.1.4. การทดลองดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ และยังไม่ครอบคลุมการใช้งานในสายการผลิตจริง

1.1.5. การประเมินผลพิจารณาจากความถูกต้องในการคัดแยก ระยะเวลาในการทำงาน และความสามารถในการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบ IIoT

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

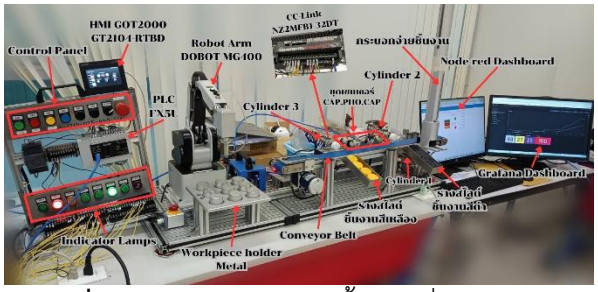
- เพื่อพัฒนาระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมสำหรับการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ
- เพื่อพัฒนาระบบควบคุมและรับ–ส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายสื่อสารอุตสาหกรรม CC-Link โดยใช้ Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5 U PLC และ Mitsubishi CC-Link NZ2 MFB1 - 3 2 DT ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคสนาม
- เพื่อพัฒนาระบบติดตาม ควบคุมการทำงานแบบเรียลไทม์ผ่าน Node-RED Dashboard พร้อมจัดเก็บข้อมูลด้วย InfluxDB และแสดงผลข้อมูลด้วย Grafana ตามแนวคิด Industrial Internet of Things (IIoT)
- เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว และเสถียรภาพในการทำงานของระบบ
- เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบอัตโนมัติสำหรับใช้เป็นชุดฝึกปฏิบัติการด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีโรงงานอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนทางวิศวกรรม

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

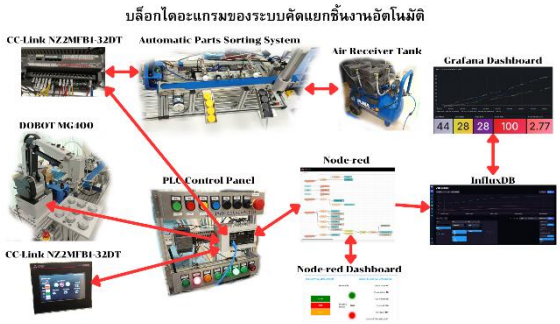
งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านเครือข่ายสื่อสาร CC-Link สำหรับการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบโครงสร้างระบบ

ทำการออกแบบโครงสร้างของระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติ โดยแบ่งระบบออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบสายพานลำเลียง ระบบตรวจจับชิ้นงาน ระบบคัดแยกด้วยนิวเมติกส์ ระบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และระบบติดตามและควบคุมข้อมูลผ่านเครือข่าย Industrial Internet of Things (IIoT) ซึ่งใช้ Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U PLC เป็นตัวควบคุมหลักในการประมวลผลและสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1,2



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้ในระบบ



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ

3.2 การออกแบบระบบสายพานลำเลียง

ระบบสายพานลำเลียงถูกออกแบบให้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เพื่อใช้ในการลำเลียงชิ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งตรวจจับ คัดแยก โดย PLC ทำหน้าที่ควบคุมการเริ่มต้นและหยุดการทำงานของสายพาน [1-2] ทั้งนี้ได้ออกแบบโครงสร้างสายพาน

ให้เหมาะสมกับการทำงานร่วมกับระบบเซนเซอร์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

3.3 การออกแบบระบบตรวจจับและคัดแยกชิ้นงาน

ระบบตรวจจับชิ้นงานประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับ 3 ประเภท ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจจับโลหะแบบอินดัคทีฟ (Inductive Sensor) เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Sensor) และเซนเซอร์คาปาซิทีฟ (Capacitive Sensor) เพื่อใช้ในการจำแนกชิ้นงานประเภทโลหะ สีดำ และสีเหลือง [6-8] จากนั้น PLC จะทำการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อสั่งงานระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์ DOBOT MG400 สำหรับการคัดแยกชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่กำหนด [11]

ระบบนิวเมติกส์ประกอบด้วยกระบอกลมและโซลินอยด์วาล์วสั่งงานด้วยไฟฟ้าสำหรับผลักชิ้นงานออกจากสายพานลำเลียง โดยออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบตรวจจับ การควบคุมของ PLC เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและความแม่นยำในการคัดแยกชิ้นงาน

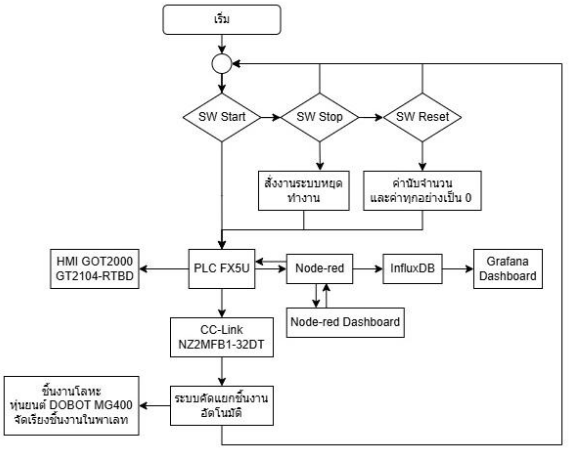
3.4 การออกแบบระบบเครือข่ายสื่อสารอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้ใช้ระบบเครือข่าย CC-Link ในการรับ–ส่งข้อมูลระหว่าง PLC กับอุปกรณ์โมดูล Remote I/O รุ่น Mitsubishi CC-Link NZ2MFB1-32DT [9-10] เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของการเดินสายสัญญาณ เพิ่มความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบ ทั้งนี้ PLC จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ ส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ขับเคลื่อนต่าง ๆ ผ่านเครือข่าย CC-Link

3.5 การพัฒนาระบบติดตามและควบคุมแบบเรียลไทม์

ได้พัฒนาระบบติดตาม ควบคุมการทำงานของระบบผ่าน Node-RED Dashboard โดยทำการเชื่อมต่อข้อมูลจาก PLC ผ่านโปรโตคอล Modbus TCP/IP [12] เพื่อใช้ในการอ่านและเขียนข้อมูลระหว่างระบบควบคุมและระบบติดตามข้อมูล โดยใช้ Node Modbus Read, Write ภายในแพลตฟอร์ม Node-RED สำหรับดึงข้อมูลรีจิสเตอร์จาก PLC เช่น สถานะเซนเซอร์ จำนวนชิ้นงาน และสถานะการทำงานของระบบแบบเรียลไทม์

ข้อมูลที่ได้จาก PLC จะถูกประมวลผลและแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard เพื่อใช้ในการติดตามและควบคุมระบบจากหน้าเว็บแอปพลิเคชัน นอกจากนี้ข้อมูลการทำงานทั้งหมดจะถูกจัดเก็บลงฐานข้อมูล InfluxDB สำหรับการบันทึกข้อมูล และนำมาแสดงผลในรูปแบบกราฟ แดชบอร์ดผ่าน Grafana เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและติดตามสถานะของระบบอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ตามแนวคิด Industrial Internet of Things (IIoT) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 System architecture diagram การทำงานของระบบ

3.6 การทดสอบและประเมินผลระบบ

ทดสอบประสิทธิภาพของระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยประเมินผลในด้านความถูกต้องในการคัดแยกชิ้นงาน ระยะเวลาในการตอบสนองของระบบ

เสถียรภาพในการสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย Modbus TCP/IP และ CC-Link รวมถึงทดสอบการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านระบบ Dashboard และฐานข้อมูล เพื่อประเมินความเหมาะสมของระบบสำหรับใช้เป็นต้นแบบชุดฝึกปฏิบัติการด้านระบบอัตโนมัติและโรงงานอัจฉริยะ

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมสำหรับการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยกำหนดให้มีชิ้นงานทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ ชิ้นงานโลหะจำนวน 9 ชิ้น ชิ้นงานพลาสติกสีดำจำนวน 4 ชิ้น และชิ้นงานพลาสติกสีเหลืองจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งถูกบรรจุอยู่ภายในแมกกาซีนจ่ายชิ้นงานในลักษณะเป็นการสุ่มป้อนแบบต่อเนื่องวนซ้ำจนกว่าจะครบ 100 ชิ้น เพื่อจำลองการทำงานของระบบสายการผลิตอัตโนมัติในสภาพการทำงานจริง

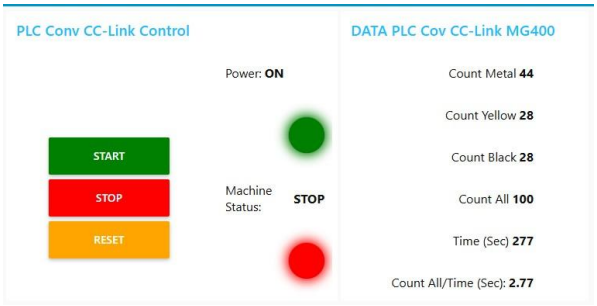
ในการทดลอง ได้กำหนดให้ระบบทำการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติจำนวนทั้งหมด 100 ครั้ง โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับชิ้นงานร่วมกับระบบควบคุม PLC และระบบนิวเมติกส์ในการคัดแยกชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่กำหนด พร้อมทั้งมีการติดตามและบันทึกข้อมูลการทำงานผ่านระบบ Node-RED Dashboard และฐานข้อมูล InfluxDB

ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยใช้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมด 277 วินาที คิดเป็นอัตราส่วนการคัดแยกเฉลี่ยเท่ากับ 2.77 วินาทีต่อชิ้น ทั้งนี้ผลการคัดแยกชิ้นงานที่ได้จากการทดลองจำนวน 100 ครั้ง ประกอบด้วยชิ้นงานโลหะจำนวน 44 ชิ้น ชิ้นงานพลาสติกสีเหลืองจำนวน 28 ชิ้น และชิ้นงานพลาสติกสีดำจำนวน 28 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคัดแยกชิ้นงานแบบต่อเนื่องของระบบอัตโนมัติ สุ่มวนซ้ำต่อเนื่อง 100 ครั้ง

รายการ	ค่า
จำนวนชิ้นงานทั้งหมด	100 ชิ้น
ชิ้นงานโลหะ	44 ชิ้น
ชิ้นงานสีเหลือง	28 ชิ้น
ชิ้นงานสีดำ	28 ชิ้น
เวลารวม	277 วินาที
เวลาเฉลี่ยต่อชิ้น	2.77 วินาที/ชิ้น
ความถูกต้องในการคัดแยก	100 %

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถคัดแยกชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง มีความเสถียรในการทำงาน โดยระบบสามารถประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ ตรวจจับประเภทของชิ้นงาน และสั่งงานระบบนิวเมติกส์ร่วมกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ระบบติดตามและควบคุมผ่าน Node-RED Dashboard ดังแสดงในรูปที่ 4 สามารถแสดงผลข้อมูลการทำงานแบบเรียลไทม์ บันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล InfluxDB เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังผ่าน Grafana ดังแสดงในรูปที่ 5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบระบบอัตโนมัติและชุดฝึกปฏิบัติการด้านเทคโนโลยีโรงงานอัจฉริยะ



รูปที่ 4 ระบบแสดงผลและควบคุมผ่าน Node-RED Dashboard



รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังผ่าน Grafana Dashboard

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติโดยประยุกต์ใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) ร่วมกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม DOBOT MG400 ระบบลำเลียงแบบสายพาน ระบบนิวแมติกส์ และเทคโนโลยี Industrial Internet of Things (IIoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกชิ้นงานในกระบวนการผลิต โดยระบบสามารถตรวจจับชนิดของชิ้นงาน ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอุตสาหกรรม และสั่งงานหุ่นยนต์ให้หยิบและจัดเรียงชิ้นงานได้อย่างอัตโนมัติ

ผลการทดสอบระบบจำนวน 100 รอบการทำงาน พบว่าระบบสามารถคัดแยกชิ้นงานได้ถูกต้องร้อยละ 100 โดยสามารถสื่อสารข้อมูลระหว่าง PLC หุ่นยนต์อุตสาหกรรม และระบบ IIoT ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ ระบบยังสามารถแสดงสถานะการทำงานและข้อมูลการผลิตผ่านเครือข่ายได้แบบเวลาจริง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและควบคุมกระบวนการผลิต

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การทดลองดำเนินการกับชิ้นงานที่มีขนาดและน้ำหนักอยู่ในช่วงที่หุ่นยนต์ DOBOT MG400 สามารถรองรับได้ การทดสอบดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ และยังไม่มีการประเมินประสิทธิภาพในสายการผลิตจริงที่มีปัจจัยรบกวนหลายด้าน เช่น การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งชิ้นงาน ความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ หรือภาระงานที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

สำหรับข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมการผลิตจริง เพิ่มจำนวนและความหลากหลายของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของข้อมูลการทำงานเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของระบบ นอกจากนี้ อาจประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) หรือการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเพิ่มความสามารถในการจำแนกชิ้นงานและการตัดสินใจอัตโนมัติ ตลอดจนพัฒนาระบบการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคาดการณ์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) ในระบบอุตสาหกรรมอัจฉริยะต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา และผศ.สุรินทร์ อ่อนน้อม ที่กรุณาสนับสนุนสถานที่วิจัยรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Bolton, W. (2015). Programmable Logic Controllers. 6th ed. Oxford: Newnes.

[2] Groover, M. P. (2016). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 4th ed. Boston: Pearson.

[3] Lee, J., B. Bagheri, and H. A. Kao. (2015). "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems." Manufacturing Letters 3: 18-23.

[4] Monostori, L. (2014). " Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges." Procedia CIRP 17: 9-13.

[5] Wang, S., J. Wan, D. Li, and C. Zhang. (2016). " Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook." Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things, Harbin, China, January 14-15.

[6] วนายุทธ์ แสนเงิน, ณรงค์พล นัยสงวนศรี, กริชธนา บุญนาค และนัฐพร แซ่พู. (2565). "การพัฒนาชุดศึกษาระบบคัดแยกสีของวัตถุบนสายพานลำเลียงด้วยแขนกลหุ่นยนต์สการ่า." เอกสารประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45.

[7] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม. (2561). "แขนกลจับชิ้นงานจากเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติตามสายพาน." วารสารวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 4(1), 45–52.

[8] ชัยณรงค์ ณ ระนอง, ชาญ บทมาตรา และกิตติชัย ฝ่ายโชคชัย. (2564). "ชุดฝึกระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติ." วารสารสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้, 3(2), 109–116.

[9] Mitsubishi Electric. (2024). MELSEC iQ-F FX5 U User's Manual. Accessed May 15. Available from: https://www.mitsubishielectric.com/

[10] Mitsubishi Electric. (2024). CC-Link System Master/Local Module User's Manual. Accessed May 15. Available from: https://www.mitsubishielectric.com/

[11] Dobot Robotics. (2024). MG400 Collaborative Robot User Manual. Accessed May 15. Available from: https://www.dobot-robots.com/

[12] Node-RED. (2024). Node-RED User Guide. Accessed May 15. Available from: https://nodered.org/

ระบบตรวจจับและระบุความผิดพลาดของแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

PCB Fault Detection and Classification System Using Deep Learning Technique

กรัณฑ์กมล ภูครองหิน[1] และ กฤษฎา ทาสันเทียะ[1]*

[1]สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: kritsada.ta@rmuti.ac.th, 089-189-8073

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาชุดจำลองระบบตรวจจับและ ระบุความผิดพลาดของแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกและสถาปัตยกรรม YOLOv8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลปัญญาประดิษฐ์สำหรับตรวจจับและจำแนกข้อบกพร่อง 3 ประเภท ได้แก่ Missing hole, Mouse bite และ Open circuit จากชุดข้อมูลภาพ PCB จำนวน 1,191 ภาพ ที่ผ่านการกำกับข้อมูล (Annotation) ด้วย Roboflow โดยแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกสอนร้อยละ 70 ชุดตรวจสอบร้อยละ 20 และชุดทดสอบร้อยละ 10 งานวิจัยได้ทดลองปรับค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning rate) สามค่า คือ 0.01, 0.001 และ 0.0001 พบว่าค่า Learning rate = 0.01 ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่า Precision 0.88, Recall 0.86 และ mAP@0.5 เท่ากับ 0.87 ระบบถูกนำไปติดตั้งในชุดจำลองต้นแบบที่ประกอบด้วยสายพานลำเลียง กล้อง Webcam และ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผล ผลการทดสอบกับแผ่น PCB จริง 30 ตัวอย่าง ให้ความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 76.67 โดย Missing hole และ Open circuit มีความแม่นยำร้อยละ 90 ส่วน Mouse bite มีความแม่นยำร้อยละ 50 เนื่องจากลักษณะตำหนิที่มีความซับซ้อน ระบบต้นแบบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบคุณภาพในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดด้านการตรวจจับ Mouse bite ในสภาพแสงที่แปรปรวน ซึ่งเป็นทิศทางการพัฒนาในอนาคต

คำสำคัญ: แผ่นวงจรพิมพ์, การตรวจจับข้อบกพร่อง, การเรียนรู้เชิงลึก, ปัญญาประดิษฐ์

Abstract

This paper presents the development of a simulation system for detecting and identifying defects in Printed Circuit Boards (PCBs) using deep learning techniques with the YOLOv8 architecture. The objective is to develop an AI model capable of detecting and classifying three defect types: Missing hole, Mouse bite, and Open circuit. A dataset of 1,191 PCB images was annotated using Roboflow and split into 70% training, 20% validation, and 10% testing. Three learning rates (0.01, 0.001, and 0.0001) were evaluated; LR = 0.01 achieved the best performance with Precision 0.88, Recall 0.86, and mAP@0.5 of 0.87. The model was deployed in a prototype system comprising a conveyor belt, a Webcam, and a Raspberry Pi as the processing unit. Real-world testing on 30 PCB specimens yielded 76.67% average accuracy: 90% for Missing hole and Open circuit, and 50% for Mouse bite due to its complex visual characteristics. The prototype demonstrates strong potential for industrial quality inspection applications.

However, the system still has limitations in detecting Mouse bite under variable lighting conditions, which represents a direction for future development.

Keywords: Printed Circuit Board, Defect Detection, Deep Learning, Artificial Intelligence.

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรม 4.0 แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ถือเป็นหัวใจสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด คุณภาพของ PCB ส่งผลโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ปลายทาง ในกระบวนการผลิตอาจเกิดข้อบกพร่องได้หลายรูปแบบ หากไม่ถูกตรวจพบในเวลาที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์และเพิ่มต้นทุนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ [1]

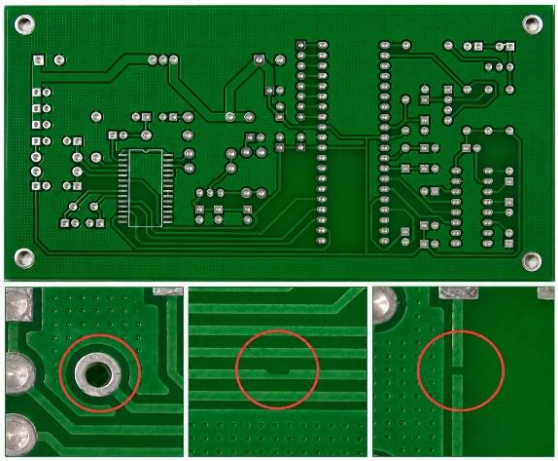
ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้นำระบบตรวจสอบด้วยสายตาอัตโนมัติ (AOI/AVI) มาใช้อย่างแพร่หลาย แต่ก็ยังเผชิญกับข้อจำกัดด้านความแม่นยำเมื่อ PCB มีขนาดเล็กลงและซับซ้อนขึ้น การนำ YOLOv8 มาประยุกต์ใช้จึงเป็นทางออกที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถตรวจจับแบบ real-time พร้อมระบุตำแหน่งและจำแนกประเภทในขั้นตอนเดียว [2]

เพื่อตอบโจทย์ข้อจำกัดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงนำเสนอชุดจำลองที่ผสาน YOLOv8n บน Raspberry Pi ร่วมกับสายพานลำเลียง เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของระบบตรวจสอบอัตโนมัติแบบฝังตัวต้นทุนต่ำที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาโมเดล YOLOv8 สำหรับตรวจจับข้อบกพร่อง PCB 3 ประเภท (2) ออกแบบและสร้างชุดจำลองระบบตรวจสอบคุณภาพต้นแบบ และ (3) ประเมินประสิทธิภาพของระบบในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อบกพร่องของแผ่นวงจรพิมพ์

แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นข้อบกพร่อง 3 ประเภทที่พบบ่อย ได้แก่ (1) Missing hole: รูเจาะหายไป (2) Mouse bite: รอยบิ่นขอบลายทองแดง และ (3) Open circuit: ลายวงจรขาด ดังแสดงในรูปที่ 1 [3]



(ก) Missing hole (ข) Mouse bite (ค) Open circuit

รูปที่ 1 ตัวอย่างภาพข้อบกพร่อง PCB

2.2 สถาปัตยกรรม YOLOv8

YOLO (You Only Look Once) เป็นอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุแบบ One-stage detector ที่มีความเร็วและความแม่นยำสูง YOLOv8 (ปี ค.ศ. 2023) พัฒนาโดย Ultralytics รองรับการ Export เป็น ONNX สำหรับอุปกรณ์ Edge computing [4]

สำหรับ YOLOv8 ได้ปรับปรุงสถาปัตยกรรมจากรุ่นก่อนหน้า ประกอบด้วย Backbone แบบ

CSPDarknet ผสาน C2f module ที่เพิ่มประสิทธิภาพการสกัดคุณลักษณะ ใช้ PANet เป็น Neck สำหรับรวมคุณลักษณะหลายมาตราส่วน และใช้ Anchor-free decoupled head ที่ลดความซับซ้อนของขั้น post-processing งานวิจัยนี้เลือกใช้ YOLOv8n (Nano) ซึ่งมีจำนวนพารามิเตอร์น้อยที่สุด (ประมาณ 3.2 ล้านพารามิเตอร์) เหมาะสำหรับการประมวลผลบน Edge device ที่มีทรัพยากรจำกัด เช่น Raspberry Pi

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

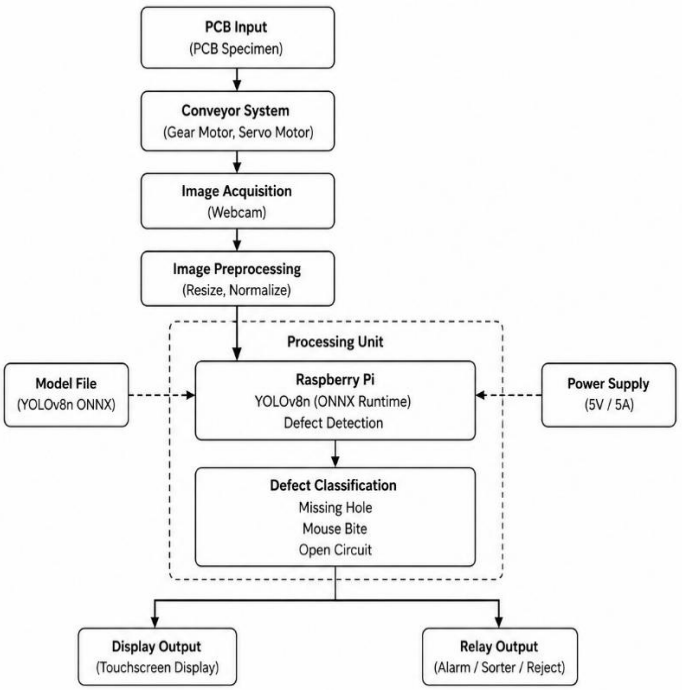
งานวิจัยด้านการตรวจจับข้อบกพร่อง PCB ด้วย Deep learning มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง Huang และ Wei [3] เผยแพร่ชุดข้อมูล PCB สังเคราะห์ 1,386 ภาพ ครอบคลุมข้อบกพร่อง 6 ประเภท ซึ่งกลายเป็น benchmark สำคัญในวงการ ต่อมา Huang และคณะ [9] ได้ขยายเป็นชุดข้อมูล HRIPCB ที่ท้าทายมากขึ้น ในด้านโมเดล Ding และคณะ [8] เสนอ TDD-Net ซึ่งปรับ Faster R-CNN ให้เหมาะกับการตรวจจับข้อบกพร่องขนาดเล็ก Hu และ Wang [4] พัฒนา Faster R-CNN ร่วมกับ ResNet50 และ Feature Pyramid Network ขณะที่ Kim และคณะ [7] เสนอแนวทาง Unsupervised ด้วย skip-connected convolutional autoencoder

ในระยะหลัง การประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม YOLO ได้รับความสนใจมากขึ้น Khan และคณะ [5] รายงานว่า YOLOv8s ให้ค่า Precision สูงถึง 0.987 และ Liu และคณะ [6] เสนอ YOLOv8s ที่ปรับปรุงด้วย EMAttention และ Wise-IoU ให้ค่า mAP เพิ่มขึ้นจาก 0.958 เป็น 0.972 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาโมเดลและประเมินบนชุดข้อมูล โดยใช้ GPU ในการประมวลผล ยังขาดการพัฒนาชุดฮาร์ดแวร์ต้นแบบที่ใช้ Edge device จริง และทดสอบในสภาพแวดล้อมการใช้งาน ซึ่งเป็นช่องว่างที่งานวิจัยนี้มุ่งเติมเต็ม

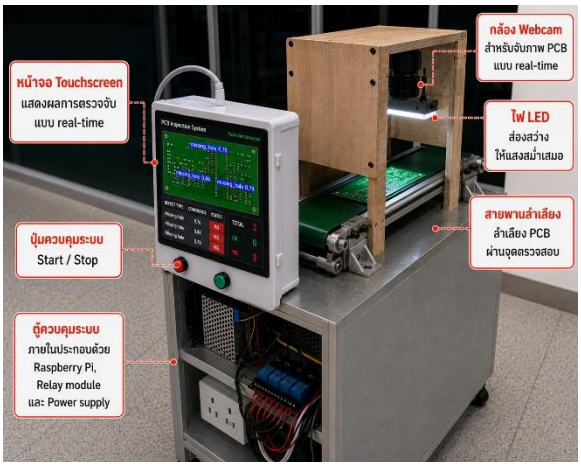
3. วิธีการวิจัย

3.1 การออกแบบชุดจำลองระบบ

ชุดจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (1) ชุดขับเคลื่อน: สายพานลำเลียงขับเคลื่อนด้วย Gear motor และ Servo motor (2) ชุดมองเห็น: กล้อง Webcam จับภาพแบบ real-time และ (3) ชุดควบคุม: Raspberry Pi รันโมเดล ONNX พร้อม Relay module และ Touchscreen แสดงผล ดังรูปที่ 2 และภาพถ่ายชุดจำลองจริงแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมของระบบตรวจจับข้อบกพร่อง PCB



รูปที่ 3 ชุดจำลองระบบตรวจจับตำหนิบน PCB

3.2 การเตรียมชุดข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดข้อมูลภาพ PCB จำนวนรวมทั้งหมด 1,191 ภาพ แบ่งเป็น 3 คลาส จากนั้นดำเนินการทำ Annotation ด้วย Bounding box บน Roboflow เพื่อความสะดวกในการดำเนินงาน โดยทำการแบ่งข้อมูลในสัดส่วน 70:20:10 สำหรับชุดฝึก ตรวจสอบ และทดสอบตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 1 และใช้ Data augmentation เพื่อเพิ่มความหลากหลาย

ตารางที่ 1 การแบ่งชุดข้อมูลภาพ PCB

ชุดข้อมูล	จำนวนภาพ	สัดส่วน
Training	834	70%
Validation	238	20%
Test	119	10%
รวม	1,191	100%

3.3 การฝึกสอนโมเดล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โมเดล YOLOv8n (Nano) รูปแบบ ONNX ที่เหมาะสำหรับการประมวลผลบน Edge device โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ Epoch = 100, Batch size = 8, Image size = 832×832, Optimizer = SGD จากนั้นทำการทดลองปรับค่า Learning rate ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.01, 0.001 และ 0.0001 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพของโมเดล

โดยตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล ได้แก่ Precision = TP/(TP+FP), Recall = TP/(TP+FN) และ mAP@0.5 (Mean Average Precision ที่ IoU = 0.5) โดยที่ True Positive (TP) คือกรณีที่โมเดลทำนายว่าเป็นข้อบกพร่องและตรงกับความจริง, False Positive (FP) คือกรณีที่โมเดลทำนายว่าเป็นข้อบกพร่องแต่ความจริงไม่ใช่, False Negative (FN) คือกรณีที่ความจริงมีข้อบกพร่องแต่โมเดลตรวจไม่พบ และ True Negative (TN) คือกรณีที่โมเดลทำนายว่าไม่มีข้อบกพร่องและตรงกับความจริง โดย Precision สะท้อนความถูกต้องของการทำนายเชิงบวก ขณะที่ Recall สะท้อนความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องจริงทั้งหมด

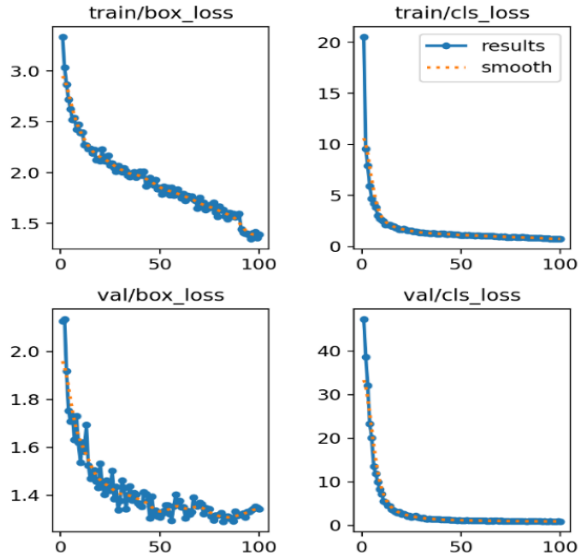
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการเปรียบเทียบค่า Learning rate

จากการทดลองปรับค่า Learning rate ทั้งสามค่า โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่นไว้ พบว่าที่ LR = 0.01 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ Learning rate ต่างกัน

LR	Precision	Recall	mAP@0.5
0.01	0.88	0.86	0.87
0.001	0.82	0.79	0.80
0.0001	0.80	0.78	0.78



รูปที่ 4 กราฟ Training Loss curve ที่ Learning rate = 0.01

รูปที่ 4 กราฟ Training loss และ Validation loss ของโมเดล ที่ Learning rate = 0.01 แสดงให้เห็นว่า Loss ลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพโดยไม่เกิดภาวะ Overfitting

4.2 ประสิทธิภาพการตรวจจับแยกตามคลาส

วิเคราะห์ประสิทธิภาพแยกตามประเภทข้อบกพร่องที่ LR = 0.01 ดังตารางที่ 3

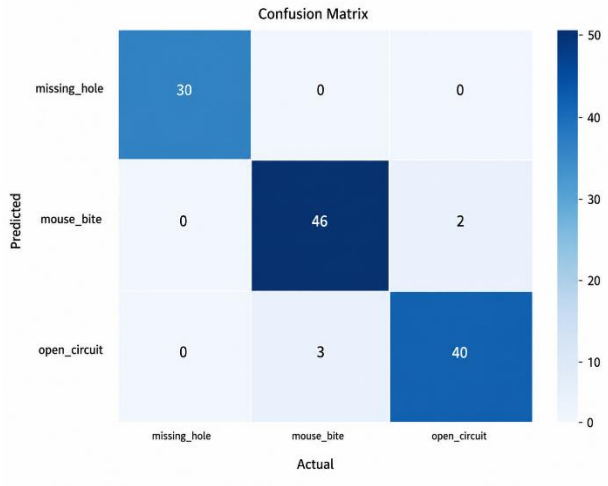
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการตรวจจับแยกตามคลาส

ประเภทตำหนิ	Precision	Recall	mAP@0.5
Missing Hole	0.94	0.92	0.93
Open Circuit	0.89	0.87	0.88
Mouse Bite	0.82	0.80	0.81
เฉลี่ย	0.88	0.86	0.87

Missing hole มีประสิทธิภาพสูงสุด (mAP@0.5 = 0.93) เนื่องจากลักษณะตำหนิชัดเจน คลาส Mouse bite ต่ำสุด (0.81) เนื่องจากรอยมีขนาดเล็กกว่า Missing hole (โดยทั่วไป < 2 มม.) ลักษณะขอบไม่ชัดเจน ทำให้เกิด IoU mismatch ในขั้นกำกับข้อมูล อีกทั้งบางครั้งสีของรอยใกล้เคียงกับลายทองแดงโดยรอบ ทำให้แยกแยะออกจาก background ได้ยากกว่าตำหนิประเภทอื่น

4.3 การวิเคราะห์ Confusion Matrix

Confusion matrix ที่ LR = 0.01 แสดงให้เห็นว่าโมเดลจำแนก Missing hole ถูก ร้อยละ 100 (30/30), Mouse bite ร้อยละ 95.8 (46/48) และ Open circuit ร้อยละ 93.0 (40/43) ข้อผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดระหว่าง Mouse bite และ Open circuit ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Confusion Matrix ของโมเดล YOLOv8 ที่ Learning rate = 0.01

4.4 ผลการทดสอบการใช้งานจริง

ทดสอบระบบกับแผ่น PCB จริง 30 ตัวอย่าง (คลาสละ 10 ตัวอย่าง) ที่ไม่เคยอยู่ในชุดข้อมูลฝึก ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการใช้งานจริง

ประเภทตำหนิ	จำนวน	ถูก	ผิด	แม่นยำ (%)
Missing Hole	10	9	1	90.00
Open Circuit	10	9	1	90.00
Mouse Bite	10	5	5	50.00
รวม	30	23	7	76.67

Missing hole และ Open circuit มีความแม่นยำร้อยละ 90 เนื่องจากลักษณะตำหนิชัดเจน ส่วน Mouse bite ให้ความแม่นยำร้อยละ 50 เนื่องจากรอยมีขนาดเล็ก รูปร่างไม่แน่นอน และผลกระทบจากความแปรปรวนของแสงสว่างในสภาพแวดล้อมจริง ความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 76.67 แสดงถึงความสามารถ generalize ของโมเดลในระดับที่ยอมรับได้

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่า Learning rate มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของโมเดล ค่า 0.01 ให้ความสมดุลที่ดีระหว่างความเร็วในการเรียนรู้และความแม่นยำ ขณะที่ค่า 0.001 และ 0.0001 แม้จะให้ความเสถียรสูงกว่าแต่ก่อให้เกิดภาวะ underfitting ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง

ความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างคลาสสะท้อนธรรมชาติของข้อบกพร่อง Missing hole มีลักษณะเด่นชัดจึงตรวจจับง่าย ขณะที่ Mouse bite มีขนาดเล็ก รูปร่างไม่แน่นอน และอาจถูกบดบังด้วยสัญญาณรบกวน ช่องว่างระหว่าง mAP@0.5 = 0.87 กับความแม่นยำจริง ร้อยละ 76.67 เกิดจากความแปรปรวนของสภาพแสง มุมกล้อง และคุณภาพภาพในสภาพแวดล้อมจริง

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า จุดเด่นของงานนี้คือการพัฒนาชุดฮาร์ดแวร์ต้นแบบที่ครบวงจรและการทดสอบจริงในสภาพแวดล้อมการใช้งาน ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ก่อนหน้ามักรายงานเฉพาะผลการทดสอบในชุดข้อมูลเท่านั้น

การรายงานความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 76.67 อาจทำให้ภาพรวมประสิทธิภาพดูต่ำลงเมื่อเทียบกับการแสดงผลแบบแยกตามคลาส ผู้วิจัยจึงรายงานผลทั้งสองรูปแบบควบคู่กัน (ตารางที่ 4) เพื่อให้ผู้อ่านประเมินจุดแข็งและจุดอ่อนของระบบในแต่ละคลาสได้ชัดเจน ในการพัฒนาต่อไป อาจพิจารณาใช้ macro-F1 หรือ class-weighted score แทนการหาค่าเฉลี่ยปกติเพื่อสะท้อนประสิทธิภาพเชิงสมดุลของแต่ละคลาส

นอกจากนี้ ระบบยังมีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา ได้แก่ (1) ขนาดชุดข้อมูลทดสอบจริง (n=30) เพียงพอสำหรับการสาธิตเชิงต้นแบบ แต่การประเมินเชิงสถิติที่เข้มงวดต้องใช้ขนาดตัวอย่างที่ใหญ่กว่านี้ (2) ครอบคลุมข้อบกพร่องเพียง 3 ประเภท ขณะที่อุตสาหกรรมจริงพบ 6-9 ประเภท และ (3) ยังไม่ได้รายงานความเร็วในการประมวลผลเชิงปริมาณบน Raspberry Pi ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการใช้งานแบบ real-time และเป็นทิศทางการพัฒนาในงานวิจัยถัดไป

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดจำลองระบบตรวจจับและระบุความผิดพลาดของแผ่น PCB สำเร็จ โดยใช้โมเดล YOLOv8 ที่ LR = 0.01 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

(Precision 0.88, Recall 0.86, mAP@0.5 = 0.87) ระบบต้นแบบที่ผสมผสานสายพานลำเลียง กล้อง Webcam และ Raspberry Pi แสดงให้เห็นศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม

แนวทางการพัฒนาในอนาคต ควร (1) เพิ่มจำนวนและความหลากหลายของชุดข้อมูล โดยเฉพาะคลาส Mouse bite (2) ทดลองใช้ YOLOv8 รุ่นที่ใหญ่กว่า เช่น Small หรือ Medium (3) เพิ่มประเภทข้อบกพร่อง เช่น Short circuit และ Spurious copper (4) พัฒนาการควบคุมแสงเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม และ (5) ทดลองเปรียบเทียบกับโมเดลทางเลือก เช่น RT-DETR หรือ YOLOv10/v11 เพื่อหาสมดุลระหว่างความแม่นยำกับความเร็วบน Edge device และวัดเวลาประมวลผลเชิงปริมาณบน Raspberry Pi อย่างเป็นระบบ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้การสนับสนุนทรัพยากรและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Moganti, F. Ercal, C. H. Dagli, and S. Tsunekawa, "Automatic PCB inspection algorithms: A survey," Comput. Vis. Image Understand., vol. 63, no. 2, pp. 287–313, Mar. 1996. doi: 10.1006/cviu.1996.0020

[2] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, "Ultralytics YOLOv8," version 8.0.0, 2023. [Online].Available: https://github.com/ultralytics/ultralytics

[3] W. Huang and P. Wei, "A PCB dataset for defects detection and classification," arXiv preprint arXiv:1901.08204, Jan. 2019.

[4] B. Hu and J. Wang, "Detection of PCB surface defects with improved Faster-RCNN and feature pyramid network," IEEE Access, vol. 8, pp. 108335–108345, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001349

[5] R. U. Khan, F. Shah, A. A. Khan, and H. Tahir, "Advancing PCB quality control: Harnessing YOLOv8 deep learning for real-time fault detection," Comput. Mater. Continua, vol. 81, no. 1, pp. 345–367, 2024. doi: 10.32604/cmc.2024.054439

[6] S. Liu, X. Zhang, Y. Yang, and X. Ma, "PCB defect detection method based on improved YOLOv8s," Proc. SPIE 13560, ICCAID 2024, 135601Z, Apr. 2025. doi: 10.1117/12.3061247

[7] J. Kim, J. Ko, H. Choi, and H. Kim, "Printed circuit board defect detection using deep learning via a skip-connected convolutional autoencoder," Sensors, vol. 21, no. 15, p. 4968, 2021. doi: 10.3390/s21154968

[8] R. Ding, L. Dai, G. Li, and H. Liu, "TDD-Net: A tiny defect detection network for printed

circuit boards," CAAI Trans. Intell. Technol., vol. 4, no. 2, pp. 110–116, 2019. doi: 10.1049/trit.2019.0019

[9] W. Huang, P. Wei, M. Zhang, and H. Liu, "HRIPCB: A challenging dataset for PCB defects detection and classification," J. Eng., vol. 2020, no. 13, pp. 303–309, 2020. doi: 10.1049/joe.2019.1183

ESTACON 2026 | 17th

ระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุสำหรับป้อมยาม

Mail and Parcel Notification System for a Guardhouse

พุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์[1], เสาวลักษณ์ แสงแก[1] สุทธี ทับทองดี[1] ขวัญลดา ค้าคล่อง[1]
ปัญญา หันตุลา[2] ประกาย นาดี[2] พุทธาวุฒิ ลีกุลธร[2] และ ธรรมกร ครองไตรภพ[2,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบไอโอที คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เลขที่ 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: thammakorn@rmuti.ac.th, 081-549-6274

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุสำหรับป้อมยาม โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยมีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาจดหมายและพัสดุตกค้างที่บริเวณป้อมยามของหน้าหมู่บ้าน โดยประยุกต์ใช้งานโมดูล ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลางเชื่อมต่อกับคีย์แพดเพื่อกดรหัสอาคารบ้านพักที่อยู่บนหลังซองจดหมายหรือหลังกล่องพัสดุ ระบบจะส่งอีเมลแจ้งเตือนไปยังผู้รับโดยอัตโนมัติผ่านระบบ Wi-Fi นอกจากนี้ระบบยังมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อควบคุมพัดลมระบายอากาศในตัวเครื่อง โดยมีการติดตั้งโมดูล DHT22 เพื่อตรวจจับอุณหภูมิที่สูงเกินค่าที่กำหนด และมี PIR Sensor สำหรับตรวจจับความเคลื่อนไหวเพื่อเปิดปิดไฟฟ้าแสงสว่างอัตโนมัติเพื่อช่วยประหยัดพลังงานภายในห้องยาม จากผลการทดลองแจ้งเตือนการรับจดหมายหรือพัสดุไปยังบ้านพักอาคาร A, B, C และ D โดยแต่ละอาคารมีจำนวน 5 ชั้น ๆ ละ 10 ห้องโดยมีการสุ่มเป็นจำนวน 100 ครั้ง พบว่าระบบสามารถส่งอีเมลแจ้งเตือนได้ทุกครั้งคิดเป็นค่าเฉลี่ยของความถูกต้องเท่ากับ 100% โดยมีค่าเวลาเฉลี่ยของการส่งแจ้งเตือนแต่ละครั้งประมาณ 52 วินาที ระบบเซนเซอร์ควบคุมพัดลมระบายอากาศและไฟฟ้าแสงสว่างสามารถทำงานได้ถูกต้อง

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง อีเอสพี32 อีเมล ไวไฟ

Abstract

This paper presents the design and development of an Internet of Things (IoT)-based mail and parcel notification system for security guard stations. The purpose of the system is to address the problem of accumulated mail and parcels at the security guard station of a residential community. The system uses an ESP32 microcontroller connected to a keypad for entering building codes from mail or parcel labels. Notification emails are automatically sent to recipients via Wi-Fi. A DHT22 sensor monitors temperature to control a ventilation fan, while a PIR sensor detects motion to automatically control lighting for energy efficiency. The system was evaluated in residential buildings A, B, C, and D, each consisting of five floors with ten rooms per floor. Based

on 100 test cases, the system successfully delivered email notifications in every test, achieving an average accuracy of 100% with an average notification time of approximately 52 seconds. The ventilation fan and lighting control functions also operated correctly and reliably.

Keywords: Internet of Things, ESP32, E-Mail, Wi-Fi

1. บทนำ

ปัจจุบันแม้การสื่อสารผ่าน E-Mail จะได้รับความนิยมอย่างมาก แต่การรับส่งจดหมายและพัสดุผ่านระบบไปรษณีย์ยังคงมีความจำเป็นโดยเฉพาะในอาคารบ้านพัก หน่วยงานราชการ และหมู่บ้านจัดสรรที่มีป้อมยามอยู่ด้านหน้าของหมู่บ้าน อย่างไรก็ตามปัจจุบันปัญหาของจดหมายและพัสดุตกค้างมีจำนวนมาก [1] สาเหตุหนึ่งของปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นที่บริเวณป้อมยามของหน้าหมู่บ้านเนื่องจากผู้รับเองไม่ทราบว่ามีจดหมายหรือพัสดุถูกส่งมาที่ป้อมยามหรือเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยไม่รู้จักเจ้าของจดหมายได้ทั้งหมดที่ผ่านทางเข้าออกของหน้าหมู่บ้านจัดสรรจึงส่งผลให้มีจดหมายและพัสดุตกค้างอยู่จำนวนมาก ดังนั้นการพัฒนาระบบแจ้งเตือนการรับจดหมายและพัสดุผ่าน E-Mail จึงมีความสำคัญ เพื่อช่วยให้ผู้รับทราบว่ามีจดหมายหรือพัสดุถูกส่งมาที่ป้อมยามซึ่งช่วยลดปริมาณของจดหมายหรือพัสดุตกค้างให้น้อยลง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการพัฒนาระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุผ่านเทคโนโลยี IoT งานวิจัยแรกได้พัฒนาระบบแจ้งเตือนออดบ้านแบบเรียลไทม์โดยใช้ NodeMCU เชื่อมต่อกับระบบ E-Mail [2] โดยเมื่อมีผู้มาส่งจดหมายหรือมีผู้มาติดต่อแต่ผู้รับไม่อยู่บ้าน ระบบจะส่งการแจ้งเตือนไปยังเจ้าของบ้านซึ่งจะช่วยเพิ่มความสะดวกในการรับทราบข่าวสาร แต่ระบบนี้เหมาะสมกับบ้านพักเดี่ยวเนื่องจากจำนวนพอร์ตที่เชื่อมต่อกับ NodeMCU มีจำกัดทำให้ไม่รองรับการใช้งานในอาคารหรือหมู่บ้านที่มีห้องพักจำนวนมากได้ งานวิจัยต่อมามีการพัฒนากล่องจดหมายอัจฉริยะที่สามารถแจ้งเตือนผ่านบริการ Line Notify [3] โดยเมื่อมีการหย่อนจดหมายลงในกล่องจะมี Infrared Sensor คอยตรวจจับและส่งการแจ้งเตือนเพื่อให้ผู้รับทราบว่าได้มีจดหมายมาส่ง แต่ระบบดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเนื่องจากบริการของ Line Notify ได้ประกาศยุติการให้บริการแล้วเมื่อเดือนมีนาคม 2568 [4] งานวิจัยต่อมาได้พัฒนากล่องจดหมายอัจฉริยะโดยใช้เซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริกสำหรับตรวจจับแรงกระแทกหรือน้ำหนักเมื่อมีจดหมายหรือพัสดุถูกนำส่งภายในกล่องโดยใช้โมดูล WeMos (ESP8266) [5] เป็นหน่วยประมวลผลและเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi เพื่อส่งข้อมูลแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ไปยังผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์ช่วยให้ตรวจสอบสถานะการมาถึงของจดหมายและพัสดุได้อย่างสะดวก แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่เหมาะต่อการใช้งานกับบ้านพักที่มีป้อมยามอยู่ด้านหน้าของหมู่บ้านเพราะทุกบ้านต้องติดตั้งกล่องรับจดหมายหรือพัสดุ และติดตั้งแอปพลิเคชัน Blynk ทำให้ไม่สะดวกต่อผู้ใช้งานเป็นจำนวนมาก

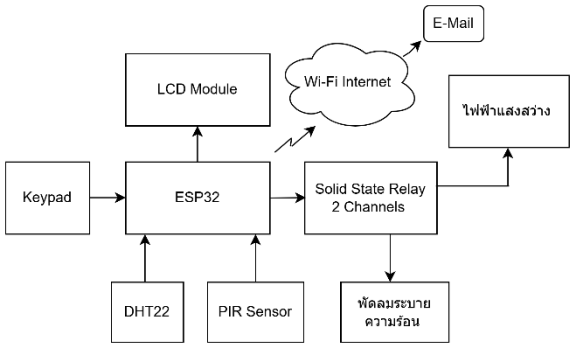
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุตกค้างสำหรับป้อมยามที่ดูแลระบบหมู่บ้านจัดสรรหรืออาคารบ้านพัก โดยใช้ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผล โดยเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยสามารถป้อนรหัสอาคารที่เขียนกำกับมากับ

ESTACON 2026 | 17th

ซองจดหมายหรือพัสดุโดยกดรหัสผ่านแป้นคีย์แพด เช่น B12 เพื่อระบุห้องผู้รับเมื่อยืนยันข้อมูลด้วยปุ่ม # ระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนไปยัง E-Mail ของผู้รับทันที นอกจากนี้ยังมีการประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างในห้องพักของเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยด้วยการใช้ PIR Sensor ตรวจจับการเคลื่อนไหวเพื่อควบคุมการเปิดปิดไฟอัตโนมัติ และใช้โมดูล DHT22 ตรวจวัดอุณหภูมิภายในกล่องควบคุม หากอุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนด ระบบจะเปิดพัดลมระบายอากาศเพื่อช่วยลดความร้อนให้กับตัวอุปกรณ์ต่างๆ

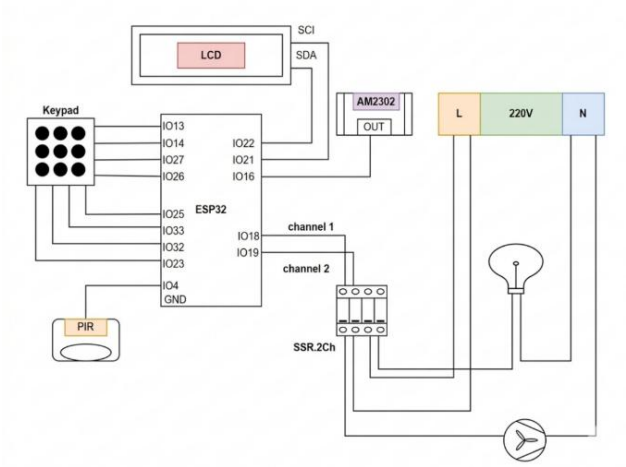
2. การออกแบบและพัฒนาฮาร์ดแวร์

การออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์อยู่บนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง โดยประยุกต์ใช้งานโมดูล ESP32 [6] เป็นตัวประมวลผลที่เชื่อมต่อกับคีย์แพดสำหรับกดรหัสอาคารของบ้านพัก รหัสของชั้นที่พักและหมายเลขห้องพัก ตามลำดับ ซึ่งรหัสดังกล่าวผู้ส่งจดหมายจะต้องเขียนติดหลังซองจดหมายหรือพัสดุ เมื่อเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยประจำบ้านพักหรือหมู่บ้านจัดสรรผู้รับจดหมายมาแล้วจะทำการป้อนรหัสดังกล่าวให้กับโมดูล EPS32 จากนั้นระบบจะส่ง E-Mail แจ้งเตือนผู้ใช้งานโดยผ่านระบบ Wi-Fi กระบวนการส่งข้อมูลแสดงผลผ่านจอ LCD โดยมีบล็อคไดอะแกรมวงจรฮาร์ดแวร์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรฮาร์ดแวร์

จากรูปที่ 1 มีส่วนประกอบของโมดูล DHT22 (AM2302) [6] ทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิภายในกล่องเมื่ออุณหภูมิสูงมากไป จะทำให้วงจรพัดลมทำงานเพื่อช่วยลดค่าอุณหภูมิภายในกล่องที่ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด วงจรควบคุมพัดลมเชื่อมต่อผ่าน Solid State Relay วงจร PIR Sensor ทำหน้าที่ช่วยประหยัดพลังงานของไฟฟ้าแสงสว่างที่ติดตั้งภายในห้องของเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย เมื่อไม่มีเจ้าหน้าที่อยู่ภายในห้องจะช่วยปิดไฟฟ้าแสงสว่างอัตโนมัติเพื่อลดการใช้พลังงาน รายละเอียดการต่อวงจรฮาร์ดแวร์ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การต่อวงจรฮาร์ดแวร์

3. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมอยู่บนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรม Arduino IDE ที่มีการติดตั้งไลบรารีของโมดูล ESP32 เพื่อใช้งานสำหรับการพัฒนาโปรแกรมโดยมีการเพิ่ม Library ที่ส่วนหัวของโปรแกรมเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อระบบ Wi-Fi และ Mail Server รวมทั้ง Library ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น โมดูล LCD, Keypad, DHT22 และการเชื่อมต่อระบบบัสแบบ I2C เป็นต้น องค์ประกอบของ Library ที่ติดตั้งทั้งหมดดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3

```
#include <WiFi.h>
#include <ESP_Mail_Client.h>
#include <Keypad.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>
```

รูปที่ 3 Library ของอุปกรณ์ที่ใช้งาน

```
SMTP_HOST "smtp.gmail.com"
SMTP_PORT 465
AUTHOR_EMAIL     "jame01292@gmail.com"
AUTHOR_PASSWORD "ncwnjwihyxbfvuox"
```

รูปที่ 4 การเชื่อมต่อ SMTP Server

จากรูปที่ 4 เป็นการเชื่อมต่อกับ SMTP Server ซึ่งเป็นเซิร์ฟเวอร์สำหรับส่งอีเมลในโปรแกรมได้กำหนดค่าเซิร์ฟเวอร์ของ Gmail และมีการตั้งค่ารหัสยืนยันตัวตนของผู้ใช้งาน

```
session.login.email = AUTHOR_EMAIL;
session.login.password = AUTHOR_PASSWORD;
```

รูปที่ 5 การยืนยันตัวตนกับ SMTP Server

```
SMTP_Message message;
message.sender.name = "เจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย";
message.sender.email = AUTHOR_EMAIL;

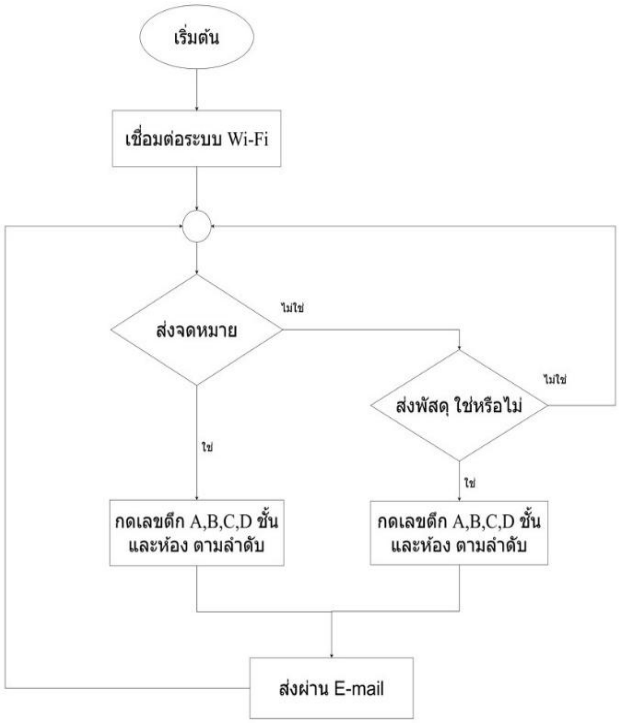
message.subject = (type == '1') ? "จดหมายมาส่งแล้วครับ" : "พัสดุมาส่งแล้วครับ";
message.addRecipient("Resident", toEmail);
message.text.content = (type == '1') ? "จดหมายมาส่งแล้วครับ" : "พัสดุมาส่งแล้วครับ";
message.text.charSet = "utf-8";
```

รูปที่ 6 กำหนดผู้ส่ง-ผู้รับและข้อความแจ้งเตือน

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นการยืนยันตัวตนกับ SMTP Server และการกำหนดผู้ส่งคือเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยและข้อความแจ้งเตือนที่จะไปปรากฏบน E-Mail ของผู้รับพัสดุหรือจดหมาย นอกเหนือจากส่วนนี้แล้วส่วนต่อไปจะเป็นเงื่อนไขการรับข้อมูลมาจากคีย์แพดเพื่อตรวจสอบ เช่น ข้อมูลที่รับมาเป็นจดหมายของอาคาร B ชั้นที่ 3 และห้องที่ 6 โดยระบบโปรแกรมจะบันทึก E-Mail ของผู้รับไว้ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยชื่ออาคาร ชั้นและเลขที่ห้องเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขการแจ้งเตือนให้กับผู้ใช้งานทุกห้อง

```
if (b=='B' && floor==3 && room==6)
return"blueberryrm2@gmail.com";
```

ส่วนโฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมในภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อเริ่มให้ระบบทำงานโมดูล ESP32 จะทำการเชื่อต่อระบบ W-Fi และตรวจสอบว่ามีการกดเลือกส่งจดหมายหรือพัสดุมาหรือไม่ เมื่อมีการส่งมาจะนำเลขอาคาร เลขชั้น และเลขที่ห้องมาทำการตรวจสอบกับโปรแกรมที่กำหนดไว้หากถูกต้องจะดำเนินการส่ง E-Mail แจ้งเตือนไปยังเจ้าของจดหมายหรือพัสดุนั้น ซึ่งจะทำให้มีผู้รับมารับจดหมายหรือพัสดุที่ป้อมยาม ซึ่งช่วยลดจำนวนจดหมายหรือพัสดุตกค้างได้เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 7 Flowchart

4. การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การทดลองส่งการแจ้งเตือน การทำลองเปิดปิดไฟฟ้าแสงสว่างอัตโนมัติ การทดลองปิดเปิดพัดลมระบายอากาศ ตามลำดับ

4.1 การทดลองส่งการแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองส่งอีเมลแจ้งเตือนการรับจดหมายหรือพัสดุไปยังผู้อยู่อาศัยตามห้องต่างๆ ของแต่ละตึกโดยจำลองว่ามีตึก A, B, C และ D แต่ละตึกมีจำนวน 5 ชั้นๆ ละ 10 ห้อง มีการทดลองจำนวน 100 ครั้ง โดยแบ่งเป็นการแจ้งเตือนจดหมาย 50 ครั้ง และแจ้งเตือนพัสดุ 50 ครั้ง การส่งการแจ้งเตือนแต่ละครั้งจะพิจารณาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ระหว่างการส่ง โดยมีผลการทดลองดังตารางที่ 1, 2, 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองแจ้งเตือนจดหมาย

ครั้งที่	ตึก	ชั้น	ห้อง	E-Mail
1-10	A	1,2	1-5,6-10	√
11-20	B	4,5	1-5,6-10	√
21-30	C	3,1	1-5,6-10	√
31-40	D	3,4	1-5,6-10	√
41-50	A	1,5	1-5,6-10	√

√ หมายถึง ทำงานได้ทั้ง 10 ครั้ง

ตารางที่ 2 ผลการพิจารณาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ส่ง

ครั้งที่	ตึก	ชั้น	ห้อง	เวลาเฉลี่ย
1-10	A	1,2	1-5,6-10	51.77
11-20	B	4,5	1-5,6-10	52.65
21-30	C	3,1	1-5,6-10	51.23
31-40	D	3,4	1-5,6-10	52.18
41-50	A	1,5	1-5,6-10	52.11
ค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ส่ง (วินาที)				51.988

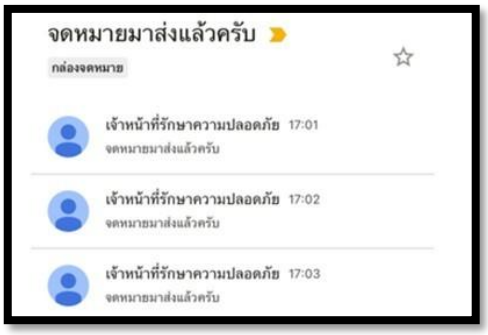
ตารางที่ 3 ผลการทดลองแจ้งเตือนพัสดุ

ครั้งที่	ตึก	ชั้น	ห้อง	E-Mail
1-10	C	4,2	1-5,6-10	√
11-20	D	5,1	1-5,6-10	√
21-30	A	2,3	1-5,6-10	√
31-40	B	1,4	1-5,6-10	√
41-50	D	2,5	1-5,6-10	√

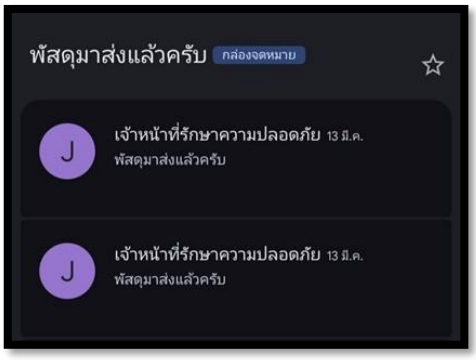
√ หมายถึง ทำงานได้ทั้ง 10 ครั้ง

ตารางที่ 4 ผลการพิจารณาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ส่ง

ครั้งที่	ตึก	ชั้น	ห้อง	เวลาเฉลี่ย
1-10	C	4,2	1-5,6-10	52.04
11-20	D	5,1	1-5,6-10	52.15
21-30	A	2,3	1-5,6-10	51.16
31-40	B	1,4	1-5,6-10	51.00
41-50	D	2,5	1-5,6-10	52.42
ค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ส่ง (วินาที)				51.745



รูปที่ 8 การแจ้งเตือนจดหมาย



รูปที่ 9 การแจ้งเตือนพัสดุ



รูปที่ 10 การส่งแจ้งเตือนผ่านคีย์แพด

จากผลการทดลองในตารางที่ 1,2,3 และ 4 พบว่าระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนจดหมายและพัสดุไปยังผู้รับได้ถูกต้องทั้งหมดคิดเป็นค่าเฉลี่ยของความถูกต้องในแต่ละตารางเท่ากับ 100% โดยค่าเวลาเฉลี่ยของเวลาในการส่งแต่ละครั้งโดยประมาณ 52 วินาที

4.2 การทดลองปิดเปิดระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการปิดเปิดไฟอัตโนมัติ โดยมี PIR Sensor ตรวจจับความเคลื่อนไหวเมื่อเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยนั่งทำงานอยู่ระบบไฟฟเสงสว่างจะทำงานเมื่อเจ้าหน้าที่เดินออกนอกห้องระบบจะปิดไฟเพื่อช่วยประหยัดพลังงาน โดยมีการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง มีผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดลองปิดเปิดไฟฟ้าแสงสว่าง

ครั้งที่	ความเคลื่อนไหว	หลอดไฟฟ้า
1-5	√	√
6-10	√	√
11-15	√	√
16-20	√	√
21-25	√	√
26-30	√	√

√ หมายถึงทำงานได้ทั้ง 5 ครั้ง

จากผลการทดลองในตารางที่ 5 เมื่อมีความเคลื่อนไหวเกิดขึ้น PIR Sensor สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหวได้ทุกครั้ง และหลอดไฟสามารถติดสว่างได้ตามต้องการ

4.3 การทดลองระบบพัดลมระบายอากาศ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบพัดลมระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 30 องศา โดยมีเซนเซอร์ DHT22 ทำหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิ มีการทดลองจำนวน 30 ครั้ง ในการทดลองได้พิจารณาให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่าง 29-31 องศา โดยใช้เครื่องทำความร้อนช่วยเพิ่มอุณหภูมิ มีผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดลองพัดลมระบายอากาศ

ครั้งที่	Temp (˚C)	สถานะพัดลม
1-5	29-31	√
6-10	29-31	√
11-15	29-31	√
16-20	29-32	√
21-25	29-31	√
26-30	29-31	√

√ หมายถึงทำงานได้ทั้ง 5 ครั้ง

จากผลการทดลองในตารางที่ 6 เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 30 องศาเซลเซียส พัดลมระบายอากาศสามารถทำงานอัตโนมัติได้ทุกครั้ง

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาของจดหมายและพัสดุตกค้างที่บริเวณป้อมยามซึ่งในปัจจุบันหมู่บ้านจัดสรร หรืออาคารบ้านพักที่มีป้อมยามเป็นศูนย์กลางของการรับ-ส่งยังคงมีอยู่ซึ่งเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยเองไม่รู้จักบุคคลที่

อาศัยอยู่ภายในหมู่บ้านหรือบ้านพักของอาคารแต่ละอาคารได้ทั้งหมด การตกค้างของจดหมายและพัสดุจึงมีอยู่มาก ระบบที่พัฒนาใช้โมดูล ESP32 เชื่อมต่อกับคีย์แพดเพื่อให้เจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยช่วยอำนวยความสะดวกนอกเหนือจากหน้าที่ของการรักษาความปลอดภัยของหมู่บ้านโดยการกดรหัสอาคารบ้านพักที่มากับหลังซองจดหมายหรือกล่องพัสดุซึ่งผู้ส่งจะต้องระบุเพิ่มเติมมาด้วยทุกครั้ง จากนั้นโมดูล ESP32 ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบ Wi-Fi อยู่แล้วจะส่งการแจ้งเตือนไปยัง E-Mail ของผู้ใช้งานตามที่โปรแกรมไว้ จากผลการทดลองเมื่อสุ่มการแจ้งเตือนทั้งจดหมายและพัสดุไปยังอาคารบ้านพักต่างๆ เป็นจำนวน 100 ครั้ง พบว่าสามารถแจ้งเตือนได้ทุกครั้ง คิดเป็นค่าเฉลี่ยของความถูกต้องเท่ากับ 100% โดยใช้เวลาเฉลี่ยในการส่งแต่ละครั้งประมาณ 52 วินาที ระบบพัดลมระบบบายอากาศและการปิดเปิดไฟฟ้าแสงสว่างอัตโนมัติทำงานได้ปกติ

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก นางสาวปนิดา สีทน และนายวายุ พานสระน้อย ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทดลอง คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณท่านทั้งสองมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Khaosod. (2562). แชร์ว่อนกองจดหมายค้างจ่ายเอกสารสำคัญปลายทางพันฉบับ. เข้าถึงเมื่อ 17 ธันวาคม 2568. เข้าถึงจาก https://www.khaosod.co.th/.

[2] Setiawan A., and et al, (2020). Real-time Home Bell Notification Using Node-MCU Through E-mail (Base on the Internet of Things). International Conference on Industrial Automation, Smart Grid and its Application (ICIASGA).

[3] เจตน์ งามประพฤติ, พุทธชาติ ยมกิจ และสัญญา พันธุ์แพง. (2563). กล่องจดหมายอัจฉริยะเพื่อบริษัทแอดไวซ์เชียงราย. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน.

[4] LINE DEV. (2568). Line Notify Service will be Discontinued on Mach 31, 2025. เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2569. เข้าถึงจาก https://linedevth.line.me/th/knowledge-api/discontinued-line-notify.

[5] Y.-K. Sin, J.-W. Ng, and Z.-K. Lim. (2022). Smart Mailbox Using Piezoelectric Sensors. Proceedings of the Multimedia University Engineering Conference (MECON 2022), Atlantis Press, 2022, pp. 154–163.

[6] A. Safputra, L. Kamelia, E. A. Z. Hamidi, and Endy. (2023). *IoT-Based Monitoring and Feeder Control for Smart Poultry Farm System.* Proceedings of the 2023 International Conference on Wireless and Telematics (ICWT 2023), IEEE, pp. 1–4.

การยกระดับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนสู่อุปกรณ์ IoT ด้วยอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนังที่ใช้ ESP32-C3 และโปรโตคอล MQTT บน Home Assistant

Transforming Split-type Air Conditioners into IoT Devices via an ESP32-C3-Based Wall-Mounted Controller Replacement with MQTT and Home Assistant

ประกาย นาดี[1,*], ชิติสรรค์ วิชิโต[1], ธรรมกร ครองไตรภพ[1] และ พุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์[2]

[1] สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่ 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบไอโอที คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

*ผู้ติดต่อ: prakai@rmuti.ac.th, 098-936-1945

บทคัดย่อ

ระบบบ้านอัจฉริยะที่ใช้ Home Assistant ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ใช้ชุดควบคุมแบบติดผนังส่วนใหญ่ยังคงควบคุมผ่านชุดควบคุมของผู้ผลิตเท่านั้น ไม่สามารถบูรณาการเข้าสู่ระบบบ้านอัจฉริยะได้โดยตรง วิธีการที่มีอยู่ เช่น การส่งสัญญาณ IR เลียนแบบรีโมต หรือการเชื่อมต่อกับโปรโตคอลภายในของผู้ผลิต ล้วนมีข้อจำกัดด้านความเข้ากันได้ระหว่างยี่ห้อ บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนังของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 และจอแสดงผล OLED 0.96 นิ้ว อุปกรณ์รองรับการเดินสายสองรูปแบบที่พบทั่วไป ได้แก่ (1) การควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลแรงดันต่ำไปยังบอร์ดสวิตช์ในตัวคอยล์เย็น และ (2) การตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง ผู้ใช้สามารถสั่งงานฟังก์ชันที่ชุดควบคุมเดิมรองรับได้ผ่านปุ่มกดที่ตัวอุปกรณ์ ในขณะเดียวกันอุปกรณ์จะลงทะเบียนตนเองเป็น climate entity ใน Home Assistant ผ่าน MQTT auto-discovery โดยอัตโนมัติ ผลการทดสอบยืนยันการทดแทน 11 ฟังก์ชัน ใช้งานกับเครื่องปรับอากาศ 3 เครื่อง เวลาตอบสนอง 1.265 วินาที และ 0.637 วินาทีในสองทิศทาง ทำให้สามารถควบคุมและตรวจสอบสถานะของเครื่องปรับอากาศจากระบบบ้านอัจฉริยะแบบเครือข่ายภายในเท่านั้นได้ โดยไม่ขึ้นกับยี่ห้อหรือบริการคลาวด์ของผู้ผลิต

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน, ESP32-C3, MQTT, Home Assistant

Abstract

Smart home systems using Home Assistant have gained widespread adoption. However, many split-type air conditioners with wall-mounted controllers cannot be integrated directly into such systems. Existing approaches such as infrared remote emulation or vendor-specific protocol integration impose limitations on cross-brand compatibility and depend on cloud services. This paper presents a drop-in replacement device for wall-mounted controllers of split-type air conditioners, based on the ESP32-C3 microcontroller and a 0.96-inch OLED display. The device supports two common wiring schemes: (1) low-voltage digital signaling to a switching board inside the indoor coil unit, and (2) direct alternating-current switching. Users can operate the device through physical buttons, while the device registers itself as a climate entity in Home Assistant via MQTT auto-discovery. Experiments confirm 11-function

replacement, 3-unit compatibility, and response times of 1.265 s and 0.637 s bidirectionally. The result is a smart-home integration that is local-only, brand-agnostic, and independent of vendor cloud services.

Keywords: Internet of Things, Split-type air conditioner, ESP32-C3, MQTT, Home Assistant

1. บทนำ

ระบบบ้านอัจฉริยะ (smart home) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งในเชิงพาณิชย์และในกลุ่มผู้ใช้ที่ต้องการบริหารจัดการอุปกรณ์ภายในที่พักอาศัยด้วยตนเอง แพลตฟอร์มที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในกลุ่มหลังคือ Home Assistant ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สสำหรับบ้านอัจฉริยะที่เน้นการทำงานในเครือข่ายภายใน (local-first) ไม่ขึ้นกับบริการคลาวด์ของผู้ผลิต และรองรับการบูรณาการกับอุปกรณ์หลากหลาย ผ่านโปรโตคอลมาตรฐาน เช่น MQTT, Zigbee และ Matter

อย่างไรก็ตาม เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (split-type) ซึ่งเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าหลักของที่พักอาศัยในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น ส่วนใหญ่ยังควบคุมผ่านชุดควบคุมที่ผู้ผลิตจัดให้ ไม่ว่าจะเป็นรีโมตคอนโทรลแบบอินฟราเรด (IR) หรือชุดควบคุมแบบติดผนัง ที่ไม่สามารถสื่อสารสถานะกลับสู่ผู้ใช้และไม่สามารถรับคำสั่งจากระบบอัตโนมัติภายในบ้าน ความพยายามนำเครื่องปรับอากาศกลุ่มนี้เข้าสู่ระบบบ้านอัจฉริยะในงานก่อนหน้ามักอาศัยการส่งสัญญาณ IR เลียนแบบรีโมต การเชื่อมต่อกับโปรโตคอลภายในของผู้ผลิตหรือบริการคลาวด์ของผู้ผลิต ซึ่งทั้งสามแนวทางมีข้อจำกัดร่วมกันคือ ขึ้นอยู่กับยี่ห้อหรือรุ่นเฉพาะ และมักต้องอาศัยการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและบริการของบุคคลที่สาม

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนังของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยใช้ไมโครคอน โทรลเลอร์ ESP32-C3 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง อุปกรณ์มีคุณสมบัติเด่นสามประการ คือ (1) ลงทะเบียนตนเองเป็น climate entity ใน Home Assistant ผ่าน MQTT auto-discovery แบบเครือข่ายภายในเท่านั้น (local-only) โดยไม่ขึ้นกับบริการคลาวด์ของผู้ผลิต (2) รองรับรูปแบบการเดินสายระหว่างชุดควบคุมและคอยล์เย็นทั้งสองกลุ่มที่พบทั่วไป ได้แก่ การควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลแรงดันต่ำและการตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง จึงใช้งานได้กับเครื่องปรับอากาศหลากหลายยี่ห้อโดยไม่ผูกกับโปรโตคอลภายในของผู้ผลิต และ (3) ทดแทนชุดควบคุมเดิมในเชิงฟังก์ชันได้สมบูรณ์ ทำให้ยังสั่งงานจากตัวอุปกรณ์ได้แม้ในสถานการณ์ที่เครือข่ายภายในบ้านไม่พร้อมใช้งาน

ขอบเขตของอุปกรณ์ครอบคลุมเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ใช้ชุดควบคุมแบบติดผนังในรูปแบบใดก็ได้ของคอยล์เย็น (แบบแขวนผนัง แขวนใต้ฝ้า ฝังฝ้า หรือตั้งพื้น) ตราบเท่าที่ใช้รูปแบบการเดินสายแบบ logic-level หรือ AC-level อย่างใดอย่างหนึ่ง ขอบเขตปัจจุบันไม่ครอบคลุมเครื่องที่ใช้รีโมตอินฟราเรดเพียงทางเดียว ระบบปรับอากาศรวมศูนย์ (central air conditioning) และฟังก์ชันโหมด dry และ auto ซึ่งจะพัฒนาในเวอร์ชันถัดไป

บทความนี้มีโครงสร้างดังนี้ ส่วนที่ 2 ทบทวนงานที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 อธิบายการออกแบบระบบและอุปกรณ์ ส่วนที่ 4 รายงานผลการทดลอง ส่วนที่ 5 อภิปรายผล และส่วนที่ 6 สรุปและเสนอแนวทางการพัฒนาต่อ

2. งานที่เกี่ยวข้อง

2.1 Home Assistant และโปรโตคอล MQTT สำหรับระบบบ้านอัจฉริยะ

Home Assistant เป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สสำหรับระบบบ้านอัจฉริยะที่ทำงานในเครือข่ายภายในเป็นหลัก รองรับอุปกรณ์หลากหลายประเภทผ่านโปรโตคอลมาตรฐาน โดยเฉพาะ MQTT (Message

Queuing Telemetry Transport) ซึ่งเป็นโปรโตคอลแบบ publish-subscribe สำหรับอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัดและเครือข่ายแบนด์วิดท์ต่ำ [1] MQTT ได้รับการประยุกต์ใช้กว้างขวางใน Internet of Things และระบบบ้านอัจฉริยะ เนื่องจากโครงสร้างเรียบง่าย ใช้ทรัพยากรน้อย และมีกลไกรับประกันการส่งข้อความสามระดับ [2, 3]

Home Assistant รองรับการเพิ่มอุปกรณ์ MQTT ผ่านกลไก MQTT Discovery ที่กำหนดให้อุปกรณ์ส่งข้อความ JSON ตามรูปแบบที่กำหนดไปยังหัวข้อ (topic) เฉพาะ เมื่อ Home Assistant ได้รับข้อความจะลงทะเบียนอุปกรณ์เป็น entity ของประเภทที่กำหนดโดยอัตโนมัติ สำหรับเครื่องปรับอากาศ Home Assistant รองรับ entity ประเภท climate ซึ่งครอบคลุมการเปิด-ปิดและเลือกโหมด การตั้งอุณหภูมิเป้าหมาย และการตั้งความเร็วพัดลม

2.2 แนวทางการบูรณาการเครื่องปรับอากาศเข้าสู่ระบบบ้านอัจฉริยะ

งานที่ผ่านมาที่นำเสนอแนวทางการบูรณาการเครื่องปรับอากาศเข้าสู่ระบบบ้านอัจฉริยะสามารถจัดกลุ่มได้เป็นสามแนวทางหลัก

แนวทางที่ 1: การส่งสัญญาณอินฟราเรดเลียนแบบรีโมต ใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ IR ภายนอกที่รับคำสั่งจากระบบบ้านอัจฉริยะแล้วแปลงเป็นสัญญาณ IR ตามรหัสรีโมตของผู้ผลิตแต่ละราย Thongkaew และ Charitkuan [4] นำเสนอแพลตฟอร์ม IoT เพื่อประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนผ่าน MQTT ในแนวทางนี้ข้อจำกัด คือ การสื่อสารทางเดียวที่ไม่สามารถยืนยันสถานะปัจจุบันของเครื่องปรับอากาศ และต้องอาศัยฐานข้อมูลรหัส IR ของแต่ละยี่ห้อ

แนวทางที่ 2: การเชื่อมต่อกับโปรโตคอลภายในของผู้ผลิต ใช้การวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse-engineering) โปรโตคอลของแต่ละยี่ห้อเพื่อสื่อสารกับชุดควบคุมภายในโดยตรง โครงการในชุมชนนักพัฒนาที่รู้จัก ได้แก่ การสื่อสารกับเครื่องปรับอากาศ Mitsubishi ผ่านพอร์ต CN105 และการทดแทนโมดูล Wi-Fi ของ Daikin ด้วยฮาร์ดแวร์โอเพนซอร์ส โดยทั่วไปโครงการในกลุ่มนี้พัฒนาบนเฟรมเวิร์ก ESPHome [7] ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์กโอเพนซอร์สสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ IoT บนชิป ESP แนวทางนี้ให้การสื่อสารสองทางและควบคุมครบทุกฟังก์ชัน แต่ผูกกับยี่ห้อโดยตรง

แนวทางที่ 3: การใช้บริการคลาวด์ของผู้ผลิต ใช้ API สาธารณะ เช่น LG ThinQ หรือ Samsung SmartThings ข้อจำกัดคือต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและพึ่งบริการของบุคคลที่สาม ขัดกับหลักการของระบบบ้านอัจฉริยะแบบเครือข่ายภายในเป็นหลัก และผู้ผลิตอาจปรับเปลี่ยนหรือยกเลิก API ได้

2.3 การทดแทนชุดควบคุมเดิมและช่องว่างของวรรณกรรม

ในกลุ่มเครื่องทำความร้อนและเครื่องปรับอากาศที่ใช้ชุดควบคุมแบบติดผนังเดิม มีงานที่นำเสนอการทดแทนด้วยชุดควบคุมอัจฉริยะอยู่บ้าง Rahaman และ Iqbal [5] นำเสนอระบบควบคุมและตรวจสอบเทอร์โมสตัทสำหรับบ้านพักอาศัยโดยใช้ openHAB และโปรโตคอล MQTT บนแพลตฟอร์ม ESP32 เพื่อทดแทนการตั้งค่าเทอร์โมสตัทแบบเดิม อย่างไรก็ตามงานดังกล่าวเน้นที่ระบบทำความร้อนซึ่งมีฟังก์ชันการควบคุมที่จำกัดกว่าเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนมาก และไม่ได้ครอบคลุมประเด็นของรูปแบบการเดินสายที่หลากหลายระหว่างชุดควบคุมและคอยล์เย็น

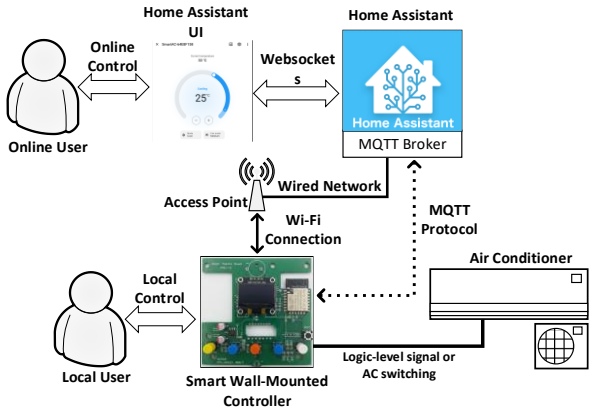
โดยสรุป งานที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการบูรณาการเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ใช้รีโมต IR ในขณะที่เครื่องปรับอากาศที่ใช้ชุดควบคุมแบบติดผนังยังไม่มีงานวิชาการที่เสนอแนวทางการบูรณาการอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะที่คำนึงถึงรูปแบบการเดินสายที่หลากหลายในตลาด งานนี้อุดช่องว่างดังกล่าวด้วยการรองรับการเดินสายสองรูปแบบหลักที่

พบในเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ทำให้สามารถใช้งานกับเครื่องหลากหลายยี่ห้อโดยไม่ต้องอาศัยการวิศวกรรมย้อนกลับโปรโตคอลของผู้ผลิต และอาศัย MQTT auto-discovery ของ Home Assistant ทำให้บูรณาการเข้าสู่ระบบบ้านอัจฉริยะแบบเครือข่ายภายในเท่านั้นได้โดยอัตโนมัติ

3. การออกแบบระบบและอุปกรณ์

3.1 ภาพรวมระบบ

อุปกรณ์ที่นำเสนอในบทความนี้ออกแบบให้ติดตั้งทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนังเดิมของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน โดยใช้สายและขั้วต่อเดิมระหว่างคอยล์เย็นและตำแหน่งติดตั้งบนผนัง สถาปัตยกรรมของระบบประกอบด้วยสามส่วน คือ (1) ตัวอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ทั้งเป็นชุดควบคุมที่ผู้ใช้ปฏิสัมพันธ์ด้วย และเป็นโหนด IoT ที่สื่อสารกับเครือข่ายภายใน (2) MQTT broker ในเครือข่ายเดียวกันที่เป็นตัวกลางรับ-ส่งข้อความระหว่างอุปกรณ์และระบบบ้านอัจฉริยะ และ (3) Home Assistant ที่รับข้อความ MQTT discovery เพื่อลงทะเบียนอุปกรณ์เป็น climate entity และให้ผู้ใช้ควบคุมเครื่องปรับอากาศจากหน้าจอของ Home Assistant รูปที่ 1 แสดงสถาปัตยกรรมโดยรวมของระบบ



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมโดยรวมของระบบ

อุปกรณ์ทำหน้าที่หลักสามประการพร้อมกันตามที่ระบุในบทนำ หน้าที่ทั้งสามแยกเป็นโมดูลย่อยที่ทำงานเป็นอิสระต่อกัน ได้แก่ โมดูลปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (ปุ่มกดและจอแสดงผล) โมดูลควบคุมเครื่องปรับอากาศ (วงจรขับสัญญาณไปยังคอยล์เย็น) โมดูลตรวจวัดอุณหภูมิห้อง และโมดูลสื่อสารกับเครือข่าย (Wi-Fi และ MQTT client) ภายใต้การประสานของหน่วยประมวลผลกลางที่บริหารสถานะของเครื่องปรับอากาศและรักษาความสอดคล้องระหว่างคำสั่งจากผู้ใช้และคำสั่งจาก Home Assistant

3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

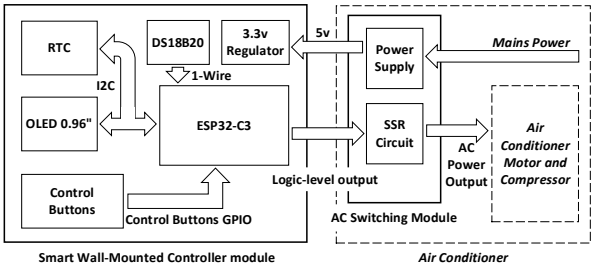
วงจรของอุปกรณ์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 ซึ่งเป็น system-on-chip จาก Espressif Systems รองรับ Wi-Fi ในตัวและใช้พลังงานต่ำเหมาะกับงาน IoT [6]

ส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ประกอบด้วยจอแสดงผล OLED 0.96 นิ้ว ที่สื่อสารผ่านอินเทอร์เฟซ I²C เพื่อแสดงสถานะของเครื่องปรับอากาศและการเชื่อมต่อเครือข่าย และปุ่มกดห้าปุ่ม ได้แก่ POWER, MODE, FAN, TEMP+ และ TEMP– ที่เชื่อมต่อกับ GPIO ผ่านตัวต้านทาน pull-up พร้อมการกำจัดสัญญาณกระเด้ง (debouncing) ที่ระดับซอฟต์แวร์

เซ็นเซอร์อุณหภูมิห้องใช้ DS18B20 สื่อสารผ่านโปรโตคอล 1-Wire อุณหภูมิที่อ่านได้ใช้เป็นข้อมูลป้อนกลับสำหรับควบคุมเครื่องปรับอากาศตามอุณหภูมิเป้าหมาย และเผยแพร่ให้ Home Assistant เป็น current_temperature ของ climate entity

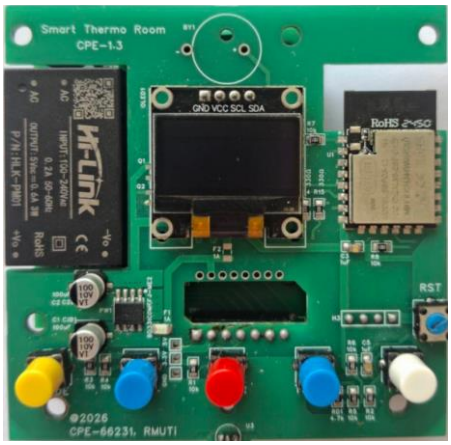
การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์และเครื่องปรับอากาศใช้สัญญาณดิจิทัลแรงดันต่ำ (logic-level signal) จาก GPIO ออกสู่ระบบสวิตช์ของเครื่องปรับอากาศ (AC Switching Module) ซึ่งพบสองรูปแบบ รูปแบบแรกคือระบบสวิตช์ติดตั้งในตัวคอยล์เย็น รับสัญญาณดิจิทัล 3.3 หรือ 5 โวลต์จากชุดควบคุม กรณีนี้อุปกรณ์ส่งสัญญาณไปยังระบบสวิตช์โดยตรง รูปแบบที่สองคือเครื่องที่ไม่มีระบบสวิตช์ในคอยล์เย็น และเดินสายไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นมายังชุดควบคุมแบบติดผนัง กรณีนี้อุปกรณ์มีวงจรเสริมที่ใช้ Solid-State Relay (SSR) ที่มีการแยกสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยแสงในตัวทำหน้าที่ตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับตามสัญญาณควบคุม

จากไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมแยกส่วนแรงดันต่ำออกจากส่วน AC เพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 2 ผังโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์และความสัมพันธ์กับระบบเครื่องปรับอากาศ

วงจรทั้งหมดออกแบบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ที่จัดทำขึ้นโดยเฉพาะ มีขนาดและรูปแบบที่ติดตั้งในตำแหน่งของชุดควบคุมเดิมได้ รูปที่ 2 แสดงผังโครงสร้างฮาร์ดแวร์และความสัมพันธ์กับระบบเครื่องปรับอากาศ และรูปที่ 3 แสดง PCB

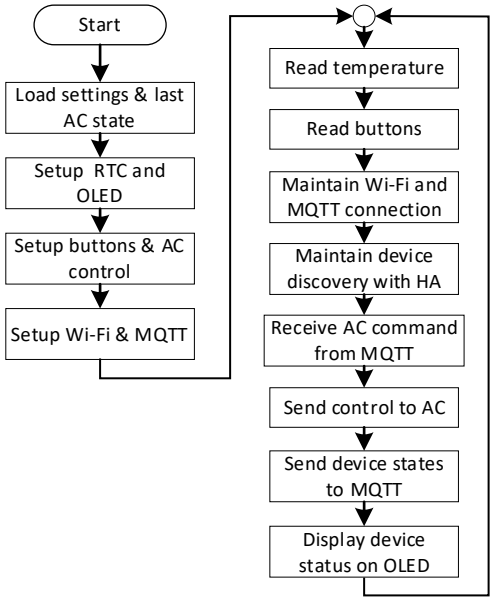


รูปที่ 3 PCB ของอุปกรณ์

3.3 การออกแบบเฟิร์มแวร์

เฟิร์มแวร์พัฒนาในสภาพแวดล้อม PlatformIO โดยใช้ Arduino framework สำหรับ ESP32-C3 โครงสร้างของเฟิร์มแวร์ออกแบบเป็นกลไกสถานะ (state machine) ที่บริหารสถานะของเครื่องปรับอากาศและประสานคำสั่งจากสองทาง คือปุ่มกดที่ตัวอุปกรณ์และ Home Assistant ผ่าน MQTT สถานะที่เก็บรักษาประกอบด้วยห้าหมวด ได้แก่ สถานะเปิด-ปิด โหมดการทำงาน (off, cool, fan_only) อุณหภูมิเป้าหมาย ความเร็วพัดลม (high, medium, low, auto) และอุณหภูมิห้องปัจจุบันจาก DS18B20

เมื่อสถานะเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจากผู้ใช้หรือ Home Assistant อุปกรณ์ดำเนินการสามอย่างพร้อมกัน คือ (1) ปรับสัญญาณขาออกไปยังคอยล์เย็น (2) ปรับการแสดงผลบนจอ OLED และ (3) เผยแพร่ข้อความ MQTT แจ้งสถานะใหม่ให้ Home Assistant การออกแบบนี้รับประกันความสอดคล้องระหว่างการแสดงผลที่อุปกรณ์ การทำงานของเครื่องปรับอากาศ และสถานะใน Home Assistant ไม่ว่าผู้ใช้จะสั่งงานจากช่องทางใด



รูปที่ 4 ผังงานของเฟิร์มแวร์และการสื่อสารกับ Home Assistant

เฟิร์มแวร์อ่านค่าอุณหภูมิห้องจาก DS18B20 ทุก 15 วินาที และเผยแพร่ไปยัง Home Assistant เมื่อค่าเปลี่ยนเกิน 1 องศาเซลเซียสจากครั้งล่าสุด หรือเมื่อเกิน 1 นาทีจากการเผยแพร่ครั้งล่าสุด กลไกแบบ hybrid นี้ลดภาระเครือข่ายเมื่ออุณหภูมิคงที่ และรับประกันการอัปเดตให้ Home Assistant อย่างน้อยทุก 1 นาที ดังรูปที่ 4 แสดงผังงานของเฟิร์มแวร์

3.4 การลงทะเบียนเป็น climate entity ผ่าน MQTT Discovery

เมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อ MQTT broker สำเร็จ เฟิร์มแวร์เผยแพร่ข้อความ JSON ที่อธิบายตนเองตามรูปแบบ Home Assistant MQTT Discovery ไปยังหัวข้อ homeassistant/climate/<unique_id>/config โดย unique_id สร้างจาก MAC address ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Home Assistant ที่ได้รับข้อความจะลงทะเบียนอุปกรณ์เป็น climate entity โดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องตั้งค่าเพิ่มเติม

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการควบคุมและการสื่อสารกับเครือข่าย

การแยกหน้าที่สามประการในเชิงสถาปัตยกรรมส่งผลให้พฤติกรรมของอุปกรณ์ในสามสถานะของการเชื่อมต่อเครือข่ายมีความสมเหตุสมผลและคาดเดาได้

สถานะแรกคือ standalone เกิดเมื่ออุปกรณ์ยังไม่ได้ตั้งค่าเชื่อมต่อ Wi-Fi หรือ Home Assistant อุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมที่สมบูรณ์ในตัวเองเทียบเท่าชุดควบคุมเดิม

สถานะที่สองคือออนไลน์ เกิดเมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อกับ Home Assistant สำเร็จ อุปกรณ์ทำงานเป็นอุปกรณ์ IoT เต็มรูปแบบ ผู้ใช้ควบคุมเครื่องปรับอากาศได้จากทั้งปุ่มกดที่ตัวอุปกรณ์และ Home Assistant โดยสถานะระหว่างสองช่องทางสอดคล้องกันโดยอัตโนมัติ

สถานะที่สามคือออฟไลน์ เกิดเมื่ออุปกรณ์ที่เคยออนไลน์สูญเสียการเชื่อมต่อกับ Wi-Fi หรือ MQTT broker ฟังก์ชันการควบคุมที่ตัวอุปกรณ์ยังทำงานได้สมบูรณ์เทียบเท่า standalone ขณะที่เฟิร์มแวร์พยายามเชื่อมต่อกลับในเบื้องหลัง เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จอุปกรณ์เปลี่ยนกลับเป็นออนไลน์และเผยแพร่สถานะปัจจุบันไปยัง Home Assistant ทันทีเพื่อให้สถานะระหว่างทั้งสองตรงกัน

4. การทดลองและผล

การทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน ที่ครอบคลุมคุณสมบัติเด่นทั้งสามประการของอุปกรณ์ การทดสอบดำเนินการกับโหมดการทำงานที่เฟิร์มแวร์รองรับ ได้แก่ off, cool และ fan_only ทดลองในห้องสำนักงานที่อุณหภูมิปกติ ผ่านเครือข่าย Wi-Fi 2.4 GHz โดยมี Home Assistant และ Mosquitto MQTT broker ทำงานบน Raspberry Pi 4

4.1 การทดสอบฟังก์ชันการทดแทนชุดควบคุมเดิม

ชุดทดลองนี้มุ่งพิสูจน์ความสมบูรณ์ของฟังก์ชันที่อุปกรณ์สั่งงานเครื่องปรับอากาศ เมื่อเทียบกับชุดควบคุมเดิม ทดสอบในสถานะ standalone โดยติดตั้งอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมเดิม แล้วทดสอบสั่งงานทุกฟังก์ชันโดยกดปุ่มที่ตัวอุปกรณ์ และสังเกตการตอบสนองของเครื่องปรับอากาศ ทดสอบเดียวกันกับชุดควบคุมเดิมก่อนถอดออกเพื่อใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ ครอบคลุม 11 รายการ ได้แก่ การเปิด/ปิดเครื่อง การเลือกโหมด Cool และ Fan-only การสลับโหมดวนรอบ การปรับอุณหภูมิเป้าหมายขึ้น/ลง และการปรับความเร็วพัดลมระดับ high, medium, low และ auto อุปกรณ์ผ่านทุกฟังก์ชันเทียบเท่าชุดควบคุมเดิม ยืนยันความสมบูรณ์ของการทดแทนในเชิงฟังก์ชัน ซึ่งเหนือกว่าแนวทาง IR-based [4] ที่สื่อสารทางเดียว

4.2 การทดสอบความเข้ากันได้กับเครื่องปรับอากาศหลายยี่ห้อ

ชุดทดลองนี้พิสูจน์ความสามารถในการใช้งานข้ามยี่ห้อและข้ามรูปแบบการเดินสาย โดยทดสอบติดตั้งอุปกรณ์กับเครื่องปรับอากาศ 3 เครื่องที่มีในห้องทดลอง ซึ่งครอบคลุมรูปแบบการเดินสายทั้งสองรูปแบบที่อุปกรณ์รองรับ คือ logic-level และ AC-level รายการเครื่องที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย

1. ยี่ห้อ York รุ่น FLCT40 ขนาด 40,900 BTU เดินสายแบบ logic-level
2. ยี่ห้อ York รุ่น FLCT40 ขนาด 40,900 BTU เดินสายแบบ AC-level
3. ยี่ห้อ Central Air รุ่น CFH-32EFN20 ขนาด 20,200 BTU เดินสายแบบ AC-level

อุปกรณ์ผ่านการทดสอบความเข้ากันได้ครบทุกฟังก์ชันกับเครื่องปรับอากาศทั้ง 3 เครื่อง ยืนยันว่าการรองรับการเดินสายสองรูปแบบทำให้อุปกรณ์ใช้งานได้กับเครื่องปรับอากาศหลากหลายยี่ห้อ โดยไม่ต้องวิศวกรรมย้อนกลับโปรโตคอลของผู้ผลิตเช่นแนวทาง Protocol-based [7]

4.3 การทดสอบการบูรณาการกับ Home Assistant

ชุดทดลองนี้พิสูจน์ว่าอุปกรณ์ทำงานเป็น climate entity ใน Home Assistant ได้สมบูรณ์ในสองทิศทาง (อุปกรณ์ ⟶ HA และ HA ⟶ อุปกรณ์) และคงไว้ซึ่งฟังก์ชันการควบคุมเครื่องปรับอากาศเมื่ออยู่ในสถานะออฟไลน์

4.3.1 สถานะออนไลน์: การสื่อสารแบบสองทาง

หลังจากตั้งค่า Wi-Fi และการเชื่อมต่อกับ MQTT broker สำเร็จ Home Assistant ลงทะเบียน entity ของอุปกรณ์ผ่าน MQTT discovery การทดสอบในสถานะออนไลน์ตรวจสอบฟังก์ชันการควบคุมจากทั้งสองทิศทาง โดยแต่ละขั้นทดสอบฟังก์ชันเดียวกันจากทั้งปุ่มกดที่ตัวอุปกรณ์และจาก Home Assistant อุปกรณ์ผ่านการทดสอบทั้ง 6 ขั้นตามตารางที่ 1 ส่วนสถานะออนไลน์ ยืนยันว่าการควบคุมจากทั้งสองช่องทางทำงานได้ครบทุกฟังก์ชัน และสถานะระหว่างทั้งสองช่องทางสอดคล้องกันโดยอัตโนมัติ

4.3.2 สถานะออฟไลน์: การคงไว้ซึ่งฟังก์ชันการควบคุม

การทดสอบนี้จำลองสถานะออฟไลน์โดยตัด Wi-Fi router และทดสอบการ recovery กลับเป็นสถานะออนไลน์ อุปกรณ์ผ่านการทดสอบทั้ง 4 ขั้นตามตารางที่ 1 ส่วนสถานะออฟไลน์ ยืนยันว่าฟังก์ชันการควบคุมที่ตัวอุปกรณ์ยังคงทำงานได้เมื่ออยู่ในสถานะออฟไลน์ และสามารถเปลี่ยนกลับเป็นสถานะออนไลน์พร้อมส่งสถานะให้ Home Assistant สอดคล้องกันอย่างถูกต้อง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบในสถานะออนไลน์และสถานะออฟไลน์

การกระทำ	ผล
สถานะออนไลน์	
1. ตรวจ climate entity ใน HA หลังบูต	ผ่าน
2. เปิด/ปิดเครื่อง (อุปกรณ์ <-> HA)	ผ่าน
3. เลือกโหมด Cool/Fan-only (อุปกรณ์ <-> HA)	ผ่าน
4. สลับโหมดแบบวนรอบจาก HA	ผ่าน
5. ปรับอุณหภูมิเป้าหมาย (อุปกรณ์ <-> HA)	ผ่าน
6. ปรับความเร็วพัดลม (อุปกรณ์ <-> HA)	ผ่าน
สถานะออฟไลน์	
1. ตัด Wi-Fi router	ผ่าน
2. ควบคุม 4 ฟังก์ชันที่อุปกรณ์	ผ่าน
3. เปิด Wi-Fi router	ผ่าน
4. ตรวจสถานะใน HA ตรงกับอุปกรณ์	ผ่าน

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารกับ Home Assistant

ชุดทดลองนี้พิสูจน์ประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์และ Home Assistant โดยวัด 2 มิติ ได้แก่ เวลาตอบสนองของคำสั่งทั้งสองทิศทาง และความเสถียรของการเชื่อมต่อหลัง Wi-Fi หลุด แต่ละการทดสอบดำเนินการซ้ำ 10 รอบและรายงานสถิติพื้นฐาน

4.4.1 เวลาตอบสนองระหว่าง Home Assistant และอุปกรณ์

การทดสอบนี้วัดเวลาตอบสนองในทั้งสองทิศทางโดยใช้คำสั่งเปิด/ปิดเครื่อง (Power) เป็นตัวแทน เนื่องจากทุกคำสั่งใช้เส้นทางการประมวลผลและการสื่อสารเดียวกัน

ทิศทางจาก Home Assistant ไปยังอุปกรณ์วัดเวลาตอบสนองที่ผู้ใช้รับรู้ (user-perceived latency) ตั้งแต่คลิกสั่งงานที่ UI ของ Home Assistant จนอุปกรณ์ได้รับและประมวลผลคำสั่ง โดยผู้ทดสอบจับเวลาขณะคลิกและอุปกรณ์บันทึก timestamp เมื่อได้รับคำสั่ง MQTT แล้วคำนวณส่วนต่าง ทิศทางจากอุปกรณ์ไปยัง Home Assistant วัดเวลาตอบสนอง

ไป-กลับ (round-trip latency) ที่ระดับเครื่อง โดยอุปกรณ์เผยแพร่สถานะไปยัง state topic และรับข้อความสะท้อนกลับ บันทึก timestamp ทั้งสองจุดในเครื่องเอง ผลจึงไม่มีองค์ประกอบความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ ผลการทดสอบทั้งสองทิศทางแสดงในตารางที่ 2

ผลการทดสอบสรุปว่าทิศทาง HA ⟶ อุปกรณ์มีค่าเฉลี่ย 1.265 วินาที (ต่ำสุด 1.076 สูงสุด 1.529 SD 0.175) และทิศทางอุปกรณ์ ⟶ HA มีค่าเฉลี่ย 0.637 วินาที (ต่ำสุด 0.524 สูงสุด 0.728 SD 0.052) ค่าเวลาไป-กลับ 0.637 วินาทีสะท้อนประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในเครือข่ายภายในที่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 2 เวลาตอบสนองระหว่าง Home Assistant และอุปกรณ์ในทั้งสองทิศทาง

ค่าสถิติ	HA ⟶ อุปกรณ์ (s)	อุปกรณ์ ⟶ HA (s)
ค่าเฉลี่ย	1.265	0.637
ค่าต่ำสุด	1.076	0.524
ค่าสูงสุด	1.529	0.728
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.175	0.052

4.4.2 Wi-Fi reconnect

การทดสอบนี้วัดความสามารถของอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อกลับหลัง Wi-Fi ขาดหายชั่วคราว วิธีการคือผู้ทดสอบสั่งปิดบริการ Wi-Fi ที่ Access Point เพื่อจำลองการขาดการเชื่อมต่อ และสั่งเปิดบริการกลับเพื่อให้อุปกรณ์เริ่มเชื่อมต่อกลับ อุปกรณ์เริ่มนับเวลาเมื่อตรวจพบการขาดการเชื่อมต่อ และสิ้นสุดเมื่อเชื่อมต่อกลับสำเร็จ ค่าเวลาที่วัดได้สะท้อนเวลาการเชื่อมต่อกลับแบบ end-to-end ที่รวมเวลาดำเนินการของ Access Point และความคลาดเคลื่อนจากการสั่งงานด้วยมนุษย์ ทำการทดสอบซ้ำ 10 รอบ ผลสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ย 3.631 วินาที ค่ามัธยฐาน 3.319 วินาที อัตราความสำเร็จ 10 ต่อ 10 อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อกลับและสอดคล้องสถานะกับ Home Assistant ได้สำเร็จในทุกรอบ ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานที่ต่างกันสะท้อนการมีค่าผิดปกติ (outlier) ในรอบที่ 1 ที่ 7.319 วินาที โดยรอบที่ 2 ถึงรอบที่ 10 มีค่ารวมตัวอยู่ในช่วง 2.32 ถึง 3.40 วินาที (จะอภิปรายที่มาในส่วนที่ 5) ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เวลาเชื่อมต่อกลับหลังหลุดจากการเชื่อมต่อ Wi-Fi

ค่าสถิติ	เวลา reconnect (s)
ค่าเฉลี่ย	3.631
ค่าต่ำสุด	2.320
ค่าสูงสุด	7.319
ค่ามัธยฐาน	3.319
อัตราความสำเร็จ	10/10

5. อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงว่าอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมเดิมของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนได้สมบูรณ์ในเชิงฟังก์ชัน บูรณาการเข้าสู่ Home Assistant โดยอัตโนมัติผ่าน MQTT auto-discovery และทำงานเสถียรในทุกสถานะการเชื่อมต่อเครือข่าย ในแง่ประสิทธิภาพการสื่อสาร ค่าเวลาตอบสนองที่ผู้ใช้รับรู้จาก HA ไปยังอุปกรณ์ (ค่าเฉลี่ย 1.265 วินาที) สูงกว่าค่าเวลาตอบสนองไป-กลับที่วัดจากอุปกรณ์ (ค่าเฉลี่ย 0.637 วินาที) เนื่องจากค่าแรกครอบคลุม UI processing ของ Home Assistant และความคลาดเคลื่อนของการจับเวลาโดยมนุษย์ ขณะที่ค่าหลังสะท้อนเวลาการสื่อสารระดับโปรโตคอล

ค่าผิดปกติในรอบที่ 1 ของการทดสอบ Wi-Fi reconnect (7.319 วินาที) เกิดจากความคลาดเคลื่อนของการสั่งงาน Access Point ด้วยมนุษย์ และระยะเวลาที่ผู้ทดสอบคงสถานะปิดไว้ระหว่างรอบรอบถัดไปผู้ทดสอบคุ้นกับขั้นตอน เวลาจึงสม่ำเสมอขึ้น ค่ามัธยฐานจึงสะท้อนเวลาการเชื่อมต่อกลับในเชิงตัวแทนได้ดีกว่าค่าเฉลี่ย

เฟิร์มแวร์เวอร์ชันปัจจุบันรองรับโหมด off, cool และ fan_only ซึ่งเป็นโหมดหลักที่พบในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น การพัฒนาโหมด dry และ auto

สามารถดำเนินการในเวอร์ชันถัดไป ในเชิงการติดตั้งรูปแบบ AC-level ที่ต้องตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงควรดำเนินการโดยช่างที่มีความชำนาญด้านการเดินสายไฟฟ้า และผู้ใช้ควรตรวจสอบเงื่อนไขการรับประกันของผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศก่อนเปลี่ยนชุดควบคุมเดิม

6. สรุปและงานในอนาคต

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทดแทนชุดควบคุมแบบติดผนังของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยใช้ ESP32-C3 อุปกรณ์มีคุณสมบัติเด่นสามประการ คือ (1) ยกระดับเครื่องปรับอากาศที่ใช้ชุดควบคุมแบบติดผนังให้เป็นอุปกรณ์ IoT ใน Home Assistant ผ่าน MQTT auto-discovery แบบเครือข่ายภายในเท่านั้น (2) รองรับการเดินสายทั้งแบบ logic-level และ AC-level ทำให้ใช้งานได้กับเครื่องปรับอากาศหลากหลายยี่ห้อโดยไม่ต้องอาศัยการวิศวกรรมย้อนกลับโปรโตคอลของผู้ผลิต และ (3) ทำงานเป็นชุดควบคุมแบบ standalone ที่สมบูรณ์แม้ไม่มีการเชื่อมต่อเครือข่าย ผลการทดลองยืนยันว่าอุปกรณ์ทำหน้าที่ได้สมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ และมีประสิทธิภาพการสื่อสารกับ Home Assistant ในระดับที่ใช้งานได้จริง

งานในอนาคตประกอบด้วย (1) พัฒนาโหมด dry และ auto ในเฟิร์มแวร์เพื่อขยายความสามารถจากที่ปัจจุบันรองรับเฉพาะ off, cool และ fan_only (2) ขยายไปยังโปรโตคอลบ้านอัจฉริยะอื่น เช่น Matter (3) ทดสอบกับเครื่องปรับอากาศหลากหลายยี่ห้อและรุ่นเพื่อยืนยันความเป็น universal เนื่องจากปัจจุบันทดสอบเพียง 3 เครื่อง และ (4) ประเมินความเสถียรในการใช้งานต่อเนื่องระยะยาว เนื่องจากระยะเวลาการทดสอบในงานนี้เพียง 1 สัปดาห์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Banks, A., & Gupta, R. (2014). MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard.

[2] Yudidharma, A., Nathaniel, N., Gimli, T. N., Achmad, S., & Kurniawan, A. (2023). A systematic literature review: Messaging protocols and electronic platforms used in the internet of things for the purpose of building smart homes. Procedia Computer Science, Vol. 216, pp. 194-203. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.127

[3] Esposito, M., Belli, A., Palma, L., & Pierleoni, P. (2023). Design and Implementation of a Framework for Smart Home Automation Based on Cellular IoT, MQTT, and Serverless Functions. Sensors, Vol. 23, No. 9, Article 4459. DOI: 10.3390/s23094459

[4] Thongkaew, S., & Charitkuan, C. (2018). IoT for Energy Saving of Split-Type Air Conditioner by Controlling Supply Air and Area Temperature. 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), pp. 1-4, Chiang Mai, Thailand. DOI: 10.1109/ICSEC.2018.8712656.

[5] Rahaman, M. H., & Iqbal, M. T. (2020). A Remote Thermostat Control and Temperature Monitoring System of a Single-Family House using openHAB and MQTT. European Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 4, No. 5. DOI: 10.24018/ejece.2020.4.5.234

[6] Espressif Systems. (2024). ESP32-C3 Series Datasheet, Version 2.4. Retrieved from https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf

[7] ESPHome. (2026). Open-source firmware for ESP-based devices. Retrieved June 9, 2026, from https://esphome.io/

การออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสารทางเสียงและการมองเห็นทางสายตา

The design and development of a communication glove for individuals with speech and visual impairments.

อัตถ์ ศรีเนตร[1*], สุรินทร์ อ่อนน้อม[2], อนันท์ เกสูงเนิน[3], เกรียงกมล มงคลเมือง[4], ศิริชัย ลาภาสระน้อย[5] , ภากร นาคศรี[6] และปิยรัตน์ งามสนิท[7]

[1-7] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: ath.si@hotmail.com, 092-5094449

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีข้อจำกัดด้านการพูดและการมองเห็น รวมทั้งศึกษาความเหมาะสมของการอ่านและประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์โค้งงอร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 เพื่อจำแนกข้อความจากการงอของนิ้วมือด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัว ติดตั้งที่ถุงมือผ้าทั้ง 5 นิ้ว แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ ทดสอบการรับรู้ด้วยลักษณะของการงอนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ด้วยรูปแบบที่แตกต่างกันได้ข้อความทั้งหมด 31 ข้อความ ทดลองซ้ำ 11 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่า ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ ค่าแรงดันเอาต์พุต และค่าสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์มีความแตกต่างกันในแต่ละนิ้ว ส่งผลต่อการกำหนดช่วงค่าสัญญาณซึ่งการจำแนกข้อความพิจารณาจากรูปแบบของการงอนิ้วมือ นอกจากนี้ มุมโค้งงอตั้งแต่ 60 องศาขึ้นไปให้ความถูกต้องในการจำแนกข้อความสูงที่สุด ระบบสามารถแสดงผลข้อความที่มีความถูกต้องเกินกึ่งหนึ่งของการทดลองร้อยละ 83.8 มีความถูกต้องสมบูรณ์ร้อยละ 100 ในจำนวนร้อยละ 64.5 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการสื่อสารสำหรับผู้ที่มีข้อจำกัดด้านการพูดและการมองเห็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ถุงมือสื่อสารอัจฉริยะ, เซนเซอร์โค้งงอ, ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3, เทคโนโลยีสวมใส่เพื่อการช่วยเหลือ

Abstract

This study aimed to design and develop a smart communication glove for individuals with speech and visual impairments and to evaluate the suitability of using flex sensors with an ESP32-C3 microcontroller for gesture-based text recognition. The system incorporated five flex sensors mounted on the fingers of a fabric glove and operated at 3.3 V. Finger-bending gestures were used to represent 31 predefined messages, and each gesture was tested in 11 repeated trials. The results showed that the resistance, output voltage, and analog signal values differed among the sensors, requiring individual threshold settings for accurate gesture classification. Finger bending angles of **60° or greater** provided the highest recognition accuracy. The system correctly recognized messages in **83.8%** of the trials and achieved **100% recognition accuracy** in **64.5%** of the experiments. These findings indicate that the proposed smart glove is a promising wearable assistive device for supporting communication among individuals with speech and visual impairments through reliable real-time gesture recognition.

Keywords: Smart communication glove, Flex sensor, ESP32-C3, Wearable assistive technology

1. บทนำ

การสื่อสารเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตและการมีส่วนร่วมทางสังคมของมนุษย์ ซึ่งงานวิจัย[2] พบว่าผู้ที่มีความบกพร่องทางการสื่อสารผ่านเสียงและการมองเห็นยังคงประสบปัญหาในการติดต่อสื่อสาร ส่งผลต่อการศึกษา การประกอบอาชีพ และการใช้ชีวิตประจำวัน แม้ว่าจะมีเทคโนโลยีช่วยเหลือหลายรูปแบบ แต่ยังขาดอุปกรณ์ที่มีความสะดวกและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาถุงมือสื่อสารอัจฉริยะโดยใช้เซนเซอร์โค้งงอร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือและแปลงท่าทางเป็นข้อความสำหรับการสื่อสาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารของผู้ที่มีข้อจำกัดด้านการพูดและการมองเห็น ตลอดจนส่งเสริมการเข้าถึงเทคโนโลยีช่วยเหลือที่สามารถใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ ยังมีการประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน [5] เพื่อศึกษาศักยภาพของอุปกรณ์ในการลดอุปสรรคด้านการสื่อสาร เพิ่มความสามารถในการดำเนินชีวิตอย่างอิสระ และส่งเสริมการมีส่วนร่วมทางสังคมของผู้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสารทางเสียงและการมองเห็นเป็นโครงการที่มีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีหลายด้าน รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีช่วยเหลือสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการสื่อสาร การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้จึงครอบคลุมการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านการสื่อสาร, การใช้ภาษามือ, เทคโนโลยีเซนเซอร์, และแนวคิดการออกแบบที่คำนึงถึงผู้ใช้ (user-centered design)

2.1 อุปกรณ์ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 C3

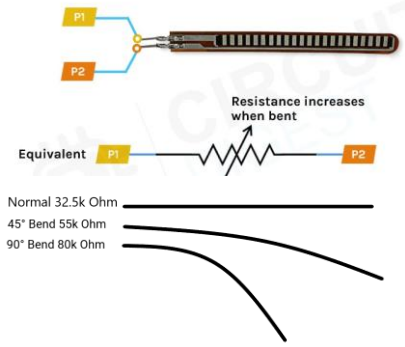
ESP32-C3 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ System on Chip จากบริษัท Espressif Systems ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานด้านIoTโดยเน้นความปลอดภัยสูง ประหยัดพลังงาน และมีราคาที่คุ้มค่า โดยใช้สถาปัตยกรรม RISC-V 32-bit Single-Core



รูปที่ 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 C3

2.1.2 เซนเซอร์โค้งงอ (Flex Sensor)

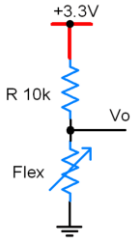
เป็นอุปกรณ์ตรวจจับชนิดตัวต้านทานแปรค่าได้ที่มีต้นทุนต่ำและใช้งานได้ง่าย โดยถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดระดับการโค้งงอหรือการดัดโค้งของตัวเซนเซอร์ งานวิจัย [1] พบว่าค่าความต้านทานของเซนเซอร์จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่ออยู่ในสภาพแบนราบ และจะเพิ่มขึ้นตามระดับการดัดงอที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อเซนเซอร์ถูกดัดงอที่มุมประมาณ 90 องศา



รูปที่ 2 เซนเซอร์โค้งงอ

การอ่านค่าจากเซนเซอร์โค้งงอสามารถอ่านค่าได้อย่างง่ายดายโดยการต่อเข้ากับตัวต้านทานคงที่ในรูปแบบวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) การจัดวงจรในลักษณะนี้จะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานของเซนเซอร์ ซึ่งแรงดันดังกล่าวสามารถนำไปวัดและประมวลผลได้ผ่านวงจรแปลงสัญญาณเชิงแอนาล็อกเป็นดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการประเมินระดับการโค้งงอของเซนเซอร์อย่างแม่นยำ



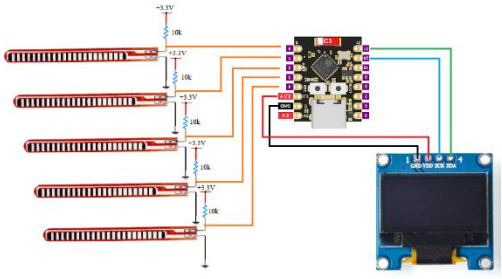
รูปที่ 3 การอ่านค่าจากเซนเซอร์โค้งงอ

สมการพื้นฐานของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) สามารถนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคร่อมตัวต้านทานของเซนเซอร์โค้งงอได้ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Vo = Vcc \frac{RFlex}{R + RFlex} \quad (1)$$

ตัวอย่างเชิงปฏิบัติ สามารถอธิบายได้ว่าบอร์ด ESP32 ทำงานที่แรงดันเลี้ยง 3.3 โวลต์ ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดัน 3.3 โวลต์ให้แก่วงจร และต่อตัวต้านทานคงที่ค่าประมาณ 10 กิโลโอห์ม อนุกรมร่วมกับเซนเซอร์โค้งงอหากเซนเซอร์อยู่ในสภาวะตรงค่าความต้านทานของเซนเซอร์อยู่ที่ประมาณ 32.5 กิโลโอห์ม จะสามารถคำนวณแรงดันเอาต์พุตได้จากสมการแบ่งแรงดัน

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า เมื่อมุมการโค้งงอเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของเซนเซอร์โค้งงอจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตที่จุดแบ่งแรงดันลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าดังกล่าวสามารถนำเข้า ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและแปลงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระดับการโค้งงอไปสู่การวัดเชิงมุมหรือเชิงเชิงสัดส่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ จอแสดงผล OLED และ เซนเซอร์โค้งงอ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบโครงสร้างถุงมือสื่อสารโดยใช้เซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ชิ้น

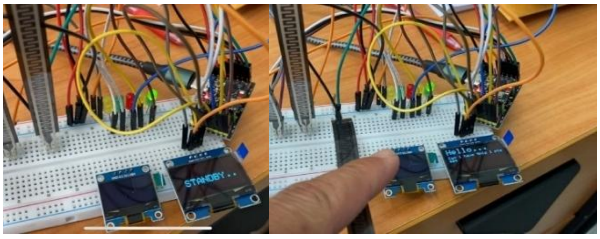
การออกแบบและพัฒนาถุงมือสื่อสาร สำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสารทางเสียงและการมองเห็นทางสายตาในวิจัยฉบับนี้ แบ่งการวิจัยออกเป็นสามหัวข้อหลัก 1. การออกแบบโครงสร้างถุงมือสื่อสารโดยติดตั้งเซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ชิ้น ติดตั้งที่นิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว 2. การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ esp32-c3 อ่านค่าสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์โค้งงอเพื่อจำแนกข้อความจากการงอของนิ้วมือด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน แสดงข้อความด้วย OLED ขนาด 1.3 นิ้ว 3. ทดสอบการทำงานของถุงมือสื่อสาร



รูปที่ 5 โครงสร้างถุงมือสื่อสารโดยใช้เซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ชิ้น

ถุงมือสื่อสารที่ติดตั้งเซนเซอร์โค้งงอเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหวและระดับการงอของนิ้วมือ โดยใช้ Flex Sensor จำนวน 5 ชิ้น

แปลงการเปลี่ยนแปลงเชิงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า และประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 ก่อนแสดงผลผ่านจอ OLED แบบเรียลไทม์ สัญญาณแรงดันจากวงจรแบ่งแรงดันของเซนเซอร์แต่ละตัวถูกส่งเข้าสู่ขา ADC ของ ESP32-C3 ซึ่งรองรับแรงดันอินพุต 0–3.3 โวลต์ และแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลความละเอียด 12 บิต (0–4095) เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ระดับการงอของนิ้วมือ หรือปรับเทียบเป็นค่ามุมองศา ได้การแสดงผลใช้จอ OLED ขนาด 1.3 นิ้ว ไดรเวอร์ SSD1306 เชื่อมต่อผ่านบัส I²C (SDA และ SCL) ที่แรงดัน 3.3 โวลต์ ความละเอียด 128 × 64 พิกเซล โดยแสดงค่าจากเซนเซอร์ทั้ง 5 ช่องในรูปแบบข้อความเพื่อตรวจสอบสถานะการงอของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้แบบเรียลไทม์ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 6 ทดสอบการโค้งงอของเซนเซอร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และจอแสดงผล

3.2 ทดสอบการทำงานของถุงมือสื่อสารสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางด้านการสื่อสารทางเสียงและการมองเห็นทางสายตา

ถุงมือสื่อสารที่ติดตั้งเซนเซอร์โค้งงอ ถือเป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวโดยระบบดังกล่าวใช้เซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ชิ้น ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงเชิงกลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อจำแนกข้อความจากการงอของนิ้วมือด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 และแสดงข้อความผ่านจอแสดงผล OLED เพื่อให้สามารถอ่านค่าและตรวจสอบสถานะการทำงานระบบการอ่านค่าสัญญาณ (Analog to Digital Conversion) แรงดันเอาต์พุตจากวงจรแบ่งแรงดันของแต่ละเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่ขา ADC ของ ESP32-C3 ช่วงแรงดันอินพุต: 0–3.3V ช่วงค่าดิจิทัลที่แปลงได้: 0–4095 (ความละเอียด 12-bit) ค่าที่ได้จากการแปลง ADC จากนั้นเขียนโปรแกรมสร้างเงื่อนไขจากการขยับนิ้วมือในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อความที่แตกต่างกันออกมาโดยกำหนดเมื่อมีการโค้งงอของนิ้วมือตั้งแต่ 60 องศาขึ้นไปให้มีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อนิ้วเหยียดตรงจะมีค่าเท่ากับ 0 ดังตาราง

ตารางที่ 1 การทดลองของถุงมือสื่อสาร

ลำดับ	การโค้งงอ					ข้อความ	
	นิ้วหัวแม่มือ	นิ้วชี้	นิ้วกลาง	นิ้วนาง	นิ้วก้อย		
1	0	0	0	0	1	ข้อความที่	1
2	0	0	0	1	0	ข้อความที่	2
3	0	0	0	1	1	ข้อความที่	3
4	0	0	1	0	0	ข้อความที่	4
5	0	0	1	0	1	ข้อความที่	5
6	0	0	1	1	0	ข้อความที่	6
7	0	0	1	1	1	ข้อความที่	7
8	0	1	0	0	0	ข้อความที่	8
9	0	1	0	0	1	ข้อความที่	9
10	0	1	0	1	0	ข้อความที่	10
11	0	1	0	1	1	ข้อความที่	11
12	0	1	1	0	0	ข้อความที่	12
13	0	1	1	0	1	ข้อความที่	13
14	0	1	1	1	0	ข้อความที่	14
15	0	1	1	1	1	ข้อความที่	15

*หมายเหตุ ตัวเลข 0 คือนิ้วตรงปกติ ตัวเลข 1 คือการงอนิ้วมือตั้งแต่ 60 องศาขึ้นไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ค่าความโค้งงอของเซนเซอร์ที่มีผลกับค่าความต้านทานและแรงดันไฟฟ้า

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้าของเซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัว ภายใต้ระดับการโค้งงอที่แตกต่างกัน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ระบบได้รับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ขนาด 3.3 โวลต์ เพื่อให้สอดคล้องกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรแปลงสัญญาณแบบตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในการทดลอง ได้ทำการวัดค่าความต้านทานของ

เซนเซอร์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดเอาต์พุตของวงจร และค่าสัญญาณแอนะล็อกที่อ่านได้จากขา ADC ของ ESP32-C3 ภายใต้ระดับการโค้งงอ 4 ระดับ ได้แก่ 0, 30, 60 และ 90 องศา สำหรับเซนเซอร์

ตารางที่ 2 ค่าความโค้งงอของเซนเซอร์ที่มีผลกับค่าความต้านทาน

เซนเซอร์โค้งงอ	มุมในการโค้งงอ (องศา)			
	0°	30°	60°	90°
1	32 KΩ	45 KΩ	58 KΩ	75 KΩ
2	33 KΩ	45 KΩ	55 KΩ	76 KΩ
3	32 KΩ	47 KΩ	57 KΩ	75 KΩ
4	35 KΩ	42 KΩ	52 KΩ	77 KΩ
5	31 KΩ	49 KΩ	61 KΩ	80 KΩ
ค่าเฉลี่ย	3.26 KΩ	45.6 KΩ	56.6 KΩ	76.6 KΩ

ตารางที่ 3 ค่าความโค้งงอที่มีผลกับค่าแรงดันเอาท์พุต

เซนเซอร์โค้งงอ	มุมในการโค้งงอ (องศา)			
	0°	30°	60°	90°
ตัวที่ 1	0.78 v	0.67 v	0.49 v	0.37 v
ตัวที่ 2	0.78 v	0.67 v	0.44 v	0.38 v
ตัวที่ 3	0.71 v	0.64 v	0.45 v	0.35 v
ตัวที่ 4	0.74 v	0.64 v	0.48 v	0.35 v
ตัวที่ 5	0.77 v	0.65 v	0.49 v	0.37 v
ค่าเฉลี่ย	0.756 v	0.654 v	0.47 v	0.364 v

ตารางที่ 4 ค่าความโค้งงอกับค่าสัญญาณแอนะล็อก

เซนเซอร์โค้งงอ	มุมในการโค้งงอ (องศา)			
	0°	30°	60°	90°
ตัวที่ 1	4095	3845	3600	2702
ตัวที่ 2	4090	3841	3602	2715
ตัวที่ 3	4095	3844	3610	2711
ตัวที่ 4	4095	3844	3610	2710
ตัวที่ 5	4094	3845	3604	2700
ค่าเฉลี่ย	4093.8	3843.8	3605.2	2707.6

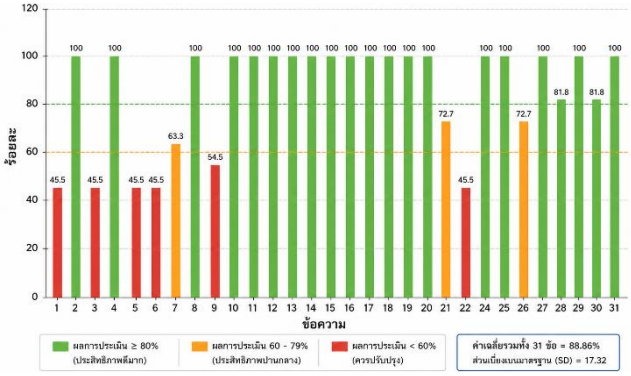
4.2 ผลการทดลองเขียนโปรแกรมกำหนดข้อความโดยใช้ความโค้งงอ 60 องศา

ผลการทดสอบการแสดงผลข้อความจำนวน 31 ข้อความ จากการทดลองซ้ำ 11 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าการกำหนดช่วงค่าสัญญาณที่สอดคล้องกับมุมโค้งงอ 60 องศา สามารถให้ค่าความถูกต้องในการจำแนกข้อความสูงกว่ามุมโค้งงอระดับอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงสถิติที่แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของค่าความต้านทาน ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าสัญญาณแอนะล็อกในช่วงมุมดังกล่าว

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเขียนโปรแกรมกำหนดข้อความโดยใช้ความโค้งงอตั้งแต่ 60 องศา

ข้อความ	การทดลองครั้งที่											ร้อยละ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
ข้อความที่ 1	x	x	x	✓	✓	x	x	✓	x	✓	✓	45.5
ข้อความที่ 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 3	x	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	45.5
ข้อความที่ 4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 5	x	x	✓	✓	x	x	x	x	✓	✓	✓	45.5
ข้อความที่ 6	✓	x	x	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓	45.5
ข้อความที่ 7	✓	x	x	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	63.3
ข้อความที่ 8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 9	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	54.5
ข้อความที่ 10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
ข้อความที่ 15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100

การทดลองจำแนกข้อความจากการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัว ติดตั้งที่นิ้วมือแต่ละนิ้วและทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ โดยทดสอบการรับรู้และแสดงผลจำนวน 31 ข้อความ ด้วยการทดลองซ้ำ 11 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่า ค่าความต้านทาน ค่าแรงดันเอาต์พุต และค่าสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์มีความแตกต่างกันในแต่ละนิ้ว ส่งผลให้การกำหนดช่วงค่าสัญญาณสำหรับการจำแนกต้องพิจารณาแยกตามนิ้ว นอกจากนี้ มุมโค้งงอตั้งแต่ 60 องศาขึ้นไปให้ความถูกต้องในการจำแนกข้อความสูงที่สุด ระบบสามารถแสดงผลข้อความที่มีความถูกต้องเกินกึ่งหนึ่งของการทดลองร้อยละ 83.8 มีความถูกต้องสมบูรณ์ร้อยละ 100 ในจำนวนร้อยละ 64.5



รูปที่ 7 การทดลองจำแนกข้อความจากการเคลื่อนไหวของนิ้วมือด้วยเซนเซอร์โค้งงอ

5 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะการตอบสนองของเซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัวที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 วัดค่าความต้านทานแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณแอนะล็อกที่มุมการโค้งงอ 0, 30, 60 และ 90 องศา เซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัว ติดตั้งที่ถุงมือผ้าทั้ง 5 นิ้ว แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ ทดสอบการรับรู้ด้วยลักษณะของการงอนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ด้วยรูปแบบที่แตกต่างกันได้ข้อความทั้งหมด 31 ข้อความ ทดลองซ้ำ 11 ครั้ง แสดงข้อความจากการทดลองด้วยจอ OLED การโค้งงอตั้งแต่ 60 องศาขึ้นไปให้ความถูกต้องในการจำแนกข้อความสูงที่สุด ระบบสามารถแสดงผลข้อความที่มีความถูกต้องเกินกึ่งหนึ่งของการทดลองร้อยละ 83.8 มีความถูกต้องสมบูรณ์ร้อยละ 100 ในจำนวนร้อยละ 64.5

เอกสารอ้างอิง

[1] อัตถ์ ศรีเนตร.(2563). “การออกแบบและพัฒนาแขนเทียมไฟฟ้าสำหรับผู้พิการ”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ณ โรงแรมรอยัลฮิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ทแอนด์ สปา จังหวัดนครนายก, 20-22 พฤษภาคม.

[2] อรอนงค์ สงเจริญ. (2546). “สุขภาพจิตและความต้องการของคนพิการทางกายหรือการเคลื่อนไหว : กรณีศึกษาศูนย์ฟื้นฟูสมรรถภาพคนงาน,” วารสารวิทยาลัยราชสุดาเพื่อการวิจัยและพัฒนาคนพิการ, หน้า 57-72.

[3] ทวี งามวิไลกร และคณะ. (2554). “การออกแบบแขนกลความเร็วสูงแบบ3 องศาอิสระ”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25.กระบี่

[4] สมฤกษ์ ปุจฉาการ และคณะ. (2555). “การพัฒนาแขนหุ่นยนต์3 แกนสำหรับเคลื่อนย้ายวัสดุ” การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี พ.ศ.2555.เพชรบุรี

[5] มุฑิตา สงฆ์จันทร์ (2558). “การควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้การเรียนรู้ซ้ำแบบทำซ้ำชนิดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด” กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยนเรศวร. (รายงานการวิจัย ประจำปี 2558 ของมหาวิทยาลัยนเรศวร).

[6] Brady, M., Gerhardt, L. A., & Davidson, H. F. (Eds.). (2012). “Robotics and artificial intelligence (Vol. 11)”. Springer Science & Business Media.

[7] Cañizares, A., Pazos, J., & Benítez, D. (2017, November). “On the use of 3D printing technology towards the development of a low-cost robotic prosthetic arm” In Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2017 IEEE International Autumn Meeting on (pp. 1-6). IEEE.

ชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับเครือข่าย CAN BUS พร้อมจอแสดงผล

Electric vehicle training kit for CAN BUS network with Display

รัฐศาสตร์ ลายกนก[1,*], ณัฐวัฒน์ ตุมพร[2], ธนภูมิ ดอกมะรุม[3] และ ภานุวัฒน์ คำแสน[4]

[1] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: Rattasat.L@nrru.ac.th, 0842457259

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอการพัฒนาชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับเครือข่าย CAN bus พร้อมจอแสดงผล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสื่อการเรียนการสอนสำหรับระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ในยานยนต์สมัยใหม่ ขอบเขตของงานครอบคลุมการออกแบบและจำลองระบบทำงานหลัก 5 ระบบของรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ 1) ระบบขับเคลื่อนที่สามารถปรับเร่งความเร็ว 2) ระบบทำความเย็น 3) ระบบแสงสว่าง 4) ระบบปัดน้ำฝน 3 ระดับ และ 5) ระบบจอแสดงผลที่ทำหน้าที่รับและประมวลผลข้อมูลสถานะการทำงานของทุกระบบย่อยผ่านเครือข่าย CAN bus ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถสื่อสารข้อมูลร่วมกันได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยมีอัตราความถูกต้องแม่นยำของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ยร้อยละ 98.32 และมีความหน่วงเวลาต่ำกว่า 5 มิลลิวินาที ชุดฝึกที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่เพียงแต่ได้ต้นแบบที่ใช้งานได้จริง แต่ยังเป็นสื่อการสอนที่ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจสถาปัตยกรรมการสื่อสารข้อมูลภายในรถยนต์และการออกแบบอินเทอร์เฟซ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาทักษะด้านเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ต่อไป

คำสำคัญ: ชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้า, เครือข่าย CAN bus, จอแสดงผล, ระบบจำลองในรถยนต์, สื่อการเรียนการสอน

Abstract

The development of an electric vehicle (EV) training kit for a Controller Area Network (CAN bus) with a display has been presented in this paper. The primary objective is to create an instructional media for modern automotive electronic control systems. The scope encompasses the design and simulation of five core vehicle systems connected via a CAN bus network: 1) a drivetrain system with speed acceleration, 2) a cooling unit, 3) a lighting system, 4) a wiper system with 3-level adjustments, and 5) a centralized display system to process real-time operational data from all subsystems. Experimental results demonstrate high-stability communication across the network, achieving an average data transmission accuracy of 98.32% with a latency of less than 5 milliseconds. The developed training kit not only provides a functional prototype for EV simulation but also serves as a practical educational tool that enhances learners' understanding of in-vehicle communication architecture and display interface design.

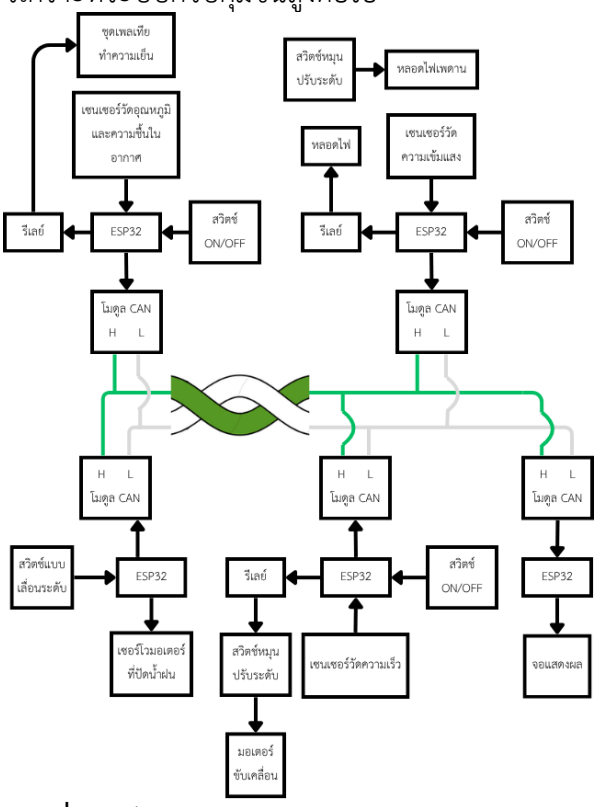
Keywords: Electric Vehicle Training Kit, CAN bus Network, Display, Vehicle Simulation System, Instructional Media

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์กำลังเปลี่ยนผ่านไปสู่ยานยนต์ไฟฟ้า (EVs) อย่างรวดเร็วเนื่องจากปัญหามลพิษทางอากาศส่งผลให้มีการนำระบบอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยมากขึ้น [1], [2] สถาปัตยกรรมภายในตัวรถจึงมีความซับซ้อนสูง และจำเป็นต้องติดตั้งหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (ECU) จำนวนมากเพื่อแยกทำหน้าที่ควบคุมระบบย่อยต่าง ๆ เช่น ระบบควบคุมรถยนต์ (VCU) ระบบขับเคลื่อน ระบบส่องสว่าง และระบบตัวถัง (BCU) [2]

เมื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างระบบมีความถี่สูงขึ้น [1], [3] เครือข่ายพื้นที่ควบคุม (Controller Area Network) หรือ CAN bus จึงกลายมาเป็นมาตรฐานหลักในการสื่อสารภายในยานยนต์ เนื่องจากช่วยลดจำนวนสายไฟและมีกลไกจัดลำดับความสำคัญของข้อความที่มีประสิทธิภาพ [4] อย่างไรก็ตาม การเติบโตของยานยนต์อัจฉริยะส่งผลให้ภาระบนเครือข่ายบัสเพิ่มสูงขึ้นจนกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานแบบเรียลไทม์ [1] รวมถึงสร้างความท้าทายด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์จากการโจมตีบิดเบือนข้อมูล [5] การทำความเข้าใจโครงสร้างการไหลของข้อมูลและการจัดการอินเทอร์เฟซเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายกับระบบแสดงผลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง [3] แม้ว่าจะมีการใช้ระบบจำลองทางซอฟต์แวร์หรือแบบจำลองเชิงดิจิทัลในการวิเคราะห์ [4] แต่สำหรับการศึกษาและการฝึกอบรมบุคลากร "ชุดฝึกทักษะทางกายภาพ" ที่สามารถจำลองสถาปัตยกรรมจริงของรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเป็นรูปธรรมยังคงเป็นสิ่งสำคัญที่ขาดแคลน

บทความนี้จึงนำเสนอการสร้างชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับเครือข่าย CAN bus พร้อมจอแสดงผลเพื่อใช้เป็นสื่อการสอน โดยชุดฝึกจะจำลองระบบการทำงานหลัก 5 ระบบ ได้แก่ ระบบขับเคลื่อน ระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง ระบบปัดน้ำฝน และระบบจอแสดงผลอัจฉริยะที่ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลสถานะผ่านเครือข่าย CAN bus การพัฒนาชุดฝึกช่วยให้ผู้เรียนสามารถศึกษาพฤติกรรมการสื่อสารข้อมูลและการออกแบบเมนูอินเทอร์เฟซได้อย่างเข้าใจ เพื่อเป็นพื้นฐานในการต่อยอดสู่การวิเคราะห์ระบบควบคุมขั้นสูงต่อไป



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างและระบบเครือข่าย CAN bus ของชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้า

2. วิธีการดำเนินงาน

การพัฒนาชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้านี้ ประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลักแยกตามฟังก์ชัน และเชื่อมต่อผ่านโครงข่าย CAN bus เพื่อส่งข้อมูลไปแสดงผลแบบเรียลไทม์

2.1 โครงสร้างเชิงสถาปัตยกรรมของชุดฝึก

สถาปัตยกรรมเครือข่ายและการเชื่อมต่อระบบย่อยแสดงดังรูปที่ 1 มีองค์ประกอบหลักดังนี้:

สายสัญญาณแกนหลัก (CAN Bus Backbone): ใช้สายคู่บิดเกลียว (Twisted Pair) ประกอบด้วยสาย CAN High (H) และ CAN Low (L) เชื่อมต่อแบบ

โครงสร้างบัส (Bus Topology) เพื่อลดความซับซ้อนของสายไฟและป้องกันสัญญาณรบกวน

โมดูลระบบขับเคลื่อน (Drivetrain Module): ทำหน้าที่เปิด-ปิดระบบผ่านรีเลย์ และรับสัญญาณวัดความเร็วรอบจากเซนเซอร์ (Speed Sensor) เพื่อส่งขึ้นสู่เครือข่าย CAN

โมดูลระบบปัดน้ำฝน (Wiper Module): รับค่าอนาลอกจาก Slide Potentiometer เพื่อประมวลผลความเร็ว และควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

โมดูลระบบแสงสว่าง (Lighting Module): รับสัญญาณจากสวิตช์และเซนเซอร์วัดความเข้มแสงเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดระบบไฟส่องสว่างผ่านรีเลย์

โมดูลระบบปรับอากาศ (Air Conditioning Module): รับค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเซนเซอร์ DHT22 และควบคุมชุดเพลเทียร์ (Peltier) ผ่านรีเลย์

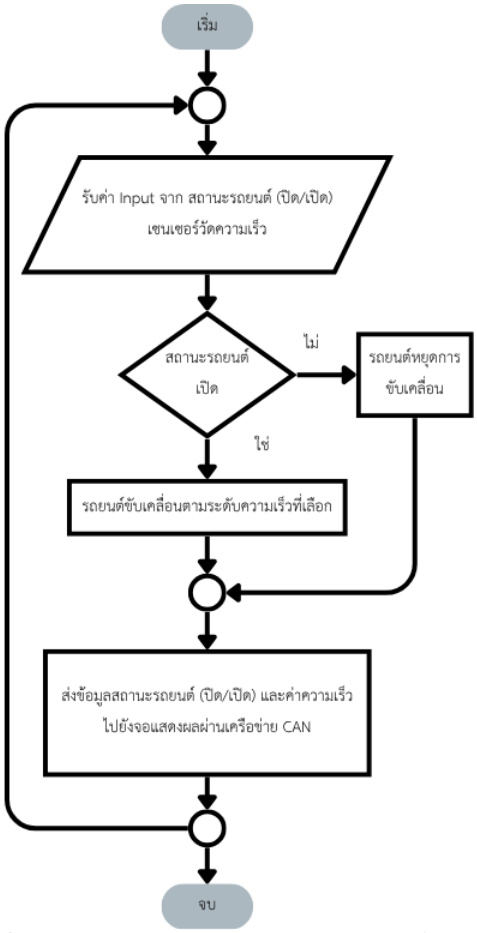
โมดูลจอแสดงผลส่วนกลาง (Display Module): ทำหน้าที่เป็นโหนดผู้รับ ดักรับข้อมูลจากทุกโหนดบนรถยนต์เพื่อนำมาแสดงผล

2.2. โมดูลระบบขับเคลื่อน

จากรูปที่ 2 เริ่มจากอ่านสถานะสวิตช์ ON/OFF และนับสัญญาณพัลส์จากเซนเซอร์วัดความเร็ว หากสวิตช์อยู่สถานะ OFF ระบบจะสั่งรีเลย์ตัดไฟเลี้ยงเพื่อหยุดมอเตอร์ หากอยู่สถานะ ON รีเลย์จะจ่ายไฟให้บอร์ดควบคุมความเร็ว โดยความเร็วรอบจะแปรผันตามแรงดันเฉลี่ยจากการหมุนสวิตช์วอลุ่มโดยตรง จากนั้นระบบจะส่งเฟรมข้อมูลสถานะและความเร็วผ่านสาย CAN High และ CAN Low ไปยังจอแสดงผล

2.3 โมดูลระบบปัดน้ำฝน

จากรูปที่ 3 เริ่มจากอ่านค่าแรงดันอนาลอกจาก Slide Potentiometer เพื่อแบ่งช่วงสภาวะอินพุตเป็น 4 ระดับ หากเป็นระดับ 0 ระบบจะล็อกเซอร์โวมอเตอร์ไว้ที่จุดจอดเริ่มต้น หากเป็นระดับ 1-3 จะหน่วงเวลาการเคลื่อนที่สลับไป-กลับของเซอร์โวมอเตอร์ตามความเร็วที่เลือก จากนั้นจะจัดโครงสร้างข้อมูลระดับดังกล่าวส่งผ่านเครือข่าย CAN



รูปที่ 2 ผังงานการทำงานของระบบขับเคลื่อนและควบคุมความเร็ว

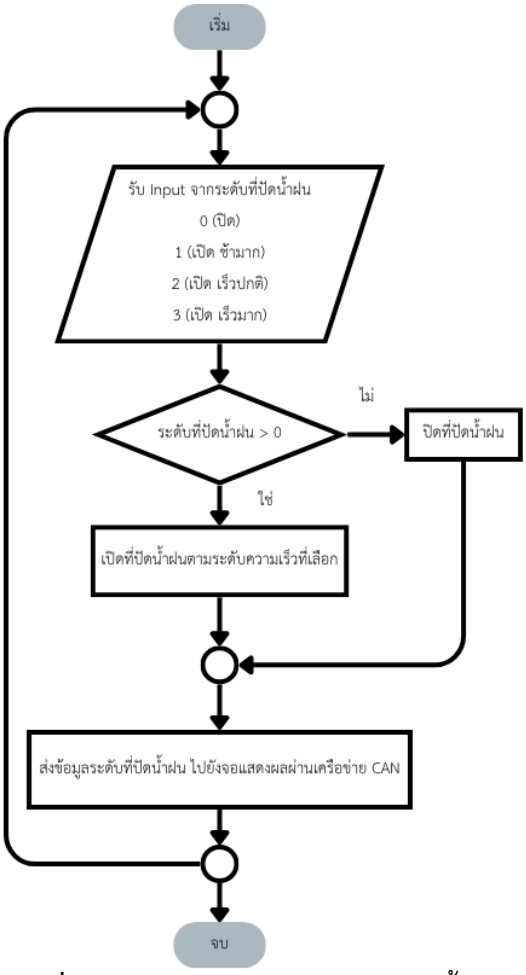
2.4 โมดูลระบบแสงสว่าง

จากรูปที่ 4 เริ่มจากการอ่านค่าจากชุดสวิตช์และเซนเซอร์วัดความเข้มแสง แล้วแยกประมวลผลเป็น 3 ฟังก์ชันย่อยก่อนส่งข้อมูลรวมผ่านเครือข่าย CAN:

ระบบไฟหน้า: จากรูปที่ 5 ทำการ เปิด/ปิด ไฟหน้าตามอินพุตจากสวิตช์

ระบบไฟเลี้ยว: จากรูปที่ 6 ทำงานผ่านสวิตช์ 3 จังหวะ (เลี้ยวซ้าย/ขวา) และสวิตช์กดไฟฉุกเฉิน โดยระบบจะกำหนดลำดับความสำคัญให้ไฟฉุกเฉินทำงานก่อนไฟเลี้ยวเสมอเมื่อมีการเปิดใช้งานพร้อมกัน

ระบบไฟเพดาน: จากรูปที่ 7 ปรับหรี่ความเข้มแสงผ่านสวิตช์วอลุ่มบนบอร์ดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เป็นอิสระ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าความเข้มแสงจากเซนเซอร์เพื่อส่งต่อไปยังบัส CAN



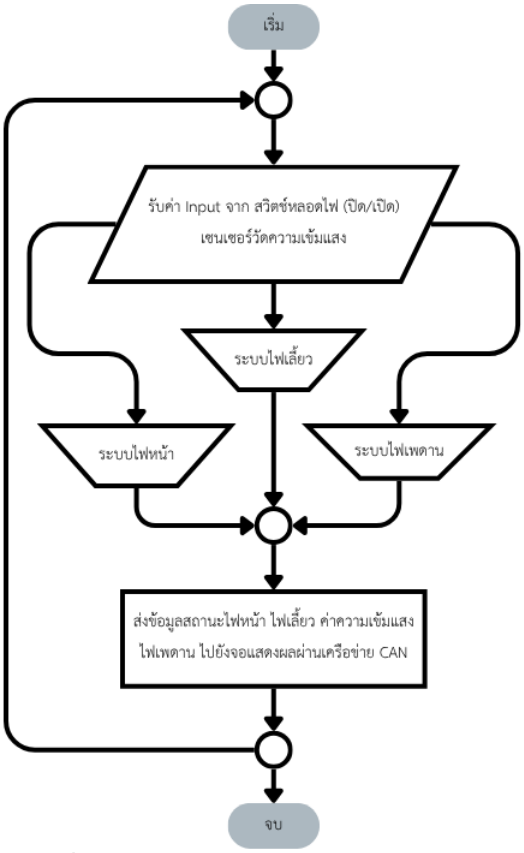
รูปที่ 3 ผังงานการทำงานของระบบปัดน้ำฝน

2.5 โมดูลระบบปรับอากาศ

จากรูปที่ 8 เริ่มจากอ่านสถานะสวิตช์และอ่านค่าสภาพอากาศจากเซนเซอร์ DHT22 หากสวิตช์ปิด รีเลย์จะตัดไฟระบบ หากสวิตช์เปิด รีเลย์จะจ่ายไฟแรงดัน 12V ให้แผ่นเพลเทียร์และชุดพัดลมเพื่อสร้างและกระจายความเย็นผ่านกล่องจำลองห้องโดยสาร จากนั้นข้อมูลสถานะ อุณหภูมิ และความชื้นจะถูกจัดลงเฟรมข้อมูล CAN เพื่อส่งไปยังโหนดจอแสดงผล

2.6 โมดูลจอแสดงผลส่วนกลาง

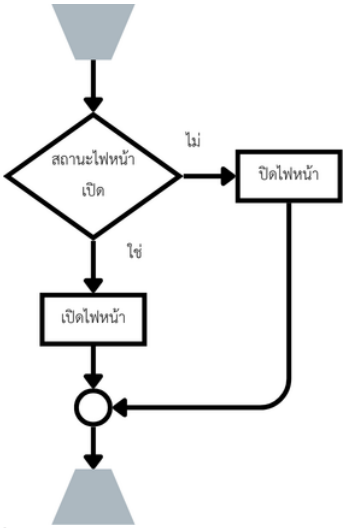
ทำหน้าที่ดักรับเฟรมข้อมูลจากทุกโหนดผ่านโมดูลแปลงสัญญาณ CAN และประมวลผลแสดงภาพกราฟิกบนหน้าจอสัมผัส TFT ขนาด 2.8 นิ้ว ผ่านโปรโตคอล SPI โดยแบ่งข้อมูลเป็น 3 หน้าต่างหลัก ดังรูปที่ 10 ได้แก่ Screen 1: แสดงมาตรวัดความเร็ว (km/hr) และความเร็วรอบ (r/min) พร้อมสถานะรถยนต์, Screen 2: แสดงโมเดลรถยนต์มุมมองหน้าพร้อมสถานะไฟสัญญาณและค่าความเข้มแสง (lux), และ Screen 3: แสดงระดับที่ปัดน้ำฝน (0-3) ควบคู่กับสถานะเครื่องปรับอากาศ ค่าอุณหภูมิ (°C) และความชื้น (%)



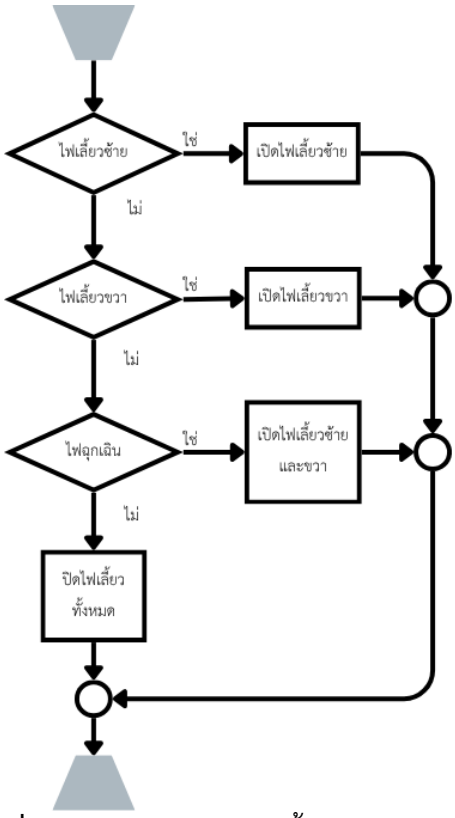
รูปที่ 4 ผังงานหลักระบบแสงสว่างยานยนต์

2.7 โครงสร้างและการจัดวางโมดูลของชุดฝึก

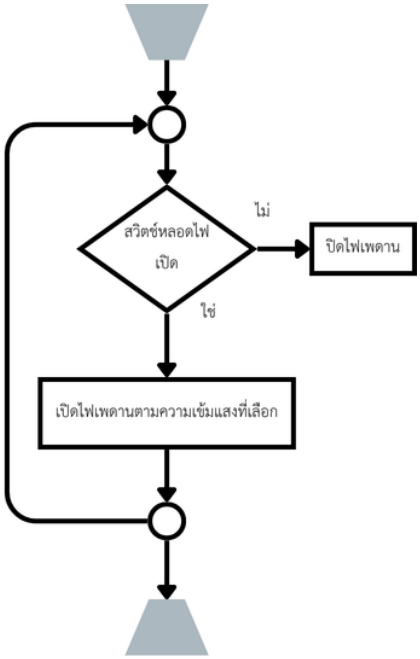
โครงสร้างกายภาพแสดงดังรูปที่ 11 โดยแบ่งการจัดวางโมดูลบนแผงสาธิตเพื่อจำลองสถาปัตยกรรมรถยนต์จริงดังนี้: มุมบนซ้ายติดตั้งระบบปรับอากาศ, กึ่งกลางบนติดตั้งระบบปัดน้ำฝน, มุมบนขวาติดตั้งจอแสดงผล, มุมล่างซ้ายติดตั้งระบบขับเคลื่อน และมุมล่างขวาติดตั้งระบบแสงสว่าง โดยทุกโหนดเชื่อมต่อกันด้วยสายบัสคู่บิดเกลียวสีเขียว-เหลือง



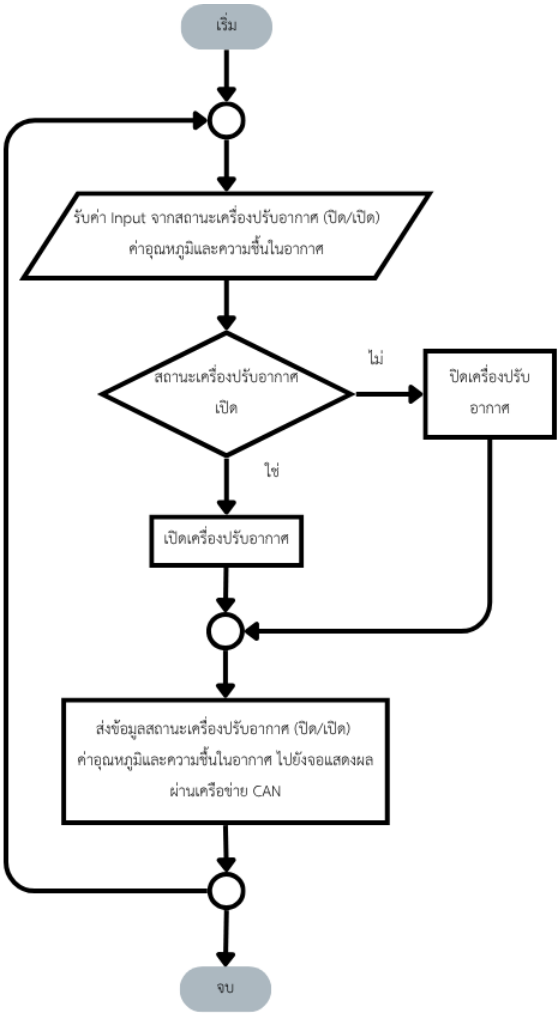
รูปที่ 5 ผังงานย่อยระบบไฟหน้ารถยนต์



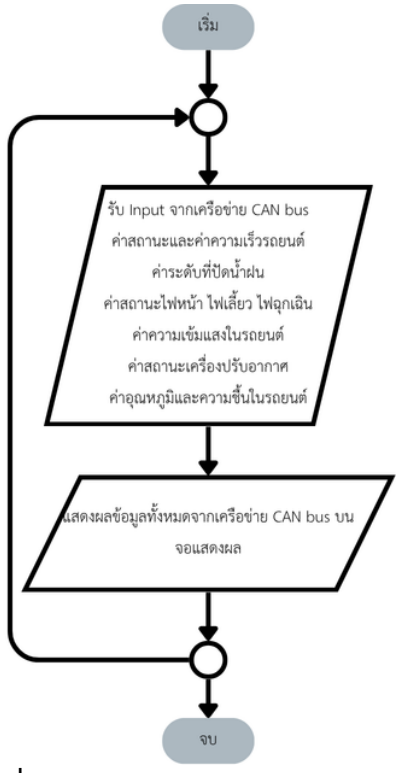
รูปที่ 6 ผังงานย่อยระบบไฟเลี้ยวและไฟฉุกเฉิน



รูปที่ 7 ผังงานย่อยระบบไฟเพดาน



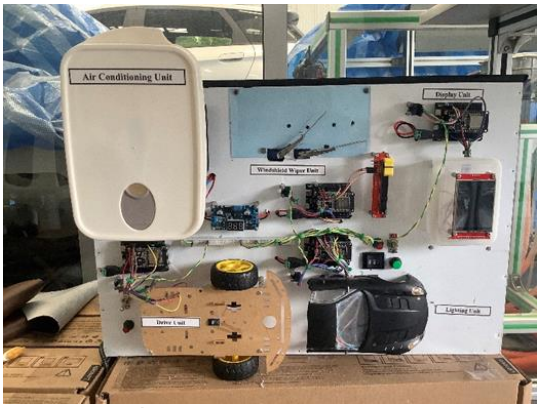
รูปที่ 8 ผังงานการทำงานของระบบปรับอากาศ



รูปที่ 9 ผังงานการทำงานของจอแสดงผล



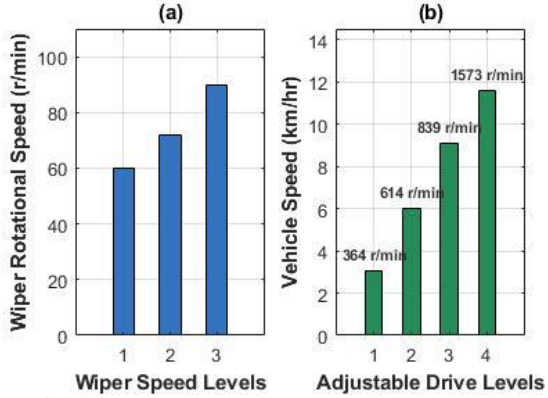
รูปที่ 10 หน้าจอแสดงผลทั้ง 3 หน้า



รูปที่ 11 โครงสร้างชุดฝึกจำลอง

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการตอบสนองของระบบปัดน้ำฝนจำลอง โดยการปรับสวิตช์อินพุตเพื่อแปรเปลี่ยนระดับความเร็วจากระดับ 1 ถึง 3 จากนั้นทำการวัดค่าความเร็วรอบในการกวาดไป-กลับจริงของใบปัดน้ำฝนที่ควบคุมด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งผลการวัดความเร็วรอบในแต่ละระดับแสดงดังรูปที่ 12(a)



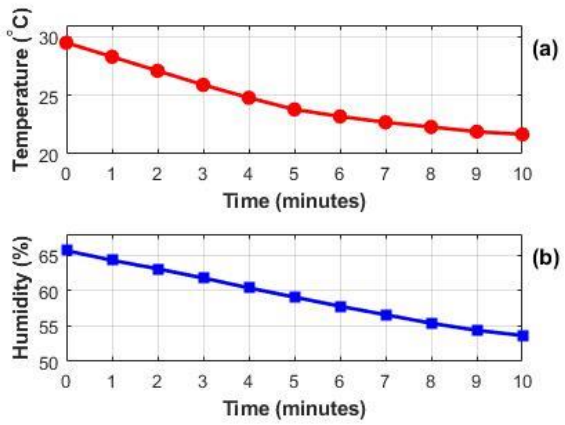
รูปที่ 12 ผลการทดสอบความเร็วระบบควบคุมใบปัดน้ำฝน (a) และผลการทดสอบความเร็วรอบและระบบขับเคลื่อน (b)

จากผลการทดลองในรูปที่ 12(a) พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนระดับการควบคุมที่โมดูลระบบปัดน้ำฝน ระบบสามารถแปรผันความเร็วรอบการทำงานได้อย่างแม่นยำและเป็นขั้นบันได โดยในระดับ 1 ให้ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ 60 r/min เมื่อขยับขึ้นเป็นระดับ 2 ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเป็น 72 r/min และในระดับ 3 ซึ่งเป็นระดับสูงสุด ระบบสามารถขับกำลังทางกลให้มีความเร็วรอบสูงถึง 90 r/min ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ตัวแปรคาบเวลาการหน่วงพัลส์เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมของ ESP32 สามารถตอบสนองต่อค่าอินพุตได้อย่างเที่ยงตรง

ต่อมาทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนจำลอง โดยการปรับหมุนสวิตช์วอลุ่ม ไปยังตำแหน่งขีดระดับที่ผู้จัดทำกำกับไว้รอบตัวสวิตช์ ตั้งแต่ขีดที่ 0 (หยุดนิ่ง) ไปจนถึงระดับสูงสุด (Max) จากนั้นทำการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

(r/min) ควบคู่กับค่าความเร็วของรถยนต์จำลองที่เกิดขึ้นจริงในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr) โดยทำการทดลองซ้ำในแต่ละระดับทั้งหมด 100 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12(b)

จากผลการทดลองในรูปที่ 12(b) พบว่าเมื่อปรับเพิ่มตำแหน่งขีดระดับของสวิตช์วอลุ่ม บอร์ดควบคุมกำลังไฟฟ้าจะแปรผันแรงดันเฉลี่ยจ่ายให้แก่มอเตอร์ ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ขยับสูงขึ้นเป็นขั้นตามลำดับ ได้แก่ 364, 614, 839 และสูงสุดที่ 1,573 r/min ตามตำแหน่งการหมุน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบทางกลนี้เป็นต้นเหตุสอดคล้องโดยตรงที่ช่วยขับเคลื่อนให้รถของเล่นจำลองมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยวัดค่าความเร็วได้เท่ากับ 3.05, 6.02, 9.09 และสูงสุดที่ 11.58 km/hr ตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบมีความแม่นยำในการวัดและควบคุมความเร็วอยู่ในเกณฑ์ดี มีความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีเพียงเล็กน้อย และตัวไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผลคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งสองร่วมกันได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 13 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบการลดอุณหภูมิ (a) และความชื้นสัมพัทธ์ (b) ตามระยะเวลา

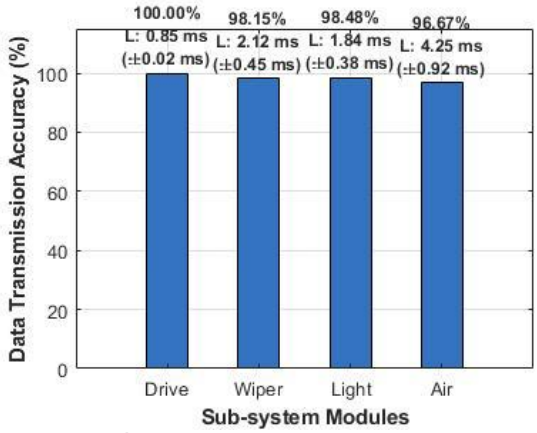
ต่อมาทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นเพลเทียร์ภายในกล่องจำลองห้องโดยสาร โดยเปิดระบบทิ้งไว้และบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม/อุณหภูมิห้องภายนอกเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 29.50°C ผลการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อเปิดระบบปรับอากาศจำลองทิ้งไว้ ชุดแผ่นทำความเย็นเพลเทียร์และพัดลมหมุนเวียนอากาศสามารถทำงานร่วมกันเพื่อลดอุณหภูมิและควบคุมความชื้นภายในกล่องทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิภายในกล่องลดลงจากเริ่มต้น 29.50°C (ซึ่งเป็นจุดที่อุณหภูมิภายในกล่องเท่ากับอุณหภูมิห้องภายนอก) ลงมาอยู่ที่ 21.67°C ณ นาทีที่ 10 สามารถลดอุณหภูมิลงได้ถึง 7.83°C ควบคู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลงจากร้อยละ 65.67 ลงมาอยู่ที่ร้อยละ 53.67 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกล่องลดลงต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ไอน้ำในอากาศจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะที่แผงระบายความเย็น ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลงตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากอัตราการลดลงของอุณหภูมิ พบว่าในนาทีแรก ๆ อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วประมาณ 1.0°C - 1.3°C ต่อนาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปเกิน 6 นาที อัตราการลดลงจะเริ่มชะลอตัวลงเหลือประมาณ 0.5°C - 0.6°C ต่อนาที เนื่องมาจากผลกระทบของอุณหภูมิห้องภายนอก (29.50°C) ที่เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกล่องทดสอบย้อนกลับเข้ามาภายใน ประกอบกับขีดจำกัดในการระบายความร้อนฝั่งด้านร้อนของแผ่นเพลเทียร์

ในการประเมินประสิทธิภาพความเสถียรและความเร็วในการรับส่งข้อมูลของชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ทำการบันทึกข้อมูลสถิติด้านการสื่อสารของโมดูลระบบย่อยทั้ง 4 โมดูล ผ่านการส่งสัญญาณทดสอบซ้ำโมดูลละ 50 ครั้ง ผลการทดสอบเชิงปริมาณแสดงดังรูปที่ 14

จากผลการทดลองในรูปที่ 14 พบว่าภาพรวมของระบบเครือข่าย CAN Bus มีสมรรถนะและเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูลอยู่ในเกณฑ์สูงมาก โดยระบบขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพสูงสุด มีอัตราความสำเร็จในการรับส่งข้อมูลเต็มร้อยละ 100 และมี

ความหน่วงเวลาเฉลี่ยต่ำที่สุดเพียง 0.85 ms (± 0.02 ms) ถัดมาคือระบบแสงสว่างและระบบปัดน้ำฝน ซึ่งมีอัตราความสำเร็จใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 98.48 และ 98.15 ตามลำดับ โดยมีค่าความหน่วงเวลาเฉลี่ยไม่เกิน 2.12 ms



รูปที่ 14 สมรรถนะเครือข่าย CAN Bus

ขณะที่ระบบปรับอากาศมีอัตราความสำเร็จต่ำที่สุดที่ร้อยละ 96.67 และมีความหน่วงเวลาเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.25 ms (± 0.92 ms) ซึ่งความหน่วงที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากโมดูลระบบปรับอากาศต้องใช้เวลาในประมวลผลและการแปลงสัญญาณอนาล็อกจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นก่อนทำการส่งข้อมูลข้ามเครือข่าย อย่างไรก็ตาม ค่าความหน่วงเวลาเฉลี่ยรวมของทุกระบบย่อยยังคงต่ำกว่า 5 ms ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการแสดงผลแบบเรียลไทม์ และยอมรับได้สำหรับมาตรฐานการสื่อสารในยานยนต์

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาชุดฝึกยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับเครือข่าย CAN bus พร้อมจอแสดงผล ที่จำลองสถาปัตยกรรมระบบควบคุมในรถยนต์ โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ประมวลผลแยกตามโหนดฟังก์ชันหลัก 5 ระบบ ได้แก่ ระบบขับเคลื่อน ระบบปัดน้ำฝน ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และระบบจอแสดงผลอัจฉริยะ ผลการทดสอบเชิงวิศวกรรมชี้ให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพสูง โดยมีอัตราความถูกต้องแม่นยำในการรับส่งข้อมูลเฉลี่ยร้อยละ 98.32 และมีความหน่วงเวลาในการสื่อสารต่ำกว่า 5 ms ชุดฝึกทักษะทางกายภาพนี้จึงมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน เพื่อเสริมสร้างความเข้าใจในพฤติกรรมการสื่อสารข้อมูลและการออกแบบอินเทอร์เฟซในระบบยานยนต์สมัยใหม่ได้อย่างเป็นรูปธรรม

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Zhang, C. (2021). “Research on the Real-time Performance of CAN Bus Based on 4WID New Energy Bus Network.” 2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT): 24-28.

[2] Naqvi, S. S. A., et al. (2024). “Evolving Electric Mobility Energy Efficiency: In-Depth Analysis of Integrated Electronic Control Unit Development in Electric Vehicles.” IEEE Access 12: 15957-15983.

[3] He, Yu, and Gui-he Qin. (2009). “Implementation of interface between vehicle bus network and on-vehicle information system.” 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications: 1016-1019.

[4] Li, F., L. Wang, and C. Liao. (2008). “CAN (Controller Area Network) Bus Communication System Based on Matlab/Simulink.” 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing: 1-4.

[5] Bimmo, H. Aryo, and B. Rahardjo. (2025). “Fed-CALiBER: Federated Lightweight BERT Intrusion Detection on CAN Bus Protocol in Autonomous Vehicle.” IEEE Access 13: 172384-172401.

การทดสอบสมรรถนะระบบขับเคลื่อนภายใต้สภาวะบรรทุกของหุ่นยนต์อารักขาพืชสำหรับแปลงผักกลางแจ้ง

Mobility Testing of a Plant Protection Robot Under Payload Conditions for Outdoor Vegetable Plots

รัฐศาสตร์ ลายกนก[1,*], นิทัศน์ สุริยะกาญจน์[2], พิเชฐ เกล็ดงูเหลือม[3], ภาณุวัฒน์ ศรีสังข์[4] และ ณัฐวัฒน์ คนตรง[5]

[1] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: Rattasat.L@nrru.ac.th, 0842457259

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของหุ่นยนต์อารักขาพืชสำหรับแปลงผักกลางแจ้ง โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาการบังคับเลี้ยวและการทรงตัวบนพื้นผิวเกษตรกรรมด้วยระบบขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระร่วมกับกลไกข้อต่อพ่วงเชื่อม ภายใต้ภาระบรรทุกของเหลวทางการเกษตร 100 ลิตร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทรงตัวและการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ในสภาวะแวดล้อมเปิด ผลการทดลองพบว่า หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนพื้นราบแข็งได้ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยสูงสุด 3.21 ± 0.15 เมตรต่อวินาที สำหรับพื้นทราย หุ่นยนต์สามารถรักษาความเร็วได้อย่างสม่ำเสมอที่อัตราเร็วเฉลี่ย 2.72 ± 0.10 เมตรต่อวินาที แม้จะอยู่ภายใต้พื้นผิวที่มีความต้านทานสูง ในขณะที่บนพื้นดินขรุขระอัตราเร็วเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ 1.88 ± 0.13 เมตรต่อวินาที เนื่องจากสภาพผิวที่ไม่เรียบ และบนพื้นลาดเอียง 30 องศา อัตราเร็วเฉลี่ยลดลงต่ำสุดเหลือ 0.71 ± 0.19 เมตรต่อวินาที เนื่องจากผลกระทบร่วมระหว่างมุมลาดชันและภาระบรรทุกหนัก ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าระบบขับเคลื่อนและกลไกที่พัฒนาขึ้นช่วยให้หุ่นยนต์ทำงานได้อย่างต่อเนื่องแม้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มั่นคง และเพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวเข้ากับงานเกษตรกรรมที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: หุ่นยนต์อารักขาพืช, สมรรถนะการเคลื่อนที่, การควบคุมระยะไกล

Abstract

This paper presents a performance evaluation of the mobility and stability of a plant protection robot developed for outdoor vegetable plots under a fluid payload of 100 liters, which is a critical factor directly affecting the robot's balance and velocity control in open environments. To overcome steering and traction limitations on agricultural surfaces, an independent four-wheel-drive system integrated with a linkage mechanism was implemented. The experimental results reveal that the robot achieved its maximum average speed on flat hard ground at 3.21 ± 0.15 m/s. On sandy terrain, the robot maintained a highly consistent velocity with an average speed of 2.72 ± 0.10 m/s despite the high surface resistance. Meanwhile, on rough soil terrain, the average speed decreased to 1.88 ± 0.13 m/s due to surface irregularities. Under the most challenging condition on a 30-degree inclined slope, the average speed dropped to its lowest at 0.71 ± 0.19 m/s as a result of the combined effects of the steep incline and heavy payload. The experimental outcomes confirm that the robot can operate continuously even in unstable environments, demonstrating its capacity to adapt to diverse agricultural tasks.

Keywords: Plant Protection Robot, Mobility Performance, Remote Control

1. บทนำ

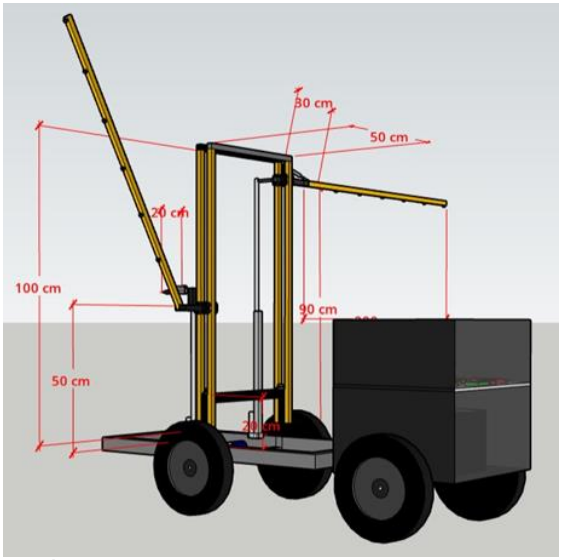
แปลงผักกลางแจ้งในปัจจุบันกำลังเผชิญปัญหาการขาดแคลนแรงงานเกษตรกรที่มีทักษะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากร ส่งผลให้คุณภาพผลผลิตลดลงและความยากลำบากในการดูแลรักษาเพิ่มสูงขึ้น เทคโนโลยีหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการทดแทนแรงงานมนุษย์ในภารกิจที่ซ้ำ ๆ [1] รวมถึงการพัฒนาระบบกำจัดวัชพืชอัตโนมัติเพื่อลดงานหนักและลดการใช้สารเคมีในแปลงปลูก [2] ทิศทางการวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นการเพิ่มความฉลาดให้แก่หุ่นยนต์ผ่านระบบซอฟต์แวร์และการรับรู้ขั้นสูง เช่น การจำแนกโซนแปลงเพื่อจ่ายปุ๋ย [3] การใช้โมเดล YOLOv8 ตรวจจับโรคพืชเพื่อสั่งการรดน้ำเฉพาะจุด [4] การใช้ Deep Learning ในระบบนำทางและการพ่นสารเคมีอย่างแม่นยำ [5] ตลอดจนการใช้กล้องตรวจจับความลึก (Depth Camera) เพื่อสร้างแผนที่นำทางภายใต้ทรงพุ่มไม้ในสภาพแสงเปิดกลางแจ้ง [6]

อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการปฏิบัติงานจริงไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบซอฟต์แวร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับสมรรถนะของแพลตฟอร์มขับเคลื่อนภาคพื้นดิน แม้ที่ผ่านมาจะมีการศึกษาหุ่นยนต์พ่นสารควบคุมไร้สายในแปลงพืชเฉพาะทาง [7] และการออกแบบหุ่นยนต์ขับเคลื่อนเพื่อการฉีดพ่นที่มีความคล่องตัวสูงในพื้นที่จำกัด [8] แต่ความท้าทายสำคัญที่ยังคงอยู่คือ "เสถียรภาพการเคลื่อนที่ภายใต้ภาระบรรทุกของเหลวปริมาณมากในสภาพแวดล้อมที่แปรปรวน" การที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับของเหลวพิกัด 100 ลิตร (ประมาณ 100 กิโลกรัม) วิ่งผ่านภูมิประเทศจริง เช่น พื้นทราย พื้นดินขรุขระ หรือทางลาดชันสูงถึง 30 องศา มวลของเหลวที่กระฉอกจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพการทรงตัวและทำให้ความเร็วขับเคลื่อนผันผวน ซึ่งส่งผลเสียต่อความแม่นยำในการกระจายของเหลวหรือพ่นสารในลำดับถัดไป

บทความวิชาการฉบับนี้จึงมุ่งเน้นประเมินสมรรถนะการเคลื่อนที่ (Mobility) และเสถียรภาพของหุ่นยนต์อารักขาพืชที่พัฒนาขึ้น ภายใต้เงื่อนไขโหลดของเหลวเต็มพิกัด 100 ลิตร ผ่านการทดสอบเชิงประจักษ์บนสภาพภูมิประเทศจริง 4 รูปแบบ เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วและขีดจำกัดการไต่ทางลาดชัน ข้อมูลสถิติที่ได้จะใช้เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการออกแบบอัลกอริทึมควบคุมความเร็วอัตโนมัติเพื่อชดเชยกำลังและเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงานจริงต่อไป

2. วิธีการดำเนินงาน

การประเมินสมรรถนะหุ่นยนต์อารักขาพืชในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและทดสอบโครงสร้างทางกลร่วมกับระบบขับเคลื่อนเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขภาระบรรทุก โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์อารักขาพืช

2.1 การออกแบบโครงสร้างทางกลและระบบขับเคลื่อน

ดังรูปที่ 1 ตัวโครงสร้างหลักของหุ่นยนต์ถูกออกแบบขึ้นโดยใช้เหล็กกัลวาไนซ์ (Galvanized Steel) เพื่อคุณสมบัติในการป้องกันสนิมและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเปิดประเภทร่องแปลงผักกลางแจ้งที่มีความชื้นและฝุ่นละอองสูง มิติโครงสร้างของหุ่นยนต์ถูกกำหนดให้มีความกว้างฐานล้อ 50-60 เซนติเมตร และความสูงโครงสร้างหลัก 90-100

เซนติเมตร เพื่อความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ระหว่างร่องแปลงผัก



รูปที่ 2 ชุดล้อติดตั้งมอเตอร์และโครงสร้างของหุ่นยนต์

ระบบขับเคลื่อนเป็นระบบขับเคลื่อน 4 ล้ออิสระ (4-Wheel Drive) ดังรูปที่ 2 ใช้ยางออฟโรดประเภทดอกยางลึกขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร เพื่อลดโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ล้อฟรีและติดหล่มในชั้นดิน ต้นกำลังติดตั้งมอเตอร์สกู๊ตเตอร์กระแสตรง (DC Scooter Motor) จำนวน 4 ตัว พิกัดกำลังตัวละ 24 โวลต์ 250 วัตต์ อัตราความเร็วรอบพิกัด 75 รอบต่อนาที แหล่งจ่ายพลังงานหลักใช้แบตเตอรี่เพื่อการขับเคลื่อน ส่งกำลังสัญญาณควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 Pro Mini ร่วมกับโมดูลรีโมทคอนโทรลไร้สายความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ขนาด 10 ช่องสัญญาณ ระยะสั่งการไม่น้อยกว่า 100 เมตร

2.2. การปรับปรุงกลไกเพื่อเสถียรภาพและภาระบรรทุก

เนื่องจากแพลตฟอร์มดั้งเดิมมีโครงสร้างแบบแข็งเกร็ง (Rigid Frame) ส่งผลให้การเลี้ยวบนพื้นผิวที่มีความต้านทานสูงหรือโคลนตมทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงโครงสร้างโดย "การเพิ่มกลไกต่อพ่วงเชื่อม (Articulated Joint) ระหว่างชุดขับเคลื่อนด้านหน้าและชุดบรรทุกด้านหลัง" ซึ่งกลไกนี้ช่วยลดรัศมีวงเลี้ยว เพิ่มความยืดหยุ่นในการกระจายน้ำหนัก และรักษาสมดุลหน้าสัมผัสของยางบนสภาพผิวที่ต่างระดับ โดยหุ่นยนต์ถูกติดตั้งถังบรรจุของเหลวคู่เพื่อจำลองภาระโหลดเต็มพิกัดในการปฏิบัติงานจริงที่ปริมาตรรวม 100 ลิตร (เทียบเท่าน้ำหนักบรรทุกโหลดประมาณ 100 กิโลกรัม)

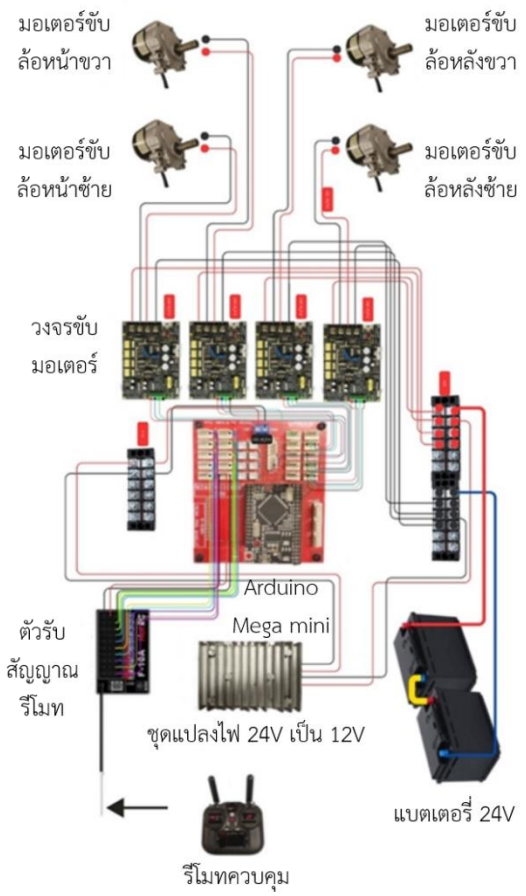


รูปที่ 3 กลไกต่อพ่วงเชื่อมระหว่างชุดขับเคลื่อนและชุดบรรทุก

2.3 สถาปัตยกรรมระบบควบคุมและระบบจัดสรรพลังงาน

จากรูปที่ 4 ระบบควบคุมการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ถูกออกแบบบนพื้นฐานสถาปัตยกรรมขับเคลื่อน 4 ล้ออิสระ (Independent 4-Wheel Drive) โดยมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega mini เป็นหน่วยประมวลผลหลัก (Main Processing Unit) ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมไร้สายแบบ PWM/PPM จากรีโมทคอนโทรลความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ผ่านตัวรับสัญญาณวิทยุ (RC Receiver) จากนั้นประมวลผลเพื่อแปลงค่าเป็นความเร็วและทิศทาง ก่อนส่งสัญญาณควบคุมความกว้างพัลส์ (PWM) แยกส่วนไปยังวงจรขับมอเตอร์ (Motor Driver) แบบ H-Bridge ทั้ง 4 ชุด ทำให้สามารถควบคุมการเลี้ยวและการกระจายแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) แต่ละล้อได้อย่างอิสระ ส่งผล

ให้หุ่นยนต์มีความคล่องตัวและทรงประสิทธิภาพในการรองรับภาระโหลดที่ผันผวน



รูปที่ 4 แผนผังวงจรควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ด้านระบบบริหารจัดการพลังงาน (Power Distribution System) ใช้แบตเตอรี่พิกัด 24 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังหลัก (Main Power Source) ให้แก่วงจรขับมอเตอร์ที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง และใช้ชุดแปลงแรงดันไฟฟ้าลง (DC-to-DC Buck Converter) เพื่อลดระดับแรงดันจาก 24 โวลต์ เหลือ 12 โวลต์ สำหรับเลี้ยงระบบควบคุมและอุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุ นอกจากนี้ได้ติดตั้งแผงกระจายกำลังไฟฟ้า (Power Distribution Board) และบัสบาร์ทองเหลืองเพื่อจัดระเบียบสายไฟ ลดความสูญเสียในระบบ และร่วมกับการออกแบบระบบกราวด์ร่วม (Common Ground) เพื่อรักษาเสถียรภาพของสัญญาณควบคุมและลดสัญญาณรบกวน (Noise) ภายใต้สภาวะปฏิบัติงานจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลสูง



รูปที่ 5 หุ่นยนต์อารักพืชที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมการบรรจุโหลด

ในงานวิจัยนี้จะใช้รีโมทคอนโทรล 2.4 กิกะเฮิรตซ์ 10 ช่องสัญญาณ โดยได้มีการกำหนดช่องสัญญาณของอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลให้สอดคล้องกับหน้าที่การทำงานของส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์อย่างเป็นระบบ โดยช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในทิศทางเดินหน้า ถอยหลัง และการเลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา ทั้งนี้ช่องสัญญาณที่เหลือจะถูกใช้สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5

2.4 การคำนวณความเร็ว

ในการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้น (v) คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเชิงเส้นที่เคลื่อนที่ได้จริง (s) ต่อหน่วยเวลา (t) ดังสมการ

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

ESTACON 2026 | 17th

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบการเลี้ยวของหุ่นยนต์อารักขาพืชที่พัฒนาขึ้น ถูกนำไปเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะกับงานวิจัยของ [9] ซึ่งใช้ระบบขับเคลื่อนที่อาศัยการขยับมุมล้อเลี้ยว (Steering Angle) ซึ่งแม้ระบบดังกล่าวจะทำงานได้ดีในพื้นที่เรียบ แต่อัตราการตอบสนองเชิงกลจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเผชิญกับสภาพพื้นที่ขรุขระ ลาดเอียง หรือพื้นทราย

ในงานวิจัยนี้จึงได้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบระบบขับเคลื่อนอิสระ 4 ล้อ (4-Wheel Skid-Steer / Differential Drive) ที่อาศัยการควบคุมความเร็วรอบที่แตกต่างกันของมอเตอร์แต่ละฝั่งเพื่อสร้างแรงบิดในการเลี้ยว ส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถรักษาเสถียรภาพและควบคุมทิศทางการเลี้ยวในแปลงเกษตรกรรมกลางแจ้งที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอและมีความลาดเอียงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า

ตารางที่ 1 ทิศทางการหมุนของมอเตอร์สัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ทิศทางการเคลื่อนที่	มอเตอร์			
	หน้าซ้าย	หลังซ้าย	หน้าขวา	หลังขวา
หยุด	Stop	Stop	Stop	Stop
เดินหน้า	FW 100%	FW 100%	FW 100%	FW 100%
ถอยหลัง	BW 100%	BW 100%	BW 100%	BW 100%
เลี้ยวซ้าย	FW 50%	FW 20%	FW 100%	FW 20%
เลี้ยวขวา	FW 100%	FW 20%	FW 50%	FW 20%
ถอยซ้าย	BW 20%	BW 50%	BW 20%	BW 100%
ถอยขวา	BW 20%	BW 100%	BW 20%	BW 50%

จากตารางที่ 1 การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อน 4 ล้ออิสระผ่านสัญญาณ PWM ร่วมกับกลไกต่อพ่วงเชื่อม เพื่อควบคุมทิศทางแบบ Skid-steering ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถกระจายแรงบิดเพื่อเปลี่ยนทิศทางได้อย่างแม่นยำ โดยเมื่อสั่งการเดินหน้าหรือถอยหลัง มอเตอร์ทั้ง 4 ตัวจะทำงานร่วมกันเต็มพิกัด (FW 100% หรือ BW 100%)

สำหรับจังหวะการเลี้ยวโค้งภายใต้ภาระบรรทุก ระบบจะใช้วิธีควบคุมความเร็วรอบที่แตกต่างกัน (Differential Speed) เพื่อชดเชยรัศมีวงเลี้ยวและแรงเสียดทานผิวสัมผัส เช่น ในการเลี้ยวซ้าย มอเตอร์ล้อหน้าขวาจะถูกเร่งกำลังสูงสุด (FW 100%) ร่วมกับล้อหน้าซ้าย (FW 50%) ในขณะที่ล้อคู่หลังซ้ายและขวาจะรักษาความเร็วรอบต่ำที่ FW 20% เพื่อประคองเสถียรภาพและลดการสไลด์ไถลบนพื้นผิวอ่อนนุ่ม ในทางกลับกันการเลี้ยวขวาจะใช้อัตราส่วนกำลังที่สมมาตรตรงกันข้าม ซึ่งการจัดสรรกำลังในลักษณะนี้ช่วยให้โครงสร้างข้อต่อพ่วงสามารถบิดตัวและพาหุ่นยนต์เลี้ยวในพื้นที่จำกัดของร่องแปลงผักได้โดยที่มอเตอร์ไม่เกิดสภาวะโอเวอร์โหลด

การทดสอบอัตราการเคลื่อนที่เชิงเส้นมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินเสถียรภาพระบบควบคุมและมอเตอร์ภายใต้สภาวะบรรทุกของเหลว 100 ลิตร ในสภาพแวดล้อมจริง โดยกำหนดระยะทางคงที่ 10 เมตรสำหรับพื้นราบ (พื้นราบแข็ง, พื้นทราย, พื้นขรุขระ) และระยะทาง 2 เมตรสำหรับพื้นลาดเอียง ทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นถึงจุดสิ้นสุดด้วยระบบจับเวลาดิจิทัลเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้งในแต่ละสภาวะ เพื่อใช้เป็นข้อมูลฐานในการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงโครงสร้างและกำลังของระบบขับเคลื่อน

เพื่อประเมินขีดความสามารถเชิงพลศาสตร์และผลกระทบของน้ำหนักโหลดที่มีต่อสมรรถนะการขับเคลื่อน การทดลองได้จำลองสถานการณ์ปฏิบัติงานภาคสนามจริงในสภาพแวดล้อมเปิด โดยเปรียบเทียบระหว่าง "สภาวะไม่บรรทุกน้ำ" ในตารางที่ 2 (น้ำหนัก

แพลตฟอร์มเปล่า) และ "สภาวะบรรทุกของเหลวเต็มพิกัด 100 ลิตร" ในตารางที่ 3 (น้ำหนักโหลดชดเชยประมาณ 100 กิโลกรัม) บนสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ทำการเก็บข้อมูลความเร็วรูปแบบละ 10 ครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2 อัตราเร็วของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ โดยไม่บรรทุกน้ำ

ครั้งที่	อัตราเร็ว (เมตรต่อวินาที)			
	พื้นราบ	พื้นทราย	พื้นขรุขระ	ลาดเอียง
1	5.5	4.5	3.8	2.1
2	5.5	4.6	3.7	2.2
3	5.3	4.5	3.5	2.1
4	5.4	4.5	3.8	2.0
5	5.6	4.6	3.7	1.8
6	5.5	4.5	3.5	1.9
7	5.2	4.3	3.8	1.8
8	5.4	4.6	3.5	1.8
9	5.5	4.5	3.7	2.1
10	5.5	4.3	3.7	2.0
ค่าเฉลี่ย	5.44	4.49	3.67	1.98
S.D.	0.12	0.11	0.12	0.15

ตารางที่ 3 อัตราเร็วของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ โดยบรรทุกน้ำ 100 ลิตร

ครั้งที่	อัตราเร็ว (เมตรต่อวินาที)			
	พื้นราบ	พื้นทราย	พื้นขรุขระ	ลาดเอียง
1	3.2	2.8	1.8	0.7
2	3.1	2.7	1.9	0.5
3	3.2	2.8	2.1	0.4
4	3.0	2.8	1.8	0.5
5	3.4	2.6	1.9	0.9
6	3.2	2.7	1.7	0.8
7	3.5	2.8	1.8	0.9
8	3.2	2.5	2.0	0.7
9	3.2	2.7	2.0	0.9
10	3.1	2.8	1.8	0.8
ค่าเฉลี่ย	3.21	2.72	1.88	0.71
S.D.	0.15	0.10	0.13	0.7

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบอัตราเร็วเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างสภาวะไม่บรรทุกและบรรทุกของเหลว 100 ลิตร

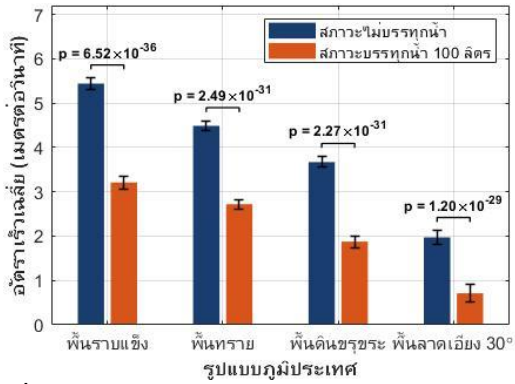
รูปแบบภูมิประเทศ	สภาวะไม่บรรทุกน้ำ (เมตรต่อวินาที)	สภาวะบรรทุกน้ำ 100 ลิตร (เมตรต่อวินาที)	อัตราความเร็วที่ลดลง (%)
พื้นราบแข็ง	5.44 ± 0.12	3.21 ± 0.15	40.99
พื้นทราย	4.49 ± 0.11	2.72 ± 0.10	39.42
พื้นดินขรุขระ	3.67 ± 0.12	1.88 ± 0.13	48.77
พื้นลาดเอียง 30 องศา	1.98 ± 0.15	0.71 ± 0.19	64.14

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราเร็วของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่บนพื้นประเภทต่าง ๆ ในตารางที่ 4 และรูปที่ 6 ผลการทดสอบด้วยสถิติ t-test ยืนยันว่าการเพิ่มภาระโหลดส่งผลให้อัตราเร็วลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสภาพผิวสัมผัส ($p < 10^{-13}$) โดยสามารถจำแนกพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ตามลักษณะทางกายภาพได้ดังนี้:

พื้นราบแข็งและพื้นทราย: เมื่อเพิ่มภาระโหลดของเหลว 100 ลิตร อัตราเร็วเฉลี่ยบนพื้นราบแข็งและพื้นทรายลดลงในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 40% (5.44 → 3.21 เมตรต่อวินาที และ 4.49 → 2.72 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ) ที่น่าสนใจคือบนผิวทรายค่า S.D. แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง (0.11 และ 0.10 เมตรต่อวินาที) แสดงให้เห็นว่าหน้ารับแรงของยางออฟโรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ซม. สามารถกระจายน้ำหนักลงสู่ผิวสัมผัสได้อย่างสม่ำเสมอ และแรงบิดจากมอเตอร์ 250 วัตต์ ทั้ง 4 ตัว มีความเสถียรเพียงพอในการเอาชนะความต้านทานการหมุน (Rolling Resistance) แม้จะมีมวลโหลดเพิ่มขึ้น

พื้นดินขรุขระ: อัตราเร็วเฉลี่ยลดลงเกือบครึ่งหนึ่ง คิดเป็น 48.77% (3.67 → 1.88 เมตรต่อวินาที) และค่า S.D. ปรับตัวสูงขึ้นเล็กน้อย (0.13 เมตรต่อวินาที) เนื่องมาจากโครงสร้างตัวรถต้องปะทะกับความต่างระดับของชั้นดิน แรงกระแทกทางกลส่งผลให้แรงปฏิกิริยาตั้งฉากที่กระทำต่อล้อผันผวนตลอดเวลา อย่างไรก็ตามกลไกต่อพ่วงเชื่อมที่เพิ่มเข้าไปสามารถช่วยบิดตัวเพื่อซับแรงสั่นสะเทือนและรักษาสมดุลไม่ให้หุ่นยนต์สูญเสียการทรงตัว

พื้นลาดเอียง 30 องศา: เป็นสภาวะวิกฤตที่สุด โดยอัตราเร็วลดลงมากถึง 64.14% (1.98 → 0.71 เมตรต่อวินาที) และปรากฏค่าความผันผวนสูงสุด (S.D. = 0.19 เมตรต่อวินาที) พฤติกรรมนี้เกิดจากผลกระทบร่วม (Combined Effect) ระหว่างแรงฉุดตามแนวราบของมุมชัน และการถ่ายเทน้ำหนัก (Weight Transfer) ของเหลวปริมาตร 100 ลิตร ภายในถังที่ไหลเทลงสู่ด้านหลังตามแรงดึงดูดโลก ส่งผลให้จุดศูนย์ถ่วง (CG) เลื่อนต่ำลง มอเตอร์คู่หลังจึงต้องรับภาระโหลดทางกลหนักกว่าปกติทำให้ความเร็วรอบไม่คงที่ชั่วขณะ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชิงประจักษ์นี้ยืนยันขีดจำกัดสูงสุดได้ว่า หุ่นยนต์ยังมีแรงบิดเพียงพอที่จะไม่เกิดสภาวะล้อล็อกหรือไหลลื่นถอยหลัง และสามารถไต่ผ่านอุปสรรคชันได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่บนพื้นประเภทต่าง ๆ

4. สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและประเมินสมรรถนะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อารักขาพืชสำหรับแปลงผักกลางแจ้ง โดยการบูรณาการระบบขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระร่วมกับกลไกข้อต่อพ่วงเชื่อม ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการบังคับเลี้ยวบนพื้นผิวเกษตรกรรมที่มีความต้านทานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดสอบด้วยสถิติ (t-test) ยืนยันว่าการเพิ่มภาระโหลดของเหลวเต็มพิกัด 100 ลิตร ส่งผลให้อัตราเร็วเฉลี่ยของหุ่นยนต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสภาพผิวสัมผัส โดยมีค่านัยสำคัญ (p -value) ระดับน้อยกว่า 10^{-13} ซึ่งบนพื้นราบแข็งและพื้นทราย อัตราเร็วลดลงในสัดส่วนใกล้เคียงกันประมาณ 40% โดยบนพื้นราบแข็งความเร็วลดลงจาก 5.44 เมตรต่อวินาที เป็น 3.21 เมตรต่อวินาที และบนพื้นทรายลดลงจาก 4.49 เมตรต่อวินาที เป็น 2.72 เมตรต่อวินาที ขณะที่บนพื้นดินขรุขระ อัตราเร็วเฉลี่ยลดลง 48.77% โดยลดลงจาก 3.67 เมตรต่อวินาที เป็น 1.88 เมตรต่อวินาที และในสภาวะวิกฤตบนทางลาดเอียง 30 องศา อัตราเร็วเฉลี่ยลดลงสูงสุดถึง 64.14% โดยลดลงจากเดิม 1.98 เมตรต่อวินาที เหลือเพียง 0.71 เมตรต่อวินาที อันเป็นผลกระทบร่วมจากการถ่ายเทน้ำหนักมวลของเหลวลงสู่ด้านหลัง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลสถิติเชิงประจักษ์สามารถยืนยันได้ว่าระบบขับเคลื่อนและ

กลไกพ่วงเชื่อมที่พัฒนาขึ้น มีเสถียรภาพและแรงบิดเพียงพอที่จะรักษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่โดยไม่เกิดสภาวะล้อล็อกหรือไถลถอยหลัง องค์ความรู้และฐานข้อมูลตัวเลขเชิงเปรียบเทียบในบทความนี้ จะถูกนำไปใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการออกแบบอัลกอริทึมชดเชยแรงบิดมอเตอร์อัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการรักษาความเร็วสำหรับการฉีดพ่นและการจัดการแปลงผักอัจฉริยะในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 คณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Tooltham, A., Kittisupakorn, P., & Suksri, T. (2024). “Ladybug: An automated cultivation robot for addressing manpower shortages in agriculture.” ECTI Transactions on Computer and Information Technology 18, 1: 1–10.

[2] Slaughter, D. C., Giles, D. K., & Downey, D. (2008). “Autonomous robotic weed control systems: A review.” Computers and Electronics in Agriculture 61, 1: 63–78.

[3] Ruangpayoongsak, N. (2025). “Vision-based maize field zone classification for control of agricultural fertilizer dispenser robot.” Agriculture and Natural Resources 59, 1: 101–112.

[4] Kijdech, D. (2025). “Using convolutional neural networks (YOLOv8) with agricultural robots for plant disease detection and irrigation control.” Journal of Agricultural Informatics 16, 2: 45–60.

[5] Chang, C. L., Lin, Y. C., Chen, Y. Z., & Huang, W. H. (2023). “Robust guidance and selective spraying based on deep learning for agricultural robots.” Agronomy 13, 5: 1234.

[6] Gai, J., Xiang, L., & Tang, L. (2021). “Using a depth camera for crop row detection and mapping for under-canopy navigation of agricultural robotic vehicle.” Computers and Electronics in Agriculture 184: 106301.

[7] Khuantham, C., & Sonthitham, A. (2020). “Spraying robot controlled by smartphone application for pepper farm.” In Proceedings of the International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2020), 1: 1–5.

[8] ศุภชัย กุลมุติวัฒน์. (2563). “การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูง.” วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 26, 2: 15–28.

[9] Chaudhary, H., Kushwaha, A., Gautam, R., Tyagi, A., Singh, D., & Kumar, A. (2025). “An Autonomous Vehicle for Smart Urban Garbage Collection.” 2025 International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU), 1: 1-6.

ระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์

Cloud Electrical Energy Monitoring System

วรพจน์ ผิวโพธิ์[1],กิตติวัฒน์ ถาดทอง[1],สุภาพร ปานิคม[2],ประยงค์ เสาร์แก้ว[2]
คณะวัติ เนื่องวงษา[2],อังคณา เจริญมี[2] และจักรวัฒน์ บุตรบุญชู[2]

[1] บริษัท ไมโคร เอ็กซ์เพิร์ท จำกัด 29/17 ตำบล คลองห้า อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120
[2] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
E-mail,: jakawat.bu@rmuti.ac.th โทร. 0988281942

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในสำนักงานและสถานประกอบการส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานสูงขึ้น การตรวจสอบและบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการลดค่าใช้จ่ายและการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้นำเสนอระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยใช้เซนเซอร์วัดแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้า เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้กำลังงานแบบเรียลไทม์ และส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ NETPIE สำหรับการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลการใช้กำลังงานไฟฟ้า ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานและระบุช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูง ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการพลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและยั่งยืนภายในองค์กร

คำสำคัญ: การจัดการพลังงานไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, NETPIE, การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า, คลาวด์คอมพิวติ้ง

Abstract

The continuous increase in electrical energy consumption in offices and industrial facilities has resulted in higher energy costs. Therefore, effective monitoring and management of electrical energy usage are essential for reducing operational expenses and promoting sustainable energy utilization. This research presents an Internet of Things (IoT)-based electrical energy monitoring and tracking system. The proposed system employs voltage, current and electric power sensors connected to a microcontroller to collect real-time electrical power consumption data. The acquired data are transmitted via the Internet to the NETPIE cloud platform for data storage and visualization of electrical power consumption. The collected information is further analyzed to identify energy consumption patterns and determine peak usage periods. The results of the analysis can be utilized as a guideline for reducing unnecessary energy consumption, improving energy management efficiency, and promoting cost-effective and sustainable energy utilization within organizations.

Keywords: Electrical Energy Monitoring, Internet of Things (IoT), NETPIE, Energy Management, Cloud Computing.

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันและการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจในทุกภาคส่วน โดยถูกนำมาใช้ในระบบแสงสว่าง เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคารสำนักงาน และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์สื่อสาร ซึ่งล้วนมีส่วนช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน อย่างไรก็ตามความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรพลังงานอย่างมาก โดยเฉพาะแหล่งพลังงานฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและไม่สามารถทดแทนได้ในระยะเวลาอันสั้น

ปัจจุบันสำนักงานและสถานประกอบการมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในหลายระบบ เช่น ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ การเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้พลังงานส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการดำเนินงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายและส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน [1] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับระบบคลาวด์คอมพิวติ้งสามารถช่วยในการตรวจวัด ติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าได้แบบเรียลไทม์ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถทราบสถานะการใช้พลังงานและนำข้อมูลไปใช้ประกอบการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]-[4]

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้งานเซ็นเซอร์ PZEM-004T โดยระบบออกแบบมาเพื่อรองรับการวัดโหลดแบบเชิงเส้น เพื่อตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับแพลตฟอร์ม NETPIE สำหรับจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ข้อมูลการใช้พลังงานถูกเก็บรวบรวมเป็นระยะเวลา 30 วัน เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานและระบุช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูง ผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการบริหารจัดการพลังงาน ลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น และส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าและยั่งยืนภายในองค์กร

2. การทำงานของระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์

ระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์ถูกออกแบบเพื่อเฝ้าติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ โดยแสดงการเชื่อมโยงระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบตั้งแต่การตรวจวัด การประมวลผลข้อมูล และการจัดเก็บข้อมูลบนระบบคลาวด์

ในส่วนของการตรวจวัดใช้เซ็นเซอร์ PZEM-004T ซึ่งสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม ความถี่ และตัวประกอบกำลัง [5]-[6] โดยเซ็นเซอร์จะส่งข้อมูลการวัดไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผ่านการสื่อสารแบบ UART

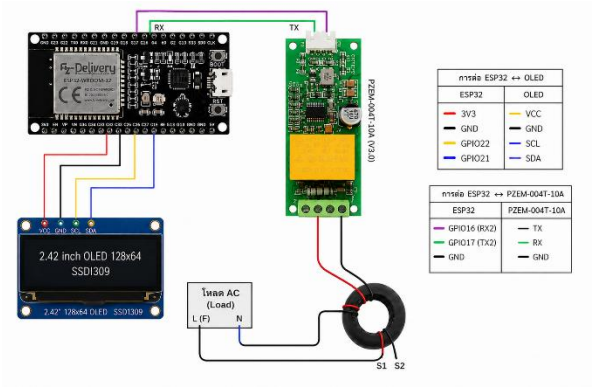
หลังจากได้รับข้อมูล ESP32 จะทำหน้าที่ประมวลผลและจัดรูปแบบข้อมูลก่อนส่งต่อผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังแพลตฟอร์ม NETPIE ซึ่งเป็นระบบคลาวด์สำหรับรองรับการสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ IoT โดยข้อมูลที่ส่งขึ้นไปจะถูกจัดเก็บและประมวลผลบนเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ ทำให้สามารถเข้าถึง

ข้อมูลการใช้กำลังงานไฟฟ้าได้จากทุกสถานที่ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

นอกจากนี้ NETPIE ยังทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard ในรูปแบบกราฟ ตาราง และค่าพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และประเมินรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการพลังงาน การลดการสูญเสียพลังงาน และการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคารหรือภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 ระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์



รูปที่ 2 ตำแหน่งขาการเชื่อมต่อวงจร

การคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย [5] และค่าความคลาดเคลื่อนแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$P_{Ave} = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i) \qquad (1)$$

$$\%Error = \frac{|Measured - \text{Re } ference|}{\text{Re } ference} \times 100 \qquad (2)$$

3. ผลการทดลอง

การทดสอบการทำงานของเครื่องวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้าง ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงถึงเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน

ตารางที่ 1 แสดงการวัดแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดัน 100 ถึง 240 โวลต์ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน ดิจิทัลมิเตอร์ Fluke 189 จำนวน 10 ครั้ง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแรงดันเท่ากับ 0.07

Voltage	PZEM-004T(V)	Fluke 189(V)	% Error
100	100.4	100.488	0.088
120	120.2	120.213	0.013
140	140.7	140.738	0.029
160	160.3	160.37	0.04
180	180.1	180.128	0.0183
200	200.1	200.16	0.03
220	220.1	220.14	0.02
240	241	240.22	0.32

ตารางที่ 1 ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดัน 100 ถึง 240 โวลต์

ตารางที่ 2 แสดงการวัดกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน จำนวน 10 ครั้ง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.24

	PZEM-004T(A)	Fluke 189(A)	% Error
1	0.0962	0.21	0.096
2	0.0931	0.11	0.093
3	0.0935	0.53	0.094
4	0.0929	0.11	0.093
5	0.0932	0.21	0.093
6	0.0933	0.32	0.093
7	0.0933	0.32	0.093
8	0.0921	0.11	0.092
9	0.092	0.092	0.440
10	0.091	0.092	0.550

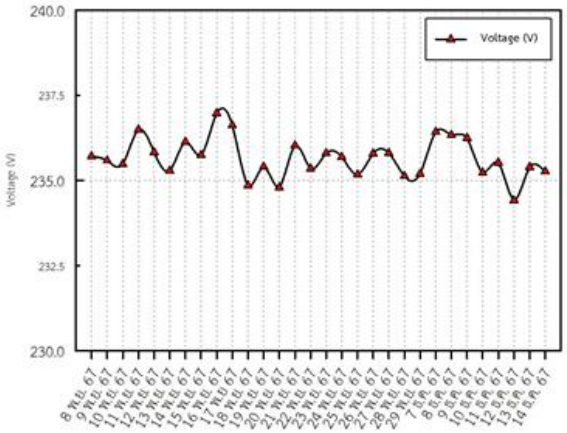
ตารางที่ 2 ความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 3 แสดงการวัดแรงดัน กระแสและความคลาดเคลื่อนที่วัดได้เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน จากโหลดเครื่องปรับอากาศจำนวน 5 เครื่อง

PZEM-004T		Fluke 189		%Error	
(Volt)	(Amp)	(Volt)	(Amp)	(Volt)	(Amp)
233	4.6	232	4.62	0.43	0.43
232	8	230	8.01	0.87	0.13
232	13.2	229	13.22	1.31	0.15
230	17.4	229	17.43	0.44	0.17
230	21	229	21.06	0.44	0.29

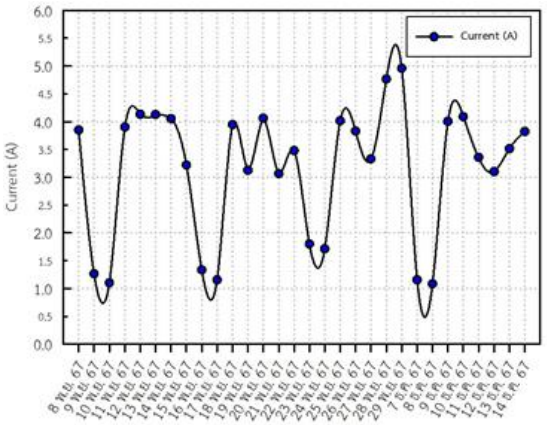
ตารางที่ 3 ค่าของแรงดัน กระแสไฟฟ้าและความคลาดเคลื่อนจาก PZEM-004T และ Fluke 189

รูปที่ 3 กราฟแสดงข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศจำนวน 5 เครื่อง โดยเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 30 วัน มีค่าแรงดันไฟฟ้าโดยประมาณ 234 ถึง 237 โวลต์



รูปที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ

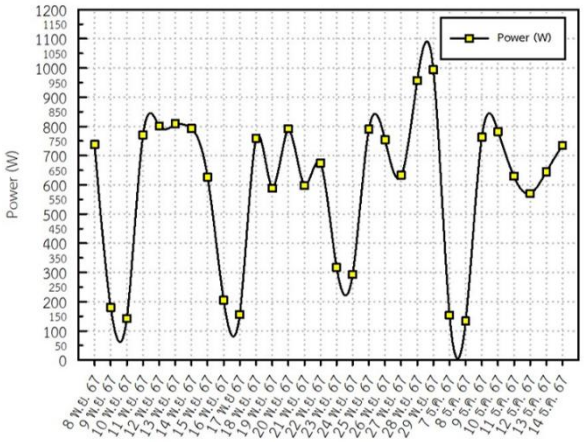
รูปที่ 4 กราฟแสดงข้อมูลของกระแสไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศโดยเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 30 วัน เริ่มตั้งแต่วันที่ 8 พ.ย.67 ถึง14 ธ.ค.67 พบมีค่ากระแสไฟฟ้าโดยประมาณ 0.6 ถึง 5.5 แอมป์



รูปที่ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ

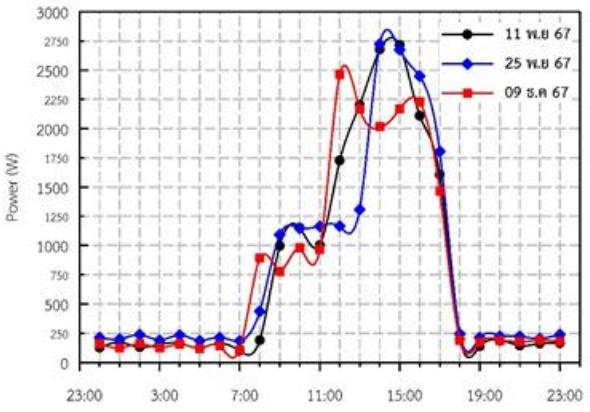
รูปที่ 5 กราฟแสดงข้อมูลของกำลังงานไฟฟ้า พบว่าช่วงที่มีการใช้กำลังงานสูงสุดไฟฟ้าประมาณ 1,090 วัตต์ และต่ำสุดประมาณ 150 วัตต์ ค่าเฉลี่ย

กำลังงานไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 30 วัน ประมาณ 590 วัตต์



รูปที่ 5 ค่ากำลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ

รูปที่ 6 กราฟแสดงค่ากำลังงานไฟฟ้าในช่วงวันทำงานผลการทดลองพบว่าช่วงเวลาที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดจะอยู่ระหว่างเวลาประมาณ 11.00 ถึง 17.00 น.



รูปที่ 6 ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในวันทำงาน

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากเซ็นเซอร์เปรียบเทียบกับการคำนวณหากำลังงานไฟฟ้าจากแรงดันและกระแสที่วัดจากมัลติมิเตอร์ จากสมการที่ (1) โดยไม่นำค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) มาคำนวณเนื่องจากมัลติมิเตอร์ไม่สามารถวัดกำลังไฟฟ้าได้ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยประมาณของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6.36 ถึง 12.61

PZEM-004T(W)	Calculate(W)	% Error
896	1,071.5	10.52
1,622	1,842.3	12.61
2,778	3,027.4	8.50
3,640	3,991.5	9.17
4,053	4,809	6.36

ตารางที่ 4 กำลังไฟฟ้าและความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ จำนวน 5 เครื่อง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองระบบวัดและติดตามพลังงานไฟฟ้าผ่านคลาวด์ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงข้อมูลของค่าพลังงานที่ใช้ได้อย่างต่อเนื่องสามารถแสดงข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 1.5 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนของกำลังไฟฟ้า มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าโดยไม่นำค่าตัวประกอบกำลังมาคำนวณ ซึ่งเครื่องปรับอากาศแบบธรรมดา (Fixed speed) มีค่าตัวประกอบกำลังโดยประมาณตั้งแต่ 0.8 ถึง 0.9 [7] จากตารางที่ 3 เมื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าจากแรงดันและกระแสที่วัดได้โดยมัลติมิเตอร์และกำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 มีความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจากการคำนวณเทียบกับการวัดกำลังไฟฟ้าโดยเซ็นเซอร์ PZEM-004T ประมาณ 1.3 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น คณะวิศกรรมศาสตร์ ในการสนับสนุนทุนพัฒนางานสร้างสรรค์สู่งานวิจัยเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีนักศึกษาระดับปริญญาตรี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ณัฐภัทร อภิรัชภิญโญ และ สมบูรณ์ ชาวชายโขง. (2565). “ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) กรณีศึกษาอาคารศรีโคตรบูรณ์ มหาวิทยาลัยนครพนม”,วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 93–108.

[2] ธนากร นามหอมจันทร์.(2565). “การพัฒนาระบบติดตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัยด้วยแพลตฟอร์ม NETPIE”, วารสารการพัฒนางานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์, ปีที่ 12, ฉบับที่ 35, หน้า 32–49,

[3] ชัยณรงค์ กิตติยัญปัญญา และสถาพร สุอาเถด. (2568). “การประยุกต์ใช้งานระบบตรวจสอบพลังงานด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 1–12.

[4] วรภัทร เดืองกวานทอง, พรนภา อินจันทร์ และศรัณย์ ดวงสุวรรณ.(2567). “การพัฒนาระบบวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคารด้วยเทคโนโลยี IoT”, วารสารวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย, ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้า 45–55.

[5] Huan-Liang Tsai, Le Phuong Truong and Wei-Hung Hsieh(2023). “Design and evaluation of wireless power monitoring IoT system for AC appliances”.pp.2-27.

[6] José Varela-Aldás, Steven Silva and Guillermo Palacios-Navarro.(2022). “IoT-Based Alternating Current Electrical Parameters Monitoring System”. Energies, 23 pages.

[7] Abhisek Ukil, Richard Bloch and Andrea Andenna.(2011). “Estimation of Induction Motor Operating Power Factor From Measured Current and Manufacturer Data”. IEEE Transaction on energy conversion. Vol. 26, No. 2, pp.699-706.

หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ
Radio-controlled Garbage Collection Robot

กัญจนา ชัยอมฤต[1], พุฒิพงษ์ ทวีชีพ[1] สุทธิรักษ์ แสงสุทธิ[1] เสขะ โพธิรุกข์[1] และ ชาญวิทย์ ชัยอมฤต[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: kunjana.ch@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุที่สามารถควบคุมได้จากระยะไกล เพื่อศึกษาการทำงานของระบบควบคุมระยะไกลผ่านเทคโนโลยีเครือข่ายแบบไร้สายวิทยุ หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุมีขนาด 55 × 90 × 53 เซนติเมตร สามารถเก็บขยะขนาดไม่เกิน 8.5 × 8.5 × 32 เซนติเมตร ควบคุมด้วยระบบควบคุมระยะไกลที่ใช้คลื่นวิทยุเพื่อสั่งการการเคลื่อนที่และเก็บขยะในระยะทาง 300 เมตร โดยสามารถเก็บขยะมูลฝอยประเภทขวดพลาสติก (ขนาดความจุไม่เกิน 1.5 ลิตร) เศษกระดาษ เศษใบไม้ ถุงพลาสติก และกระป๋องเครื่องดื่ม น้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ขณะไม่มีโหลดจะอยู่ที่ 18.5 กิโลกรัม มีขีดความสามารถในการบรรทุกโหลดเต็มพิกัดอยู่ที่ 32 กิโลกรัม หุ่นยนต์มีความเร็วเฉลี่ยบนพื้นคอนกรีตราบเรียบขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 1.18 - 1.19 และ 0.85 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 357 นาที และ 130 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบกล้องส่งสัญญาณภาพแบบเรียลไทม์ จากการทดสอบพบว่าหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์และสามารถปฏิบัติงานได้ตามที่ออกแบบไว้

คำสำคัญ: หุ่นยนต์, หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ, การควบคุมระยะไกลด้วยคลื่นวิทยุ

Abstract

This research aims to design and develop a radio-controlled garbage collection robot that can be operated remotely. The study focuses on the operation of a remote control system through wireless radio communication technology. The radio-controlled garbage collection robot has dimensions of 55 × 90 ×53 centimeters and is capable of collecting waste with a maximum size of 8.5 × 8.5 × 32 centimeters. It is controlled by a radio-based remote control system, allowing movement and waste collection within a range of 300 meters. The robot is designed to collect various types of municipal solid waste, including plastic bottles with a capacity of up to 1.5 L, paper waste, dry leaves, plastic bags, and beverage cans. The unloaded weight of the robot is 18.5 kg, and its maximum payload capacity is 32 kg. The robot's average speeds on a smooth concrete surface, under no-load and full-load conditions are 1.18–1.19 and 0.85 m/s, respectively. The battery runtime is 357 minutes under no-load conditions and 130 minutes at full-load conditions. In addition, a real-time video transmission camera system has been installed. The experimental results show that the developed radio-controlled garbage collection robot can operate according to its intended objectives and perform as designed.

Keywords: Robot, radio-controlled garbage collecting robot, remote control by radio waves

1. บทนำ

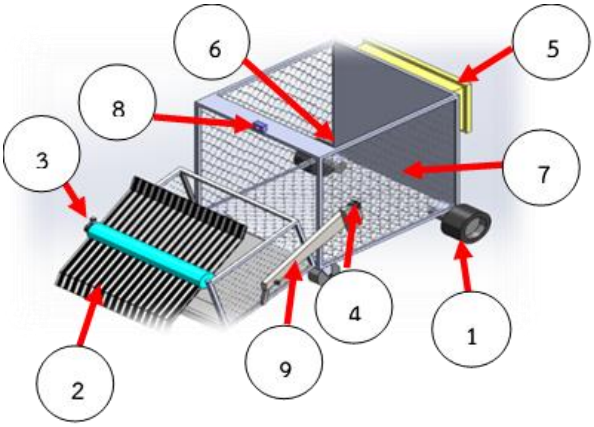
ปัญหาขยะมูลฝอยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งปัจจัยหลักมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ นอกจากนี้ขยะมูลฝอยยังเป็นปัญหาที่สำคัญในหลายๆ จังหวัด โดยส่วนใหญ่มักจะถูกทิ้งไม่เป็นที่ในพื้นที่สาธารณะส่งผลให้เกิดการบั่นทอนทัศนียภาพและสุขอนามัยของชุมชน เพื่ออำนวยความสะดวกในการเก็บขยะมูลฝอยจึงได้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้ในการเก็บขยะ เช่น การใช้หุ่นยนต์ [1-3] เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุโดยใช้การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยสัญญาณวิทยุ นั่นคือการใช้สัญญาณวิทยุในการควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกล โดยอาศัยการส่งคลื่นวิทยุจากตัวส่งไปยังตัวรับสัญญาณที่อยู่บนอุปกรณ์ ระบบนี้ไม่ต้องใช้สายสัญญาณ และสามารถควบคุมอุปกรณ์ได้โดยไม่ต้องอยู่ใกล้ หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุสามารถควบคุมระยะไกล 300 เมตร สามารถเก็บขยะมูลฝอยประเภทขวดพลาสติก (ขนาดความจุไม่เกิน 1.5 ลิตร) เศษกระดาษ เศษใบไม้ ถุงพลาสติก และกระป๋องเครื่องดื่ม โดยน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ขณะไม่มีโหลดจะอยู่ที่ 18.5 กิโลกรัม มีขีดความสามารถในการบรรทุกโหลดเต็มพิกัดอยู่ที่ 32 กิโลกรัม และมีกล้องบันทึกภาพในระหว่างการปฏิบัติหน้าที่ของหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ [4] เพื่ออำนวยความสะดวกในการเก็บขยะ

2. วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุและการออกแบบการควบคุมของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

2.1 การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุออกแบบให้มีขนาด 55 × 90 × 53 เซนติเมตร โดยขีดความสามารถในการจัดเก็บถูกออกแบบมาให้รองรับขยะขนาดที่ไม่เกิน 8.5 × 8.5 × 32 เซนติเมตร สามารถเคลื่อนที่ด้วยการควบคุมผ่านรีโมทบังคับวิทยุและเก็บขยะประเภทต่างๆ เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก เศษกระดาษ เป็นต้น การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์เก็บขยะแสดงดังรูปที่ 1 และหุ่นยนต์เก็บขยะที่สร้างแสดงดังรูปที่ 2 โดย หมายเลข 1 คือ ล้อของหุ่นยนต์ โดยล้อขับเคลื่อนด้านหลังเลือกใช้ฝาท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว นำมาเจาะรูแกนกลางเพื่อยึดเข้ากับเพลามอเตอร์ ส่วนล้อบังคับทิศทางด้านหน้าเป็นชุดล้ออิสระ ตัวล้อเป็นเหล็ก ขอบล้อเป็นยางเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 4 นิ้ว หมายเลข 2 คือ ใบพัดปัดเก็บขยะ ทำจากเส้นพลาสติกแข็งรีไซเคิลขนาด 20 เซนติเมตร ประกอบเข้ากับแกนหมุน หมายเลข 3 คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ใช้ขับใบพัดปัดเก็บขยะ หมายเลข 4 คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ยกขึ้น-ลงใบพัดเก็บขยะ หมายเลข 5 คือ กล่องคอนโทรลและกล่องเก็บแบตเตอรี่ เลือกใช้กล่องพลาสติก ABS ขนาด 20 × 30 เซนติเมตร หมายเลข 6 คือ พื้นที่เก็บขยะในตัวหุ่นยนต์ ขนาด 40 × 45 × 40 เซนติเมตร หมายเลข 7 คือ ตาข่ายกักกั้นขยะ โดยทำจากตาข่ายพลาสติก PE หมายเลข 8 คือ กล้องบันทึกภาพ เลือกใช้กล้อง KTvision 4G ขนาด 600 × 350 × 350 มิลลิเมตร หมายเลข 9 คือ เฟืองยกขนาด 33 × 18 × 14 เซนติเมตร



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์เก็บขยะ



รูปที่ 2 หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

2.2. การออกแบบการควบคุมของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

การควบคุมของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุสามารถควบคุมโดยใช้รีโมทบังคับวิทยุ Flysky FS-I6X [5] ส่งสัญญาณวิทยุไปยังตัวรับสัญญาณรีซีฟเวอร์ FS-IA6B และส่งสัณญาณควบคุมไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์ PWM BTS 7960 เพื่อควบคุมหุ่นยนต์เก็บขยะต่อไป โดยมีการทำงานหลักๆ อยู่ 2 ส่วน คือ

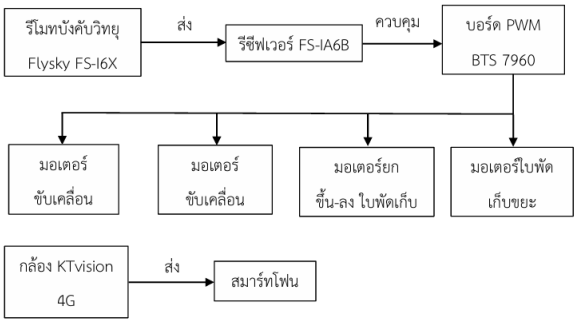
1. ส่วนขับเคลื่อน ในส่วนนี้ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งหมดของตัวหุ่นยนต์ โดยใช้ระบบไฟฟ้า 24 โวลต์ ในการควบคุมมอเตอร์ขับซ้าย และมอเตอร์ขับขวาซึ่งแปลงมาจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ผ่านวงจรเพิ่มแรงดันเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น ในด้านการควบคุมทิศทางและความเร็วจะรับคำสั่งจากบอร์ดควบคุมมอเตอร์ PWM BTS 7960 เพื่อแยกสั่งงานล้อแต่ละข้างทำให้หุ่นยนต์สามารถเลี้ยวซ้าย-ขวา หรือหมุนตัวได้ตามสัญญาณจากรีโมท

2. ส่วนเก็บขยะ ในส่วนนี้ทำหน้าเกี่ยวกับระบบใบพัดปัดเก็บขยะ โดยใช้ระบบไฟ 12 โวลต์จากแบตเตอรี่ในการควบคุมมอเตอร์ใบพัดเก็บขยะ และมอเตอร์ยกขึ้น-ลง โดยการทำงานทั้งหมดจะถูกสั่งการผ่านบอร์ดควบคุมมอเตอร์ PWM BTS 7960 เช่นเดียวกับส่วนขับเคลื่อน ซึ่งบอร์ดนี้จะรับสัญญาณจากรีโมทบังคับวิทยุเพื่อกำหนดทิศทางการหมุนและความเร็วของใบพัดรวมถึงการควบคุมระยะยกขึ้น-ลงของกลไกได้อย่างอิสระและแม่นยำ

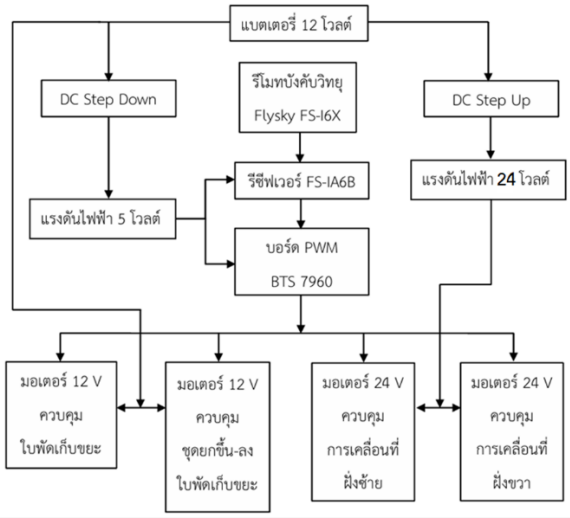
สำหรับส่วนของการส่งสัญญาณภาพของกล้องจะส่งผ่านแอปพลิเคชั่นของกล้องไปยังสมาร์ทโฟนโดยตรง

บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของการควบคุมหุ่นยนต์และบล็อกไดอะแกรมแสดงชุดควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

แบตเตอรี่ของหุ่นยนต์เก็บขยะมีขนาด 12 โวลต์ 20 แอมแปร์ชั่วโมง โดยเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่ชนิด 18650 VTC6 ขนาด 3.7 โวลต์ 4 ก้อนเชื่อมต่อร่วมกับวงจรบริหารจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ขนาด 4S 20 A



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

3. การทดสอบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ

การทดสอบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุประกอบด้วย 7 การทดสอบ ดังนี้ 1.การทดสอบระยะในการรับส่งสัญญาณวิทยุ 2.การทดสอบควบคุมทิศทาง 3.การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ 4.การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่บนพื้นเอียง 15 องศา 5.การทดสอบการส่งสัญญาณจากกล้องที่เชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ (4G/5G) 6.การทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบไม่มีโหลด 7.การทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบมีโหลดเต็มพิกัด

ในส่วนการทดสอบการเก็บขยะของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ หุ่นยนต์สามารถเก็บขยะมูลฝอยประเภทขวดพลาสติก (ขนาดความจุไม่เกิน 1.5 ลิตร) เศษกระดาษ เศษใบไม้ ถุงพลาสติก และกระป๋องเครื่องดื่ม โดยน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ขณะไม่มีโหลดจะอยู่ที่ 18.5 กิโลกรัม และมีขีดความสามารถในการบรรทุกโหลดเต็มพิกัดอยู่ที่ 32 กิโลกรัม ได้ตามที่ออกแบบไว้ทั้งนี้ มีข้อจำกัดในการเก็บขยะคือน้ำหนักขยะต่อชิ้นไม่ควรเกิน 300 กรัม เนื่องจากกลไกชุดใบพัดปัดขยะที่นำมาใช้ผลิตจากเส้นพลาสติกแข็งรีไซเคิล ดังนั้นถ้าน้ำหนักของขยะมากเกินไปใบพัดปัดขยะจะไม่สามารถปัดขยะเข้าสู่ตัวหุ่นยนต์ได้ และเพื่อป้องกันความเสียหายต่อวัสดุที่ใช้เป็นใบพัดปัดขยะ

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบระยะในการรับส่งสัญญาณวิทยุ

การทดสอบระยะในการรับส่งสัญญาณวิทยุทำการทดสอบบริเวณพื้นที่โล่งและพิจารณาการตอบสนองของสัญญาณวิทยุจากรีโมท ผลการทดสอบระยะในการรับส่งสัญญาณวิทยุแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าการตอบสนองของสัญญาณวิทยุจากรีโมทมีความเสถียรอยู่ในเกณฑ์ดีในช่วง 1 ถึง 300 เมตร ทั้งนี้ช่วงตั้งแต่ 100 ถึง 300 เมตร รีโมทจะมีการส่งเสียงเตือนเป็นระยะ แต่ยังคงสามารถควบคุมอุปกรณ์ได้ตามปกติโดยไม่มีความหน่วงของสัญญาณจนกว่าสัญญาณจะหลุดและเมื่อระยะทางเพิ่มในช่วง 310 เมตร ถึงระยะ 320 เมตร สัญญาณจะเริ่มขาดความเสถียรและขาดหายเป็นบางช่วงจนกระทั่งสัญญาณขาดหายไปอย่างสมบูรณ์ที่ระยะทาง 330 เมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะในการรับส่งสัญญาณวิทยุ

ระยะทาง (เมตร)	การตอบสนองของสัญญาณ	
	ตอบสนอง	ไม่ตอบสนอง
1	✓	
100	✓	
200	✓	
300	✓	
310	✓	
320	✓	
330		✓

4.2 ผลการทดสอบควบคุมทิศทาง

ผลการทดสอบการทดสอบควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุที่ระยะทางต่างๆ โดยทดสอบบนพื้นคอนกรีตราบเรียบ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าหุ่นยนต์สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการทดสอบควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุบนพื้นที่ราบ

ระยะทาง (เมตร)	เดินหน้า	ถอยหลัง	เลี้ยวซ้าย	เลี้ยวขวา	ถอยซ้าย	ถอยขวา
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	✓	✓	✓	✓	✓	✓
300	✓	✓	✓	✓	✓	✓
310	✓	✓	✓	✓	✓	✓
320	✓	✓	✓	✓	✓	✓
330	✗	✗	✗	✗	✗	✗

ESTACON 2026 | 17th

4.3 ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่

ผลการทดสอบหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุ โดยทดสอบบนพื้นคอนกรีตราบเรียบ ขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัดที่ระยะทางต่างๆ โดยทดสอบบนพื้นคอนกรีตราบเรียบ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า ขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัด หุ่นยนต์มีความเร็วเฉลี่ย 1.18-1.19 และ 0.85 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	ความเร็วในการเคลื่อนที่ (เมตรต่อวินาที)	
	ไม่มีโหลด	โหลดเต็มพิกัด
100	1.18	0.85
200	1.19	0.85
300	1.19	0.85

4.4 ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่บนพื้นเอียง 15 องศา

ผลการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุบนพื้นเอียง 15 องศา ระยะทางไม่เกิน 5 เมตร ขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัด แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัด หุ่นยนต์มีความเร็วเฉลี่ย 0.85 และ 0.61 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	ความเร็วในการเคลื่อนที่ (เมตรต่อวินาที)	
	ไม่มีโหลด	โหลดเต็มพิกัด
1	0.85	0.61
2	0.85	0.61
3	0.85	0.61
4	0.85	0.61
5	0.85	0.61

4.5 ผลการทดสอบการส่งสัญญาณจากกล้องที่เชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ (4G/5G)

ผลการทดสอบการส่งสัญญาณจากกล้องที่เชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ (4G/5G) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการส่งสัญญาณจากกล้องที่เชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ (4G/5G)

สภาวะการทดสอบ	การตอบสนองของสัญญาณจากกล้อง		หมายเหตุ
	การตอบสนอง	ความล่าช้าของสัญญาณ	
สัญญาณเต็ม (4G/5G)	✓	< 1 วินาที	ภาพลื่นไหลปกติ
สัญญาณปานกลาง (2-3 ขีด)	✓	2-3 วินาที	เริ่มมีอาการหน่วง
สัญญาณต่ำ (1 ขีด/จุดอับ)	✓	5-8 วินาที	ภาพกระตุกหน่วง
ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต	✗	-	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้

4.6 ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบไม่มีโหลด

ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุแบบไม่มีโหลด แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง 357 นาที

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบไม่มีโหลด

แบตเตอรี่	แรงดัน (V)	กระแส (A)	เวลา (นาที)
100%	13.61	2.441	0
90%	13.42	2.442	17
80%	13.32	2.446	46
70%	13.20	2.460	84
60%	13.12	2.463	123
50%	13.04	2.465	163
40%	12.98	2.469	200
30%	12.91	2.469	236

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบไม่มีโหลด (ต่อ)

แบตเตอรี่	แรงดัน (V)	กระแส (A)	เวลา (นาที)
20%	12.80	2.471	267
10%	12.43	2.475	307
0%	11.47	0	357

หมายเหตุ : บอร์ด BMS ตัดการทำงานของวงจรแบตเตอรี่ที่ 11.47 V

4.7 ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบมีโหลดเต็มพิกัด

ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุแบบมีโหลดเต็มพิกัด แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง 130 นาที

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่แบบมีโหลดเต็มพิกัด

แบตเตอรี่	แรงดัน (V)	กระแส (A)	เวลา (นาที)
100%	13.61	7.924	0
90%	13.07	7.928	15
80%	12.92	7.933	31
70%	12.80	7.947	46
60%	12.72	7.951	61
50%	12.64	7.955	77
40%	12.58	7.962	92
30%	12.51	7.965	100
20%	12.40	7.970	108
10%	12.03	7.976	118
0%	11.47	0	130

หมายเหตุ : บอร์ด BMS ตัดการทำงานของวงจรแบตเตอรี่ที่ 11.47 V

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุนั้น พบว่าหุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ สามารถเก็บขยะมูลฝอยประเภทขวดพลาสติก (ขนาดความจุไม่เกิน 1.5 ลิตร) เศษกระดาษ เศษใบไม้ ถุงพลาสติก และกระป๋องเครื่องดื่ม น้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ขณะไม่มีโหลดจะอยู่ที่ 18.5 กิโลกรัม มีขีดความสามารถในการบรรทุกโหลดเต็มพิกัดอยู่ที่ 32 กิโลกรัม สามารถควบคุมได้ในระยะทางไกล 300 เมตร โดยมีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ขณะไม่มีโหลดและมีโหลดเต็มพิกัดบนพื้นคอนกรีตราบเรียบเท่ากับ 1.18-1.19 และ 0.85 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ หุ่นยนต์เก็บขยะบังคับวิทยุสามารถทำงานได้ต่อเนื่องขณะไม่มีโหลด และมีโหลดเต็มพิกัด 357 และ 130 นาที ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ณัฐชัย กัดไธสง และ ณัฐพงศ์ พลสยม. (2559). การควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อผ่านการสื่อสารไร้สาย. คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

[2] ไกรทอง ชาวดร, อภิวัฒน์ ขันศรีนวล และ วีระพงษ์ พลทองสถิตย์. (2562). หุ่นยนต์ทำความสะอาดชายหาดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านคลื่นวิทยุ 2.4 GHz.. สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษกอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1 อุดรธานี.

[3] จารุนันท์ เพิ่มพูล, ชาญชัย เหล่าลาภะ และธวัชชัย สวยครบุรี. (2562). หุ่นยนต์เก็บขยะสะเทินน้ำสะเทินบก. สาขาวิชาวิศกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น.

[4] Shenzhen Qianniao Xiangyun Technology Co. Ltd. (2569). *V360 Pro*. เข้าถึงเมื่อ 18 มีนาคม. เข้าถึงได้จาก https://v360pro.camapp365.com/

[5] FlySky. (2569). คู่มือการใช้งาน FS-iA6B. เข้าถึงเมื่อ 18 มีนาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.flysky-cn.com/ia6b-canshu

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและตัวชี้วัดสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้เงื่อนไขวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐาน

Comparative Analysis of Energy Consumption and Performance Metrics in Fuel Cell Electric Vehicles under Standard Driving Cycle Conditions

ณัฐกิตติ์ แสนทอง[1], วิศรุต เพชรจรัส[1], บัววรณ์ ไชยธงรัตน์[1] , บรรณญัติ บริบูรณ์[1] และ สุทิน พลบูรณ์[2,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
234 หมู่ 12 ตำบลสามพร้าว อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี 41000
[2] สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
234 หมู่ 12 ตำบลสามพร้าว อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี 41000
*ผู้ติดต่อ: suthin.ph@udru.ac.th, 0957891173

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (FCEV) ดัดแปลงจำนวน 4 รุ่น ได้แก่ BYD Dolphin, GWM ORA Good Cat, MG4 Electric และ Tesla Model 3 โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลศาสตร์ยานยนต์ การจำลองสภาวะการขับขี่อ้างอิงตามวัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐาน WLTP Class 3b แบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 5 h เพื่อเทียบเคียงเส้นทางการเดินทางข้ามจังหวัดจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี สามพร้าว ถึงมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา รวมระยะทางสะสมประมาณ 230-240 kg จากผลการจำลองพบว่ารถยนต์ทั้งสี่รุ่นสามารถตอบสนองต่อโหลดของมอเตอร์ และเดินทางครอบคลุมระยะทางดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสะสมน้อยกว่าขีดจำกัดความจุของถังเชื้อเพลิงที่ออกแบบไว้ 4.0 - 6.0 kg พลวัตของการสิ้นเปลืองพลังงานชี้ให้เห็นว่า ภาวะการขับขี่ที่ความเร็วต่ำถึงปานกลาง รถยนต์ที่มีมวลน้อยอย่าง BYD Dolphin มีความได้เปรียบด้านความประหยัดเนื่องจากภาระความเฉื่อยต่ำ อย่างไรก็ตามในย่านความเร็วสูงบนทางหลวง รถยนต์ Tesla Model 3 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำมาก สามารถชดเชยข้อเสียเปรียบด้านน้ำหนักตัวรถได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้การบริหารจัดการพลังงานในช่วงท้ายของการขับขี่มีประสิทธิภาพสูง งานวิจัยนี้จึงเป็นการยืนยันหลักการออกแบบพิกัดกำลังของระบบเซลล์เชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ทางอากาศพลศาสตร์และมวลของยานยนต์ เพื่อป้องกันปัญหาเกี่ยวกับระยะทางการขับขี่ และเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน

คำสำคัญ: รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง, รถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่, วัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐาน, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน, การจำลองเชิงตัวเลข

Abstract

This study compares the performance and energy consumption of four modified fuel cell electric vehicles (FCEVs): BYD Dolphin, GWM ORA Good Cat, MG4 Electric, and Tesla Model 3, using

mathematical models of vehicle dynamics. Driving conditions were simulated using a continuous 5 h WLTP Class 3b driving cycle, which represents a cross-provincial journey from Udon Thani Rajabhat University (Sam Phrao) to Nakhon Ratchasima Rajabhat University, covering approximately 230 – 240 kg.

The simulation results indicate that all four vehicle models successfully responded to the motor torque demands and completed the designated route. The cumulative hydrogen consumption for each model remained strictly within the designed capacity limits of their 700-bar hydrogen tanks (4.0 - 6.0 kg). The dynamics of energy consumption revealed a clear trade-off: under low to medium-speed driving conditions, lighter vehicles such as the BYD Dolphin exhibited superior fuel economy due to lower inertia. Conversely, during the high-speed phases of the cycle, the Tesla Model 3, with its exceptionally low aerodynamic drag coefficient, significantly compensated for its heavier mass, enabling highly efficient energy management. This study confirms the engineering feasibility of optimizing fuel cell system sizing based on a vehicle's aerodynamic parameters and mass, thereby eliminating range anxiety and maximizing overall energy efficiency for long-distance travel.

Keywords: Fuel cell electric vehicles, battery electric vehicles, standard driving cycle, energy consumption, numerical simulation.

1. บทนำ

วิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน เป็นปัญหาและความท้าทายเร่งด่วนที่ประชาคมโลกกำลังเผชิญ สาเหตุหลักของปัญหาดังกล่าวนี้มาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยภาคส่วนที่มีอัตราการปลดปล่อยสูงเป็นอันดับต้น ๆ คือการขนส่ง และการเดินทางด้วยยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในที่พึ่งพาเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ นอกเหนือจากการเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกหลักเท่านั้น ยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในท้องถิ่น เช่น ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบเชิงลบโดยตรงต่อสุขภาพของประชาขน และระบบนิเวศในเขตเมืองที่ประชากรหนาแน่น

ด้วยเหตุนี้หลายประเทศจึงผลักดันมาตรการเข้มงวดเพื่อเปลี่ยนผ่านไปสู่เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน ส่งผลให้เกิดการเติบโตอย่างก้าวกระโดดของเทคโนโลยียานยนต์ไร้มลพิษในปัจจุบัน แม้ว่า BEV ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกลุ่มรถยนต์นั่งส่วนบุคคล แต่ยังมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาการอัดประจุที่นาน และน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหากต้องการเพิ่มระยะทางการขับขี่ ประเด็นดังกล่าวนี้เป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับยานยนต์พาณิชย์ขนาดใหญ่ และการขนส่งระยะไกล รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้พลังงานจากไฮโดรเจนจึงเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มีศักยภาพสูง โดยมีจุดเด่นคือความหนาแน่นพลังงานสูงกว่า ระยะเวลาในการเติมเชื้อเพลิงที่รวดเร็วเทียบเท่ารถยนต์เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน และปล่อยไอเสียที่มีเพียงน้ำบริสุทธิ์ และไม่มีมลพิษสำหรับชั้นบรรยากาศ [1]

การนำรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ยังคงมีประเด็นท้าทายในด้านวิศวกรรม ด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความทนทานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากโหลดชนิดการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์จะแปรผันอย่างรวดเร็วตามพฤติกรรมการขับขี่ และสภาวะจราจร ดังนั้นการวิเคราะห์ และประเมินสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (FCEV) ขณะขับขี่ด้วยวัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐาน WLTC จึงเป็นกระบวนการวิจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลของพลังงาน อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบ [2] ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้นักวิจัย และวิศวกรสามารถนำไปพัฒนา และปรับปรุงขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงาน เพื่อกระตุ้นสมรรถนะของตัวรถออกมาได้อย่างเหมาะที่สุด และประหยัดพลังงานได้มากที่สุด

จากเหตุผลและความสำคัญดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน และตัวชี้วัดสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้เงื่อนไขวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐาน เพื่อนำเสนอผลการประเมินเชิงตัวเลข และข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ในประเทศไทยให้เติบโตอย่างยั่งยืนต่อไป

แม้ว่า FCEV จะได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในยุคยานยนต์ไร้มลพิษ แต่ความท้าทายสำคัญในเชิงพาณิชย์ และการพัฒนาทางวิศวกรรมคือความไม่แน่นอนของสมรรถนะ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการใช้งานจริง ซึ่งอาจ

คลาดเคลื่อนและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากค่าที่ประเมินในห้องปฏิบัติการเบื้องต้น ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวประกอบไปด้วยปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

1) การเร่งความเร็วอย่างรวดเร็ว หรือการเบรกกะทันหันจะส่งผลให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเผชิญกับภาระชั่วครู่ของโหลด ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือการลดลงของประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน และเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองไฮโดรเจน

2) ความหนาแน่นของการจราจรในเขตเมือง และสภาพภูมิประเทศที่มีความลาดชัน ส่งผลให้การใช้พลังงานจริงสูงกว่าค่าที่ได้จากการประเมิน จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการใช้ไฮโดรเจนในภาวะการขับขี่จริงบนท้องถนนอาจสูงกว่าการทดสอบในภาวะควบคุมปกติได้ถึงร้อยละ 50 [3] ซึ่งความผันผวนดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการคาดการณ์ระยะทางการขับขี่ และอาจก่อให้เกิดความวิตกกังวลต่อผู้ใช้ขับขี่

ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ การประเมินสมรรถนะของ FCEV โดยอ้างอิงจากวัฏจักรการขับทดสอบแบบเก่า NEDC จึงมีความแม่นยำไม่เพียงพอ และไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการขับขี่ในปัจจุบันได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากมีความเร่งต่ำและลักษณะรูปแบบการขับขี่ที่ราบเรียบเกินไป ความจำเป็นเร่งด่วนของงานวิจัยนี้จึงใช้วัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐาน WLTC ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นความเร็วที่มีโพรไฟล์พลวัตรครอบคลุมสภาวะการขับขี่ที่หลากหลาย ตั้งแต่ความเร็วต่ำในเมือง ความเร็วปานกลางในเขตชานเมือง และความเร็วสูงบนทางหลวง

จากการทดลองเชิงแบบจำลองพบว่าการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไข WLTC สามารถช่วยลดช่องว่างความคลาดเคลื่อน และให้ข้อมูลอ้างอิงที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะการขับขี่จริงบนท้องถนนได้เป็นอย่างดี สามารถสะท้อนอัตราการสิ้นเปลืองไฮโดรเจน และพฤติกรรมการไหลของพลังงานได้อย่างแม่นยำ [4] การนำวัฏจักร WLTC มาใช้เป็นฐานในการประเมิน และเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้จึงเป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้ได้ชุดข้อมูลอ้างอิงเชิงตัวเลขที่เที่ยงตรง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบ และพัฒนาระบบจัดการพลังงานของ FCEV ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองไฮโดรเจนของ FCEV

2) เพื่อประเมินตัวชี้วัดสมรรถนะซึ่งประกอบไปด้วยประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานที่สูญเสีย และพิสัยของการขับ

3) เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะวัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐาน WLTP ที่มีต่อระบบของ FCEV

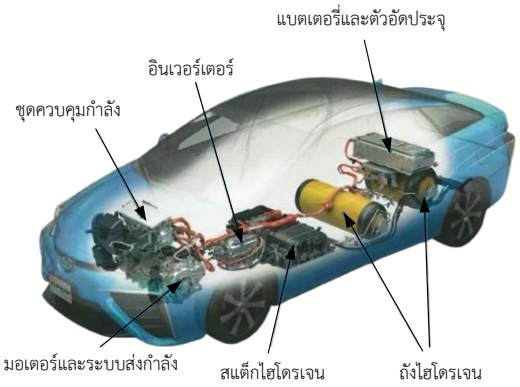
3. วิธีการดำเนินวิจัย

วิธีการดำเนินวิจัยประกอบไปด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผังงานของการจำลองด้วยโปรแกรม Python ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

รถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงเป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนได้โดยที่ไม่ต้องเสียบปลั๊กเพื่ออัดประจุ เพราะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เองด้วยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศ

โครงสร้างและส่วนประกอบภายในของ FCEV แสดงในรูปที่ 1 มีส่วนประกอบ และหน้าที่ดังต่อไปนี้ [5-6]



รูปที่ 1 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

1) สแต็กไฮโดรเจนคือหัวใจหลักของ FCEV เพราะทำหน้าที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยการรับก๊าซไฮโดรเจนจากถังเก็บ และออกซิเจนจากอากาศเข้ามาทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีให้กลายเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

2) ถังไฮโดรเจนทำหน้าที่เก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในรูปแบบก๊าซภายใต้แรงดันสูง

3) แบตเตอรี่และตัวอัดประจุทำหน้าที่สะสมพลังงานที่ได้จากการเบรกผ่านตัวอัดประจุ และช่วยจ่ายพลังงานเสริมร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง

4) อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าตรงจากเซลล์เชื้อเพลิง และแบตเตอรี่ให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ และควบคุมความเร็ว หรือแรงบิดของมอเตอร์

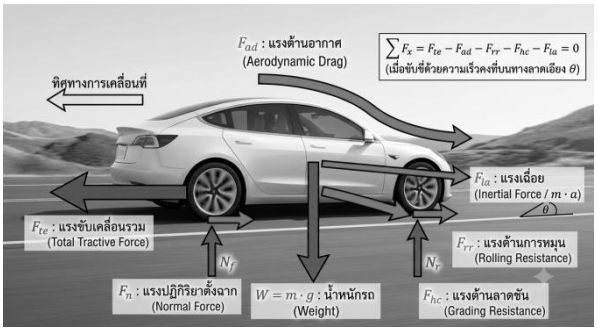
5) ชุดควบคุมกำลังมีหน้าที่จัดการพลังงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ การอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ และดูดกลืนพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อช่วยเสริมระบบขับเคลื่อนให้ระบบทั้งหมดทำงานด้วยประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด

6) มอเตอร์และระบบส่งกำลังเป็นส่วนประกอบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานกล และหมุนล้อขับเคลื่อนรถยนต์

3.2 แบบจำลองพลศาสตร์ตามยาวรถยนต์ไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ตามยาวของ FCEV มีพื้นฐานมาจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันสอดคล้องกับสมการ $\Sigma F = ma$ สำหรับคำนวณหาแรงขับเคลื่อนรวมที่ล้อรถเพื่อเอาชนะแรงต้านทานในขณะขับขี่ สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พิจารณาแผนภาพอิสระแรงที่กระทำต่อ FCEV ในรูปที่ 2 สมการแรงขับเคลื่อนรวมที่ล้อต้องการสำหรับการขับเคลื่อนรถ (F_{te}) มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านทานทางฟิสิกส์ทั้งหมดที่กระทำกับตัวรถในแนวเส้นตรงดังสมการที่ (1) [7]



รูปที่ 2 แผนภาพอิสระแรงที่กระทำต่อ FCEV

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} \qquad (1)$$

เมื่อ F_{rr} คือแรงต้านการหมุนของล้อ F_{ad} คือแรงต้านอากาศ F_{hc} คือแรงต้านจากความลาดชัน และ F_{la} คือ แรงเฉื่อยจากความเร่ง แรงต้านการหมุนของล้อเกิดจากการเสียดสี และการเสียรูปของยางรถยนต์กับพื้นผิวถนน สมการคำนวณคือ

$$F_{rr} = f_{rr} mg\cos(\theta) \quad (2)$$

เมื่อ f_{rr} คือสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ m คือมวลสุทธิของ FCEV g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และ θ คือมุมความลาดชันของถนน แรงต้านอากาศเกิดจากแรงปะทะกับอากาศในขณะที่ FCEV เคลื่อนที่ไปข้างหน้า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงดังกล่าวนี้คือ

$$F_{ad} = 0.5\rho C_d A_f v^2 \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศที่ระดับน้ำทะเล C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ A_f คือพื้นที่หน้าตัดด้านหน้าของ FCEV และ v คือความเร็วของ FCEV แรงต้านเนื่องจากความลาดชันเกิดจากแรงดึงดูดของโลกที่พยายามฉุด FCEV เมื่อขับขึ้นบนทางลาดชัน หรือทางขึ้นเขา สมการคำนวณแรงดังกล่าวนี้คือ

$$F_{hc} = mg\sin(\theta) \quad (4)$$

แรงต้านการเคลื่อนที่ของ FCEV ชนิดสุดท้ายคือแรงที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนความเร็วของรถยนต์ หรือแรงเนื่องจากความเร่ง สมการแบบจำลองที่คิดรวมทั้งมวลของตัวรถและแรงเฉื่อยจากการหมุนของชิ้นส่วนภายใน เช่น ล้อ มอเตอร์ เป็นต้นคือ

$$F_{la} = (1+\delta)ma \quad (5)$$

เมื่อ a คือความเร่งของ FCEV δ คือปัจจัยมวลหมุนชดเชยสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า สมการคำนวณกำลังสำหรับการขับเคลื่อนสี่ล้อ (P_{te}) ของ FCEV คือ

$$P_{te} = vF_{te} \quad (6)$$

แรงบิด (T_m) ที่มอเตอร์ต้องสร้างให้กับระบบขับเคลื่อนของ FCEV คือ

$$T_m = (rF_{te})/(G\eta_t) \quad (7)$$

เมื่อ r คือรัศมีประสิทธิผลของล้อ G คืออัตราทดเกียร์รวม และ η_t คือประสิทธิภาพเชิงกลของระบบส่งกำลัง ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สำหรับการนำไปเลือกพิกัดของมอเตอร์คือ

$$\omega_m = vG/r \quad (8)$$

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองก๊าซไฮโดรเจนของแผงเซลล์เชื้อเพลิงในขณะที่ FCEV กำลังวิ่งด้วยความเร็ว v ต้องใช้แบบจำลองการไหลของพลังงานซึ่งเชื่อมโยงจากพลศาสตร์ตามยาวของตัวรถส่งต่อพลังงานไปยังระบบขับเคลื่อน และปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

ตามลำดับ รายละเอียดสมการทั้งหมดที่ใช้ในจำลองมีดังต่อไปนี้ [8]

ปริมาณกำลังที่แผงเซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายสามารถคำนวณได้จากความเร็วรถ v และแรงขับเคลื่อนรวม F_{te}

$$P_{fc} = \frac{vP_{te}}{\eta_t \eta_m \eta_{dc}} + P_{aux} - P_{bat} \quad (9)$$

กำลังทางกลที่ล้อทั้งสี่ต้องการ $(P_{te}(v))$ สัมพันธ์กับความเร็ว v โดยตรงดังนี้

$$P_{te}(v) = vF_{te} = v\left(F_{rr} + F_{ad}(v) + F_{hc} + F_{la}\right) \quad (10)$$

เมื่อ P_{fc} คือกำลังเอาต์พุตของแผงเซลล์-เชื้อเพลิง η_t คือประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง η_m คือประสิทธิภาพของมอเตอร์ η_{dc} คือประสิทธิภาพขอตัวแปลงผันแรงดัน P_{aux} คือกำลังที่อุปกรณ์ส่วนควบในรถดูดกลืนไปใช้ P_{bat} คือกำลังแบตเตอรี่การคำนวณอัตราการไหลของมวลไฮโดรเจนนิยมใช้แบบจำลองสองรูปแบบดังนี้ [9]

1) แบบจำลองอิงประสิทธิภาพ และค่าความร้อนหลักเหมาะสำหรับกรณีทราบกราฟประสิทธิภาพรวมของแผงเซลล์เชื้อเพลิง (η_{fc}) ในแต่ละช่วงการทำงาน

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P_{fc}}{\eta_{fc}\left(P_{fc}\right) LHV_{H_2}} \quad (11)$$

เมื่อ $\dot{m}_{H_2}$ คืออัตราการสิ้นเปลืองก๊าซไฮโดรเจน $\eta_{fc}(P_{fc})$ คือประสิทธิภาพของแผงเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งแปรผันตามกำลังเอาต์พุต และ LHV_{H_2} คือ ค่าความร้อนต่ำของก๊าซไฮโดรเจน

2) แบบจำลองเคมีไฟฟ้าอ้างอิงกฎของฟาราเดย์มีความแม่นยำสูงในทางวิศวกรรม กำลังถูกแปลงผันเป็นกระแสไฟฟ้าของสแต็กแล้วนำไปแทนค่าในสมการโพลาไรเซชัน สมการตามกฎของฟาราเดย์สำหรับคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองก๊าซไฮโดรเจนคือ

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2} N_{cell} I_{fc}}{zF\eta_u} \quad (12)$$

เมื่อ M_{H_2} คือมวลโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจน N_{cell} คือจำนวนแผ่นเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันภายในแผงเซลล์เชื้อเพลิง z คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ต่อ 1 โมเลกุลของ H_2 ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 2 F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ และ η_u คือสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์จากก๊าซ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมดที่ใช้ไปตลอดการวิ่งของ FCEV ด้วยวัฏจักรการขับทดสอบ WLTC สามารถคำนวณหาได้จากสมการปริพันธ์ต่อไปนี้

$$M_{H_2,total} = \int_{t_0}^{t_{end}} \dot{m}_{H_2}(t)dt \quad (13)$$

4. ผลการจำลองและการอภิปราย

แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ถูกกำหนดขึ้นเพื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบสมรรถนะและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานโดยอ้างอิงข้อมูล BEV สี่ยี่ห้อดังนี้ BYD Dolphin, GWM ORA Good Cat, MG4 Electric และ Tesla Model 3 ภายใต้สมมติฐานเชิงวิศวกรรมว่ารถยนต์ทั้งสี่คันได้รับการดัดแปลงโครงสร้างระบบขับเคลื่อนไปใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริด เส้นทางการทดสอบเริ่มต้นจากต้นทางมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี และปลายทาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยใช้วัฏจักรการขับทดสอบมาตรฐานสากล WLTP Class 3b ใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกำหนดค่าดังแสดงในตารางที่ 1 และค่าพารามิเตอร์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของรถ FCEV ที่ใช้ในจำลอง

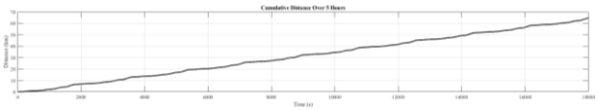
พารามิเตอร์	BYD Dolphin	GWM ORA Good Cat	MG4 Electric	Tesla Model 3
m (kg)	1,425	1,525	1,625	1,775
C_d	0.30	0.289	0.279	0.23
A_f (m^2)	2.20	2.20	2.25	2.22
r_w (m)	0.320	0.336 m	0.323	0.334
G	9.0	9.0	9.0	9.0
P_{aux} (W)	1,200	1,200	1,300	1,500

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในจำลอง

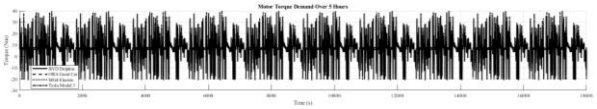
พารามิเตอร์	BYD Dolphin	GWM ORA Good Cat	MG4 Electric	Tesla Model 3
P_{fc} (kW)	70	80	90	110
ความจุถังไฮโดรเจน (kg)	4	4.5	5	6
η_{fc} (%)	55	55	55	55

จากการจำลองการขับขี่ของ FCEV) ดัดแปลงทั้งสี่ยี่ห้อภายใต้วัฏจักรการขับทดสอบ WLTP Class 3b แบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3 – 5 กราฟผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3 แสดงระยะทางสะสมซึ่งมีค่าเท่ากันทั้งสี่รุ่น กราฟแรงบิดในรูปที่ 4 แสดงการแกว่งตัวอย่างหนาแน่นตลอดช่วงเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีทั้งค่าแรงบิดค่าบวกและลบสลับกันไปตามพฤติกรรมการเร่งและการชะลอความเร็ว Tesla Model 3 มีมวลมากที่สุดต้องการแรงบิดสูงสุดในการออกตัวมากกว่ารถที่มีน้ำหนักเบาอย่าง BYD Dolphin ในทางกลับกันช่วงที่แรงบิดมีค่าเป็นลบ Tesla Model 3 ที่มีน้ำหนักมากจะสร้างแรงเฉื่อยได้มาก ส่งผลให้สามารถดึงพลังงานกลับคืนมาใช้ได้มากกว่า BYD Dolphin

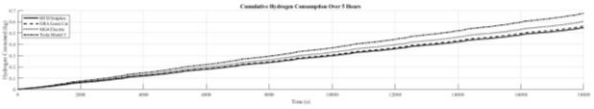
กราฟในรูปที่ 5 เป็นผลการจำลองแสดงปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ต่ำมากของ Tesla Model 3 ช่วยชดเชยข้อเสียเปรียบด้านน้ำหนักได้เป็นอย่างดี โดยพิจารณาได้จากค่าปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่เวลาสิ้นสุดการจำลองที่ 18,000 วินาที



รูปที่ 3 ระยะทางสะสม



รูปที่ 4 แรงบิด



รูปที่ 5 ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสะสม

ตารางที่ 3 แสดงตัวชี้วัดสมรรถนะและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการจำลอง 5 ชั่วโมงพบว่ารถทุกคันทำระยะทางได้ 232.5 กิโลเมตรเท่ากัน แต่มีความต้องการแรงบิดสูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ Tesla Model 3 ต้องการแรงบิดสูงถึง 285.6 Nm เพื่อเอาชนะความเฉื่อยจากมวลตัวรถที่มากที่สุด ในขณะที่ BYD Dolphin ต้องการแรงบิดเพียง 215.4 Nm

เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเฉลี่ย พบว่า BYD Dolphin มีความประหยัดสูงสุดที่ 0.92 kg/100km เนื่องจากน้ำหนักตัวรถที่เบาที่สุดทำให้สูญเสียพลังงานน้อยในจังหวะเร่ง และเบรกของวัฏจักร WLTP อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า Tesla Model 3 ซึ่งมีน้ำหนักมากที่สุด กลับมีอัตราสิ้นเปลืองเฉลี่ยต่ำเป็นอันดับสองที่ 0.94 kg/100km ซึ่งเป็นผลมาจากการชดเชยด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ต่ำเพียง 0.23 ทำให้ใช้พลังงานน้อยมากในช่วงความเร็วสูง

นอกจากนี้ ปริมาณไฮโดรเจนคงเหลือของรถทุกรุ่นยังคงอยู่เหนือระดับ 46% ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ยืนยันว่าการออกแบบพิกัดความจุถังไฮโดรเจนตั้งแต่ 4.0 - 6.0 kg เพียงพอต่อการเดินทางข้ามจังหวัดในระยะทางดังกล่าว โดยยังคงมีระยะปฏิบัติการสำรองสำหรับกรณีฉุกเฉิน หรือการจราจรติดขัดได้อย่างปลอดภัย

ตารางที่ 3 ตัวชี้วัดสมรรถนะและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการจำลอง 5 ชั่วโมง

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	BYD Dolphin	GWM ORA Good Cat	MG4 Electric	Tesla Model 3
ความต้องการแรงบิดสูงสุด (Nm)	215.4	238.2	246.7	285.6
ปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้รวม (kg)	2.15	2.28	2.35	2.18
อัตราสิ้นเปลืองเฉลี่ย (kg/100km)	0.92	0.98	1.01	0.94
อัตราความประหยัด (km/kg)	108.1	101.9	98.9	106.6
ปริมาณไฮโดรเจนคงเหลือ (%)	46.2	49.3	53.0	63.6

5. บทสรุป

การศึกษาด้วยการจำลองในงานวิจัยนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญทางวิชาการได้ดังนี้

1) รถยนต์ทั้งสี่รุ่นสามารถตอบสนองต่อภาระโหลดของมอเตอร์ และทำระยะทางสะสมรวมได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนสะสมตลอดห้าชั่วโมงของทุกรุ่นอยู่ภายใต้ขีดจำกัดความจุของถังไฮโดรเจนแรงดัน

2) ตัวชี้วัดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานชี้ให้เห็นถึงกลไกการแลกเปลี่ยนระหว่างมวลยานยนต์ และอากาศพลศาสตร์อย่างชัดเจน

3) การออกแบบขนาดสแตกเซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังเอาต์พุต 70 - 110 kW ให้เหมาะสมกับพิกัดตัวถังของรถแต่ละกลุ่มเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญ รถขนาดกะทัดรัดไม่จำเป็นต้องแบกรับน้ำหนักของสแตก และถังไฮโดรเจนที่ใหญ่เกินความจำเป็น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะ-เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ-อุดรธานี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Alreshidi MA, Yadav KK, Shoba G, Gacem A, Padmanabhan S, Ganesan S, et al. Hydrogen in transport: a review of opportunities, challenges, and sustainability concerns. RSC advances. 2025;15(29):23874-909.

[2] Raceanu M, Bizon N, Iliescu M, Carcadea E, Marinoiu A, Varlam M. Real-Time Energy Management of a Dual-Stack Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Based on a Commercial SUV Platform Using a CompactRIO Controller. World Electric Vehicle Journal. 2025;17(1):8.

[3] Di Pierro G, Bitsanis E, Tansini A, Bonato C, Martini G, Fontaras G. Fuel Cell Electric Vehicle Characterisation under Laboratory and In - use Operation. Energy Reports. 2024;11:611-23.

[4] Sahin H. Hydrogen refueling of a fuel cell electric vehicle. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;75:604-12.

[5] Tuan N, Karpukhin KE, Terenchenko As, Kolbasov AF. World trends in the development of vehicles with alternative energy sources. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018;13:2535-42.

[6] Navinkumar TM, Bharatiraja C. Sustainable hydrogen energy fuel cell electric vehicles: A critical review of system components and innovative development recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025;215:115601.

[7] Larminie J, Lowry J. Electric vehicle technology explained: John Wiley & Sons; 2012.

[8] Corbo P, Migliardini F, Veneri O. Hydrogen fuel cells for road vehicles: Springer Science & Business Media; 2011.

[9] Gu H, Yin B, Yu Y, Sun Y. Energy management strategy considering fuel economy and life of fuel cell for fuel cell electric vehicles. Journal of Energy Engineering. 2023;149(1):04022054.

ผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ

Impact of Electric Vehicle Charging on Low-Voltage Distribution System

เมธา นาลาด[1], ชินกร หลอดคำ[1], พินิจ ศรีธร[1], มงคล ด่านบำรุงตระกูล[1], พงษ์ประภัทร ชูหิรัญญ์วัฒน[1], กฤษฎา ทาสันเทียะ[1], และ ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย*

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ:Thanakrit.sr@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0872601955

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำในพื้นที่หมู่บ้านจัดสรร การศึกษาใช้วิธีการสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงจากข้อมูลโครงข่ายไฟฟ้าและพฤติกรรมการใช้พลังงานของบ้านเรือนจริงตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบสภาวะของระบบระหว่างการใช้งานปกติและการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน โดยมุ่งเน้นตรวจสอบและวิเคราะห์ตัวแปรหลัก 3 ประการ ได้แก่ ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกปลายสาย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกันแบบกระจุกตัว โดยเฉพาะเมื่อผู้ใช้งานเริ่มชาร์จทันทีที่เข้าสู่ช่วงช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟต่ำ ส่งผลกระทบอย่างรวดเร็วต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยทำให้ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนใกล้เคียงพิกัด นอกจากนี้ยังส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าปลายสายลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด และทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบพุ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ผลลัพธ์จากการจำลองนี้สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้เพื่อวางแผนรักษาเสถียรภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการระบบจำหน่ายไฟฟ้าในอนาคต

คำสำคัญ: การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า, ระบบจำหน่ายแรงต่ำ, แรงดันตก, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

Abstract

This research paper presents a study and analysis of the impacts of electric vehicle (EV) charging on a low-voltage distribution system in a residential housing estate. The study employs a simulation approach based on actual electrical network data and household energy consumption behavior over a 24-hour period. This is to compare the system conditions between normal grid operation and simultaneous EV charging scenarios. The analysis focuses on investigating three main parameters: transformer loading, end-of-line voltage drop, and power losses within the system. The results indicate that simultaneous and concentrated EV charging, particularly when users begin charging immediately at the start of Time-of-Use (TOU) off-peak periods, rapidly impacts the low-voltage distribution system. It causes the transformer loading to increase abruptly toward its rated capacity. Furthermore, it results in a noticeable drop in the end-of-line voltage and a substantial increase in system power losses (both active and reactive power) compared to normal operating conditions. The simulation results highlight the necessity of applying these findings to network planning, maintaining grid stability, and enhancing the overall efficiency of electrical distribution system management in the future.

Keywords: Electric vehicle charging, Low-voltage distribution system, Voltage drop, Power losses

1. บทนำ

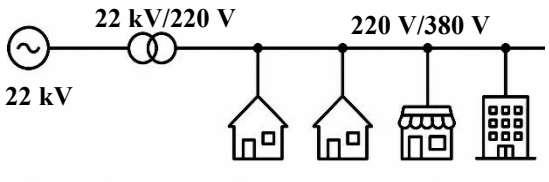
ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นเพราะช่วยประหยัดพลังงานและลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเมื่อรถยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การติดตั้งเครื่องชาร์จภายในพื้นที่พักอาศัยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้านับเป็นโหลดไฟฟ้าที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูง หากมีการใช้งานพร้อมกันในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด จะทำให้ภาระรวมของระบบเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน จนอาจส่งผลกระทบทำให้หม้อแปลงจำหน่ายทำงานเกินพิกัดได้ [1]

โดยทั่วไประบบจำหน่ายแรงต่ำเดิมถูกออกแบบมาเพื่อรองรับภาระไฟฟ้าของบ้านพักอาศัยทั่วไป ซึ่งพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าปกติจะแปรผันตามกิจกรรมประจำวันของผู้อยู่อาศัย และมีช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟขึ้นสู่จุดสูงสุดตามธรรมชาติของชุมชน โดยระบบสามารถบริหารจัดการและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งในด้านแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย [2]

บทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำของหมู่บ้านจัดสรร โดยอ้างอิงข้อมูลโครงข่ายจริงและใช้โปรแกรม OpenDSS ร่วมกับโปรแกรมจำลองระบบ ในการจำลองระบบตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องชาร์จ ทั้งในด้านกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าปลายสาย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและบริหารจัดการระบบไฟฟ้าในอนาคต

2. ระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ระบบจำหน่ายแรงต่ำเป็นส่วนปลายทางของระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำหน้าที่นำพลังงานไฟฟ้าจากหม้อแปลงจำหน่ายไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง โดยหม้อแปลงจะลดแรงดันจากระดับแรงดัน 22 kV หรือ 33 kV ลงมาที่ระดับ 220/380 V เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในบ้านพักอาศัยทั่วไป [3] ดังแสดงในรูปที่ 1

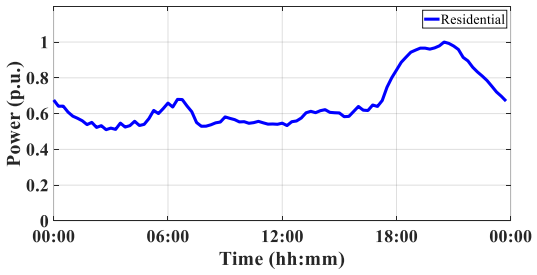


รูปที่ 1 ตัวอย่างระบบจำหน่ายแรงต่ำ

โดยทั่วไปโครงสร้างของระบบจำหน่ายแรงต่ำในเขตที่พักอาศัยจะมีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลงไปตามการขยายตัวของชุมชน ประกอบกับพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้แต่ละรายที่แตกต่างกัน รวมถึงการเพิ่มขึ้นของโหลดประเภทใหม่อย่างเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า จึงทำให้ระบบมีแนวโน้มเกิดความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟส และเกิดปัญหาภายในระบบได้ง่าย

2.1 พฤติกรรมของโหลดบ้านอยู่อาศัย

โหลดบ้านอยู่อาศัยเป็นประเภทโหลดหลักในระบบจำหน่ายแรงต่ำของเขตที่พักอาศัย มีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แปรผันตามกิจกรรมประจำวันของผู้อยู่อาศัย โดยความต้องการใช้ไฟฟ้าจะอยู่ในระดับต่ำในช่วงหลังเที่ยงคืน และเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเช้าเมื่อผู้อยู่อาศัยตื่นนอนและเตรียมตัวออกจากบ้าน จากนั้นลดลงในช่วงกลางวัน และขึ้นสู่จุดพีคในช่วงหัวค่ำเมื่อผู้อยู่อาศัยกลับถึงบ้านและเริ่มใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าพร้อมกัน [4] ดังแสดงในรูปที่ 2

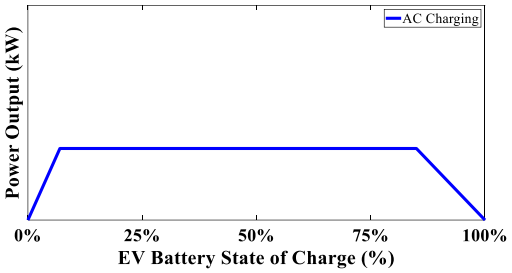


รูปที่ 2 ลักษณะกราฟโหลดของระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ESTACON 2026 | 17th

2.2 โหลดจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

โหลดจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเป็นภาระโหลดกำลังสูงเมื่อเทียบกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป โดยที่พักอาศัยส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องชาร์จแบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Charging) ขนาด 3.3–22 kW ซึ่งมีการใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ระหว่างการชาร์จ และจะลดลงเมื่อระดับการชาร์จแบตเตอรี่ (SOC) ใกล้เต็ม ดังแสดงพฤติกรรมในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการดึงกำลังไฟฟ้าของเครื่องชาร์จ

ระยะเวลาในการชาร์จจะขึ้นอยู่กับระดับประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (SOC) ณ เวลาที่เริ่มชาร์จ กล่าวคือหาก SOC เริ่มต้นต่ำ ระยะเวลาชาร์จจนเต็มก็จะนานขึ้นตามสัดส่วน ดังนั้นกราฟโหลดของเครื่องชาร์จแต่ละเครื่องจะมีลักษณะขึ้นทันทีที่เริ่มชาร์จและคงที่ตามกำลังเครื่องตลอด ก่อนจะตัดโหลดออกเมื่อแบตเตอรี่เต็ม โดยระยะเวลาที่โหลดคงอยู่ในระบบจะแตกต่างกันไปในแต่ละคันตามค่า SOC เริ่มต้น

พฤติกรรมการชาร์จส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในช่วงเวลาค่ำถึงกลางคืน ความต้องการไฟฟ้าของระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงมีการนำโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use: TOU) มาใช้เพื่อจูงใจให้ผู้ใช้งานตั้งเวลาชาร์จหลังเวลา 22:00 น. เพื่อหลีกเลี่ยงช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และลดภาระโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม หากผู้ใช้ทุกรายเริ่มชาร์จพร้อมกันทันทีที่เข้าสู่ช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย (Off-Peak) กลับทำให้เกิดการกระจุกตัวของโหลดขนาดใหญ่ในเวลาเดียวกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำอย่างรุนแรงแทน[5]

2.3 แรงดันตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

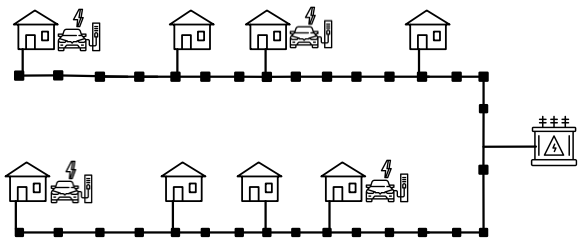
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายจำหน่ายที่มีค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ จะเกิดแรงดันตกคร่อมสายและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปของความร้อน โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียแปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสาย ดังนั้นเมื่อโหลดในระบบเพิ่มสูงขึ้น กระแสที่ไหลในสายจะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและแรงดันไฟฟ้าที่ผู้ใช้ปลายสายได้รับลดต่ำลงตามความยาวของสายจำหน่าย [6]

3. การดำเนินงาน

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเชื่อมต่อโหลดการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยเลือกใช้โปรแกรม OpenDSS สำหรับสร้างแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าและคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรมจำลองระบบ เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบอนุกรมเวลาตลอด 24 ชั่วโมง

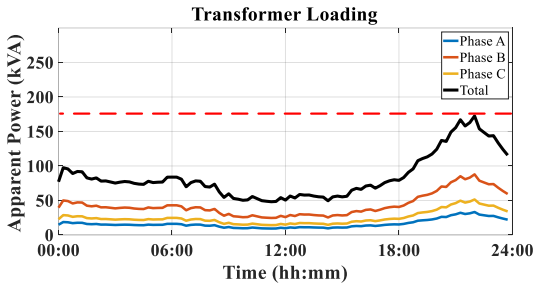
3.1 การจำลองระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ในการศึกษานี้ใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่มีหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 250 kVA โดยมีระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำขนาด 32 บัส มีโหลดบ้านอยู่อาศัยเฟส A จำนวน 19 เครื่อง เฟส B จำนวน 50 เครื่อง และเฟส C จำนวน 29 เครื่อง



รูปที่ 4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำขนาด 32 บัส

โดยกำหนดให้เครื่องชาร์จมีขนาด 7 kW ความจุแบตเตอรี่ 50 kWh และเริ่มชาร์จพร้อมกันเวลา 22:00 น. จากนั้นประเมินขีดความสามารถของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่ยังสามารถรองรับเพิ่มเติมได้ก่อนที่หม้อแปลงจะเกิดสภาวะภาระเกินพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าปรากฏของหม้อแปลง

ซึ่งพบว่าสามารถรองรับการชาร์จพร้อมกันได้สูงสุด 12 เครื่อง โดยแบ่งเป็นเฟสละ 4 เครื่อง ติดตั้งแบบสุ่มตำแหน่งในระบบ

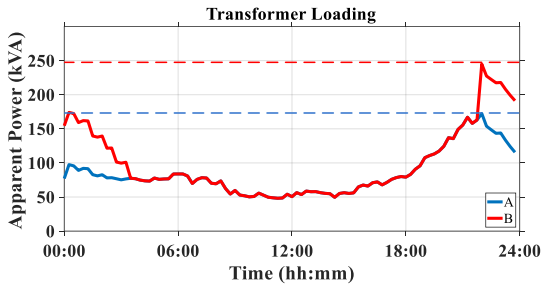
การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าภาระโหลดของหม้อแปลง แรงดันไฟฟ้าปลายสาย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1) กรณีที่ไม่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า 2) กรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกันทุกหลังคาเรือนในช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด

4. ผลการจำลอง

ผลการจำลองระบบจำหน่ายแรงต่ำตลอด 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าและกรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน โดยวิเคราะห์ผลกระทบใน 3 ด้าน ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง แรงดันไฟฟ้าปลายสาย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.1กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

การวิเคราะห์ภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า พิจารณาจากกำลังไฟฟ้าปรากฏ ที่หม้อแปลงต้องจ่าย เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีปกติและกรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 6



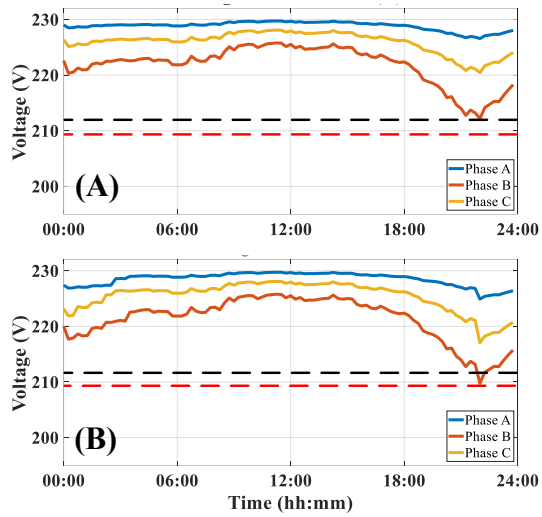
รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าปรากฏของหม้อแปลง

: A กรณีที่ไม่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า
: B กรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน

จากการจำลองพฤติกรรมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงตลอด 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติและสภาวะที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน พบว่าในกรณีปกติภาระโหลดของหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ ขณะที่กรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน เมื่อเข้าสู่เวลา 22:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มชาร์จพร้อมกันทันที ค่ากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อนที่ภาระโหลดจะค่อย ๆ ลดลงและกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

4.2 แรงดันตกปลายสาย

การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายของระบบจำหน่าย โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีปกติและกรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาใน ดังแสดงในรูปที่ 7



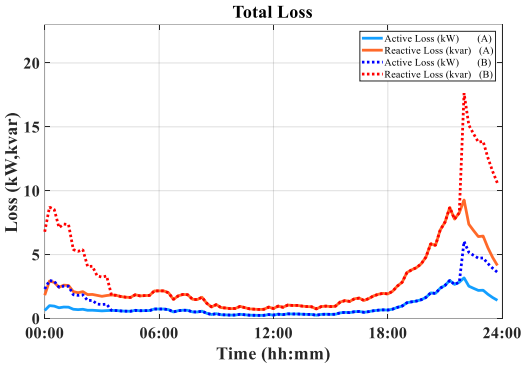
รูปที่ 7 แรงดันตกปลายสาย

: A กรณีที่ไม่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า
: B กรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน

ผลการจำลองระบบพบว่า ในสภาวะปกติ (กรณี A) ระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกเฟสมีการผันแปรตามภาระโหลดปกติของบ้านพักอาศัย โดยมีระดับแรงดันต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 212 โวลต์ ณ เวลา 22:00 น. แต่เมื่อพิจารณากรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน (กรณี B) การเพิ่มขึ้นของโหลดขนาดใหญ่พร้อมกันส่งผลให้ระดับแรงดันปลายสายของทุกเฟสตกลงอย่างรวดเร็ว ณ เวลา 22:00 น. โดยเฟสที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดมีระดับแรงดันดิ่งต่ำลงไปอยู่ที่ประมาณ 210 โวลต์ ซึ่งลดต่ำลงจากเดิมเพิ่มเติมอีก 2 โวลต์ ก่อนที่ระดับแรงดันจะค่อย ๆ ฟื้นตัวกลับคืนสู่สภาวะปกติในช่วงเช้ามืดหลังจากที่รถยนต์ไฟฟ้าบางส่วนชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มและตัดออกจากระบบ

4.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบ เทียบระหว่างกรณีปกติและกรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

: A กรณีที่ไม่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า
: B กรณีที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกัน

ผลการจำลองระบบพบว่า ณ เวลา 22:00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มดึงกำลังไฟฟ้าชาร์จพร้อมกันทันที การกระจุกตัวของภาระโหลดขนาดใหญ่ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบพุ่งสูงขึ้นอย่างกะทันหันเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 3 kW พุ่งสูงไปอยู่ที่ 6 kW หรือคิดเป็นกระโดดเพิ่มขึ้นสูงถึง 2 เท่าของสภาวะปกติ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 9 kVar พุ่งสูงขึ้นไปอยู่ที่ 17.5 kVar หรือคิดเป็นเพิ่มขึ้นประมาณ 1.94 เท่าก่อนที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจะค่อย ๆ ลดลงเข้าสู่สภาวะปกติในช่วงเช้ามืดหลังจากรถยนต์ไฟฟ้าบางส่วนชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มและตัดออกจากระบบ สะท้อนให้เห็นว่าการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายอย่างชัดเจน

5. สรุป

จากผลการจำลองผลกระทบในระบบจำหน่ายแรงต่ำเมื่อชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า สรุปได้ว่า การใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU นำมาซึ่งพฤติกรรมการตั้งเวลาชาร์จพร้อมกันทันที ณ เวลา 22:00 น. ซึ่งการกระจุกตัวของโหลดส่งผลเสียต่อระบบจำหน่ายอย่างรวดเร็วและรุนแรง โดยทำให้เกิดแรงดันตกปลายสายดิ่งต่ำลง

ไปอยู่ที่ระดับ 210 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่ากรณีปกติที่ระดับ 212 โวลต์ และในเวลาเดียวกันส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบพุ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า (จาก 3 kW เป็น 6 kW) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียเพิ่มขึ้น 1.94 เท่า (จาก 9 kVar เป็น 17.5 kVar) เมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ก่อนที่สภาวะทางไฟฟ้าจะฟื้นตัวกลับสู่ปกติในช่วงเช้ามืดหลังจากรถยนต์ไฟฟ้าบางส่วนชาร์จเต็มและตัดออกจากระบบ ข้อมูลดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงให้เห็นว่า แม้การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในช่วง Off-peak จะช่วยลดภาระของหม้อแปลงในช่วงหัวค่ำได้ดี แต่การแห่ชาร์จพร้อมกันทันทีที่เริ่มเข้าช่วงเวลา TOU กลับสร้างปัญหาแรงดันตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำอย่างรุนแรงแทน ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนโครงข่าย เพื่อรักษาเสถียรภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยรวมในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Anggraini, M. Amelin and L. Söder, "Electric Vehicle Charging Considering Grid Limitation in Residential Areas," *2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA, 2024, pp. 1-6

[2] Nutkani, I., et al.: Impact of EV charging on electrical distribution network and mitigating solutions – A review. IET Smart Grid. (2024).

[3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2559). มาตรฐานข้อกำหนดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ากรุงเทพฯ: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

[4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2569). ข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า https://www.pea.co.th/about-pea/load-research

[5] Saleem, Samran, "A study of electric vehicle charging to mitigate impacts on a power distribution system" (2024). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 74017.

[6] Gönen, T. (2014). Electric Power Distribution Engineering. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press.

การประเมินผลกระทบของการติดตั้งโซล่าเซลล์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำ

Assessment of the Impact of Photovoltaic System Installation on Voltage Profile and Power Losses in Low-Voltage Distribution Networks

ไพลิน บุญนาค[1], กนกวรรณ ศรีสงคราม[1], มงคล ด่านบำรุงตระกูล[1], พินิจ ศรีธร[1], นพณัฐ จิตกรียาน[1]
ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1], และธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[1*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*E-mail: @rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 044-233000 ต่อ 3111

บทคัดย่อ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำมีบทบาทสำคัญในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ปลายทาง ปัจจุบันมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (โซล่าเซลล์) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการติดตั้งโซล่าเซลล์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยใช้โปรแกรม LTSim ในการจำลองและวิเคราะห์ผลภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าการติดตั้งโซล่าเซลล์ในขนาดที่เหมาะสมสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบได้ อย่างไรก็ตาม หากกำลังการผลิตสูงเกินความต้องการของโหลดจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นและแรงดันไฟฟ้ายกตัวสูงขึ้นและอาจเกิดภาวะแรงดันยกตัวสูงขึ้นเป็นเส้นตรง จนเสี่ยงต่อการเกิดภาวะแรงดันเกินได้ ดังนั้น การกำหนดขนาดการติดตั้งโซล่าเซลล์ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพและความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

คำสำคัญ: ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, การจำลองระบบไฟฟ้า, LTSim

Abstract

Low-voltage distribution systems play an important role in delivering electrical energy to end users. Currently, photovoltaic (PV) systems are being increasingly installed due to their clean and environmentally friendly nature. This study aims to evaluate the impacts of PV system integration on voltage levels and power losses in a low-voltage distribution system. The LTSim software was employed to simulate and analyze system performance under various operating conditions. The results indicate that appropriately sized PV installations can reduce power losses and improve voltage profiles within the distribution network. However, when the PV generation exceeds the load demand, reverse power flow may occur, leading to increased power losses and voltage rise. In some cases, the voltage may increase linearly along the feeder, thereby increasing the risk of overvoltage conditions. Therefore, determining an appropriate PV installation capacity is essential for maintaining the efficiency and stability of low-voltage distribution systems.

Keywords: Low-Voltage Distribution System, Photovoltaic (PV) System, Power System Simulation, LTSim

1. บทนำ

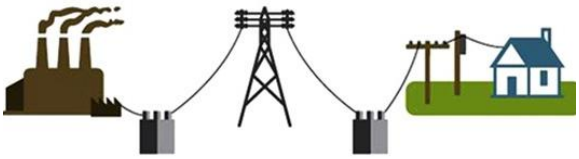
ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำมีบทบาทสำคัญในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ปลายทาง ปัจจุบันการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือโซล่าเซลล์ (Photovoltaic : PV) ในระบบจำหน่ายได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจ [1] เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานสะอาด อย่างไรก็ตาม การติดตั้งโซล่าเซลล์โดยขาดการวางแผนที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาทางเทคนิค เช่น การแปรปรวนของระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการติดตั้งในขนาดที่น้อยเกินไปจะทำให้เสียโอกาสในการใช้พลังงานสะอาดอย่างเต็มประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกัน หากติดตั้งมากเกินไปก็อาจสร้างภาระให้แก่ระบบ และส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ [2]

แม้ว่าในอดีตจะมีการประเมินผลกระทบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการตรวจวัดจากระบบจริง แต่วิธีการดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านความซับซ้อนในการวิเคราะห์และต้องใช้งบประมาณสูงในการดำเนินงาน ดังนั้น การประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์จำลองระบบไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ

บทความนี้จึงนำเสนอการใช้โปรแกรม LTSim เข้ามาเป็นเครื่องมือในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่มีการติดตั้งโซล่าเซลล์ โดยไม่จำเป็นต้องทำการตรวจวัดในพื้นที่จริง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพและผลกระทบของการติดตั้งโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพของระบบคุณภาพกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะนำไปสู่แนวทางในการวางแผนและออกแบบการติดตั้งระบบโซล่าเซลล์ให้มีความมั่นคงและมีเสถียรภาพสูงสุดต่อไป

2. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำมีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบศูนย์กลางการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดให้เป็นขนาด 220/380V 50Hz ตรงตามพิกัดของเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป และจ่ายไฟฟ้าดังกล่าวไปตามสายป้อนแรงต่ำ (Feeder) ไปยังโหลดแสดงดังรูปที่ 1

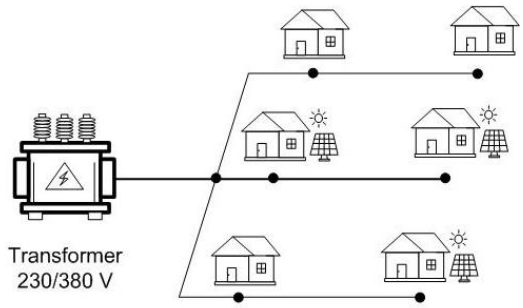


รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง [1]

2.1 พฤติกรรมของโหลด

โหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นภาระหลักของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ของการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ แสดงดังรูปที่ 2 โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แบ่งโหลดออกเป็น 7 ชนิด ได้แก่ 1) โหลดที่พักอาศัยที่มีการใช้หน่วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วย/เดือน 2) โหลดที่พักอาศัยที่มีการใช้หน่วยกำลังไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วย/เดือน 3) กิจการขนาดเล็ก 4) กิจการขนาดกลาง 5) กิจการขนาดใหญ่ 6) กิจการเฉพาะอย่าง และ 7) องค์กรไม่แสวงหาผลกำไร

โหลดแต่ละกลุ่มมีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าต่างกัน โหลดที่เป็นที่พักอาศัยและกิจการเฉพาะอย่างมักจะใช้ไฟฟ้าช่วงกลางคืน ส่วนโหลดที่กลุ่มที่เหลือจะใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน พฤติกรรมเหล่านี้ ส่งผลต่อหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ [3]



รูปที่ 2 ตัวอย่างระบบจำหน่ายแรงต่ำ

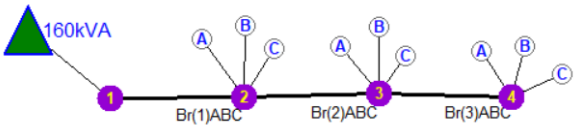
2.2 พฤติกรรมของโซล่าเซลล์

ไฟฟ้าที่ได้จากโซล่าเซลล์จะแปรผันตามปริมาณของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ส่วนใหญ่จะมีแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โซล่าเซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ และปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรตามความเข้มของแสงอาทิตย์ ทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโซล่าเซลล์ในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน [3] การติดตั้งโซล่าเซลล์ในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน ย่อมมีความแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อม เป็นผลให้เกิดความไม่สอดคล้องกับความต้องการของโหลดที่มีความหลากหลาย จึงจำเป็นต้องคำนึงพฤติกรรมของทั้งระบบและพฤติกรรมของโซล่าเซลล์ที่จะเข้ามามีบทบาทด้วย

3. การดำเนินงาน

บทความนี้นำเสนอการจำลองพฤติกรรมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำภายใต้สภาวะที่มีการเชื่อมต่อระบบโซล่าเซลล์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาพิกัดกำลังติดตั้งที่เหมาะสม [4] เนื่องจากการติดตั้งระบบโซล่าเซลล์ ในพิกัดที่สูงเกินความต้องการของภาระทางไฟฟ้า จะส่งผลให้เกิดปัญหาการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า (Reverse Power Flow) เข้าสู่หม้อแปลง [5] ซึ่งส่งผลให้แรงดันปลายสายเพิ่มสูงขึ้น แต่หากน้อยเกินไปจะไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของโหลดได้

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม LTSim เป็นเครื่องมือในการจำลองและวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ โดยดำเนินการรวบรวมพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากพื้นที่ศึกษาจริง เพื่อนำมาสร้างเป็นแผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) สำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการจำลองสถานการณ์ต่างๆ และทำให้เห็นภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ทำการศึกษา มีหม้อแปลงขนาด 160 kVA 3 Ph 230 V (สัญญาลักษณ์รูปสามเหลี่ยม) จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดรอบข้างจำนวน 26 บัส การศึกษานี้มีการติดตั้งโซล่าเซลล์ในเฟส B (สัญญาลักษณ์วงกลม) ที่ปลายสายของฟีดเดอร์

3.1 แนวคิดที่นำเสนอ

การกำหนดพิกัดของโซล่าเซลล์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่เหมาะสมที่สุด จะต้องมีความสมดุลกับภาระโหลดในระบบ หากติดตั้งโซล่าเซลล์ที่มีกำลังผลิตสูงกว่าความต้องการของโหลด ณ ขณะนั้น จะก่อให้เกิดสภาวะกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าสู่หม้อแปลงและระบบจำหน่ายหลัก ซึ่งส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบผิดปกติและเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power loss) ให้สูงขึ้น ในทางกลับกัน หากติดตั้งในพิกัดที่ต่ำเกินไป ระบบก็จะไม่อาจตอบสนองต่อความต้องการใช้พลังงานของโหลดได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

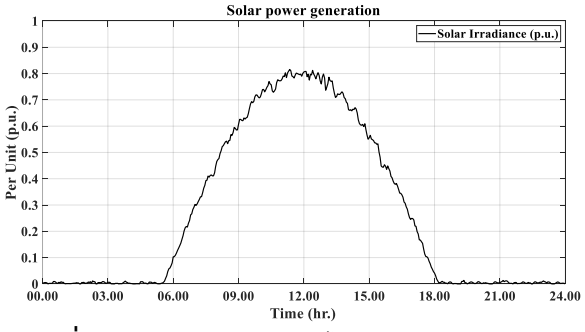
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโซล่าเซลล์ จากลักษณะสมบัติการผลิตไฟฟ้าพบว่าระบบโซล่าเซลล์มีกำลังการผลิตสูงสุดในช่วงเวลา 13:00 น. ซึ่งมักจะเกิดความไม่สอดคล้อง กับช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ของผู้ใช้ไฟฟ้า ยังพบว่าช่วงเวลาที่ระบบมีความต้องการใช้

ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในช่วง 20:00–22:00 น. ซึ่งไม่สอดคล้องกับช่วงเวลาที่โซล่าเซลล์ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่งผลให้สามารถช่วยลดภาระโหลดได้ดีในช่วงเวลากลางวัน แต่ไม่สามารถลดภาระโหลดสูงสุดในช่วงเวลากลางคืน

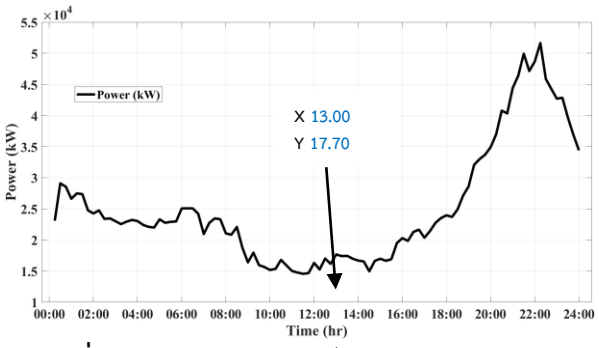
ดังนั้น เพื่อบรรเทาปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น พิกัดกำลังไฟฟ้าของโซล่าเซลล์จึงควรมีค่าเทียบเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด ณ ช่วงเวลาดังกล่าวพอดี เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$P_{solar} = P_{peak\ 13:00} \quad (1)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างพิกัดกำลังไฟฟ้าที่โซล่าเซลล์ผลิตได้เทียบกับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้งาน ณ เวลา 13:00 น. ดังแสดงในรูปที่ 5 จะสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินหาสัดส่วนการติดตั้ง ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบสามารถดึงพลังงานสะอาดมาใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ



รูปที่ 4 กราฟการผลิตกำลังไฟฟ้าของโซล่าเซลล์



รูปที่ 5 กราฟการจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

ในการศึกษานี้ กำหนดขนาดการติดตั้งโซล่าเซลล์ (PV) เป็นร้อยละของกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงจ่ายให้กับโหลด ณ เวลา 13.00 น. โดยกำหนดให้ 100% ของการติดตั้ง PV เท่ากับ 17.7 kW ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดในช่วงเวลาดังกล่าว และกำหนดตำแหน่งการติดตั้ง PV ไว้ที่กึ่งกลางฟีดเดอร์ของระบบ โดยเชื่อมต่อเข้ากับเฟส A ในการจำลอง ส่วนกรณี 0% ซึ่งหมายถึงไม่มีการติดตั้ง PV เพื่อใช้เป็นกรณีอ้างอิง (Base Case) และกรณี 110–200% เป็นการเพิ่มขนาดการติดตั้งเมื่อเทียบกับค่าฐาน 100% ทั้งนี้ ขนาดการติดตั้งที่กำหนดถูกนำมาใช้ในการจำลองเพื่อประเมินผลกระทบของการติดตั้ง PV ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงต่ำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การหาขนาดโซล่าเซลล์

การติดตั้ง PV (%)	กำลังไฟฟ้า (kW)
0%	0
100%	17.70
110%	19.47
120%	21.24
130%	23.01
140%	24.78
150%	26.55
160%	28.32
170%	30.09
180%	31.86
190%	33.63
200%	35.40

4. ผลการจำลอง

โครงสร้างและพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ได้รวบรวมจากฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ร่วมกับการลงพื้นที่สำรวจจริง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและสอดคล้องกับสภาพ

การใช้งานปัจจุบัน โดยใช้โปรแกรม LTSim เพื่อประเมินขนาดของโซล่าเซลล์ที่เหมาะสม ภายใต้สัดส่วนการติดตั้งในสภาวะก่อนการติดตั้ง (0%) และสภาวะที่มีการเชื่อมต่อระบบตั้งแต่ระดับ 100% ไปจนถึง 200% เทียบกับพิกัดภาระโหลดของหม้อแปลง โดยปรับเพิ่มขนาดพิกัดขึ้นทีละ 10% เพื่อประเมินแนวโน้มและขีดจำกัดของระบบ

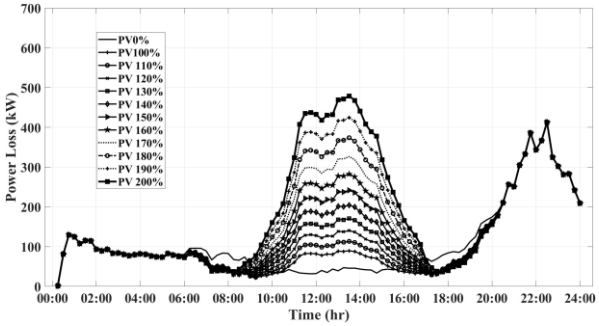
ดังนั้นจึงได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตามกระแสไฟฟ้า (Non-linear Curve), และ 2) ระดับแรงดันไฟฟ้าปลายสาย เพื่อประเมินความมั่นคงของระบบ โดยผลการวิเคราะห์ทั้งหมดจะถูกนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการหาขนาดพิกัดติดตั้งโซล่าเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

4.1 กำลังไฟฟ้าสูญสีย

จากผลการจำลองพบว่า ในช่วงเวลา 09:00–17:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มแสงอาทิตย์เอื้อต่อการผลิตไฟฟ้าพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าที่ผ่านหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณากรณีการติดตั้งที่ระดับ 100% จะพบว่าเส้นกราฟมีระดับต่ำที่สุดในช่วงกลางวัน เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณสอดคล้องกับความต้องการของภาระโหลด ทำให้ระบบดึงกำลังไฟฟ้าจากหม้อแปลงน้อยที่สุด ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดภาระของหม้อแปลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนการติดตั้งเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 110% จนถึง 200% กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซล่าเซลล์มีปริมาณเกินกว่าความต้องการของโหลดในพื้นที่จำลอง ส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลง กราฟในช่วงเวลานี้จึงแสดงขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนการติดตั้ง โดยเฉพาะในช่วงเวลา 12:00–14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบมีการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด กรณีการติดตั้งที่สัดส่วน 200% ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าหม้อแปลงพุ่งสูงถึงระดับ 470–480 kW แสดงดังรูปที่ 6

จากพฤติกรรมดังกล่าว สรุปได้ว่าการติดตั้งระบบโซล่าเซลล์ในพิกัดที่สูงเกินความเหมาะสม ไม่ช่วยลดภาระของโหลดในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (ช่วงเวลากลางคืน) แต่กลับสร้างภาระความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับปริมาณมหาศาลให้แก่หม้อแปลงในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพิกัดความทนทานของอุปกรณ์และเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำในภาพรวมได้



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อมีการติดตั้งโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆ

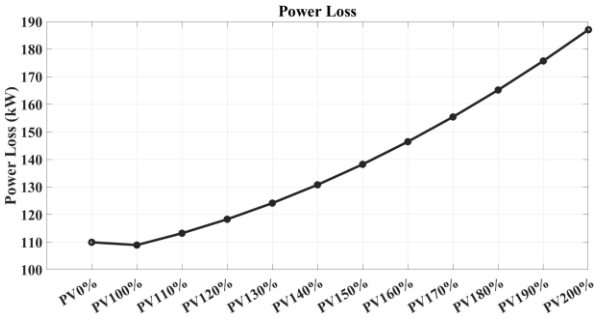
จากผลการจำลองค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ พบว่าสัดส่วนการติดตั้งโซล่าเซลล์มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยในสภาวะก่อนการติดตั้ง (0%) ระบบมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมอยู่ที่ประมาณ 110 kW แต่เมื่อมีการติดตั้งที่สัดส่วน 100% ของพิกัดโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะลดลงแตะจุดต่ำสุดที่ประมาณ 109 kW เนื่องจากพลังงานที่ผลิตได้มีความสมดุลกับความต้องการของโหลด ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ต้องไหลผ่านสายจำหน่ายจากต้นทางมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถือเป็นสัดส่วนการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ในการลดการสูญเสียของระบบ

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนการติดตั้งให้สูงขึ้นตั้งแต่ระดับ 110% ไปจนถึง 200% กำลังไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้จะเกิดการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายหลัก ยิ่งสัดส่วนการติดตั้งสูงขึ้น กระแสไหลย้อนกลับก็ยิ่งมีความหนาแน่น

มากขึ้น และเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแปรผันตามกระแสไฟฟ้ายกกำลังสองตามสมการ [2] เส้นกราฟจึงพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะเส้นโค้ง (Non-linear Curve) โดยมีค่าสูงสุดถึงระดับ 190 kW ที่สัดส่วน 200% แสดงดังรูปที่ 7

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นชัดเจนว่า การติดตั้งระบบโซล่าเซลล์ที่เกินขีดจำกัดความต้องการของโหลด นอกจากจะไม่ช่วยสนับสนุนระบบแล้ว ยังส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายตัวนำเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณและลดทอนประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจำหน่ายลงอย่างมีนัยสำคัญ

$$P_{loss} = I^2R \qquad [2]$$

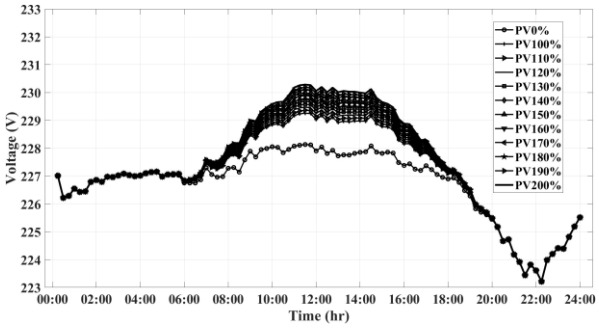


รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ย เมื่อติดตั้งโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆ

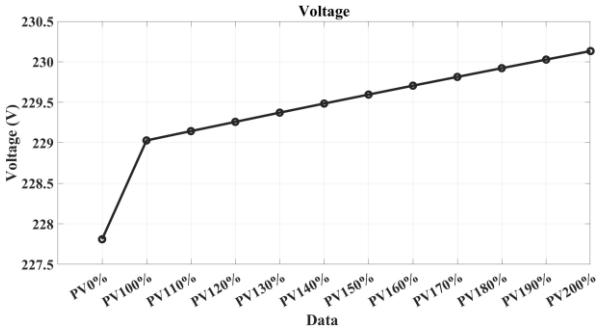
4.2 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งโซล่าเซลล์

จากผลการจำลอง รูปที่ 8 แสดงแรงดันไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมง ณ จุดเชื่อมต่อของระบบจำหน่ายแรงต่ำภายใต้สัดส่วนการติดตั้งโซล่าเซลล์ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ PV0% ถึง PV200% พบว่าในช่วงเวลากลางวันซึ่งเป็นช่วงที่โซล่าเซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ ค่าแรงดันมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดการติดตั้ง โดยเฉพาะในช่วงเวลาประมาณ 09:00–15:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์อยู่ในระดับสูง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งโซล่าเซลล์

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งโซล่าเซลล์มีส่วนช่วยปรับปรุงระดับแรงดันและลดปัญหาแรงดันตกในช่วงเวลาที่มีการผลิตไฟฟ้า ดังรูปที่ 9 อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนการติดตั้งโซล่าเซลล์สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจะพบแนวโน้มที่แรงดันเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาแรงดันเกินและการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าได้ หากขนาดการติดตั้งเกินความสามารถในการรองรับของระบบจำหน่าย



รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการติดตั้งโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆ



รูปที่ 9 แรงดันเฉลี่ย เมื่อติดตั้งโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆ

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประเมินผลกระทบของการติดตั้งระบบโซล่าเซลล์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำผ่านแบบจำลอง LTSim ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนการติดตั้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยพิกัดการติดตั้งที่ระดับ 100% ของภาระโหลดหม้อแปลง ถือเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากพลังงานที่ผลิตได้มีความสมดุลกับความต้องการของโหลด สัดส่วนดังกล่าวช่วยลดภาระการจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงในช่วงเวลากลางวันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบลดลงสู่ระดับต่ำที่สุด และช่วยยกระดับแรงดันไฟฟ้าบริเวณปลายสายป้อนให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสม ซึ่งระบบจะได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่

ในทางกลับกัน การติดตั้งโซล่าเซลล์ที่สูงเกินความต้องการของโหลด (ตั้งแต่ระดับ 110% ถึง 200%) จะก่อให้เกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า ปริมาณมหาศาลเข้าสู่หม้อแปลง ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียพุ่งสูงขึ้นแบบทวีคูณในลักษณะเส้นโค้ง (Non-linear Curve) และทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าปลายสายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในลักษณะเส้นตรง (Linear Trend) จนเสี่ยงต่อภาวะแรงดันเกิน ลักษณะความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ดังกล่าวจึงเป็นข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรมที่สำคัญ ซึ่งช่วยย้ำเตือนให้ตระหนักถึงผลเสียของการเผื่อขนาดพิกัดติดตั้ง พร้อมทั้งสามารถนำแนวโน้มเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ขีดจำกัดการ เพื่อเป็นเกณฑ์ในการวางแผนและออกแบบระบบจำหน่ายให้มีความมั่นคงในการรองรับพลังงานสะอาดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Majeed, I. B., & Nwulu, N. (2023). "Reverse Power Flow Due to Solar Photovoltaic in the Low Voltage Network." *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56674–56691, 2023,

[2] Gui, Y., Nainar, K., Bendtsen, J. D., Diewald, N., Iov, F., Yang, Y., Blaabjerg, F., Xue, Y., Liu, J., Hong, T., & Stoustrup, J. (2024). "Voltage Support With PV Inverters in Low-Voltage Distribution Networks: An Overview." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 1503–1522, 2024,

[3] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, M. R. Gouvea, S. Ahn, and F. M. Figueiredo, "Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 375–380, Jan. 2000.

[4] P. Kanklangdon, M. Dabumrungtrakul, P. Srithorn, T. Sriwisutthichai and N. Intarabamrung, "PV Sizing Evaluation for Low-Voltage Distribution Power Systems," *2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2024, pp. 82-86

[5] Iioka, D. (2020). Technical Issues of Voltage Regulation in Distribution System with Large Reverse Power Flow from Photovoltaic Systems and its Solutions. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, 140(6), 441–444.

การควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สำหรับการชดเชยโหลดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

Adaptive Band Hysteresis Current Control for Unbalanced Load Compensation in Low-Voltage Distribution Systems

จิรัชยา เกตสันเทียะ[1*], พินิจ ศรีธร, มงคล[1] ด่านบำรุงตระกูล[1] , และธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*E-mail: jirachaya.ke@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ +6664-603-2015

บทคัดย่อ

ปัญหาโหลดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำสามารถแก้ไขได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ชดเชยกระแส และนิยมใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่ ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องความถี่สวิตชิ่งผันผวนที่ก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุม บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับค่าได้ โดยทำการปรับขนาดความกว้างแถบแบบเวลาจริงตามความชันของกระแสอ้างอิง เพื่อรักษาความถี่สวิตชิงเป้าหมายให้คงที่ ผลการทดสอบผ่านโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ภายใต้สภาวะโหลดไม่สมดุลอย่างรุนแรงยืนยันได้ว่า เทคนิคนี้สามารถสร้างกรอบความกว้างแถบพลวัตที่ทำงานแยกอิสระในแต่ละเฟส ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ตอบสนองการจ่ายกระแสชดเชยได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และสามารถรักษาความถี่สวิตชิงให้คงที่ได้ตลอดการทำงาน

คำสำคัญ: ฮิสเตอรีซิสแบบปรับแถบ อินเวอร์เตอร์ ความถี่สวิตชิ่ง กระแสริปเปิล

Abstract

Unbalanced loads in low-voltage distribution systems can be mitigated by inverter-based current compensation. However, the widely used fixed-band hysteresis control has limitations regarding variable switching frequencies, which causes the control system problems. This paper proposes an adaptive band hysteresis current control that adjusts the bandwidth in real-time based on reference current slope, in order to maintain a constant target switching frequency. Computer simulation results confirm that, in severe unbalanced load conditions, this proposed technique can provide independent dynamic bandwidth envelopes for each phase. Consequently, the inverter can respond and inject compensation current accurately and rapidly, while successfully maintaining a constant switching frequency throughout the operation.

Keywords: Adaptive Band Hysteresis, Inverter, Switching Frequency, Ripple Current.

1. บทนำ

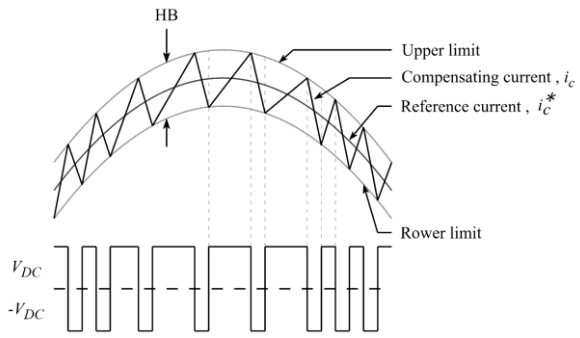
ปัญหาโหลดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบ การปรับสมดุลเฟสด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปจะอาศัยอินเวอร์เตอร์ในการสร้างและฉีดกระแสชดเชยแบบไม่สมดุลเข้าสู่ระบบ [1] อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสภาวะโหลดที่ผันผวนได้อย่างรวดเร็ว การควบคุมการสร้างกระแสชดเชยของทั้ง 3 เฟส จึงต้องได้รับการพัฒนาให้ทำงานเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้ได้ความเร็วและความแม่นยำสูงสุดในทุกสภาวะการชดเชย [2]

การควบคุมกระแสชดเชยเพื่อให้ตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว วิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ คือการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Current Control) งานวิจัยใน [3] , [4] , [5] , [6] และ [7] ต่างยืนยันตรงกันว่า แม้เทคนิคดังกล่าวจะมีจุดเด่นด้านการตอบสนองที่รวดเร็วและมีโครงสร้างระบบควบคุมที่ไม่ซับซ้อน แต่การควบคุมด้วยแถบฮิสเตอรีซิสแบบคงที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความถี่สวิตชิง (Switching frequency) และคุณภาพของกระแสชดเชยเอาต์พุต โดยมักก่อให้เกิดปัญหาความถี่สวิตชิงที่ผันผวน ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์แล้ว ยังไม่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานจริงที่กระแสอ้างอิง (Reference current) มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตตามการชดเชยของโหลดที่ไม่สมดุล [8] , [9]

บทความนี้จึงนำเสนอการยกระดับประสิทธิภาพระบบควบคุมด้วยวิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแถบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive-band Hysteresis Current Control) เพื่อขจัดข้อจำกัดดังกล่าว โดยวิธีนี้จะคำนวณและปรับขนาดของแถบควบคุมโดยอัตโนมัติให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิง ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยรักษาความถี่ในการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่มากขึ้นเท่านั้น แต่ยังลดความผิดเพี้ยนและยกระดับคุณภาพของกระแสชดเชย ส่งผลให้ระบบสามารถจ่ายกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในสภาวะโหลดไม่สมดุลได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพสูงสุด [10]

2. เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Current Control: HCC)

การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส เป็นวิธีการควบคุมที่มีหลักการพื้นฐานคือการสร้างขอบเขต รอบสัญญาณกระแสอ้างอิง i_c^* ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตบนและขอบเขตล่าง โดยมีระยะห่างระหว่างขอบเขตทั้งสองเรียกว่า แถบฮิสเตอรีซิส ในกระบวนการทำงาน เมื่อกระแสที่วัดได้มีค่าพุ่งสูงเกินขอบเขตบน ตัวควบคุมจะสั่งการให้สวิตช์ตัวบนหยุดทำงานและสวิตช์ตัวล่างทำงาน ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเป็นลบและกระแสลดลง ในทางกลับกัน เมื่อกระแสลดต่ำกว่าขอบเขตล่าง ตัวควบคุมจะสั่งการในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้กระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะรักษากระแสให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ได้เสมอ



รูปที่ 1 หลักการของเทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส

2.1 การควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่

ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสจัดเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความเรียบง่ายและมีอัตราการตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็ว โดยทำงานโดยตรงกับสัญญาณความผิดพลาดของกระแสซึ่งไม่ต้องผ่านกระบวนการมอดูเลตที่ซับซ้อน สำหรับการควบคุมแบบความกว้างแถบคงที่ ระบบจะทำการสร้างขอบเขตบนและขอบเขตล่างล้อมรอบสัญญาณกระแสอ้างอิง โดยกำหนดความกว้างของแถบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Bandwidth : HB) ให้เป็นค่าคงที่ตายตัวตลอดการทำงาน ทั้งนี้ เพื่อควบคุมไม่ให้ความถี่ในการสวิตชิ่งของระบบพุ่งสูงเกินกว่าขีดจำกัดสูงสุดที่อุปกรณ์จะรองรับได้ ($f_{s,max}$) ขนาดของความกว้างแถบที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จาก

$$HB = \frac{V_{dc}}{8 f_{s,max} L} \qquad (1)$$

โดยที่ V_{dc} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ และ L คือค่าความเหนี่ยวนำของฟิลเตอร์ อย่างไรก็ตาม การกำหนดแถบควบคุมแบบคงที่นี้ก่อให้เกิดข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยน (Trade-off) ระหว่างคุณภาพของกระแสและประสิทธิภาพของระบบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากกำหนดแถบให้แคบกระแสริปเปิลจะต่ำและได้คุณภาพสัญญาณที่ดี แต่จะส่งผลให้ความถี่สวิตชิ่งสูงและเพิ่มความสูญเสียในการสวิตช์

ในทางกลับกัน หากกำหนดแถบให้กว้าง ความสูญเสียจะลดลงแต่ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) จะเพิ่มสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การที่ความชันของกระแสอ้างอิงรูปไซน์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ยังส่งผลให้ความถี่สวิตชิ่งจริงของระบบไม่คงที่ ซึ่งสร้างความยุ่งยากต่อการออกแบบวงจรกรองสัญญาณและการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2 วิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแถบปรับเปลี่ยนได้

เพื่อขจัดข้อจำกัดด้านความถี่สวิตชิ่งที่แปรปรวนในระบบแถบคงที่ เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแถบปรับเปลี่ยนได้ จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อบังคับให้ความถี่ในการสวิตชิ่งมีค่าคงที่เท่ากับความถี่เป้าหมาย ($f_{c,target}$) หัวใจสำคัญของแนวทางนี้คือการคำนวณและปรับเปลี่ยนขนาดของแถบฮิสเทรีซิสแบบเวลาจริงให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานของวงจร โดยสมการคำนวณความกว้างแถบแบบปรับตัวตามหลักการของ [8] สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$HB = \frac{V_{dc}}{8 f_{c,target} L}\left[1 - \frac{4L^2}{V_{dc}^2}\left(\frac{V_s}{L} + \frac{di_{c*}}{dt}\right)^2\right] \qquad (2)$$

โดยที่ V_s คือแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และ di_{c*}/dt คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงเมื่อเทียบกับเวลา จากกลไกของสมการดังกล่าว พลวัตของความกว้างแถบจะปรับตัวอย่างยืดหยุ่น โดยในช่วงที่แรงดันโหลดเคลื่อนที่อยู่บริเวณจุดตัดศูนย์ (Zero-crossing) ซึ่งกระแสมีการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติที่รวดเร็ว แถบฮิสเทรีซิสจะถูกขยายให้กว้างขึ้นเพื่อชะลอการสวิตช์ ในทางตรงกันข้าม เมื่อแรงดันโหลดเคลื่อนเข้าใกล้จุดยอดคลื่น (Peak value) ซึ่งกระแสมีการเปลี่ยนแปลงช้า แถบฮิสเทรีซิสจะถูกบีบให้แคบลงเพื่อเร่งให้เกิดการสวิตช์ที่ถี่ขึ้น [11]

การปรับเปลี่ยนขอบเขตแถบควบคุมแบบไดนามิกนี้ช่วยรักษาระดับความถี่สวิตชิ่งให้คงที่ตามที่ออกแบบไว้ และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ

จำหน่ายที่มีโหลดไม่สมดุล ระบบจะแยกคำนวณแถบฮิสเทรีซิสในแต่ละเฟสอย่างเป็นอิสระต่อกัน ส่งผลให้กระแสชดเชยสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำสูงสุด ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดขนาดริปเปิลและค่า THD ลงเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในการปรับสมดุลเฟสให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์แบบ

3. การดำเนินงาน

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้ บทความนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ โดยใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์อย่าง MATLAB /Simulink ในการจำลองสภาวะการทำงาน การทดสอบมุ่งเน้นไปที่การทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ในการชดเชยกระแสเมื่อระบบต้องเผชิญกับโหลดที่มีความไม่สมดุล

ในการจำลองการทำงาน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของวงจรควบคุมกระแสวงในเป็นหลัก จึงได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าบริเวณดีซีลิงค์ (DC-link voltage) มีค่าคงที่เท่ากับ 700 V โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอุดมคติ เพื่อตัดผลกระทบจากการแกว่งตัวของแรงดันที่อาจเกิดจากวงจรควบคุมแรงดันวงนอกออกไป ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของการปรับขนาดแถบฮิสเตอรีซิสได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น สำหรับการจำลองสภาวะโหลดไม่สมดุล ได้ทำการกำหนดอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสให้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตั้งค่าระบบและวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

ส่วนประกอบของระบบ	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย	380 Vrms
ความถี่ของระบบ	50 Hz
แรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์	700 V
ความเหนี่ยวนำของฟิลเตอร์	20 mH
ความถี่สวิตชิงเป้าหมาย	15 kHz
เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	1 μs

จากตารางที่ 1 ค่าความเหนี่ยวนำของฟิลเตอร์ (L) และความถี่สวิตชิงเป้าหมาย ($f_{c,target}$) จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรหลักในบล็อกฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุม เพื่อคำนวณหาขอบเขตของแถบฮิสเตอรีซิสแบบปรับได้ตามเวลาจริงในแต่ละรอบการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งผลลัพธ์ของการปรับความกว้างแถบนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่ในหัวข้อถัดไป

4. ผลการจำลองการทำงานและวิเคราะห์ผล

เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอ การวิเคราะห์ผลจะเริ่มต้นจากการพิจารณาพฤติกรรมของระบบเมื่อใช้เทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่เปรียบเทียบกับเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้ ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน เพื่อให้เห็นถึงข้อจำกัดก่อนนำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ได้รับการปรับปรุง

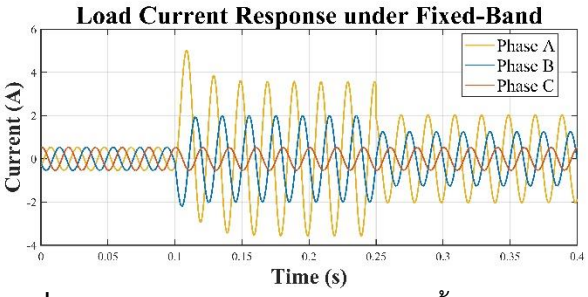
4.1 การตอบสนองของการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแถบคงที่

ในการประเมินประสิทธิภาพการชดเชยกระแสระบบได้ถูกทดสอบภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงโหลดทางพลวัต โดยสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ กระแสโหลด

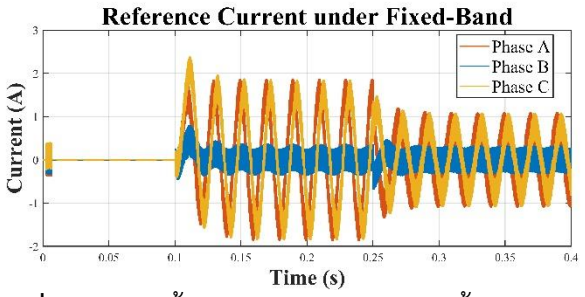
กระแสชดเชย และกระแสแหล่งจ่าย ได้อย่างชัดเจน ดังนี้ เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมของ กระแสโหลด (I_L) ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา t = 0.1 วินาที ระบบได้เกิดสภาวะโหลดไม่สมดุลอย่างรุนแรง ทำให้กระแสที่โหลดดึงไปใช้งานในแต่ละเฟสมีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงสเต็ปโหลดซ้ำอีกครั้งที่เวลา t = 0.25 วินาที

เพื่อตอบสนองต่อสภาวะโหลดที่ผิดปกติ วงจรควบคุมได้ทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง (I_c) ดังรูปที่ 3 ซึ่งมีลักษณะแอมพลิจูดแบบไม่สมดุล เพื่อใช้เป็นแกนนำทางให้อินเวอร์เตอร์สวิตชิงกระแสชดเชยออกมาหักล้างได้อย่างพอดี ผลจากการชดเชยนี้ทำให้ความผิดปกติของลำดับเฟสถูกกำจัดออกไปอย่างสมบูรณ์ สะท้อนให้เห็นผ่านรูปคลื่นกระแสแหล่งจ่าย (I_s) ในรูปที่ 4 ที่สามารถรักษารูปคลื่นให้กลับมามีความสมดุล แอมพลิจูดเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีความเรียบเนียนเป็นรูปคลื่นไซน์ตลอดช่วงการทำงาน

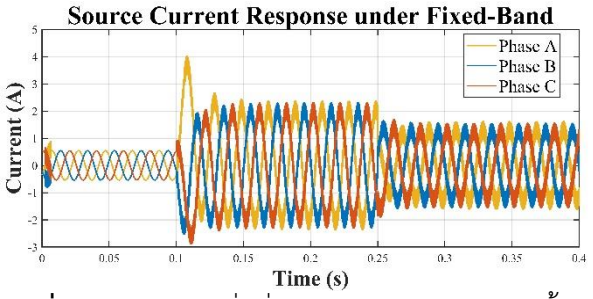
ความสำเร็จในการปรับสมดุลเฟสดังกล่าว เกิดจากการทำงานของเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่ ที่สั่งให้อินเวอร์เตอร์สวิตชิงกระแสให้อยู่ในกรอบความกว้างแถบที่กำหนดไว้ตายตัวที่ ±0.3 A อย่างเป็นอิสระต่อกันทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 5



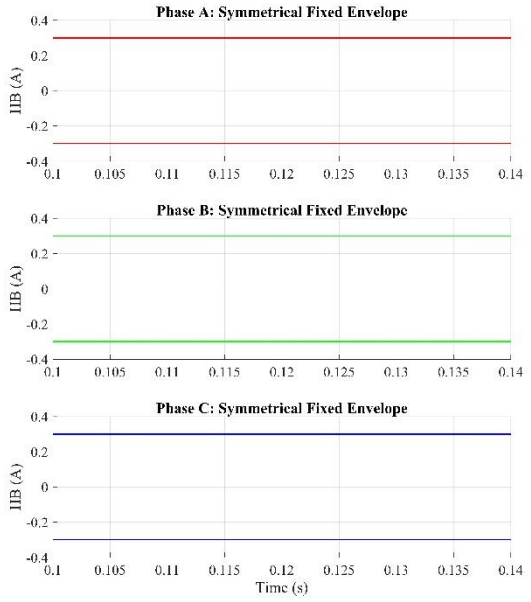
รูปที่ 2 กระแสโหลด (I_L) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่



รูปที่ 3 กระแสอ้างอิง (I_c) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่



รูปที่ 4 กระแสแหล่งจ่าย (I_s) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่



รูปที่ 5 ขนาดของความกว้างแถบฮิสเตอรีซิส ±0.3 A ด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบคงที่

อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญในด้านประสิทธิภาพสวิตชิง กล่าวคือ การบังคับให้กระแส

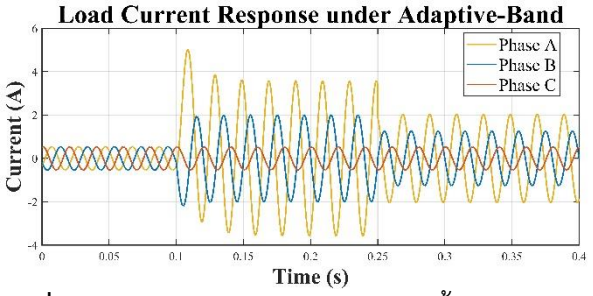
ต้องแกว่งตัวอยู่ในขอบเขตคงที่ ±0.3 A ในขณะที่ความชันของกระแสอ้างอิงรูปไซน์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงคลื่น ส่งผลให้ความถี่ในการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ พฤติกรรมการสวิตชิงที่แปรปรวนนี้จึงเป็นสาเหตุหลักที่สร้างความสูญเสียทางพลังงานในสวิตช์กำลัง และก่อให้เกิดการกระจายตัวของฮาร์มอนิกที่ควบคุมได้ยากในระบบ

4.2 การตอบสนองของการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิสแถบปรับได้

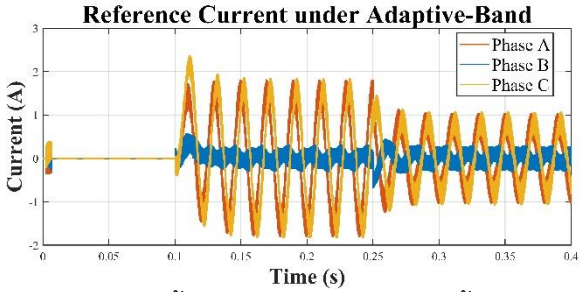
เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเทคนิคแบบดั้งเดิม ระบบได้ถูกทดสอบอีกครั้งด้วยเทคนิคการควบคุมฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้ ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงโหลดที่รุนแรงเช่นเดียวกัน ดังแสดงพฤติกรรมของกระแสโหลด (I_L) ในรูปที่ 6 ซึ่งระบบต้องเผชิญกับความไม่สมดุลของเฟสอย่างหนักในช่วงเวลา t = 0.1 วินาที และการเปลี่ยนแปลงสเต็ปโหลดที่เวลา t = 0.25 วินาที

ภายใต้สภาวะดังกล่าว วงจรควบคุมแบบปรับตัวได้ทำงานประมวลผลและสร้างสัญญาณ กระแสอ้างอิง (I_c) ออกมาดังรูปที่ 7 เพื่อสั่งการให้อินเวอร์เตอร์ตอบสนองต่อโหลดที่ผิดปกติอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์จากการฉีดกระแสชดเชยตามสัญญาณอ้างอิงนี้ ทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถหักล้างกระแสลำดับลบและศูนย์ได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ กระแสแหล่งจ่าย (I_s) ในรูปที่ 8 กลับมามีความสมดุล แอมพลิจูดเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีความเรียบเนียนเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถในการชดเชยที่ยอดเยี่ยมไม่แพ้เทคนิคดั้งเดิม

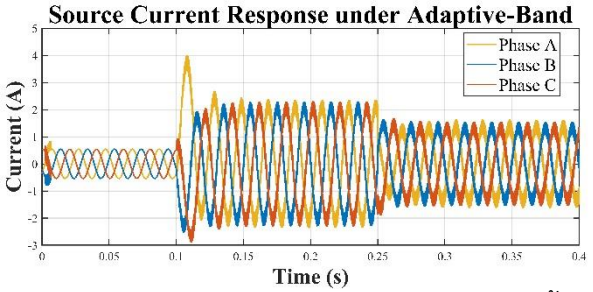
อย่างไรก็ตาม จุดเด่นสำคัญที่ทำให้เทคนิคการควบคุมฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้เหนือกว่าอย่างชัดเจนคือ กลไกการสร้างกรอบความกว้างแถบฮิสเตอรีซิส ดังแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่ากรอบความกว้างแถบไม่ได้ถูกจำกัดตายตัวอีกต่อไป แต่มีลักษณะการปรับตัวเป็นรูปคลื่นแบบพลวัต อย่างเป็นอิสระต่อกันในแต่ละเฟส โดยแถบจะขยายกว้างขึ้นบริเวณจุดตัดศูนย์ ซึ่งกระแสมีความชันสูง และจะบีบแคบลงบริเวณจุดยอดคลื่น ซึ่งกระแสมีความชันต่ำ



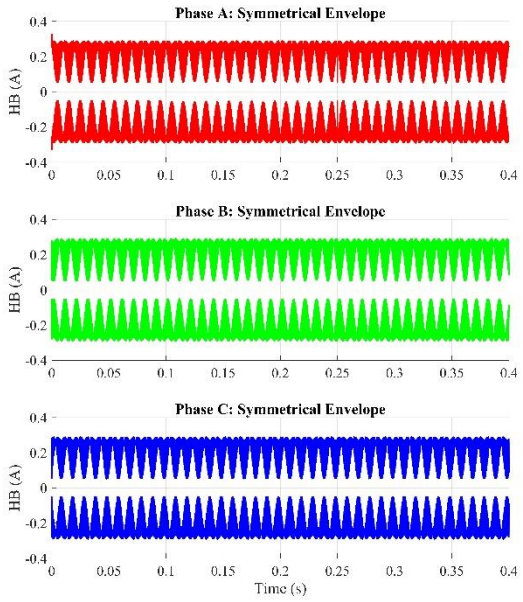
รูปที่ 6 กระแสโหลด (I_L) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้



รูปที่ 7 กระแสอ้างอิง (I_c) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้



รูปที่ 8 กระแสแหล่งจ่าย (I_s) ในการจำลองด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้

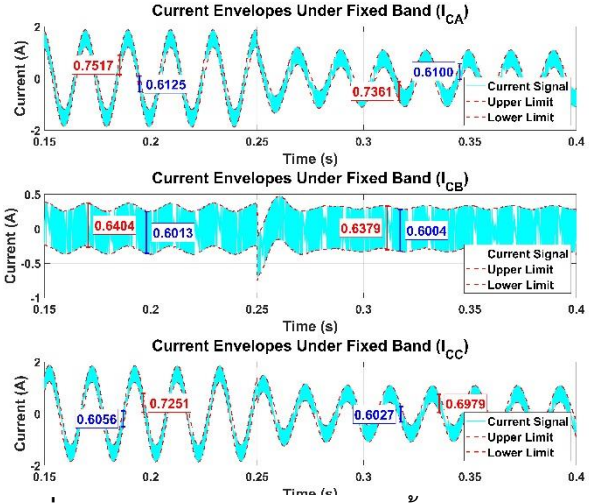


รูปที่ 9 ขนาดของความกว้างแถบฮิสเตอรีซิส ด้วยเทคนิคฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้

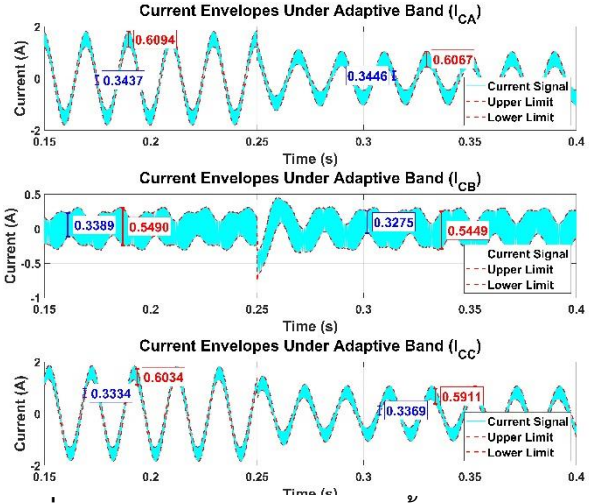
การที่กระแสถูกบังคับให้แกว่งตัวอยู่ในกรอบที่ยืดหยุ่นได้ตามเวลาจริงนี้ เป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถรักษาความถี่ในการสวิตชิงให้คงที่และมีความหนาแน่นสม่ำเสมอตลอดช่วงคลื่น การแก้ไขปัญหาความถี่แกว่งตัวนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดความสูญเสียในสวิตช์กำลัง (Switching losses) ได้อย่างเป็นรูปธรรม แต่ยังช่วยให้สเปกตรัมฮาร์มอนิกเกาะกลุ่มกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้การออกแบบตัวกรองสัญญาณทำได้ง่ายและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้อย่างสมบูรณ์

4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดของกระแสริปเปิลเชิงปริมาณ

จากการประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้ง 2 รูปแบบ ผ่านการวัดขนาดความกว้างของกระแสริปเปิลในช่วงการเปลี่ยนโฆลดครั้งที่ 1 และในช่วงการเปลี่ยนโหลดครั้งที่ 2 พบว่า ระบบควบคุมแบบแถบปรับได้ มีประสิทธิภาพในการจำกัดขนาดกระแสริปเปิลได้ดีกว่าระบบแถบคงที่ อย่างมีนัยสำคัญในทุกสภาวะการทำงาน



รูปที่ 10 ขนาดกระแสริปเปิลภายใต้เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบคงที่



รูปที่ 11 ขนาดกระแสริปเปิลภายใต้เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 เมื่อนำข้อมูลการวัดกระแสริปเปิลของทั้ง 3 เฟสมาเปรียบเทียบกัน สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างได้ดังนี้

การเปรียบเทียบในช่วงที่กระแสริปเปิลกว้างที่สุดภายใต้เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบคงที่ ขนาดความกว้างสูงสุดเฉลี่ยของทั้ง 3 เฟสอยู่ที่ประมาณ 0.698 A

ในขณะที่เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สามารถควบคุมและจำกัดความกว้างสูงสุดเฉลี่ยให้อยู่ที่เพียง 0.584 A ซึ่งหมายความว่า เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สามารถลดขนาดของกระแสริปเปิลสูงสุดลงได้เฉลี่ยถึง 16.3% เมื่อเทียบกับระบบแถบคงที่ การลดลงนี้เกิดจากการที่แถบฮิสเตอรีซิสปรับตัวขยายขึ้นอย่างเหมาะสมในบริเวณจุดตัดศูนย์ที่กระแสมีความชันสูง

การเปรียบเทียบในช่วงที่กระแสริปเปิลแคบที่สุดในบริเวณยอดคลื่นซึ่งกระแสมีความชันต่ำ ภายใต้เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบคงที่มีความกว้างแคบสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.602 A ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความชันที่เปลี่ยนไปได้ ในทางตรงกันข้าม ภายใต้เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สามารถบีบความกว้างของแถบลงมาได้ลึกสุดเฉลี่ยที่ 0.337 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้สามารถบีบขนาดกระแสริปเปิลให้แคบลงได้เฉลี่ยสูงถึง 43.9% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม

ตัวเลขเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ลดลงอย่างชัดเจน ยืนยันถึงความเหนือกว่าของเทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบปรับได้ กลไกการบีบและขยายตัวแบบพลวัตนี้ ไม่เพียงแต่ช่วยลดขนาดกรอบกระแสริปเปิลโดยรวม แต่ยังเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยแกว่งความถี่สวิตชิงให้คงที่ตามเป้าหมาย ซึ่งเทคนิคฮีตเตอรีซิสแบบแถบคงที่ไม่สามารถทำได้ ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสชดเชยโหลดไม่สมดุลได้อย่างแม่นยำและช่วยลดความสูญเสียจากการสวิตชิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระแสฮิสเตอรีซิสแบบแถบปรับได้ สำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เพื่อชดเชยกระแสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่ต้องเผชิญกับปัญหาสภาวะโหลดไม่สมดุลอย่างรุนแรง จากการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์อย่าง MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบ พบว่าเทคนิคแบบแถบคงที่มีข้อจำกัดสำคัญคือการเกิดความถี่สวิตชิงที่ผันผวน เนื่องจากความกว้างของแถบไม่สามารถตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชันของกระแสอ้างอิงรูปไซน์ได้

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว วิธีการที่นำเสนอสามารถปรับเปลี่ยนขนาดความกว้างของแถบฮิสเตอรีซิสแบบเวลาจริง โดยกรอบความกว้างแถบจะปรับตัวเป็นรูปคลื่นพลวัต ขยายกว้างขึ้นบริเวณจุดตัดศูนย์และบีบแคบลงบริเวณจุดยอดคลื่นอย่างเป็นอิสระในแต่ละเฟส กลไกดังกล่าวส่งผลให้เทคนิคแบบแถบปรับได้มีประสิทธิภาพในการจำกัดขนาดกระแสริปเปิลเชิงปริมาณที่เหนือกว่าอย่างชัดเจน โดยสามารถลดขนาดความกว้างสูงสุดของกระแสริปเปิลในบริเวณจุดตัดศูนย์ลงได้เฉลี่ย 16.3% และบีบขนาดความกว้างต่ำสุดบริเวณยอดคลื่นให้แคบลงได้เฉลี่ยถึง 43.9% เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคแบบแถบคงที่

การบีบและขยายตัวของกรอบกระแสริปเปิลแบบพลวัตนี้ ไม่เพียงแต่ช่วยให้อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสชดเชยแบบไม่สมดุลเพื่อปรับสมดุลเฟสได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำเท่านั้น แต่ยังเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยรักษาระดับความถี่ในการสวิตชิงให้คงที่ตามเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งการแก้ไขปัญหาความถี่แกว่งตัวนี้ส่งผลดีต่อการจัดระเบียบสเปกตรัมฮาร์มอนิก ลดความสูญเสียจากการสวิตชิง และยกระดับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบชดเชยกระแสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้อย่างสมบูรณ์

6. อ้างอิง

[1] M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann, "Three-phase four-wire shunt active filter control strategies," IEEE transactions on power electronics, vol. 12, no. 2, pp. 311-318, 1997.

[2] T. Nguyen-Van, R. Abe, and K. Tanaka, "Digital Adaptive Hysteresis Current Control for Multi-Functional Inverters," Energies, vol. 11, no. 9, p. 2422, 2018. [Online].

[3] A. Koduah, G. Svinkunas, A. Bandza, and S. Osei Fobi, "Investigations into Higher-Frequency Hysteresis Current Controller for Supraharmonic Hybrid Active Filters," Applied Sciences, vol. 14, no. 5, p. 1713, 2024.

[4] H. Wang, X. Wu, X. Zheng, and X. Yuan, "An improved hysteresis current control scheme during grid voltage zero-crossing for grid-connected three-level inverters," IET Power Electronics, vol. 14, no. 11, pp. 1946-1959, 2021.

[5] L. Syamala, D. Sankar, S. E. Makkar, B. M. Jos, and M. Kallarackal, "Hysteresis based quasi fixed frequency current control of single phase full bridge grid integrated voltage source inverter," Energies, vol. 15, no. 21, p. 8112, 2022.

[6] C. Shulin, L. Daxi, S. Siyu, Y. Xinyu, Z. Qiang, and C. Peiyuan, "A digital hysteresis control method for three-level grid-tie inverter based on online prediction of sampling time without inductance," Frontiers in Energy Research, vol. 12, p. 1403346, 2024.

[7] R. V. Chavali, A. Dey, and B. Das, "A performance comparison of hysteresis current control techniques for D-STATCOM application," Electric Power Systems Research, vol. 234, p. 110519, 2024.

[8] B. K. Bose, "An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive system," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 37, no. 5, pp. 402-408, 1990.

[9] R. Pereira et al., "A simple full digital adaptive current hysteresis control with constant modulation frequency for active power filters," in 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007: IEEE, pp. 1644-1648.

[10] N. Chellammal, V. Velmurugan, S. S. Dash, and R. Abirami, "Mitigation of power quality issues by adaptive current hysteresis band controller based shunt active filter," Advanced Materials Research, vol. 768, pp. 329-333, 2013.

[11] M. Kale and E. Ozdemir, "An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter," Electric Power Systems Research, vol. 73, no. 2, pp. 113-119, 2005/02/01/ 2005,

การประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสของระบบจำหน่ายแรงต่ำ

Impact of Phase Unbalance on Low-Voltage Power Distribution System

พลอยไพลิน ทับทิม, ตุลธร ภักดีแก้ว, พินิจ ศรีธร, มงคล ด่านบำรุงตระกูล, และธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*E-mail: ploypailin.ta@rmuti.ac.th, โทรศัพท์044-233000 ต่อ 3111

บทคัดย่อ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำเป็นส่วนสำคัญในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ไฟฟ้าส่งผลให้ภาระโหลดสูงขึ้น และก่อให้เกิดปัญหาการกระจายโหลดไม่สมดุล บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยใช้โปรแกรม OpenDSS ร่วมกับการจำลองแบบสุ่มภายใต้เงื่อนไขที่สะท้อนถึงความเป็นจริง ตรวจสอบระบบแล้วกำหนดเครื่องชาร์จจำนวน 36 เครื่อง (ตามขนาดพิกัดที่เหลือ) กระจายอยู่ในแต่ละเฟส และสุ่มรถยนต์ไฟฟ้าเข้าชาร์จจำนวน 12 คันต่อวัน ระยะเวลา 365 วัน ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลาและกำหนดค่าระดับพลังงานแบตเตอรี่คงเหลือ ไม่เกิน 50% ผลการจำลองพบว่า กรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้า ระบบมีสภาวะโหลดไม่สมดุลระหว่างเฟสอยู่เดิม มีค่าความไม่สมดุลเฟสเฉลี่ยประมาณ 53% และเมื่อมีการเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา ความไม่สมดุลเฟสเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 59% จากผลการตรวจสอบสรุปได้ว่าการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา ส่งผลให้ความไม่สมดุลเฟสมีความรุนแรงมากขึ้น กระแสในสายนิวทรัลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

คำสำคัญ: ระบบจำหน่ายแรงต่ำ การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ความไม่สมดุลเฟส การจำลองแบบสุ่ม กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

Abstract

Low-voltage distribution systems are increasingly affected by the growing adoption of electric vehicles (EVs), which can increase load demand and phase imbalance. This study evaluates the impact of phase unbalance using OpenDSS and stochastic simulation. A total of 36 EV chargers were installed and 12 EVs were randomly charged per day over 365 days under a Time-of-Use (TOU) tariff. The results showed that the average phase unbalance increased from approximately 53% in the base case to 59% after EV integration. In addition, neutral current and power losses increased due to greater phase imbalance. The findings indicate that EV charging under a TOU tariff can aggravate existing phase unbalance and adversely affect low-voltage distribution system performance.

Keywords: Low-Voltage Distribution System Electric Vehicle Charging Phase Unbalance Stochastic Simulation Power Losses

1. บทนำ

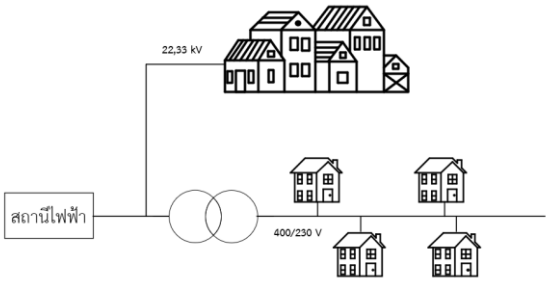
ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำในปัจจุบันกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ในภาคครัวเรือนและเชิงพาณิชย์ และการขยายตัวของการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) อย่างต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ภาระโหลดในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีความแปรผันมากขึ้น[1-3] ทำให้โครงข่ายระบบจำหน่ายแรงดันต่ำซึ่งเดิมถูกออกแบบมาสำหรับรูปแบบการใช้ไฟฟ้าในอดีต ต้องเผชิญกับความเสี่ยงในการเกิดปัญหาด้านความไม่สมดุลเฟส การรับโหลดเกินพิกัด และข้อจำกัดด้านความสามารถในการจ่ายพลังงาน

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์เหล่านี้ในอนาคตยิ่งทำให้ระบบจำหน่ายแรงต่ำประสบปัญหามากขึ้นโดยเฉพาะการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปัญหา เช่น โหลดรวมของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น แรงดันปลายสายต่ำกว่ามาตรฐาน กระแสแต่ละเฟสไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในระบบ [4-5] ดังนั้นระบบจำหน่ายแรงต่ำจึงจำเป็นต้องได้รับการประเมินอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านความสามารถในการรองรับโหลดในอนาคต ความสมดุลของเฟส คุณภาพไฟฟ้า เพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีและรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าที่กำลังเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม

บทความนี้จึงนำเสนอการประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสของระบบจำหน่ายแรงต่ำเพื่อรองรับแนวโน้มของโหลดที่มีการเพิ่มขึ้นในอนาคต และเป็นแนวทางพื้นฐานในการวางแผนปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานไฟฟ้า ทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงจากสถานีไฟฟ้าย่อยผ่านระบบสายส่ง และดำเนินการปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละกลุ่ม โดยผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือผู้ใช้ไฟฟ้าเชิงพาณิชย์จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดันปานกลาง เช่น 22 กิโลโวลต์ หรือ 33 กิโลโวลต์ ในขณะที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในภาคครัวเรือนและอาคารพักอาศัยทั่วไปจะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านการลดระดับแรงดันลงมาอยู่ในช่วง 400/230 โวลต์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ โครงสร้างของระบบจำหน่ายแรงต่ำแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายแรงต่ำ

จากลักษณะดังกล่าว ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำจึงเป็นระบบที่ต้องได้รับการออกแบบวิเคราะห์ และบริหารจัดการอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1 ความไม่สมดุลเฟส

การประเมินระดับความไม่สมดุลของกระแสโดยใช้ดัชนีความไม่สมดุลของกระแส (Current Unbalance Factor: CUF) ซึ่งคำนวณจากความ

แตกต่างระหว่างค่ากระแสของแต่ละเฟสกับค่ากระแสเฉลี่ยของระบบ ดังสมการ

$$\mathrm{CUF\%} = \left(\frac{\Delta \mathrm{I_{max}}}{\mathrm{I_{avg}}}\right) \mathrm{x}\ 100\% \qquad (1)$$

$$I_{avg} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \qquad (2)$$

โดยที่ $CUF\%$ คือ ค่าร้อยละความไม่สมดุลของกระแส (%)

$\Delta \mathrm{I_{max}}$ คือ ค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างค่ากระแสแต่ละเฟสกับค่ากระแสเฉลี่ยของระบบ *(A)*

$\mathrm{I_{avg}}$ คือ ค่ากระแสเฉลี่ยของระบบ *(A)*

I_a คือ ค่ากระแสของเฟส *A (A)*

I_b คือ ค่ากระแสของเฟส *B (A)*

I_c คือ ค่ากระแสของเฟส *C (A)*

การเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบชาร์จแบบเฟสเดียว ส่งผลโดยตรงต่อการกระจายโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้เกิดความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสอย่างมีนัยสำคัญ

2.2 การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

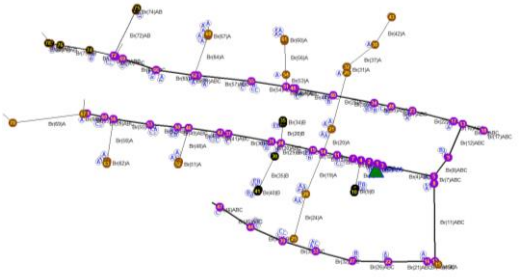
การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบจำหน่ายแรงต่ำที่ใช้งานในภาคที่อยู่อาศัย การชาร์จส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบกระแสสลับแบบเฟสเดียว ที่ระดับแรงดัน 230 V และกระแสประมาณ 32 A หรือมีขนาดกำลังไฟฟ้าประมาณ 7 kW สำหรับการชาร์จแบบช้า ลักษณะของโหลดการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้ามักเกิดขึ้นในช่วงเวลาเย็นถึงกลางคืนส่งผลให้โหลดรวมของระบบเพิ่มสูงขึ้นในช่วงพีค ซึ่งอาจส่งผลกระทบที่สำคัญจากการเพิ่มขึ้นของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

นอกจากนี้รูปแบบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้ายังมีความไม่แน่นอนและยากต่อการคาดการณ์ เนื่องจากพฤติกรรมของผู้ใช้งานมีความหลากหลาย ทั้งในด้านช่วงเวลาการชาร์จ ระยะเวลาการชาร์จ ระดับพลังงานแบตเตอรี่คงเหลือ และประเภทของเครื่องชาร์จที่ใช้งาน ส่งผลให้รูปแบบการชาร์จมีลักษณะไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ความไม่แน่นอนดังกล่าวทำให้การวางแผนและบริหารจัดการระบบจำหน่ายแรงต่ำมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะการประเมินความต้องการพลังงานไฟฟ้า

ดังนั้นการจัดการการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า เช่น การกระจายโหลดในแต่ละเฟสอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า และช่วยรักษาเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบในระยะยาว

3. การดำเนินงาน

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำในหมู่บ้านจัดสรร จากโครงข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในการวิเคราะห์ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองของระบบดังกล่าวด้วยโปรแกรม OpenDSS โดยมีระบบตัวอย่างประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 22/0.4 kV ขนาดพิกัด 250 kVA จำนวนมิเตอร์ 98 เครื่อง ขนาดสายที่ใช้คือ 95 mm² ความยาว 32 เมตร แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดที่กระจายตัวอยู่โดยรอบในพื้นที่ให้บริการ



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

หลังจากกำหนดสภาวะการทำงานของระบบในแต่ละกรณีแล้ว ได้ทำการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยพิจารณาจากค่ากระแสในระบบ โดยผลการวิเคราะห์ของแต่ละกรณีถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความไม่สมดุลของเฟสในระบบ

3.1 การตรวจสอบระบบจำหน่ายแรงต่ำ

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการทางสถิติร่วมกับโปรแกรม OpenDSS เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของระบบเป็นสภาพการใช้งานจริงที่มีความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสตามข้อมูลพื้นฐานของระบบ จากนั้นทำการเพิ่มโหลดการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลาด้วยวิธีการสุ่มเพื่อจำลองพฤติกรรมการใช้งานจริงของผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อสะท้อนความแปรปรวนของพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าในสภาวะจริง

3.2 การจำลองการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

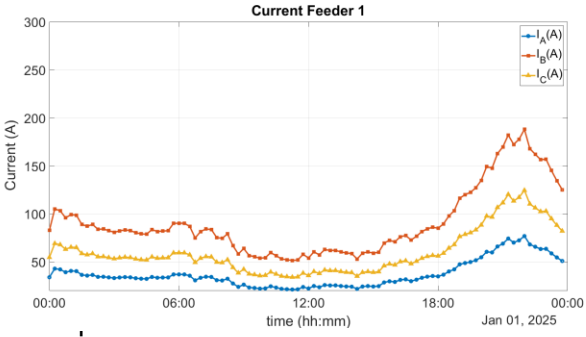
ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองพฤติกรรมการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้หลักการทางสถิติร่วมกับโปรแกรม OpenDSS เพื่อให้รูปแบบการใช้งานมีความใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยกำหนดเครื่องชาร์จจำนวน 36 เครื่อง กระจายอยู่ในเฟส A, B และ C เฟสละ 12 เครื่อง และสุ่มรถยนต์ไฟฟ้าเข้าทำการชาร์จจำนวน 12 คันต่อวัน ทำการจำลองทั้งหมด 365 กรณี เพื่อแทนพฤติกรรมการใช้งานตลอดระยะเวลา 1 ปี การจำลองอ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา โดยกำหนดให้รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มต้นการชาร์จในเวลา 22.00 น. ซึ่งเป็นช่วงนอกเวลาพีค และกำหนดให้มีการสุ่มค่าระดับพลังงานแบตเตอรี่คงเหลือของรถแต่ละคันให้มีค่าไม่เกิน 50% เพื่อสะท้อนความหลากหลายของพฤติกรรมการใช้งานจริง

นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้มีการกระจายโหลดของเครื่องชาร์จแบบไม่สมดุลระหว่างเฟส เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าและความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละกรณี เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและประเมินผลกระทบของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ

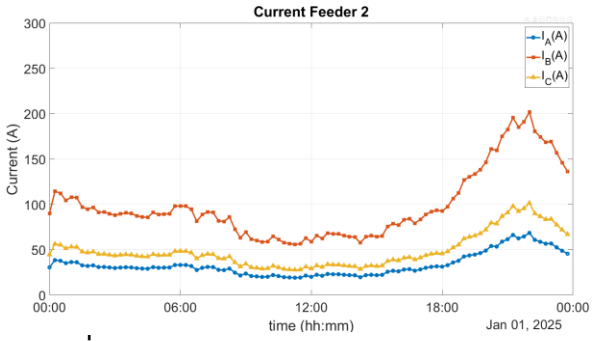
4. ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษานี้ผลกระทบของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้า และกรณีที่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้า จากผลการจำลองได้ทำการวิเคราะห์ค่ากระแสโหลดเพื่อนำมาเปรียบเทียบและประเมินผลกระทบของความไม่สมดุลเฟสภายใต้แต่ละกรณีศึกษา

ผลการจำลองในกรณีฐานซึ่งยังไม่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าระบบจำหน่ายแรงต่ำมีความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสอยู่เดิม โดยเฉพาะในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงของวัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการจำลองของ Feeder 1 ณ เวลา 22.00 น. พบว่ากระแสในเฟส A, B และ C มีค่าเท่ากับ 76.90 A, 187.99 A และ 124.54 A คิดเป็นค่าความไม่สมดุลของกระแสประมาณ 44.8% ขณะที่ Feeder 2 มีกระแสในเฟส A, B และ C เท่ากับ 68.50 A, 201.88 A และ 101.51 A ดังแสดงในรูปที่ 4 คิดเป็นค่าความไม่สมดุลของกระแสประมาณ 62.9% แสดงให้เห็นว่าการกระจายโหลดของผู้ใช้ในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลให้บางเฟสรับภาระโหลดสูงกว่าเฟสอื่นอย่างชัดเจน

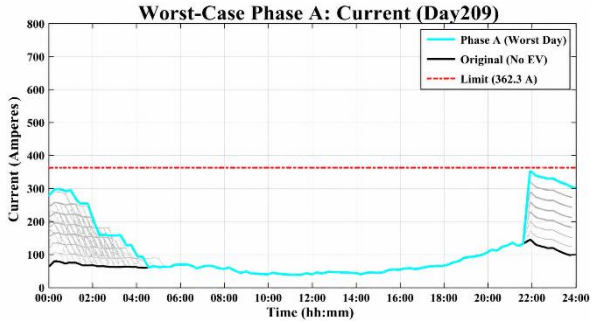


รูปที่ 3 กระแสโหลดของเฟส A, B และ C ของ Feeder 1 ในกรณีฐาน

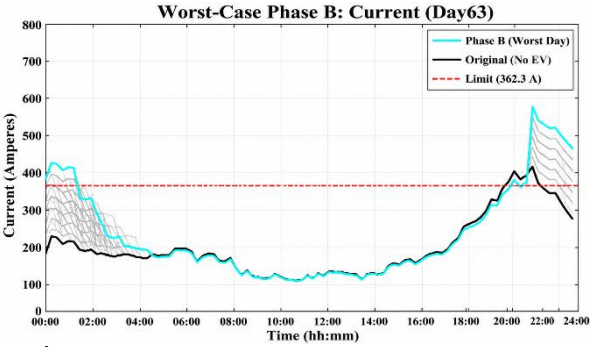


รูปที่ 4 กระแสโหลดของเฟส A, B และ C ของ Feeder 2 ในกรณีฐาน

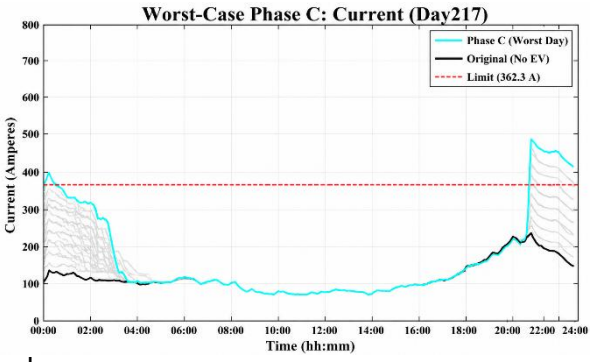
ผลการจำลองในกรณีที่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา ระยะเวลา 365 วัน แสดงให้เห็นว่าการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพร้อมกันในช่วงนอกเวลา ส่งผลให้ปัญหาความไม่สมดุลของโหลดที่มีอยู่เดิมในระบบรุนแรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกระแสโหลดสูงสุดของเฟส A, B ดังแสดงในรูปที่ 6 และ C ดังแสดงในรูปที่ 7 มีค่าเท่ากับ 350.80 A, 575.15 A และ 485.10 A ซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 209, 63 และ 217 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นถึงการกระจายโหลดที่ไม่เท่าเทียมกันระหว่างเฟสอย่างชัดเจน



รูปที่ 5 กระแสโหลดของเฟส A ในกรณีวิกฤตสูงสุด

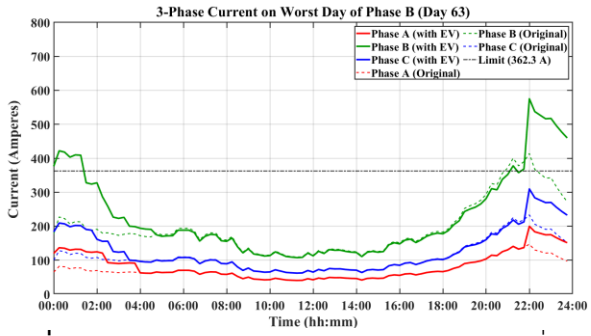


รูปที่ 6 กระแสโหลดของเฟส B ในกรณีวิกฤตสูงสุด



รูปที่ 7 กระแสโหลดของเฟส C ในกรณีวิกฤตสูงสุด

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความไม่สมดุลของกระแสในวันที่ 63 ซึ่งเป็นวันที่เฟส B มีกระแสโหลดสูงสุด พบว่ากระแสในเฟส A, B และ C มีค่าประมาณ 200 A, 575.15 A และ 310 A ตามลำดับ คิดเป็นค่าความไม่สมดุลของกระแส ประมาณ 59% ดังแสดงในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของภาระโหลดระหว่างเฟสอย่างชัดเจน



รูปที่ 8 กระแสโหลดของเฟส A, B และ C ในวันที่ 63 ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา

จากผลการจำลองทั้ง 2 กรณีแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าส่งผลให้ปัญหาความไม่สมดุลของโหลดที่มีอยู่เดิมรุนแรงมากยิ่งขึ้น อันนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกระแสนิวทรัล การสูญเสียกำลังไฟฟ้า และปัญหาแรงดันตกในระบบจำหน่ายแรงต่ำ ดังนั้นจึงควรมีการพิจารณาและประเมินแนวทางในการลดผลกระทบดังกล่าวต่อไป

5. สรุป

บทความนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายแรงต่ำในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้า และกรณีที่มีการเชื่อมต่อโหลดรถยนต์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลา

ผลการศึกษากรณีฐานที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าระบบจำหน่ายแรงต่ำมีความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสอยู่เดิม โดยกระแสโหลดในแต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสในระบบ

ผลการศึกษากรณีที่มีการเชื่อมต่อรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบช่วงเวลาพบว่าการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่กระจุกตัวในช่วงนอกเวลาพีคส่งผลให้ภาระโหลดในแต่ละเฟสเพิ่มสูงขึ้นอย่างไม่สมดุล และทำให้ปัญหาความไม่สมดุลของโหลดที่มีอยู่เดิมในระบบมีความรุนแรงมากขึ้น สะท้อนให้เห็นถึงการกระจายโหลดที่ไม่เท่ากันอย่างชัดเจน

ผลการศึกษายืนยันว่าพฤติกรรมการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้ามีผลต่อระดับความไม่สมดุลของโหลดในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยส่งผลให้ภาระโหลดในแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นอย่างไม่เท่าเทียมกัน ก่อให้เกิดสภาวะโหลดไม่สมดุลที่รุนแรงขึ้น กระแสในสายนิวทรัลเพิ่มสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของระบบจำหน่ายในระยะยาว

6. อ้างอิง

[1] J. Then, A. P. Agalgaonkar, and K. M. Muttaqi, “Coordinated Charging of Spatially Distributed Electric Vehicles for Mitigating Voltage Rise and Voltage Unbalance in Modern Distribution Networks,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 59, no. 4, pp. 5149–5157, Jul./Aug. 2023

[2] N. Nimalsiri, E. Ratnam, D. Smith, C. Mediwaththe, and S. Halgamuge, " A Distributed Coordination Approach for the Charge and Discharge of Electric Vehicles in Unbalanced Distribution Grids," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 3, pp. 3551–3562, Mar. 2024

[3] V. Boglou and A. Karlis, "A Many-Objective Investigation on Electric Vehicles' Integration Into Low-Voltage Energy Distribution Networks With Rooftop PVs and Distributed ESSs," IEEE Access, vol. 12, pp. 132210–132235, 2024

[4] G. Pisano, S. Ruggeri, G. G. Soma, D. Falabretti, S. Grillo, F. Gulotta, and F. Pilo, "Impact of Electrical Vehicle Private Charging Stations on the Quality of the Low Voltage Network Supply," IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 10, pp. 188–200, 2023

[5] N. Nimalsiri, E. Ratnam, D. Smith, C. Mediwaththe, and S. Halgamuge, "A Distributed Coordination Approach for the Charge and Discharge of Electric Vehicles in Unbalanced Distribution Grids," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 3, pp. 3551–3562, Mar. 2024

กรณีศึกษาการพัฒนาชุดทดสอบต้นแบบระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ควบคุมแบบไร้สายโดยใช้ระบบจ่ายไฟเสมือนจริงสำหรับงานระบบรถไฟ

A Case Study on the Development of a Wireless-Controlled Overhead Catenary System Test Platform Using a Virtual Power Supply for Railway Applications.

อาทิตย์ เดชะ[1], ศิริชัย ลาภาสระน้อย[2], เกรียงกมล มงคลเมือง[3], สุรศักดิ์ จ่าบาล[4]
อัตถ์ ศรีเนตร[5], ภากร นาคศรี[6], กฤษฎา ทาสันเทียะ[7] และ อนันท์ เกสูงเนิน[8,] *

[1- 6, 8] วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
[7] สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
77 ม.7 ต.หนองระเวียง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
* ผู้ติดต่อ: anan.ke@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 095830035

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกรณีศึกษาการออกแบบและพัฒนาชุดทดต้นแบบระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ควบคุมแบบไร้สายโดยใช้การแปลงพลังงานไฟฟ้าเสมือนจริงสำหรับระบบรถไฟ โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการแปลงพลังงานไฟฟ้าเสมือนจริงเพื่อจำลองการทำงานแทนการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงจริง ชุดทดสอบประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ สำหรับระบบขับเคลื่อน และขนาด 12 โวลต์ สำหรับระบบควบคุม ร่วมกับกลไกแพนโทกราฟ วงจรรับ–ส่งสัญญาณ และระบบควบคุมระยะไกลด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 433 MHz ผ่านโมดูลรีเลย์ 4 ช่องสัญญาณ ผลการทดสอบสมรรถนะพบว่า 1) กลไกแกนชักแพนโทกราฟ (ทดสอบ 10 ครั้ง) มีเวลาเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ขึ้น 6.0 วินาที และเคลื่อนที่ลง 4.0 วินาที โดยมีเวลาเฉลี่ยรวมประมาณ 4.9 วินาที 2) ชุดขับเคลื่อนเชิงกลในระยะ 10 เมตร (ทดสอบ 15 ครั้ง) มีความเสถียรสูง โดยใช้เวลาเดินหน้าเฉลี่ย 8.9 วินาที และถอยหลังเฉลี่ย 9.1 วินาที และ 3) ระบบควบคุมไร้สายทำงานมีเสถียรภาพดีที่สุดในระยะไม่เกิน 40 เมตร ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าชุดทดสอบนี้สามารถจำลองหลักการจ่ายกำลังไฟฟ้าและการควบคุมไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมระบบราง รวมถึงเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบสื่อสารสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูงในอนาคต

คำสำคัญ: แพนโทกราฟ, ระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ, ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง, สัญญาณความถี่วิทยุ

Abstract

This research presents a case study on the design and development of a wireless propulsion test rig for overhead catenary systems (OCS) in railway applications, utilizing virtual power conversion to simulate traction power supplies without high-voltage hazards. The developed rig integrates a 24 VDC propulsion motor and a 12 VDC control motor, alongside a pantograph mechanism, transceiver circuitry, and a 433 MHz radio frequency (RF) remote control interface via a 4-channel relay module. Performance evaluation indicated that: 1) the pantograph linkage (10 trials) averaged 6.0 seconds for ascent and 4.0 seconds for descent, with a total mean cycle time of 4.9 seconds; 2) the mechanical propulsion over a fixed 10-meter track (15 trials) demonstrated high stability, with mean forward and reverse times of 8.9 and 9.1 seconds, respectively; and 3) the wireless control operated reliably within a maximum range of 40 meters. The results demonstrate that the test rig successfully replicates power distribution and wireless control principles, making it highly suitable as an instructional platform for electrical and railway engineering, as well as a baseline prototype for high-speed rail communication systems.

Keywords: Pantograph, Overhead Catenary System (OCS), High-Speed Rail (HSR), Radio Frequency (RF) Signal

1. บทนำ

ระบบขนส่งทางรางเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและระบบคมนาคมของหลายประเทศ เนื่องจากสามารถรองรับการเดินทางของผู้โดยสารและการขนส่งสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความปลอดภัย และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเปรียบเทียบกับการขนส่งรูปแบบอื่น โดยเฉพาะระบบรถไฟฟ้าและรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ต้องอาศัยระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ (Overhead Catenary System: OCS) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังขบวนรถผ่านอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าหรือแพนโทกราฟ (Pantograph) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ ความเสถียร และความต่อเนื่องของการเดินรถ [1]–[3]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา งานวิจัยด้านระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะได้มุ่งเน้นการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างแพนโทกราฟกับสายสัมผัส (Pantograph–Catenary Interaction) เพื่อปรับปรุงคุณภาพการรับกระแสไฟฟ้า ลดการสึกหรอของอุปกรณ์ และเพิ่มความเสถียรของระบบ โดยเฉพาะสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่มีความเร็วมากกว่า 350 km/h ซึ่งพลศาสตร์ของแพนโทกราฟและสายสัมผัสส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังไฟฟ้าและความปลอดภัยของการเดินรถ [3]–[5] นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และแพลตฟอร์มทดสอบเสมือน (Virtual Test Track) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะและลดต้นทุนการทดสอบกับระบบจริง [6]–[8]

อย่างไรก็ตาม การศึกษาและการฝึกปฏิบัติด้วยระบบจริงยังมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย งบประมาณ และโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะทำงานภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงและต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทาง ส่งผลให้สถาบันการศึกษาหลายแห่งไม่สามารถจัดเตรียมห้องปฏิบัติการหรือชุดทดลองที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงได้ อีกทั้งงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการวิเคราะห์ระบบจริงหรือการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ ขณะที่การพัฒนาชุดทดสอบต้นแบบขนาดเล็กซึ่งผสานระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ กลไกแพนโทกราฟ และระบบควบคุมแบบไร้สายไว้ในแพลตฟอร์มเดียว เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนและการทดลองทางวิศวกรรมในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัย ยังมีรายงานการศึกษาค่อนข้างจำกัด

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบการขับเคลื่อนไร้สายในระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการแปลงพลังงานไฟฟ้าเสมือนจริง (Virtual Electrical Energy Conversion) เพื่อจำลองการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าโดยไม่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงจริง ร่วมกับระบบควบคุมแบบไร้สายผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 433 MHz สำหรับควบคุมกลไกแพนโทกราฟและระบบขับเคลื่อน พร้อมทั้งประเมินสมรรถนะของต้นแบบในด้านเวลาตอบสนองของแพนโทกราฟ ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน และความน่าเชื่อถือของการสื่อสารแบบไร้สาย

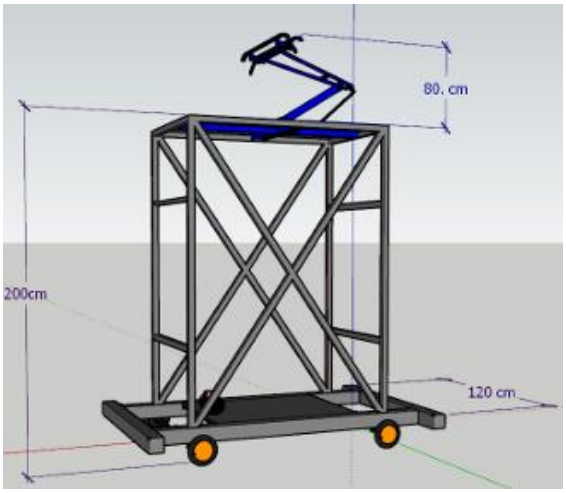
งานวิจัยนี้มีส่วนสนับสนุนองค์ความรู้ใน 3 ประการ ได้แก่ (1) การพัฒนาชุดทดสอบต้นแบบที่จำลองการทำงานของระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ (OCS) ด้วยระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการทดลอง (2) การบูรณาการระบบแพนโทกราฟ ระบบขับเคลื่อน และระบบควบคุมแบบไร้สายไว้ในแพลตฟอร์มเดียว และ (3) การพัฒนาชุดปฏิบัติการที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อการเรียนการสอน การฝึกปฏิบัติ และการวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมระบบรางในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

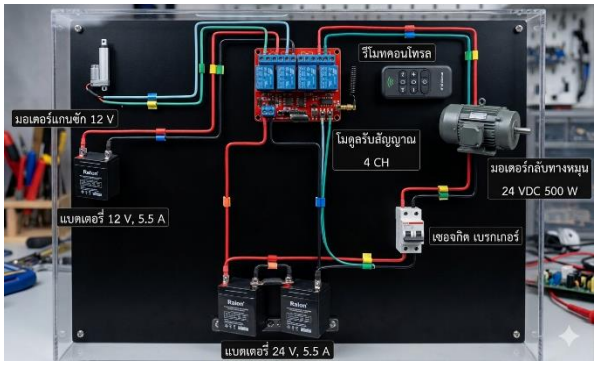
การศึกษาวิจัยครั้งนี้อาศัยหลักการทำงานของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Overhead Contact System: OCS) ร่วมกับกลไกการรับกระแสไฟฟ้าผ่านแพนโทกราฟ (Pantograph) โดยได้ประยุกต์ใช้แนวคิดการแปลงพลังงานเสมือนจริงเพื่อจำลองแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบผ่านชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ทดแทนการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงจริง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนอง พลศาสตร์การเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของกลไกรับไฟ และเสถียรภาพของการควบคุมการขับเคลื่อนแบบไร้สายผ่านคลื่นความถี่วิทยุ

3. ขั้นตอนการทำงาน

การขับเคลื่อนไร้สายในระบบการจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ใช้การแปลงพลังงานเสมือนจริงในรถไฟเริ่มจากการศึกษาการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างชิ้นงาน



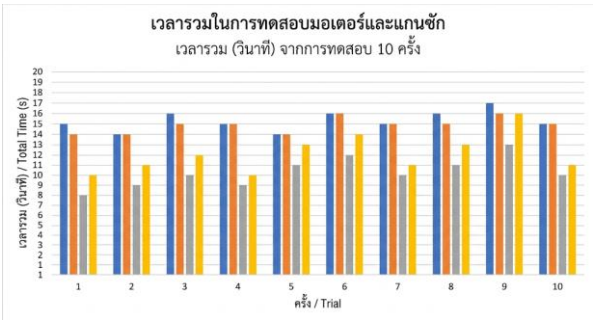
รูปที่ 2 แผนผังการต่อวงจรควบคุมมอเตอร์

จากรูปที่ 2 ออกแบบระบบเพื่อจำลองการทำงานของรถไฟที่มีอุปกรณ์การทำงานเหมือนกับรถไฟ โดยจะเน้นชุดควบคุมระยะไกลเพื่อจำลองระบบการควบคุมไร้สาย โดยมีตัวส่งสัญญาณส่งคลื่น 433 MHz เพื่อให้โมดูลรีเลย์รับสัญญาณสั่งการมอเตอร์ขับเคลื่อนและมอเตอร์แกนชักเพื่อยกขึ้นลงของแพนโทกราฟ

4. ผลการทดสอบ

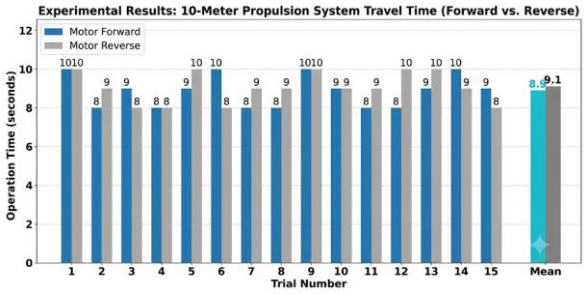


รูปที่ 3 การทำงานควบคุมไร้สายใช้การแปลงพลังเสมือนจริงในรถไฟ



รูปที่ 4 การทำงานควบคุมไร้สายสำหรับยกและลดระดับแพนโทกราฟ

จากรูปที่ 4 ผลการทดสอบการทำงานควบคุมไร้สายของกลไกแกนชักสำหรับยกและลดระดับแพนโทกราฟจำนวน 10 ครั้ง พบว่า การควบคุมระบบในขณะเคลื่อนที่ขึ้น (แกนชักขึ้น) ใช้เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 6.0 วินาที ในขณะที่ การควบคุมในขณะเคลื่อนที่ลง (แกนชักลง) ใช้เวลาเฉลี่ยเร็วกว่า โดยอยู่ที่ 4.0 วินาที สอดคล้องกับสมมติฐานทางพลศาสตร์ที่ว่า ในขณะที่ระบบรับไฟเคลื่อนที่ลง แพนโทกราฟจะมีน้ำหนักของโครงสร้างช่วยกดลงในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ ทำให้ลดภาระและแรงต้านของมอเตอร์ชัก ส่งผลให้กลไกฝั่งขาลงใช้เวลาน้อยกว่าฝั่งขาขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5 ผลการทดสอบเวลาในการเคลื่อนที่

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานแบบไร้สายของชุดขับเคลื่อนเชิงกลในการเคลื่อนที่ระยะคงที่ 10 เมตร จำนวน 15 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองทิศทางมีความเสถียรและความสม่ำเสมอสูง โดยการขับเคลื่อนในทิศทางเดินหน้า (Motor Forward) มีเวลาปฏิบัติงานเฉลี่ยอยู่ที่ 8.9 วินาที ในขณะที่การขับเคลื่อนในทิศทางถอยหลัง (Motor Reverse) มีเวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 9.1 วินาที

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะของชุดปฏิบัติการจำลองระบบขับเคลื่อนและจ่ายไฟรถไฟไร้สาย สามารถสรุปผลได้ดังนี้:

กลไกแกนชักแพนโทกราฟ: จากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง พบว่ากลไกขาขึ้นใช้เวลาเฉลี่ย 6.0 วินาที ส่วนขาลงใช้เวลาเฉลี่ย 4.0 วินาที ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานทางพลศาสตร์ เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างช่วยกดลงในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ ส่งผลให้ลดภาระและแรงต้านของมอเตอร์ขับแกนชัก

ชุดขับเคลื่อนเชิงกลระยะ 10 เมตร: จากการทดสอบจำนวน 15 ครั้ง ระบบขับเคลื่อนมีความเสถียรสูง โดยทิศทางเดินหน้า (Motor Forward) มีเวลาทำงานเฉลี่ย 8.9 วินาที และทิศทางถอยหลัง (Motor Reverse) มีเวลาทำงานเฉลี่ย 9.1 วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ

ระยะการควบคุมไร้สาย: ระบบสามารถควบคุมผ่านคลื่นความถี่ 433 MHz ได้อย่างมีเสถียรภาพในระยะไม่เกิน 40 เมตร โดยประสิทธิภาพการส่งสัญญาณจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยกรณีศึกษาการขับเคลื่อนไร้สายในระบบการจ่ายไฟเหนือศีรษะที่ใช้การแปลงพลังเสมือนจริงในรถไฟสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก นางสาวศศิภา สุขโน, นายอานนท์ ชิณวงษ์, นายศุภชัย เขียงชัยภูมิ นักศึกษาสาขาไฟฟ้า-ระบบขนส่งทางราง วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ มทร. อีสาน ในการเก็บผลงานวิจัยจนสามารถดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมายได้เป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

7. การเขียนเอกสารอ้างอิง

[1] Song, Y., Jiang, T., Nåvik, P., & Rønnquist, A., “Geometry Deviation Effects of Railway Catenaries on Pantograph–Catenary Interaction: A Case Study in Norwegian Railway System,” Railway Engineering Science, vol. 29, no. 4, pp. 350–361, 2021.

[2] An, B., Wang, P., Ma, S., et al., “Influence of Metro Track Irregularities on Pantograph Vibration and Its Interaction with Catenary,”

Applied Sciences, vol. 12, no. 13, Art. 6435, 2022.

[3] Liu, Z., Song, Y., Gao, S., et al., “Review of Perspectives on Pantograph–Catenary Interaction Research for High-Speed Railways Operating at 400 km/h and Above,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 10, no. 3, 2024.

[4] Song, Y., Lu, X., Yin, Y., et al., “Optimization of Railway Pantograph–Catenary Systems for Over 350 km/h Based on an Experimentally Validated Model,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 5, pp. 7654–7664, 2024.

[5] Song, Y., Liu, Z., & Gao, S., “Current Collection Quality of High-Speed Rail Pantograph–Catenary Considering Geometry Deviation at 400 km/h and Above,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 73, no. 10, pp. 14415–14424, 2024.

[6] Hayes, S., & Fletcher, D. I., “An Overhead Line Virtual Test Track for the Assessment of Railway Catenary–Pantograph Interaction,” Vehicle System Dynamics, vol. 63, no. 9, pp. 1724–1744, 2025.

[7] Bruni, S., Bucca, G., Facchinetti, A., Gregori, S., & Pombo, J., “Recent Developments on Pantograph–Overhead Line Interaction,” Vehicle System Dynamics, vol. 63, no. 7, pp. 1358–1394, 2025.

[8] Cheng, Y., Yan, J., Zhang, F., et al., “Surrogate Modeling of Pantograph–Catenary System Interactions,” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 224, Art. 112134, 2025.

การตรวจสอบหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำเพื่อรองรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

Low-Voltage Distribution System Transformer Assessment for Accommodating Electric Vehicles Charging

ตุลธร ภักดีแก้ว*, พลอยไพลิน ทับทิม, พินิจ ศรีธร, มงคล ด่านบำรุงตระกูล และ ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

*ผู้ติดต่อ: toollatorn.pa@rmuti.ac.th, 087-009-5578

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความพร้อมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำในการรองรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยใช้โปรแกรม OpenDSS จำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำของหมู่บ้านจัดสรรแห่งหนึ่ง ด้วยการวิเคราะห์แบบต่อเนื่องตามเวลาตลอด 24 ชั่วโมง ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นภายใต้เงื่อนไขที่สะท้อนการใช้งานจริงของผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกันจำนวน 12 คัน ทั้งในรูปแบบการชาร์จทั่วไปและการชาร์จตามอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบยังไม่เกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การชาร์จตามอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในบางเฟสสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมากกว่าการชาร์จทั่วไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลของโหลดและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะโหลดเกินของอุปกรณ์ในระบบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้น การวางแผนและบริหารจัดการการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า โดยนำการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ร่วมกับโซล่าร์เซลล์ (Solar cell) ให้สามารถนำไฟฟ้าจากโซล่าร์เซลล์มาจ่ายให้รถยนต์ไฟฟ้า ได้อย่างเหมาะสม จึงมีความสำคัญ เพื่อเตรียมความพร้อมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้สามารถรองรับการขยายตัวของการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพและมั่นคง

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่ายแรงต่ำ รถยนต์ไฟฟ้า การสุ่มภายใต้เงื่อนไขที่สะท้อนถึงความเป็นจริง

Abstract

This study aimed to evaluate the readiness of a low-voltage distribution system to accommodate the increasing penetration of electric vehicle charging in the future. OpenDSS was employed to simulate the operation of a low-voltage distribution system in a residential housing estate. The analysis was conducted using a 24-hour time-series simulation combined with probabilistic analysis under conditions that reflect actual electric vehicle charging behavior. The results showed that, when 12 electric vehicles were charged simultaneously under both conventional charging and time-of-use charging scenarios, the total system power demand remained within the transformer rating. However, the time-of-use charging scenario caused higher phase power demand than the conventional charging scenario, resulting in phase load imbalance and an increased risk of equipment overloading. These conditions may adversely affect the stability and reliability of the distribution system. Therefore, planning and managing electric vehicle charging by integrating a Battery Energy Storage System (BESS) with solar cells is essential for optimally delivering solar power to electric vehicles. This approach is crucial for preparing the electrical distribution system to efficiently and securely accommodate the future growth of electric vehicle adoption.

Keywords: Distribution Transformer; Low-Voltage Distribution System; Electric Vehicle; Probabilistic Analysis Time-Series Analysis

1. บทนำ

การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดส่งผลให้การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) ขยายตัว อย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ที่แตกต่างจากรูปแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของโหลดในช่วงเวลาพีค ในช่วงอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of Use, TOU) ที่จะได้รับความนิยมมากขึ้นสำหรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพร้อมกันจำนวนมาก ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง ทั้งในด้านเสถียรภาพของระบบ (Stability) [1] ที่พิจารณาจากพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าและสายป้อน รวมถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) [2] จากความผันผวนของแรงดัน หากขาดการวางแผนและบริหารจัดการที่เหมาะสม อาจนำไปสู่ความจำเป็นที่ต้องมีการลงทุนด้านโครงสร้างของระบบเพิ่มขึ้นในอนาคต

ในอีกด้านหนึ่ง การผลิตไฟฟ้าจากโซล่าร์เซลล์ (Solar Cells) ก็กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในระบบไฟฟ้า ถึงแม้จะเป็นรูปแบบที่ผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะเวลากลางวัน แต่ก็เป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการของโหลดในระบบได้ โดยเฉพาะความต้องการจากรถยนต์ไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องตลอดทั้งวัน มักจะเกิดขึ้นในเวลากลางคืน อาจจะเกิดขึ้นพร้อมกันสูงสุดที่ 22.00 น. ตามช่วงเวลาเริ่มต้น TOU แล้วค่อย ๆ ลดลงในช่วงเวลาหนึ่ง เป็นช่วงเวลาที่ไม่สอดคล้องกับไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) ร่วมกับโซล่าร์เซลล์เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าจากโซล่าร์เซลล์มาจ่ายให้รถยนต์ไฟฟ้า จึงเป็นอีกแนวทางสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถและประสิทธิภาพของระบบได้ [3] โดยไม่ต้องลงทุนใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่ ซึ่งจะช่วยลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) และเสริมความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

บทความนี้จึงนำเสนอการตรวจสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ เพื่อการวางแผนรองรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต ใช้โปรแกรม OpenDSS จำลองการทำงานของระบบตัวอย่าง โดยเป็นการจำลองแบบต่อเนื่องตามเวลา (Time-Series) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของกำลังไฟฟ้าตลอดช่วง 24 ชั่วโมงได้ และใช้หลักการความน่าเป็นจากการสุ่มภายใต้เงื่อนไขที่สะท้อนถึงความเป็นจริงบนพื้นฐานของข้อมูล [4] ดังต่อไปนี้

2. ยานยนต์ไฟฟ้า

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า [5] ส่งผลให้พฤติกรรมการใช้พลังงานในหมู่บ้านจัดสรรเปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิง โหลดไฟฟ้าจากเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charger) จัดเป็นโหลดหนักที่ดึงกระแสไฟสูงและต่อเนื่องเป็นเวลาหลายชั่วโมง (High-Power Continuous Load) เมื่อลูกบ้านจำนวนมากเริ่มชาร์จรถพร้อมกันในช่วงค่ำหลังจากกลับจากการทำงาน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดซ้อนทับกัน (Peak-on-Peak) ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบจำหน่ายแรงต่ำ (Low Voltage Network) ภายในหมู่บ้านจัดสรร โดยมีผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ได้แก่ หม้อแปลงจำหน่ายโหลดเกินพิกัด (Transformer Overloading) คือ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 kVA ถูกออกแบบโดยคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย (Diversity Factor) ของเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปในอดีต เมื่อมีเครื่องชาร์จขนาด 7.0 kW เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก พลังงานรวมอาจเกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสม อายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดฟิวส์ขาดและหม้อแปลงชำรุดได้

2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ (Low voltage distribution)

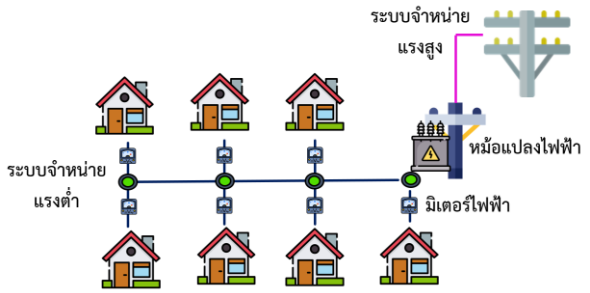
ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คือ ระบบที่ทำหน้าที่รับไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ ประกอบด้วย สถานีไฟฟ้าย่อย สายป้อนหรือสายจำหน่ายแรงสูง หม้อแปลงในระบบจำหน่าย และสายจำหน่ายแรงต่ำ เมื่อสถานีไฟฟ้าย่อยได้รับไฟฟ้าจากสายส่ง ก็จะแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีพิกัดแรงดัน 22 kV จากนั้นส่งแรงดันไฟฟ้าผ่านสายป้อนให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยผู้ใช้ไฟฟ้าดังกล่าวฯ จะติดตั้งหม้อแปลงลดระดับแรงดันให้มีพิกัดแรงดันต่ำ 230/400 V [6] แล้วนำไปจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟ ซึ่งเป็นระบบจำหน่าย 1 เฟส ระดับแรงดัน 230 V สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อยตามบ้านพักอาศัยทั่วไป

2.2 การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบปกติ (Normal charge)

การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบปกติ (Normal Charge) เป็นการอัดประจุไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอุปกรณ์อัดประจุที่ติดตั้งอยู่ภายในรถยนต์ไฟฟ้า หรือออนบอร์ดชาร์จเจอร์ (On-Board Charger) ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายเข้าสู่แบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า โดยทั่วไป ออนบอร์ดชาร์จเจอร์สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส มีขนาดกำลังไฟฟ้า 3.2 และ 7.0 กิโลวัตต์ ทั้งนี้ อุปกรณ์ดังกล่าวมักรองรับกระแสไฟฟ้าในช่วง 16–32 แอมแปร์ จึงเหมาะสำหรับการชาร์จในสถานที่ที่สามารถจอดรถเป็นระยะเวลานาน เช่น บ้านพักอาศัย สำนักงาน หรือที่จอดรถสาธารณะ โดยระยะเวลาการชาร์จมักมากกว่า 1–2 ชั่วโมง นอกจากนี้ มาตรฐานการเชื่อมต่อสำหรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบปกติเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62196 ซึ่งประกอบด้วยการชาร์จในโหมด 1 โหมด 2 และโหมด 3 [7]

3. วิธีการดำเนินงาน

บทความนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำภายในหมู่บ้านจัดสรรแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้โปรแกรม OpenDSS เพื่อประเมินขีดความสามารถของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเดิมในการรองรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า และวิเคราะห์จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถชาร์จเพิ่มเติมได้ภายใต้ข้อจำกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่ ระบบที่ศึกษาประกอบด้วยผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวน 98 ราย ใช้สายไฟฟ้าแรงต่ำขนาด 95 ตารางมิลลิเมตร และมีหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 22/0.4 กิโลโวลต์ กำลังพิกัด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ ได้แก่ ข้อมูลโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าและ ข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งได้มาจากฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [8] ตามรูปที่ 1 เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองและประเมินผลกระทบจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำภายใต้สภาวะการใช้งานจริง



รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ ภายในหมู่บ้านจัดสรร

4. ผลการทดลอง

จากการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำดั้งเดิมภายในหมู่บ้านจัดสรรตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม OpenDSS เพื่อหาขีดความสามารถของระบบ พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 kVA มีภาระกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุด (Maximum Apparent Power) เกิดขึ้น ณ เวลา 22.00 น. โดยมีค่าเท่ากับ 172.97 kVA หรือคิดเป็นร้อยละ 69.19 ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้ารวม เมื่อคำนวณกำลังไฟฟ้า

สำรองที่เหลืออยู่ของระบบจำหน่ายดั้งเดิมนี้ พบว่าสามารถรองรับการติดตั้งเครื่องประจุยานยนต์ไฟฟ้าขนาด 7.0 kW เพิ่มเติมเข้าไปในระบบได้สูงสุดจำนวน 12 เครื่องชาร์จ รูปที่ 2



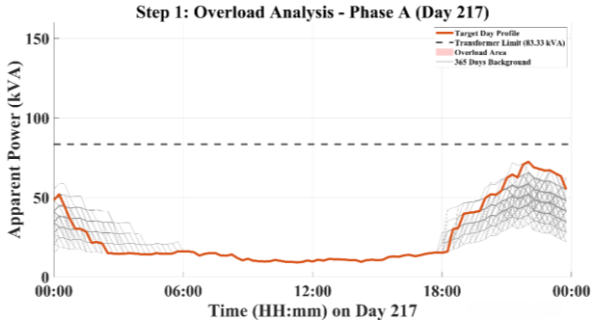
รูปที่ 2 กำลังไฟฟ้าปรากฏที่มีอยู่เดิมในระบบจำหน่ายแรงต่ำ

4.1 การจำลองพฤติกรรมการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

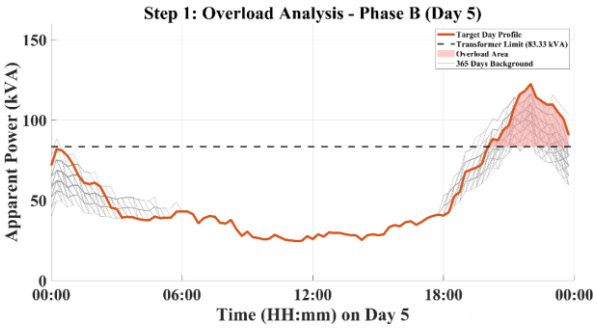
การวิเคราะห์ผลกระทบในสภาวะจริงใช้วิธีดำเนินการจำลองพฤติกรรมการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบสุ่ม (Randomized Simulation) [8] ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 365 วัน ภายใต้เงื่อนไขการติดตั้งเครื่องชาร์จจำนวน 12 เครื่อง โดยกำหนดให้มียานยนต์ไฟฟ้าเข้าประจุพลังงานจำนวน 12 คันต่อวัน ขนาดแบตเตอรี่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 50 kWh และมีค่าสถานะประจุเริ่มต้น (State of Charge: SOC) อยู่ในช่วงร้อยละ 30 ถึง 60 ทั้งนี้เพื่อประเมินและเปรียบเทียบรูปแบบการเริ่มประจุไฟฟ้า 2 รูปแบบหลัก

จากข้อมูลการจดทะเบียนรถยนต์ในประเทศไทย พบว่ารถยนต์ไฟฟ้ามีสัดส่วนประมาณ 1 คัน ต่อรถยนต์ทั่วไป 3 คัน ดังนั้น เพื่อให้การจำลองสะท้อนสภาพการใช้งานที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงในปัจจุบัน บทความนี้จึงกำหนดให้มีการติดตั้งเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 36 เครื่อง ภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของหมู่บ้านจัดสรรที่ศึกษา โดยกำหนดให้มีรถยนต์ไฟฟ้าเข้ารับการชาร์จพลังงานจำนวน 12 คันต่อวัน การกำหนดจำนวนเครื่องชาร์จและจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าที่เข้าชาร์จดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สอดคล้องกับสัดส่วนการครอบครองรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน และเพื่อประเมินผลกระทบของภาระโหลดจากการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นต่อหม้อแปลงจำหน่ายและระบบไฟฟ้าแรงต่ำภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

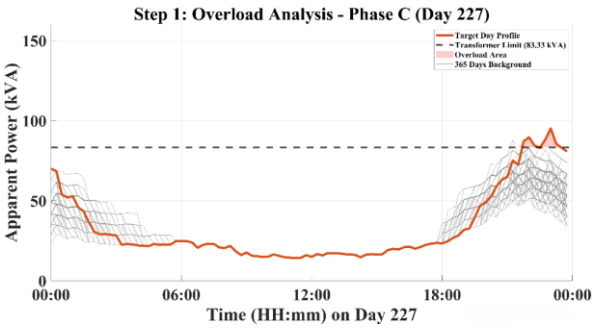
1 รูปแบบการชาร์จทั่วไป : รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มต้นการชาร์จในช่วงเวลา 18.00–23.00 น. ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการเดินทางกลับเข้าที่พักอาศัยและการใช้งานของผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าโดยทั่วไป



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส A ณ วันที่ 217 ของปี

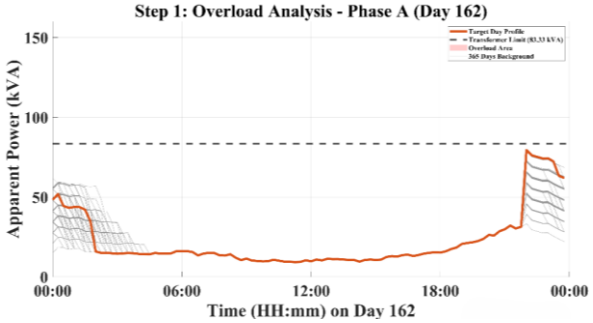


รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส B ณ วันที่ 5 ของปี

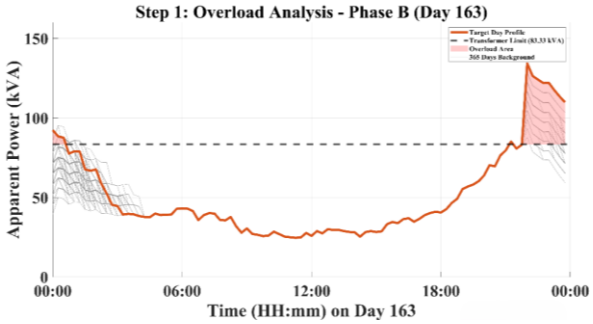


รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส C ณ วันที่ 227 ของปี

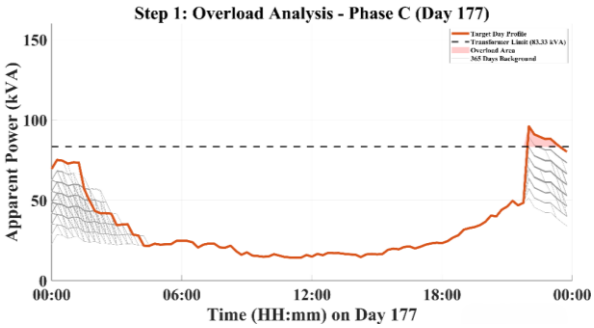
2. รูปแบบการชาร์จตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU (Time-of-Use Charging) : รถยนต์ไฟฟ้าจะเริ่มต้นการชาร์จเฉพาะในช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้านอกช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Off-Peak) ระหว่างเวลา 22.00 – 09.00 น. ของวันถัดไป



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส A ณ วันที่ 162 ของปี



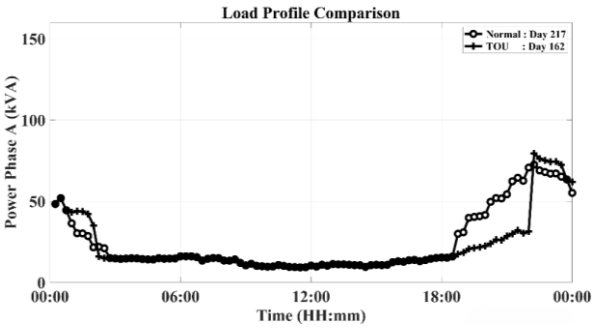
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส B ณ วันที่ 163 ของปี



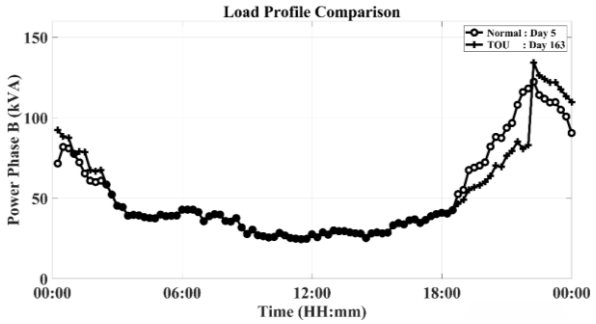
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส C ณ วันที่ 177 ของปี

4.2 เปรียบเทียบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบทั่วไป และแบบ TOU

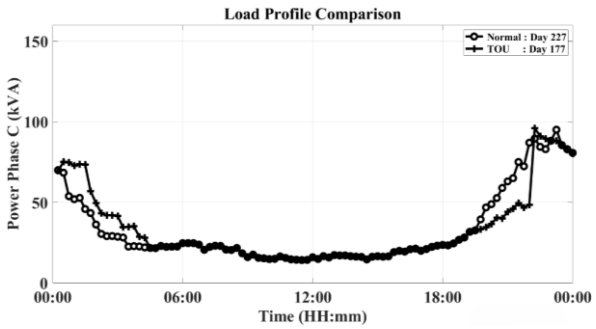
ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน จากการจำลองตลอด 365 วัน ถูกนำมาเปรียบเทียบแยกตามเฟส A เฟส B และเฟส C เพื่อประเมินผลกระทบของรูปแบบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส A



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส B



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดในเฟส C

จากผลการทดลอง พบข้อสังเกตสำคัญ คือ รูปแบบการชาร์จตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU ในช่วง Off-Peak ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดของทุกเฟสเพิ่มสูงขึ้นกว่ารูปแบบการชาร์จทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน เฟส B ที่กำลังไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้นถึง 134.27 kVA ในวันที่ 163 ของปีจำลอง และ เฟส C พุ่งสูงขึ้นถึง 96.11 kVA ในวันที่ 177 ซึ่งทั้งสองกรณีมีค่าเกินกว่าพิกัดกำลังสูงสุดที่เฟสหม้อแปลงจะรองรับได้ (83.33 kVA) ส่งผลให้เกิดพื้นที่วิกฤตโหลดเกินพิกัด (Overload Area) ที่รุนแรงกว่ารูปแบบทั่วไป

ปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า การบังคับใช้มาตรการอัตราค่าไฟฟ้า TOU ก่อให้เกิดแรงจูงใจให้ผู้ใช้งานตั้งเวลาส่งสัญญาณเริ่มชาร์จพร้อมกันทันทีเมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา Off-Peak (เวลา 22.00 น.) ส่งผลให้เกิดยอดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดซ้อนทับเฉียบพลัน (Sharp Peak-on-Peak) แตกต่างจากการชาร์จทั่วไปที่พฤติกรรมการเข้าชาร์จจะกระจายตัวอย่างอิสระตามช่วงเวลาเย็นถึงค่ำ (18.00 – 23.00 น.) ดังนั้น ข้อมูลนี้จึงชี้ให้เห็นว่า แม้การสลับมาใช้ TOU จะช่วยลดโหลดในเวลากลางวันได้ แต่หากระบบจำหน่ายจำแรงต่ำขาดการบริหารจัดการและจัดสมดุลเฟสในการป้อนประจุไฟฟ้า หรือขาดระบบการชาร์จแบบอัจฉริยะ (Smart Charging) มาช่วยหน่วงเวลาและกระจายภาระโหลด ก็จะนำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพ ความไม่สมดุลระหว่างเฟส (Phase Unbalance) และเร่งการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายในที่สุด ดังข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า	Phase		
	A	B	C
วันที่วิกฤต (ทั่วไป)	217	5	227
S สูงสุดทั่วไป (kVA)	72.50	122.45	89.63
วันที่วิกฤต (TOU)	162	163	177
S สูงสุดTOU (kVA)	79.47	134.27	96.11
ส่วนต่าง S (kVA)	6.97	11.82	6.48
เปลี่ยนแปลง (%)	9.61	9.65	7.23

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของการประจุยานยนต์ไฟฟ้าต่อหม้อแปลงในระบบจำหน่ายแรงต่ำขนาด 250 kVA จากผลการจำลองพฤติกรรมการชาร์จต่อเนื่อง 365 วัน พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าถือเป็นโหลดต่อเนื่องที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบ ทั้งในแง่ของการเกิดสภาวะหม้อแปลงทำงานเกินพิกัด (Overload) และความไม่สมดุลระหว่างเฟส (Phase Unbalance) โดยผลการศึกษาที่สำคัญชี้ให้เห็นว่า การใช้งานตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU เพื่อหวังย้ายโหลดไปสู่ช่วง Off-Peak นั้น กลับก่อให้เกิดสภาวะความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดซ้อนทับ (Peak-on-Peak) อย่างรุนแรงในช่วงเวลา 22.00 น. ส่งผลให้ภาระกำลังไฟฟ้าปรากฏพุ่งสูงเกินขีดจำกัดความปลอดภัยของหม้อแปลงที่ 83.33 kVA ต่อเฟสอย่างชัดเจน (โดยเฉพาะในเฟส B ที่พุ่งสูงถึง 134.27 kVA) ซึ่งรุนแรงกว่าการกระจายตัวชาร์จในรูปแบบทั่วไป

ดังนั้น การใช้เพียงมาตรการจูงใจด้านอัตราค่าไฟฟ้า TOU จึงไม่เพียงพอต่อการรักษาความมั่นคงของระบบจำหน่ายแรงต่ำ แนวทางการบริหารจัดการที่จำเป็นต้องนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันคือ การจัดสมดุลเฟสในการป้อนประจุไฟฟ้าอย่างรัดกุม และการนำเทคโนโลยีการชาร์จแบบอัจฉริยะ (Smart Charging) เข้ามาควบคุมและบริหารจัดการกำลังไฟฟ้าปรากฏไม่ให้เกินขีดจำกัดของแต่ละเฟสหม้อแปลง นอกจากนี้การประยุกต์ใช้พลังงานสะอาด โดยเฉพาะการบูรณาการระบบโซล่าร์เซลล์ (Solar Cells) ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในระดับแรงต่ำ จะเป็นอีกหนึ่งกลไกสำคัญที่จะช่วยตอบสนองความต้องการของโหลด ลดความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Shaving) และยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. อ้างอิง

[1] Y. Yu, L. De Herdt, A. Shekhar, G. R. C. Mouli, and P. Bauer, "EV Smart Charging in Distribution Grids—Experimental Evaluation Using Hardware in the Loop Setup," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 5, pp. 13–27, 2024.

[2] D. Aswani, R. Garoogian, P. Klauer, B. Jungers, R. Quint, S. Caruso, and M. Walker, "Impacts of Electric Vehicle Charging on Distribution and Transmission Grid Reliability," in *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Expo.*, 2024.

[3] V. Boglou and A. Karlis, "A Many-Objective Investigation on Electric Vehicles' Integration Into Low-Voltage Energy Distribution Networks With Rooftop PVs and Distributed ESSs," *IEEE Access*, 2024.

[4] T. Li, H. Wu, H. Chen, and J. Wang, "Impact Analysis of Distribution Network Integrated Electric Vehicles Based on Monte Carlo Algorithm," in *Proc. 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Nanjing, China, 2023

[5] กรมการขนส่งทางบก, "สถิติการจดทะเบียนรถ," กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน, กระทรวงคมนาคม. [ออนไลน์].

[6] IEEE Std 1818-2017: IEEE Guide for the Design of Low-Voltage Auxiliary Systems for Electric Power Substations

[7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, *คู่มือการติดตั้งระบบอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า*, กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน, 2565.

[8] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ พื้นที่จังหวัดนครราชสีมา," ข้อมูลภายในหน่วยงาน, 2568.

ตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

An Automatic Water Dispenser Controlled by a Microcontroller

พิพัฒน์ ดุรงค์ดำรงชัย[1] ชัยพร อัดโดดดร[1*] และสัญญารัก จันทรอุดร[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น 40000

ผู้ติดต่อ: อีเมล: chaiporn.add@neu.ac.th, โทรศัพท์: 093-2168326

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สำหรับจ่ายน้ำดื่มอัตโนมัติที่สามารถเพิ่มความสะดวก ลดการสัมผัสอุปกรณ์ร่วมกัน และช่วยประหยัดน้ำในการใช้งาน โดยนำเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้เป็นหน่วยประมวลผลหลักในการควบคุมการทำงานของระบบ ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับภาชนะบรรจุน้ำและอุปกรณ์ควบคุมการเปิด–ปิดการไหลของน้ำ การดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาและออกแบบวงจรควบคุม การเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และการประกอบต้นแบบตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ เมื่อผู้ใช้งานนำแก้วหรือขวดน้ำมาวางในตำแหน่งที่กำหนด เซนเซอร์จะตรวจจับวัตถุและส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งงานวาล์วน้ำหรือปั๊มน้ำให้ทำงานโดยอัตโนมัติ และหยุดการจ่ายน้ำตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบ พบว่า ตู้จ่ายน้ำสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง มีความแม่นยำในการตรวจจับภาชนะและสามารถจ่ายน้ำได้อย่างต่อเนื่องตามที่ออกแบบไว้ ช่วยลดการสัมผัสอุปกรณ์โดยตรง เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และลดการสูญเสียน้ำจากการใช้งานที่ไม่เหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานศึกษา สำนักงาน และสถานที่สาธารณะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถพัฒนาต่อยอดให้รองรับระบบอัจฉริยะ เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมการใช้งานในอนาคตต่อไปได้

คำสำคัญ: ตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ, ไมโครคอนโทรลเลอร์, เซนเซอร์ตรวจจับ, ระบบควบคุมอัตโนมัติ

Abstract

This research presents the design and construction of an automatic water dispenser controlled by an Arduino Uno R3 microcontroller. The objective is to develop an automatic drinking water dispenser that enhances convenience, reduces contact, and conserves water. A microcontroller serves as the main processing unit to control the system's operation, along with a sensor to detect water containers and a device to control water flow. The process began with studying and designing the control circuit, selecting appropriate components, programming the microcontroller, and assembling a prototype automatic water dispenser. When a user places a cup or bottle in the designated position, the sensor detects the object. It sends a signal to the microcontroller, which automatically activates the water valve or pump and stops dispensing water according to predefined conditions. Testing showed that the prototype

operates correctly, accurately detects containers, and dispenses water continuously as designed. This reduces direct contact, increases user convenience, and minimizes water waste from improper use. The system can be effectively applied in educational institutions, offices, and various public places. Furthermore, it has the potential to be developed to support smart systems and enhance future control capabilities.

Keywords: Automatic Water Dispenser, Microcontroller, Sensor, Automatic Control System

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการอำนวยความสะดวกให้กับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น โดยเฉพาะการนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ [1,2] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และลดการใช้แรงงานของมนุษย์ ตลอดจนช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานด้วยตนเอง การจ่ายน้ำดื่มเป็นกิจกรรมที่พบได้ทั่วไปในสถานศึกษา สำนักงาน โรงงาน และสถานที่สาธารณะต่าง ๆ ซึ่งตู้จ่ายน้ำแบบทั่วไปมักอาศัยการกดปุ่มหรือเปิด–ปิดวาล์วด้วยมือ ทำให้เกิดการสัมผัสร่วมกันของผู้ใช้งานจำนวนมาก อาจส่งผลต่อสุขอนามัยและการแพร่กระจายของเชื้อโรคได้ นอกจากนี้ยังอาจเกิดปัญหาการจ่ายน้ำเกินความต้องการ หรือการลืมปิดวาล์ว ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำโดยไม่จำเป็น ซึ่งน้ำดื่มเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ การเข้าถึงน้ำดื่มที่สะอาดและสะดวกจึงเป็นสิ่งจำเป็นในสถานที่ต่างๆ เช่น โรงเรียน มหาวิทยาลัย สำนักงาน โรงงาน และสถานที่สาธารณะทั่วไป โดยตู้จ่ายน้ำดื่มเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมในการให้บริการน้ำดื่มแก่ผู้ใช้งานจำนวนมาก อย่างไรก็ตามตู้จ่ายน้ำแบบทั่วไปยังคงต้องอาศัยการกดปุ่มหรือเปิด–ปิดวาล์วด้วยมือ ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสัมผัสร่วมกันของผู้ใช้งานหลายคน และอาจส่งผลต่อสุขอนามัยได้ นอกจากนี้ การกดน้ำด้วยมืออาจทำให้เกิดปัญหาน้ำล้นภาชนะ การลืมปิดวาล์ว หรือการใช้น้ำเกินความจำเป็น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำและสิ้นเปลืองทรัพยากรโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังอาจสร้างความไม่สะดวกให้กับเด็ก ผู้สูงอายุ หรือผู้ที่มีข้อจำกัดทางร่างกายในการใช้งาน และในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ [3,4] เพื่อเพิ่มความสะดวกสบาย ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการทำงาน ระบบดังกล่าวสามารถช่วยลดขั้นตอนการทำงานของมนุษย์ ลดความผิดพลาด และเพิ่มความรวดเร็วในการให้บริการได้เป็นอย่างดี จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ [5,6] โดยใช้เซนเซอร์ในการตรวจจับภาชนะหรือผู้ใช้งาน และสั่งการให้ระบบจ่ายน้ำโดยอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่กำหนด [7,8] เมื่อมีการนำแก้วหรือขวดน้ำมาวางในตำแหน่งที่กำหนด ระบบจะเริ่มจ่ายน้ำทันที และจะหยุดการจ่ายน้ำเมื่อครบระยะเวลาหรือปริมาณที่ตั้งค่าไว้ ตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วย

ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุม และเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ช่วยส่งเสริมสุขอนามัย ลดการสิ้นเปลืองทรัพยากร และเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับงานบริการในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ

ตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติเป็นอุปกรณ์ที่นำเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ในการจ่ายน้ำดื่ม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสะดวก ลดการสัมผัสอุปกรณ์โดยตรง ประหยัดน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน เทคโนโลยีที่สำคัญประกอบด้วย ดังนี้

1. **เทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์** ทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมหลักของระบบ รับข้อมูลจากเซนเซอร์ ประมวลผล และสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปั๊มน้ำ วาล์วน้ำ และจอแสดงผล
2. **เทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจจับ** ใช้สำหรับตรวจจับแก้วน้ำ ขวดน้ำ หรือการเคลื่อนไหวของผู้ใช้งาน เช่น เซนเซอร์อินฟราเรด (Infrared Sensor) และเซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor)
3. **ระบบควบคุมการไหลของน้ำอัตโนมัติ** ใช้โซลินอยด์วาล์วหรือปั๊มน้ำไฟฟ้าในการควบคุมการเปิด–ปิดการไหลของน้ำตามคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์
4. **เทคโนโลยีไร้สัมผัส** ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถรับน้ำได้โดยไม่ต้องสัมผัสปุ่มกด ลดการแพร่กระจายของเชื้อโรค

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

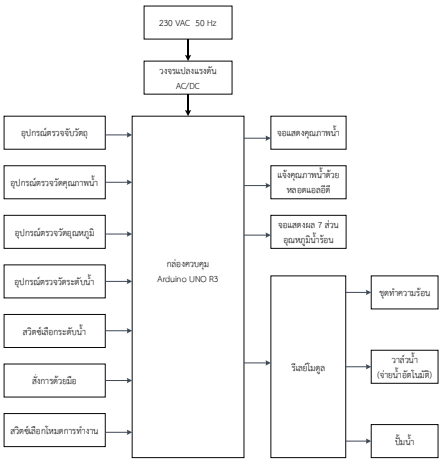
อาดูโน่ (Arduino) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนามาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติมพัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย ความง่ายของบอร์ดอาดูโน่ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือ ผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือ เพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ดอาดูโน่ แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย ในงานวิจัยนี้จะใช้ Arduino Uno R3 ซึ่งเป็นบอร์ดอาดูโน่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง ส่วนใหญ่โปรเจคและ Library ต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมา Support จะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลัก เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino และมี Shields ให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ดอาดูโน่รุ่นอื่นๆ ที่ออกแบบมาเฉพาะมากกว่า โดยบอร์ด Arduino Uno ได้มีการพัฒนาเรื่อยมาตั้งแต่ R2 R3 และรุ่นย่อยที่เปลี่ยนชิปไอซีเป็นแบบ SMD และข้อดีอีกอย่าง คือ กรณีที่ MCU เสีย ผู้ใช้งานสามารถซื้อมาเปลี่ยนเองได้ง่าย

3. การออกแบบและสร้างตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ

3.1 แผนภาพการทำงาน

การออกแบบตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อให้สามารถจ่ายน้ำได้แบบอัตโนมัติและแบบมือกด สามารถจ่ายน้ำที่อุณภูมิห้องและจ่ายน้ำร้อนได้ และมีการแจ้งเตือนคุณภาพน้ำด้วยหลอดแอลอีดี หลักการทำงานของตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติได้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ส่วนอินพุตพวกอุปกรณ์ตรวจจับชนิดต่างๆ ส่วนประมวลผลหลักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการสั่งการ ส่วนเอาต์พุต

ที่ทำงานตามการสั่งการจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนแสดงสถานะการทำงาน

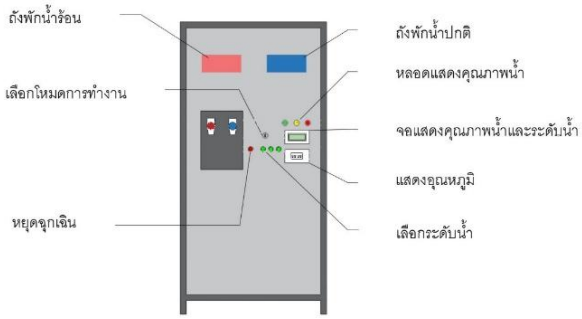


รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานตู้กดน้ำแบบอัตโนมัติ

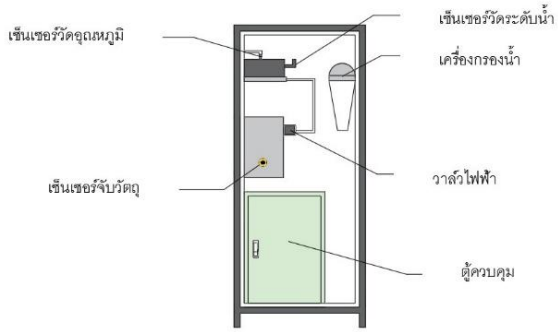
โดยการทำงานเริ่มจากการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรย่อยต่างๆ เมื่อส่วนของอินพุตที่เป็นพวกอุปกรณ์ตรวจจับค่าที่ต้องการได้ ประกอบด้วยค่าอุณหภูมิ คุณภาพน้ำ ระดับน้ำ การเลือกระดับน้ำ การเลือกโหมดการทำงาน และการสั่งการด้วยมือ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ จะถูกส่งไปประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งงานให้ปั๊มน้ำทำงานเพื่อการจ่ายน้ำ การเปิดปิดวาล์วน้ำ เพื่อควบคุมปริมาณการจ่ายน้ำ และชุดทำความร้อนทำงาน เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ระหว่างอุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงค่าอุณหภูมิผ่านจอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก มีการแสดงผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำเป็นค่าพีพีเอ็มผ่านจอแอลซีดี การแจ้งเตือนคุณภาพน้ำจะแจ้งด้วยหลอดแอลอีดี โดยที่ถ้าค่าคุณภาพน้ำดีต่ำกว่า 500 พีพีเอ็ม หลอดแอลอีดีจะแสดงเป็นสัญญาณไฟสีเขียว แต่ถ้าคุณภาพน้ำไม่ดีมีค่าสูงกว่า 500 พีพีเอ็ม หลอดแอลอีดีจะแสดงสัญญาณไฟสีแดง

3.2 โครงสร้างตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ

โครงสร้างภายนอกของตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัตินั้น ได้ทำการออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยโครงสร้างจะประกอบขึ้นจากวัสดุอลูมิเนียมเกือบทั้งหมด เพราะว่าต้องการความสวยงาม ความแข็งแรงทนทาน และป้องกันสนิมได้ดี มีความกว้าง 0.7 เมตร ความลึก 0.6 เมตร และความสูง 1.45 เมตร



รูปที่ 2 ออกแบบโครงสร้างภายนอกตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 ออกแบบโครงสร้างภายในตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4 โครงสร้างภายนอกตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ถ่ายจากภาพจริง



รูปที่ 5 โครงสร้างภายในตู้จ่ายน้ำแบบอัตโนมัติที่ถ่ายจากภาพจริง

3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ

การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำนี้ จะเลือกใช้ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัด Total Dissolved Solids (TDS) หรือที่เรียกว่าเครื่องวัดค่า TDS เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายในสารละลาย ทำงานโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนและแร่ธาตุที่ละลายอยู่เครื่องวัดนี้นิยมใช้ในการใช้งานที่หลากหลายรวมถึงในโรงบำบัดน้ำ เพื่อตรวจสอบคุณภาพของน้ำดื่มในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำตรวจสอบความเค็มของน้ำ เหตุผลในการเลือกใช้เพราะว่า การใช้งานไม่ยุ่งยาก ใช้งานร่วมกับตัว Arduino ได้ดี ราคาไม่แพง และการซ่อมแซมบำรุงรักษาทำได้ง่าย

3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมินี้ จะเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ รุ่น DS18B20 ซึ่งมีเหตุผลในการเลือกใช้ดังนี้ รุ่น DS18B20 สามารถป้องกันน้ำเข้าตัวมันได้ เพราะโครงสร้างเป็นแบบห่อหุ้ม (Encased) ทำให้ป้องกันน้ำเข้าได้ จึงทำให้สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมที่เปียกหรือจุ่มลงในน้ำได้โดยตรง ไม่ต้องกังวลเรื่องการเสียหายจากน้ำ การตั้งค่าและใช้งานค่อนข้างง่าย โดยที่รุ่น DS18B20 นี้ สามารถใช้งานร่วมกับ Arduino ได้เป็นอย่างดี มีไลบรารี (Libraries) ที่รองรับการใช้งานอย่างหลากหลาย อาทิเช่น 1-Wire (OneWire) และ Dallas Temperature ที่ช่วยให้การเขียนโค้ดทำได้อย่างสะดวก อีกทั้ง รุ่น DS18B20 นี้ ยังมีความทนทานเป็นอย่างมากต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ซึ่งจะรวมถึงการวัดอุณหภูมิในน้ำที่อาจมีความชื้นหรือสารเคมีต่างๆ เจอปน

3.5 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ

การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ จะเลือกใช้อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบไม่สัมผัส ที่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5-24 โวลต์ รุ่น XKC-Y25-V เหตุผลในการเลือกใช้ เพราะไม่ต้องสัมผัสของเหลวโดยตรง เนื่องจากอุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้แบบไม่ต้องสัมผัส จึงช่วยลดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนหรือความเสียหายจากของเหลวที่อาจกัดกร่อนหรือเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ตรวจวัดได้

3.6 อุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ

การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับวัตถุนี้ จะเลือกใช้แบบมี

การตรวจจับในระยะใกล้ โดยการใช้แสงอินฟราเรดที่ทำงานด้วยการปล่อยแสงอินฟราเรดออกไปกระทบวัตถุแล้วมีการสะท้อนกลับมายังตัวรับ รุ่น E18-D80NK เพื่อใช้ในการจ่ายน้ำแบบอัตโนมัติ

3.7 การเลือกใช้อุปกรณ์จ่ายน้ำ

จะเลือกใช้ปั๊มน้ำไดอะแฟรม ซึ่งเป็นปั๊มน้ำหรือปั๊มลมกระแสตรง (DC) ขนาดกะทัดรัดที่ทำงานด้วยระบบแผ่นยางไดอะแฟรม มีเหตุผลในการเลือกใช้เพราะว่ามีน้ำหนักเบา ปั๊มไดอะแฟรมมีโครงสร้างที่เบาถ้าเทียบกับปั๊มชนิดอื่นๆ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและเคลื่อนย้าย มีความทนทานต่อสารเคมี ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในน้ำที่มีสารเคมีเจอปน หรือมีสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เจอปนในน้ำก็ยังสามารถทำงานได้ดี

3.8 วงจรควบคุมการทำงาน

วงจรควบคุมการทำงานรวมของตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 6 โดยการทำงานของวงจรตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติมีดังนี้ เริ่มจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ Arduino UNO R3 รวมถึงโซลินอยด์วาล์ว และปั๊มน้ำไดอะแฟรม ด้วย ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ จะถูกจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจร ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ

โหมดการทำงานแบบอัตโนมัติ สำหรับการจ่ายน้ำอุณหภูมิห้อง มีหลักการทำงานดังนี้

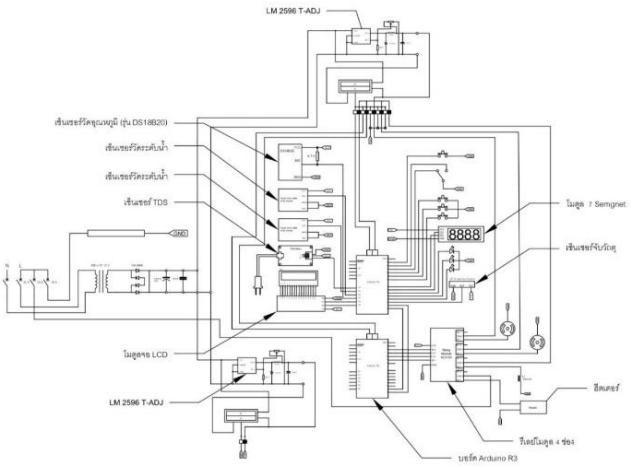
ตัวอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุจะทำการตรวจจับวัตถุตามระยะทางที่ได้กำหนดไว้ แล้วส่งค่าที่ได้ไปยัง Arduino UNO R3 เพื่อประมวลผลและสั่งการให้สามารถจ่ายน้ำได้แบบอัตโนมัติ

ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำจะทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำแล้วส่งค่าที่ได้ไปยัง Arduino UNO R3 เพื่อประมวลผลและสั่งการให้หลอดแอลอีดีทำงาน ซึ่งจะแสดงผลตามสีที่ได้กำหนดไว้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 และการแสดงค่าคุณภาพน้ำนี้ ก็จะแสดงผ่านหน้าจอแอลซีดีด้วยเช่นเดียวกัน

สวิตช์เลือกปริมาณน้ำ เมื่อทำการกดเลือกค่า ค่าที่ได้จะถูกส่งไปยัง Arduino เพื่อประมวลผลและสั่งให้ตัวรีเลย์ทำงาน ซึ่งปริมาณน้ำจะถูกจ่ายตามค่าที่ได้กดเลือกด้วยการควบคุมการทำงานของวาล์วปิดเปิดน้ำไฟฟ้าและปั๊มน้ำ

โหมดการทำงานแบบมือกด (Manual) สำหรับการจ่ายน้ำร้อนระหว่างอุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส มีหลักการทำงานดังนี้

ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิจะทำการตรวจวัดอุณหภูมิแล้วส่งค่าที่ได้ไปยัง Arduino UNO R3 เพื่อประมวลผลและส่งไปแสดงที่จอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก เพื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ระหว่างอุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส โดยที่ ถ้าค่าอุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส บอร์ด Arduino UNO R3 จะสั่งการให้รีเลย์โมดูลตัดวงจร เพื่อตัดการทำงานของฮีตเตอร์ และถ้าค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 85 องศาเซลเซียส บอร์ด Arduino UNO R3 จะสั่งการให้รีเลย์ต่อวงจร เพื่อให้ฮีตเตอร์ทำงาน เมื่อมีไฟรั่ว ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์จะตัดวงจรของฮีตเตอร์ออก



รูปที่ 6 วงจรควบคุมการทำงาน

4 ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ

เพื่อประเมินความสามารถของอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุในการตรวจจับวัตถุในระยะ 1-10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงระยะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในโหมดอัตโนมัติของตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ตรวจจับสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ และตอบสนองต่อการวางภาชนะใส่น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ

ครั้งที่	ระยะความห่าง (เซนติเมตร)	ผลการตรวจจับ
1	1	ตรวจจับได้
2	2	ตรวจจับได้
3	3	ตรวจจับได้
4	4	ตรวจจับได้
5	5	ตรวจจับได้
6	6	ตรวจจับได้
7	7	ตรวจจับได้
8	8	ตรวจจับได้
9	9	ตรวจจับได้
10	10	ตรวจจับได้

ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ ปรากฏว่าอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุสามารถทำงานได้ในระยะ 1-10 เซนติเมตร ซึ่งจะตรงตามคุณสมบัติของอุปกรณ์

4.2 ผลการทดสอบการจ่ายน้ำในโหมดเลือกปริมาณน้ำ

เพื่อต้องการตรวจสอบว่า ระบบจ่ายน้ำที่อุณภูมิห้องของตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติทำงานได้ดีแค่ไหน โดยใช้โซลินอยด์วาล์วควบคุมปริมาณน้ำให้ออกมาตรงตามที่กำหนดไว้ คือ 240 มิลลิลิตร 360 มิลลิลิตร และ 480 มิลลิลิตร ตามการออกแบบไว้ และต้องการตรวจสอบว่าปริมาณน้ำที่จ่ายออกมาแต่ละครั้งครบถ้วนและสม่ำเสมอหรือไม่ รวมถึงต้องการตรวจสอบดูว่าระบบนี้ มีประสิทธิภาพการทำงานมากพอที่จะนำไปใช้งานจริงในชีวิตประจำวันได้หรือไม่ ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 240 มิลลิลิตร

ปริมาตรน้ำที่ 240 มิลลิลิตร		
ครั้งที่	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ค่าความคาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
1	240	0
2	240	0
3	240	0
4	245	2.08
5	245	2.08
6	245	2.08
7	250	4.16
8	250	4.16
9	250	4.16
10	250	4.16
เฉลี่ย	245.5	2.29

ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 240 มิลลิลิตร ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ดี มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 2.29 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 360 มิลลิลิตร

ปริมาตรน้ำที่ 360 มิลลิลิตร		
ครั้งที่	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ค่าความคาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
1	355	1.38
2	355	1.38
3	355	1.38

4	360	0
5	360	0
6	360	0
7	360	0
8	355	1.38
9	360	0
10	355	1.38
เฉลี่ย	357.5	0.69

ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 360 มิลลิลิตร ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ดี มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 0.69 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 480 มิลลิลิตร

ปริมาตรน้ำที่ 480 มิลลิลิตร		
ครั้งที่	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ค่าความคาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
1	480	0.2
2	480	0.1
3	480	0.1
4	480	0.2
5	480	0.3
6	480	0.2
7	480	0.1
8	480	0.2
9	480	0.3
10	480	0.5
เฉลี่ย	480	0.22

ผลการทดสอบการจ่ายน้ำปริมาตร 480 มิลลิลิตร ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ดี มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 0.22 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ

เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์วัดระดับน้ำในตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยการพิจารณาว่าสามารถตรวจจับปริมาณน้ำในถังความจุ 4 ลิตร (อุณหภูมิห้อง) และถังร้อน (อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส) ความจุ 2 ลิตร ได้แม่นยำมากน้อยแค่ไหน รวมถึงต้องการตรวจสอบว่าระบบจะส่งสัญญาณเตือน เมื่อน้ำในถังลดลงต่ำกว่าระดับที่กำหนดหรือไม่ และการสั่งให้มีการเติมน้ำใหม่เองโดยอัตโนมัติ เพื่อให้มั่นใจว่าผู้ใช้จะมีน้ำใช้ในปริมาณที่เพียงพอ และพร้อมใช้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องเติมด้วยมือ ดังนี้

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (อุณหภูมิห้อง)

ครั้ง	การทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (ทำงานถูกต้อง / ทำงานไม่ถูกต้อง)
1	ทำงานถูกต้อง
2	ทำงานถูกต้อง
3	ทำงานถูกต้อง
4	ทำงานถูกต้อง
5	ทำงานถูกต้อง
6	ทำงานถูกต้อง
7	ทำงานถูกต้อง
8	ทำงานถูกต้อง
9	ทำงานถูกต้อง
10	ทำงานถูกต้อง

ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (อุณหภูมิห้อง) ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องทั้งหมด

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำร้อน (อุณหภูมิ85-90 องศาเซลเซียส)

ครั้ง	การทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ (ทำงานถูกต้อง / ทำงานไม่ถูกต้อง)
1	ทำงานถูกต้อง
2	ทำงานถูกต้อง
3	ทำงานถูกต้อง
4	ทำงานถูกต้อง
5	ทำงานถูกต้อง
6	ทำงานถูกต้อง
7	ทำงานถูกต้อง
8	ทำงานถูกต้อง
9	ทำงานถูกต้อง
10	ทำงานถูกต้อง

ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำร้อน (อุณหภูมิ85-90 องศาเซลเซียส) ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องทั้งหมด

4.4 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

เพื่อต้องการตรวจสอบดูว่าอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งภายในตู้จ่ายน้ำสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำร้อนได้อย่างถูกต้อง และควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 85-90 องศาเซลเซียส ได้หรือไม่ เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำร้อนที่จ่ายออกมามีความร้อนเหมาะสมสำหรับการใช้งาน ดังนี้

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ เพื่อควบคุมการทำงานฮีตเตอร์

อุณหภูมิที่แสดงผลบนหน้าจอแสดงผล (องศาเซลเซียส)	การทำงานของฮีตเตอร์ (ทำงาน / ไม่ทำงาน)
35	ทำงาน
45	ทำงาน
55	ทำงาน
65	ทำงาน
75	ทำงาน
86	ไม่ทำงาน
90	ไม่ทำงาน

ผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ เพื่อการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 85-90 องศาเซลเซียส โดยใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องทั้งหมด จะเห็นว่าถ้าน้ำมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่กำหนดตัวฮีตเตอร์จะไม่ทำงาน

4.5 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ

เพื่อต้องการตรวจวัดคุณภาพของน้ำดื่ม จากขวดน้ำที่มีการจำหน่ายตามท้องตลาดกับน้ำที่ได้จากตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด TDS ว่าคุณภาพของน้ำดื่มมีค่า TDS อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยที่ค่าไม่เกิน 500 ppm ตามมาตรฐาน WHO เหมาะสำหรับดื่มหรือไม่ ดังนี้

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการวัดคุณภาพน้ำ 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างการทดสอบ	ค่า TDS เฉลี่ย (พีพีเอ็ม)	อยู่ในเกณฑ์ WHO (1,000 พีพีเอ็ม)	อยู่ในเกณฑ์ EPA/มอก. (≤500 พีพีเอ็ม)	คำอธิบาย
ยี่ห้อที่1 ขวดที่ 1 (น้ำดื่มตามท้องตลาด)	249.72	อยู่ในเกณฑ์	อยู่ในเกณฑ์	คุณภาพดี มีแร่ธาตุเหมาะสม รสชาติดี (อยู่ในช่วง 150-300 พีพีเอ็ม)

ยี่ห้อที่2 ขวดที่ 2 (น้ำดื่มตามท้องตลาด)	71.83	อยู่ในเกณฑ์	อยู่ในเกณฑ์	คุณภาพดีเยี่ยม น้ำสะอาดมาก รสชาติอาจจืดเล็กน้อย (อยู่ในช่วง 50-150 พีพีเอ็ม)
ยี่ห้อที่3 ขวดที่ 3 (น้ำตู้จ่ายน้ำ)	270.11	อยู่ในเกณฑ์	อยู่ในเกณฑ์	คุณภาพดี มีแร่ธาตุเหมาะสม รสชาติดี (อยู่ในช่วง 150-300 พีพีเอ็ม)

จากการทดสอบคุณภาพของน้ำดื่ม ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด TDS ปรากฏว่าคุณภาพของน้ำดื่มจากทั้งขวดน้ำที่ขายตามท้องตลาด กลับจากขวดน้ำที่ได้จากตู้จ่ายน้ำอัตโนมัตินั้น มีค่า TDS อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย ที่ค่าไม่เกิน 500 ppm

5. บทสรุป

จากการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำ ปรากฏว่าขวดที่ 1 (TDS = 249.72 พีพีเอ็ม) ค่า TDS อยู่ในช่วง 150-300 พีพีเอ็ม ซึ่งถือว่ามีแร่ธาตุในปริมาณที่สมดุลเหมาะสำหรับการดื่มตามคำแนะนำของ WHO (รสชาติดีที่ < 300 พีพีเอ็ม) และต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุดของ EPA/มอก. (500 พีพีเอ็ม) น้ำชนิดนี้ จะเป็นน้ำดื่มบรรจุขวดที่เติมแร่ธาตุเพื่อเพิ่มรสชาติ รสชาติอาจนุ่มนวลและสมดุล จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าขวดที่ 2 (TDS = 71.83 พีพีเอ็ม) ค่า TDS อยู่ในช่วง 50-150 พีพีเอ็ม ซึ่งบ่งบอกว่าน้ำมีของแข็งละลายน้อยมาก ผ่านการกรองหรือบำบัดที่ดีเยี่ยม ตามเกณฑ์ WHO และ EPA/มอก. น้ำประเภทนี้เป็นน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำกลั่นที่มีแร่ธาตุน้อย รสชาติอาจจืดไปบ้าง แต่ปลอดภัยและสะอาดสูง และจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าขวดที่ 3 (TDS = 270.11 พีพีเอ็ม) ค่า TDS อยู่ในช่วง 150-300 พีพีเอ็ม เช่นเดียวกับขวดที่ 1 อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยของทั้ง WHO และ EPA/มอก. น้ำจากตู้จ่ายนี้จะมีแร่ธาตุจากระบบกรองหรือแหล่งน้ำดิบ รสชาติอาจคล้ายน้ำขวดทั่วไป แต่ควรตรวจสอบความสม่ำเสมอของตู้จ่ายน้ำอัตโนมัติ ทำให้ช่วยเพิ่มความสะดวก ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความประหยัดในการใช้น้ำ พร้อมทั้งสามารถพัฒนาต่อยอดสู่ระบบอัจฉริยะและระบบ IoT ได้ในอนาคต เหมาะกับการใช้งานทั้งในครัวเรือนและสถานที่สาธารณะต่างๆ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าคุณภาพของน้ำที่ได้จากตู้จ่ายน้ำอัตโนมัตินั้นสามารถดื่มได้ และมีความปลอดภัยได้มาตรฐานตามเกณฑ์ WHO และ EPA/มอก.

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ravi Bolimera, R. Mounika, K.Madhavi, G. Venu. (2025). “Automatic Water Dispenser Using Arduino”. International Journal of DATA SCIENCE AND IOT MANAGEMENT SYSTEM. IJDIM, 2025, 4 (4(2)), 120-123.

[2] Muhammad Sakban and Purnama Helena Hutabarat. (2026). “Design and Implementation of an Arduino Uno Based Smart Automatic Water Dispenser Prototype”. Jurnal Pepadun. Vol. 7 No. 1, 2026, pp. 59-66.

[3] Bing Li, Jinghong Ji. (2021). “Design and Implementation of Automatic Control System for

Intelligent Water Dispenser". Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1-7.

[4] Engr. Bernard C. Fabro, Emanuel Zack Morabe, Eruel Joseph Manales, Ian Exequiel B. Santuyo, Nathaniel Mclarrei C. Tuazon, Jushua E. Villalobos. (2026). "Touchless Water Dispensing System". International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI). Volume 13 issue 1 January 2026. 425-437.

[5] Arafat FEBRIANDIRZAa, Abdiel Alpriyan Gempa Alamsyah SAHURI. (2024). "Design and Construction of an Automatic Dispenser for the Visually Impaired Using Microcontroller Technology". Mechatronics and Automation Technology.2024. 15-22.

[6] Bello Olawale Emmanuel, Sunmonu Olabode Kayode, Ogunlana Oluwaseun Ayodeji. (2024). "Design and Implementation of an Automatic Water and Hand Sanitizer Dispensing System". ASRIC Journal on Engineering Sciences Vol.4(2) (2024) 31-38.

[7] Matthew Oluwole AROWOLO, Oluwaseun Opeyemi MARTINS, Adefemi Adeyemi ADEKUNLE. (2024). "Design, Implementation, and Evaluation of an Automated Liquid Dispensing Machine". Journal of Science. GU J Sci 37(1): 443-455 (2024).

[8] Ankit Kumar, Abhishek Madhukar, Piyush ku. Dewengan, Suyash Ramteke, Kauleshwar Prasad, Sargam Gupta. (2022). "Automatic Water Dispenser Machine". Journal of Advances in Computational Intelligence Theory Volume 4 Issue 1. 2022.1-6.

การจัดวางและกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบรัศมี IEEE 33 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธี PSO เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงแรงดัน และเพิ่มความเชื่อถือได้ พร้อมการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วยมอนติคาร์โล

Optimal Placement and Sizing of DG in IEEE 33-Bus RDN Using PSO for Loss Minimization, Voltage Improvement, Reliability Enhancement with Monte Carlo

ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1], ภัคจิรา กำเนิดเขว้า[1], นพณัฐ จิตกรียาน[1], กฤติเดช บัวใหญ่[1], กาณฑ์ เกิดชื่น[1], วุฒิชัย สง่างาม[1], ยุทธณา คงจีน[1], ศุภประดิษฐ์ มาสงค์[2], และ อดิศร พลเสนา[1,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี
140 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000
*ผู้ติดต่อ: E-mail adisorn.po@rmuti.ac.th, 044-252-659

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดวางและกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DG) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบรัศมี IEEE 33 บัส 12.66 kV โดยใช้ดัชนีความไวต่อการสูญเสีย (LSI) คัดเลือกตำแหน่ง และ PSO หา 2-DG พร้อมกัน ผลการจำลองพบว่า PSO 2-DG ที่บัส 13 (848 kW) และบัส 30 (1,175 kW) ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจาก 202.3 kW เหลือ 84.5 kW (58.2%) แรงดันต่ำสุดเพิ่มจาก 0.9132 เป็น 0.9701 p.u. และ PSO DG ร่วมกับ DSTATCOM ลดการสูญเสียได้สูงสุด 71.9% การวิเคราะห์ Monte Carlo 500 ครั้ง ยืนยันว่า P(V<0.95) ลดจาก 100% เหลือ 46.4% และ ENS ลดลง 80.1%

คำสำคัญ: DG, PSO, Loss Sensitivity Index, IEEE 33 บัส, Monte Carlo, ENS, SAIDI

Abstract

This paper presents optimal placement and sizing of distributed generation (DG) in the IEEE 33-bus radial distribution network (RDN) at 12.66 kV using Loss Sensitivity Index (LSI) for site pre-selection and Particle Swarm Optimization (PSO) for simultaneous 2-DG optimization. Simulation results show that PSO 2-DG at Bus 13 (848 kW) and Bus 30 (1,175 kW) reduces power loss from 202.3 kW to 84.5 kW (58.2%), raises minimum voltage from 0.9132 to 0.9701 p.u., and PSO DG with DSTATCOM achieves maximum loss reduction of 71.9%. Monte Carlo analysis with 500 runs confirms that P(V<0.95) drops from 100% to 46.4% and ENS decreases by 80.1%.

Keywords: DG, PSO, Loss Sensitivity Index, IEEE 33-Bus, Monte Carlo, ENS, SAIDI.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและนโยบายส่งเสริมพลังงานทดแทนระดับโลก ทำให้การบูรณาการแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว Distributed Generation (DG) เข้ากับระบบจำหน่ายได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย [1] DG หมายถึงแหล่งผลิตขนาดเล็กที่ต่อเชื่อมโดยตรงกับระบบจำหน่าย เช่น โซลาร์เซลล์ กังหันลม และเครื่องยนต์ก๊าซ ซึ่งมีศักยภาพในการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงโปรไฟล์แรงดัน และเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบ [2]

อย่างไรก็ตาม การติดตั้ง DG ในตำแหน่งหรือขนาดที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหา เช่น การสูญเสียที่เพิ่มขึ้น Overvoltage Reverse Power Flow และ Islanding [3] งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอวิธีการหลากหลาย เช่น Analytical Method [2], MINLP [5], Hybrid GWO-PSO [10], การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วย Monte Carlo [11][12] และ Multi-objective optimization ที่รวม DSTATCOM [13][14] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังขาดการบูรณาการการแก้ไขจุดอ่อนหลายด้านในระบบเดียวกัน

สรุปการเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้เป็นงานแรกที่บูรณาการครบทั้ง 5 ด้านพร้อมกัน

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	DG	Reliability	Monte Carlo	DSTATCOM	Multi-DG	ปี
[10] Hybrid GWO-PSO	✓	-	-	-	✓	2023
[13] DSTATCOM	✓	✓	-	✓	-	2021
[15] Multi-obj DG	✓	✓	-	-	✓	2023
งานวิจัยนี้	✓	✓	✓	✓	✓	**2026**

บทความนี้มีส่วนสนับสนุนใหม่ 5 ด้าน ได้แก่

1. นิยาม Objective Function แบบสเกลาร์สำหรับ 4 สถานการณ์
2. นำเสนอ Pseudocode 4 ขั้นตอนที่สามารถนำไปทำซ้ำได้จริง
3. วิเคราะห์ความเสี่ยงด้วย Monte Carlo 500 รอบ พร้อมค่า ENS, SAIFI, SAIDI, CAIDI
4. บูรณาการ DSTATCOM ร่วมกับ DG ใน PSO 5 ตัวแปร
5. ตรวจสอบความสอดคล้องตามมาตรฐาน IEEE 1547 ในทุกกรณี

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Loss Sensitivity Index (LSI)

LSI วัดความไวของการสูญเสียต่อการฉีด Real Power ที่บัส i คำนวณจาก Exact Loss Formula [2]

$$LSI(i) = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{DG}(i)} = -\frac{2[\alpha(i,i)P_L(i) + \beta(i,i)Q_L(i)]}{V(i)^2} \quad (1)$$

เมื่อ $LSI(i)$ คือ ดัชนีความไวของการสูญเสียที่บัส i

P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ (kW)

$P_{DG}(i)$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส i บัสที่มีค่า LSI ลบมากที่สุดคือตำแหน่งที่ให้ผลลดการสูญเสียสูงสุด ใช้เป็น seed สำหรับ PSO

2.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO (Kennedy & Eberhart [4]) ปรับปรุงอนุภาคตามสมการ

$$v(t+1) = w \cdot v(t) + c_1 r_1[pbest - x(t)] + c_2 r_2[gbest - x(t)] \quad (2)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (3)$$

เมื่อ $V(t)$ คือ ความเร็วของอนุภาคในรอบที่ t

$V(t+1)$ คือ ความเร็วใหม่ในรอบถัดไป

$X(t)$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค

W คือ Inertia Weight (น้ำหนักความเฉื่อย)

พารามิเตอร์ w= 0.729, C_1=C_2 = 1.494 อนุภาค 40 ตัว 100 รอบ สำหรับ 2-DG มี 4 ตัวแปร [bus_1, $size_1$, bus_2, $size_3$] ขนาด DG สูงสุด 40% ของโหลดรวม 1,486 kW

2.3 ดัชนีความเชื่อถือได้และ ENS

ดัชนีที่ใช้ได้แก่ SAIFI, SAIDI, CAIDI และ ENS ตามแนวทาง Billinton & Allan [6] DG ช่วยลด ENS โดยจ่ายไฟใน Island Mode ให้โหลดที่ถูกแยกตัวตาม IEEE Std 1547.4 [8]

2.4 DSTATCOM (Distribution Static Compensator)

DSTATCOM คืออุปกรณ์ชดเชย Reactive Power แบบ Shunt ในระบบจำหน่าย ทำงานเป็น Voltage Source Converter (VSC) ที่ต่อขนานกับระบบผ่านหม้อแปลง ฉีดหรือดูด Reactive Current เพื่อควบคุมแรงดันที่บัสจุดต่อ (Point of Common Coupling: PCC) สมการหลักมีดังนี้

$$Is = Qs / (\sqrt{3}.Vt) \quad (4)$$

เมื่อ Is = กระแส Reactive ที่ DSTATCOM

Qs = Reactive Power (kVar)

Vt = แรงดันที่ PCC (kV)

2.5 Objective Function สำหรับ PSO DG+DSTATCOM Co-optimization

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมของตำแหน่งและขนาดของ DG และ DSTATCOM กำหนดดังสมการ

$$\min f = P_{loss} + 0.3Q_{loss} + \lambda_v \left[\max\left(0, V_{min}^{lim} - V_{min}\right)\right]^2 \quad (5)$$

เมื่อ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงรวมของระบบ (kW)

Q_{loss} คือ กำลังรีแอกทีฟสูญเสียรวมของระบบ (kVar)

V_{min} คือ ค่าแรงดันต่ำสุดของระบบที่เกิดขึ้นจากผลการคำนวณโหลดโฟลว์ (p.u.)

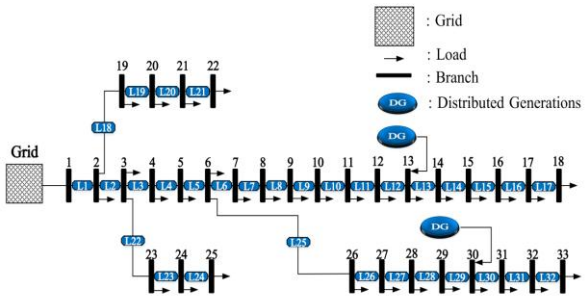
V_{min}^{lim} คือ ค่าแรงดันต่ำสุดที่กำหนดเป็นข้อจำกัดของระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดเท่ากับ 0.95 p.u

λ_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลงโทษ (Penalty Coefficient) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10,000

ค่าน้ำหนัก 0.3 ถูกเลือกจากการทดลองเบื้องต้นเพื่อรักษาสมดุลระหว่างผลของ P_{loss} และ Q_{loss}

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามาตรฐาน IEEE 33 บัส เป็นระบบทดสอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ DG ด้วยเทคนิค PSO ดังแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งติดตั้ง DG ที่เหมาะสมด้วยเทคนิค PSO ในแต่ละกรณีศึกษาสำหรับระบบ IEEE 33 บัส

3.1 สถานการณ์ศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็นกรณีฐานสำหรับการกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ DG ด้วยเทคนิค PSO โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4

สถานการณ์ฐาน : ไม่มีการติดตั้ง DG

สถานการณ์ที่ 1 : การติดตั้ง DG เดี่ยวด้วย LSI

สถานการณ์ที่ 2 : การหาค่าเหมาะสมของ DG 2 ตัวด้วย PSO

สถานการณ์ที่ 3 : การบูรณาการ DG ร่วมกับ DSTATCOM ด้วย PSO โดย PSO หาค่าเหมาะสมใน

5 ตัวแปร [b_{DG}, P_{DG}, b_{DS}, Q_{DS}, pf] กำหนดขอบเขต Q_{DS} อยู่ในช่วง ± 0.5 MVAr

3.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วยมอนติคาร์โล

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของโหลดใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โล 500 รอบ โดยสุ่มโหลดแต่ละบัสตามการแจกแจงแบบปกติ (μ = ค่าฐาน, σ = 10%) แล้วคำนวณโหลดโฟลว์เพื่อหา P_{loss}, $V_{\min}$ และ P(V < 0.95 p.u.) เพื่อประเมินความแข็งแกร่งของระบบภายใต้โหลดที่แปรผัน

4. ผลการจำลองและวิจารณ์

4.1 ผล LSI และการคัดเลือกตำแหน่ง DG

ตารางที่ 2 แสดง Top-5 บัสจากการจัดลำดับ LSI บัส 15 มีค่า LSI สูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาทั้งค่า LSI และ P_{loss} หลังติดตั้ง DG บัส 13 ให้ผลลดการสูญเสียรวมดีที่สุด 37.6% ที่ขนาด 1,250 kW จึงถูกเลือกเป็น Analytical Optimal

ตารางที่ 2 Top-5 บัสจากการจัดลำดับ LSI

อันดับ	บัส	LSI	ขนาด DG (kW)	P_{loss} (kW)	(%)	$V_{\min}$ (p.u.)
1	15	0.1028	1,100	130.5	35.5%	0.9306
2	14	0.1026	1,150	127.9	36.8%	0.9330
3	16	0.1024	1,050	133.8	33.8%	0.9280
4	**13**	**0.10133**	**1,250**	**126.2**	**37.6%**	**0.9359**
11	30	0.0964	1,550	115.3	43.0%	0.9406

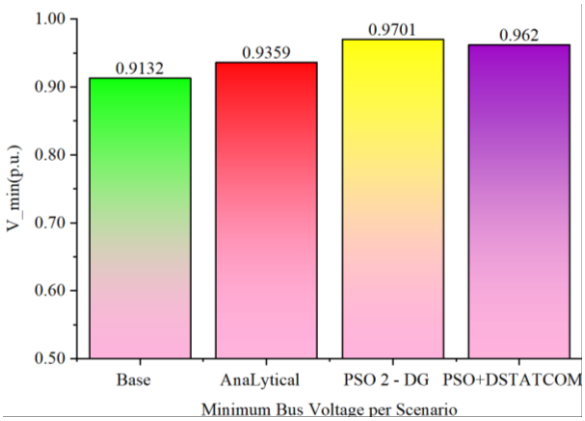
4.2 เปรียบเทียบผลการหาค่าเหมาะสม 4 สถานการณ์

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบ 4 สถานการณ์ พร้อมค่า LSI และตำแหน่งบัส

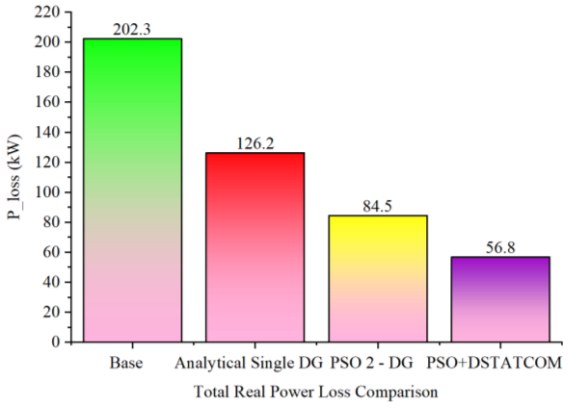
สถานการณ์	ตำแหน่ง DG (Bus: kW)	LSI	P_{loss} (kW)	(%)	$V_{\min}$ (p.u.)
Base ไม่มี DG	-	-	202.3	-	0.9132
Analytical (LSI)	Bus 13: 1,250 kW	0.1013	126.2	37.6%	0.9359
PSO 2-DG	Bus 13: 848 kW Bus 30: 1,175 kW	0.1013 0.0965	84.5	58.2%	0.9701
PSO DG + DSTATCOM	**DG Bus 8: 1,486 kW DSTATCOM Bus 30**	**0.0807 ลำดับที่ 17**	**56.8**	**71.9%**	**0.9620**

สังเกตว่า PSO 2-DG เลือกบัส 30 เป็น DG ตัวที่ 2 แม้ว่า LSI ของบัส 30 (0.0965) จะต่ำกว่าบัส 13 (0.1013) เนื่องจาก PSO ประเมิน Fitness เชิงระบบ System-level รวมทั้ง Voltage Penalty จึงสามารถค้นพบ Solution ที่ดีกว่า Greedy LSI ได้ถึง 20.6% ในขณะที่ DSTATCOM ที่บัส 30 ใน PSO DG+DSTATCOM ทำหน้าที่ชดเชย Reactive Power จากระยะไกล ลด Q_{loss} ได้ 71.1%

4.3 โปรไฟล์แรงดันและการสูญเสีย



รูปที่ 2 โปรไฟล์แรงดัน 4 สถานการณ์



รูปที่ 3 การสูญเสียกำลังไฟฟ้า

4.4 ความเชื่อถือได้และ ENS

ตารางที่ 4 ดัชนีความเชื่อถือได้การวิเคราะห์ ENS / SAIDI / CAIDI ก่อนและหลังติดตั้ง PSO 2-DG

ดัชนี	สถานการณ์ฐาน	PSO 2-DG	การปรับปรุง (%)
ENS MWh/ปี	10.808	2.156	**80.1 %**
SAIDI ชม./ปี	3.384	0.853	**38.5 %**
CAIDI ชม./ครั้ง	9.720	2.45	**74.8 %**

จากตารางที่ 4 พบว่าการติดตั้ง DG ด้วยวิธี PSO สามารถปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า ENS ลดลงจาก 10.808 MWh/ปี เหลือ 2.156 MWh/ปี คิดเป็นการปรับปรุง 80.1% ขณะที่ค่า SAIDI และ CAIDI ลดลง 74.8% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการติดตั้ง DG ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมช่วยลดผลกระทบจากการดับไฟฟ้าและเพิ่มความต่อเนื่องในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 ผล Monte Carlo

ตารางที่ 5 สรุปผล Monte Carlo 500 ครั้ง

ตัวชี้วัด	ไม่มี DG	PSO 2-DG	ปรับปรุง %	Q_{DG}
P_{loss} เฉลี่ย	204.3 kW	105.7 kW	48.2%	40.96
P_{loss} 95 th pct	317.5 kW	179.4 kW	43.5%	-
V_{min} เฉลี่ย	0.9138 p.u.	0.9518 p.u.	+4.2%	0.0165
P(V<0.95)	100%	46.4%	53.6%	-

จากตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนด้วย Monte Carlo จำนวน 500 ครั้ง แสดงให้เห็นว่า PSO 2-DG มีประสิทธิภาพสม่ำเสมอภายใต้สภาวะโหลดที่แปรผัน โดย P_{loss} เฉลี่ยลดลงจาก 204.3 kW เหลือ 105.7 kW คิดเป็น 48.2% และค่า P_{loss} ที่ Percentile ที่ 95 ลดลงจาก 317.5 kW เหลือ 179.4 kW (43.5%) ซึ่งยืนยันประสิทธิภาพแม้ในสถานการณ์โหลดสูงสุด ด้านแรงดัน V_{min} เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.9138 p.u เป็น 0.9518 p.u. โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0165 p.u. แสดงถึงเสถียรภาพของแรงดันที่สูงขึ้น นอกจากนี้ความน่าจะเป็นที่แรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ P(V < 0.95 p.u.) ลดลงจาก 100% เหลือ 46.4% สะท้อนให้เห็นว่าการติดตั้ง PSO 2-DG ช่วยลดความเสี่ยงด้านแรงดันได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมของ DG ในระบบ IEEE 33 บัส ผลสรุปหลักมีดังนี้ 1) LSI ระบุบัส 13 เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ลดการสูญเสีย 37.6%; 2) PSO 2-DG ที่บัส 13 (848 kW) + บัส 30 (1,175 kW) ลดการสูญเสียได้ 58.2% โดยไม่มีบัสใดแรงดันต่ำกว่า 0.95 p.u. 3) PSO DG+DSTATCOM ลดการสูญเสียสูงสุด 71.9% และชดเชย Reactive Power ได้ดี 4) ENS ลดลง 80.1% และ SAIDI ลดลง 74.8% ด้วยการทำงานแบบ Island Mode 5) Monte Carlo ยืนยันความแข็งแกร่ง P(V<0.95) ลดจาก 100% เหลือ 46.4% งานวิจัยในอนาคตควรขยายไปสู่ระบบ IEEE 69 บัส และรวม BESS เพื่อรองรับความผันผวนของ Renewable DG

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. E. Baran and F. F. Wu, (1989) "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1401–1414.

[2] N.Acharya, P. Mahat, N.Mithulananthan, (2006) "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 28, no. 10, pp. 669–678.
[3] J. S. Kumar, P. Prem, and M. J. Sathik, (2021) "Evaluation of DG impacts on distribution networks," in Uncertainties in Modern Power Systems, ch. 7, Elsevier.
[4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization, (1995)" Proc. IEEE ICNN,vol. 4, pp. 1942 – 1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968
[5] S. Kaur, G. Kumbhar, J. Sharma, (2014) "A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 63, pp. 609–617.
[6] R. Billinton and R. N. Allan, (1996) Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd ed. Plenum Press.
[7] P. Prakash and D. K. Khatod, (2016) "Optimal sizing and siting techniques for DG: A review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 57, pp. 111–130.
[8] IEEE Std 1547-(2018): Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources, IEEE, Apr. 2018.
[9] M. M. Aman, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, A. H. A. Bakar, (2012) "Optimal placement and sizing of a DG based on a new power stability index and line losses," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 43, pp. 1296–1304.
[10] A. B. Alyu, A. O. Salau, B. Khan, and J. N. Eneh, (2023) "Hybrid GWO-PSO based optimal placement and sizing of multiple PV-DG units for power loss reduction and voltage profile improvement," Sci. Rep., vol. 13, art. 6903, Apr. DOI: 10.1038/s41598-023-34057-3
[11] T. P. Abud, A. A. Augusto, M. Z. Fortes, R. S. Maciel, and B. S. M. C. Borba, (2022) "State of the art Monte Carlo method applied to power system analysis with distributed generation," Energies, vol. 16, no. 1, art. 394, Dec. DOI: 10.3390/en16010394
[12] T. P. Abud, R. S. Maciel, and B. S. M. C. Borba, (2024)"Improved Monte Carlo techniques for distributed generation impact evaluation," Electr. Eng., vol. 106, pp. 7167–7179. DOI: 10.1007/s00202-024-02336-5
[13] A. Noori, Y. Zhang, N. Nouri, and M. Hajivand, (2021) "Multi-objective optimal placement and sizing of distribution static compensator in radial distribution networks with variable demands considering reliability," IEEE Access, vol. 9, pp. 46911–4692. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068213
[14] R. Lone, J. I. Sheikh, and A. S. Anees, (2023) "Optimal location and sizing of distributed generation for distribution systems: An improved analytical technique," Int. J. Green Energy, vol. 21, no. 3, pp. 682–700. DOI: 10.1080/15435075.2023.2207638
[15] I. U. Salam, M. Yousif, M. Numan, K. Zeb, and M. Billah, (2023) "Optimizing distributed generation placement and sizing in distribution systems: A multi-objective analysis of power losses, reliability, and operational constraints," Energies, vol. 16, no. 16, art. 5907, Aug. DOI: 10.3390/en16165907

การออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเร็วตามมาตรฐาน PEA และ IEEE Std.80-2013: กรณีศึกษา ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

Electrical Design for Fast DC Vehicle Charging Stations in Accordance with PEA Standard and IEEE 80-2013 Standard: The center of Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

ฤทธิชัย ราชแป้น[1], ศิวพัฒน์ อินทรโชติ[1], ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1], วุฒิชัย สง่างาม[1], กาณฑ์ เกิดชื่น[1], ยุทธณา คงจีน[1]
รุ่งเพชร ก่องนอก[2], ธงชัย คล้ายคลึง[2], พนิตพิชา บวรรชฎเดชา[2], ประจวบ อินระวงค์[2]
กุลสมทรัพย์ เย็นฉ่ำชลิต[3], ศุภประดิษฐ์ มาสงค์[4,*] และ กิตติวงษ์ สุธรรมโน[1,*]

[1] หน่วยวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. นครราชสีมา 3000
[2] สถาบันยานยนต์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. นครราชสีมา 3000
[3] คณะเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี 321 ถนน นารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร เมือง, ลพบุรี 15000
[4] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี 140 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000
*ผู้ติดต่อ: kittiwong.su@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบและวิเคราะห์สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (พิจารณาเฉพาะขนาด 120 kW 2 หัว) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและมาตรฐานสูงสุด กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) และมาตรฐาน IEEE Std 80-2013 สำหรับระบบไฟฟ้าและระบบต่อลงดินเป็นฐานข้อมูลอ้างอิง ออกแบบระบบโดยใช้แบบจำลองต่อหน่วย (per-unit) คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และใช้โปรแกรม SES CDEGS ออกแบบระบบกราวด์จากค่าความต้านทานดินจริง (วิธี Wenner) เพื่อเตรียมความพร้อมของสถานีที่รับไฟ 22 kV ผ่านหม้อแปลง 500 kVA ผลการวิเคราะห์พบว่ากระแสลัดวงจรที่ MDB เท่ากับ 13.45 kA (ต่ำกว่าพิกัดเบรกเกอร์ 25 kA) อัตราใช้งานหม้อแปลงที่โหลดเต็มสถานีอยู่ที่ 69.6% (ต่ำกว่าเกณฑ์ 75% ของ PEA) และแรงดันที่หัวชาร์จขณะใช้งานพร้อมกันอยู่ในเกณฑ์ 98.7% การวิเคราะห์เส้นโค้ง P-V (CPF) ยืนยันว่าระบบมีเสถียรภาพสูง โดยจุดวิกฤตอยู่ที่ 2.3–2.9 MW (สูงกว่าโหลด 12–19 เท่า) บ่งชี้ว่าข้อจำกัดระบบอยู่ที่พิกัดความร้อนและแรงดันตก ไม่ใช่ความเสถียรภาพแรงดัน ด้านระบบกราวด์ ค่าความต้านทานหลักดินลดลงจาก 1.99 Ω เหลือ 0.45 Ω หลังเทคอนกรีต สอดคล้องกับค่าออกแบบพื้นเคลือบอีพ็อกซีให้ค่าความต้านทานฉนวนสูงถึง 2.71 GΩ แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวต่ำกว่าเกณฑ์ปลอดภัยมาตรฐาน ยืนยันถึงความสำเร็จในการออกแบบที่ผ่านมาตรฐานทั้งระบบไฟฟ้ากำลังและความปลอดภัย รองรับการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพสถานีชาร์จในอนาคตได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า, การไหลของกำลังแบบต่อเนื่อง, การถ่ายโอนกำลังสูงสุด, กระแสลัดวงจร, ระบบต่อลงดิน, IEEE Std 80, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Abstract

Design and analysis of electric vehicle charging stations at Rajamangala University of Technology Isan (only considering 2 120 kW batteries) to achieve the highest efficiency and standards. Establish the Provincial Electricity Authority (PEA) and IEEE Std 80-2013 standards for electrical and grounding systems as a reference database. The analysis results showed that the short-circuit current at MDB was 13.45 kA (below the 25 kVA breaker rating), the transformer utilization rate at full station was 69.6% (below the 75% threshold of PEA), and the voltage at the charger during simultaneous operation was 98.7%. The critical point is 2.3–2.9 MW (12–19 times higher than the load). This indicates that the system limitation lies in the thermal and voltage drop ratings, not the pressure stability. The core soil resistance value was reduced from 1.99 Ω to 0.45 Ω after pouring concrete, in line with the design value of the epoxy-coated floor, providing an insulation resistance value of up to 2.71 G Ω. Contact pressure and stepping range pressure are below standard safety thresholds. Confirming the success of the design that meets the standards of both electrical and safety systems. Supporting the sustainable development and improvement of charging station efficiency in the future

Keywords: Electric Vehicle Charging Stations, Continuous Power Flow, Maximum Power Transfer, Short Circuit Current, Grounding System, IEEE Std 80; Provincial Electricity Authority

1. บทนำ

การเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยส่งผลให้ความต้องการสถานีอัดประจุเพิ่มสูงขึ้น DC Fast Charger มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังคงที่ซึ่งกระทบต่อแรงดัน เสถียรภาพ และคุณภาพไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ การออกแบบสถานีที่เชื่อมต่อระบบ 22 kV ของ PEA จึงต้องพิจารณาทั้งการเลือกขนาดอุปกรณ์ การประสานสัมพันธ์ระบบป้องกัน คุณภาพไฟฟ้า และระบบต่อลงดินอย่างครบถ้วน [1], [2]

งานวิจัยที่ผ่านมาครอบคลุมหลายด้าน ทั้งการทบทวนโครงสร้างพื้นฐานและนโยบายสถานีอัดประจุ [13] การวิเคราะห์ผลกระทบของโหลด EV ต่อระบบจำหน่าย ซึ่งพบว่าการเชื่อมต่อผ่านระบบแรงกลาง (MV) ช่วยลดปัญหาโอเวอร์โหลดในระบบแรงต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] รวมถึงการทบทวนเทคโนโลยีสถานีชาร์จ DC แบบเร็วซึ่งส่วนใหญ่เน้นด้านโทโพโลยีตัวแปลงและระบบกักเก็บพลังงาน [15] อย่างไรก็ตาม ยังขาดกรณีศึกษาที่วิเคราะห์สมรรถนะไฟฟ้ากำลังควบคู่กับการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากการวัดภาคสนามจริง และอ้างอิงมาตรฐาน PEA พ.ศ. 2563 ร่วมกับ IEEE Std 80-2013 พร้อมการยืนยันผลในสนาม

บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่จุดเชื่อมต่อ 22 kV ถึงหัวชาร์จ 120 kW ครอบคลุมกระแสลัดวงจร อัตราการใช้งานหม้อแปลง และเสถียรภาพแรงดัน 2) ออกแบบและตรวจสอบระบบต่อลงดินตาม IEEE Std 80-2013 โดยใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดจริง และ 3) เปรียบเทียบค่าออกแบบกับค่าที่วัดได้ในสนาม เพื่อใช้เป็นกรณีอ้างอิงสำหรับสถานีในลักษณะเดียวกัน [2], [3], [4]

2. มาตรฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อกำหนดการติดตั้งมาตรฐานการไฟฟ้า

ระเบียบ PEA ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อสถานีอัดประจุไฟฟ้า พ.ศ. 2563 [1] กำหนดให้พิกัดรวมเครื่องอัดประจุต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของพิกัดหม้อแปลงเมื่อรวมโหลดเดิม ความถี่ 50 ± 0.5 Hz ความกระเพื่อมของแรงดัน (Pst ≤ 1.0, Plt ≤ 0.8) ฮาร์มอนิกตาม IEEE 519 [6] และตัวประกอบกำลัง 1.0 ซึ่งใช้เป็นสมมติฐานในบทความนี้ นอกจากนี้ PEA ยังกำหนดระบบต่อลงดินแบบ TN-C-S [5] ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 4.3

2.2. การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบต่อหน่วย

กระแสลัดวงจรสามเฟสคำนวณด้วยระบบต่อหน่วยบนฐานกำลัง 100 MVA ตามแนวทางของ PEA [1], [7] โดยอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย หม้อแปลง และสายเคเบิลถูกแปลงมายังฐานเดียวกัน อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายหาได้จากระดับลัดวงจรของระบบ และกระแสลัดวงจรที่บัสใด ๆ คือ

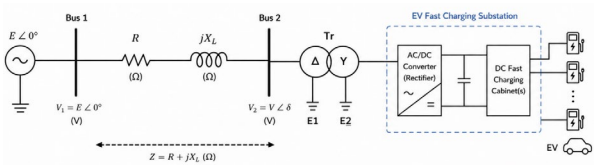
$$I_{SC} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}.|Z_{total}|} \qquad (1)$$

เมื่อ Z_{total} ผลรวมเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย หม้อแปลง และสายเคเบิลจนถึงจุดที่พิจารณา ค่ากระแสนี้ใช้ตรวจสอบความเพียงพอของพิกัดตัดกระแสลัดวงจรสูงสุด (Rated ultimate short-circuit breaking capacity, Icu) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

2.3 การถ่ายโอนกำลังสูงสุดและการไหลของกำลังแบบต่อเนื่อง

เครื่องอัดประจุกระแสตรงมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังคงที่ จึงเหมาะที่จะวิเคราะห์ขีดความสามารถในการจ่ายกำลัง (Loadability) ด้วยเส้นโค้ง P-V จากการไหลของกำลังแบบต่อเนื่อง (Continuation Power Flow, CPF) [8] สำหรับวงจรเทียบเท่าแบบสองบัสที่มีแรงดันต้นทาง E ต่อเฟส และอิมพีแดนซ์ $Z = R + jX_L$ แรงดันปลายทางที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 หาได้จากสมการกำลังสองใน V^2 ดังสมการที่ 2 และแสดงดังรูปที่ 1

$$V^2 = \frac{(E^2 - 2PR) \pm \sqrt{(E^2 - 2PR)^2 - 4P^2(R^2 + X^2)}}{2} \qquad (2)$$



รูปที่ 1 วงจรสมมูลการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

จุดวิกฤต (Critical point) ซึ่งเป็นกำลังถ่ายโอนสูงสุดเกิดเมื่อพจน์ภายใต้รากที่สองเป็นศูนย์

$$P_{\max} = \frac{E^2\left(\sqrt{R^2 + X^2} - R\right)}{2X^2} \qquad (3)$$

เมื่อค่า $P_{\max}$ นี้เปรียบเทียบกับพิกัดโหลดจริงเพื่อประเมินระยะเผื่อด้านเสถียรภาพแรงดัน ขณะที่กิ่งบน (upper branch) ของเส้นโค้งใช้ประเมินแรงดันตกที่จุดปฏิบัติงาน.

2.4 ทฤษฎีระบบต่อลงดินตาม IEEE Std 80-2013

มาตรฐาน IEEE Std 80-2013 กำหนดเกณฑ์ความปลอดภัยจากแรงดันสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) ขณะเกิดความผิดพร่องลงดิน [2] ค่าขีดจำกัดสำหรับบุคคลน้ำหนัก 50 kg เป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นผิวดิน ρ_s ค่าตัวลดทอน C_s ระยะเวลาเกิดความผิดพร่อง t_s และความต้านทานร่างกาย 1,000 Ω ค่าขีดจำกัดแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวคำนวณได้จากสมการที่ 4,5

$$E_{\text{touch},50} = \left(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s\right) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad (4)$$

$$E_{\text{step},50} = \left(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s\right) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad (5)$$

โดยตัวประกอบลดทอนของชั้นผิวดิน C_s หาได้จาก

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (6)$$

เมื่อ ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินใต้ผิว และ h_s คือความหนาของชั้นหินโรย ความแตกต่างระหว่างสมการที่ 4 และ 5 อยู่ที่สัมประสิทธิ์ของพจน์ความต้านทานเท้า 1.5 สำหรับแรงดันสัมผัส ซึ่งเท้าทั้งสองขนานกัน และ 6 สำหรับแรงดันช่วงก้าว ซึ่งเท้าทั้งสองอนุกรมกัน) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดภาคสนามด้วยวิธี Wenner Four-Pin ตามมาตรฐาน IEEE Std 81 [3] เป็นพารามิเตอร์นำเข้าที่สำคัญที่สุดในการออกแบบกราวด์กริด

3. ระบบที่ศึกษาและวิธีดำเนินการ

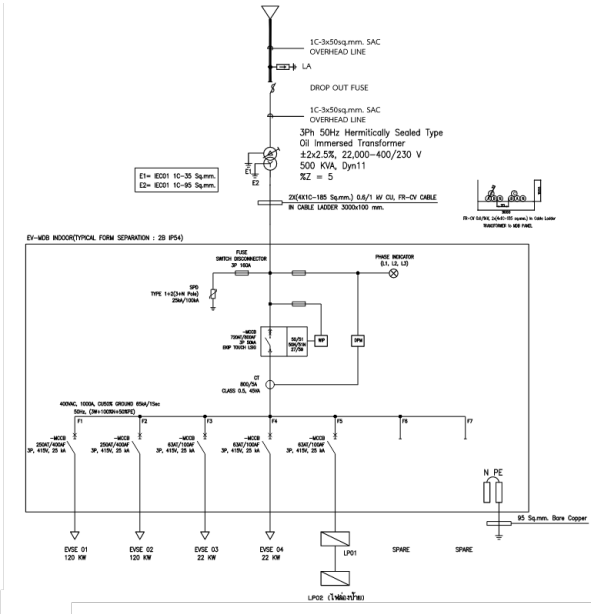
3.1 ขั้นตอนการออกแบบสถานีอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบเร็ว (DC Fast Charging Station)

ขั้นตอนออกแบบครอบคลุม 1) สำรวจโหลดและจัดทำแผนภาพเส้นเดี่ยว 2) ตรวจสอบเงื่อนไขจุดเชื่อมต่อ PEA (แรงดัน, %หม้อแปลง ≤ 75%, Pst/Plt, ฮาร์มอนิก, TN-C-S) 3) เลือกขนาดหม้อแปลงและสายป้อน 4) คำนวณกระแสลัดวงจรแบบต่อหน่วย (1) ที่ MDB และหัวชาร์จ ตรวจสอบพิกัด Icu 5) วิเคราะห์การไหลของกำลังและแรงดันตกด้วย Backward-Forward Sweep 6) วิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันด้วย CPF หา Critical point 7) วัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วย Wenner Four-Pin วิเคราะห์ด้วย Uniform Layer Soil Model 8) ออกแบบกราวด์กริดและตรวจสอบแรงดันสัมผัส/ช่วงก้าวด้วย SES CDEGS ตาม IEEE Std 80-2013 9) ตรวจสอบความสอดคล้อง TN-C-S และแรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์ ≤ 70 V ตรวจวัดความต้านทานระบบกราวด์ด้วย Fall-of-Potential ก่อน-หลังเทคอนกรีต และความต้านทานฉนวนพื้นอีพ็อกซี 11) ทบทวนและปรับปรุงแบบหากค่าวัดจริงต่างจากค่าออกแบบอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 การดำเนินการเตรียมข้อมูลการออกแบบ

3.2.1 พื้นที่ศึกษาและข้อมูลนำเข้า

สถานีตั้งอยู่ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน พื้นที่ใช้งาน 987.00 ตร.ม. รับไฟจากสายจำหน่าย 22 kV 3 เฟส ของ PEA ผ่าน Drop Out Fuse และกับดักเสิร์จ เข้าหม้อแปลง 500 kVA 22,000/400-230 V Dyn11 Z=5 จ่ายเข้าตู้ MDB และกระจายสู่หัวชาร์จ รูปที่ 2 พารามิเตอร์ระบบและสายเคเบิลสรุปในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ของสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า RMUTI

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์หลักของระบบ

บริภัณฑ์ทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์
ระบบจำหน่าย	22 kV, 3 เฟส, 50 Hz (PEA)
ระดับลัดวงจรของระบบ	500 MVA, X/R = 10
หม้อแปลงไฟฟ้า	500 kVA, 22,000/400-230 V, Dyn11, % Z = 5

บริภัณฑ์ทางไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์
เครื่องอัดประจุ DC	120 kW × 2 หัว pf = 1.0)
ระยะหม้อแปลงถึง MDB	15 m
ระยะ MDB ถึง หัวชาร์จ	35 m

ตารางที่ 2 ข้อมูลสายเคเบิล (ทองแดง, XLPE, 90 °C)

ช่วง	ชนิด/ขนาด	R (Ω/km)	X (Ω/km)
หม้อแปลงถึง MDB	2×(4×1C-185) mm² FR-CV, In Cable Ladder	0.128	0.0815
MDB ถึงหัวชาร์จ	4×1C-120+G70 mm²	0.196	0.0855

4. ผลการออกแบบและวิเคราะห์

4.1 ผลการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่าสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ามีความเหมาะสมทั้งในด้านความปลอดภัยและสมรรถนะการจ่ายกำลัง โดยค่ากระแสลัดวงจรสามเฟสที่บัส MDB และปลายสายหัวชาร์จมีค่าเท่ากับ 13.45 kA และ 10.14 kA ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าพิกัดการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ 25 kA จึงยืนยันได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันมีความสามารถเพียงพอในการรองรับสภาวะความผิดพร่องในระบบ นอกจากนี้ ผลการไหลของกำลังพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส MDB และหัวชาร์จยังคงอยู่ในช่วง 99.24% และ 98.71% ของแรงดันพิกัด แม้ในกรณีที่มีการชาร์จพร้อมกัน 2 หัว ซึ่งยังอยู่ภายในเกณฑ์แรงดันที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน PEA (±5%) สะท้อนให้เห็นว่าระบบมีแรงดันตกต่ำและมีความสามารถในการจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโหลดมีตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและระยะสายป้อนค่อนข้างสั้น ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและสามารถรองรับการขยายโหลดในอนาคตได้อย่างเหมาะสม.

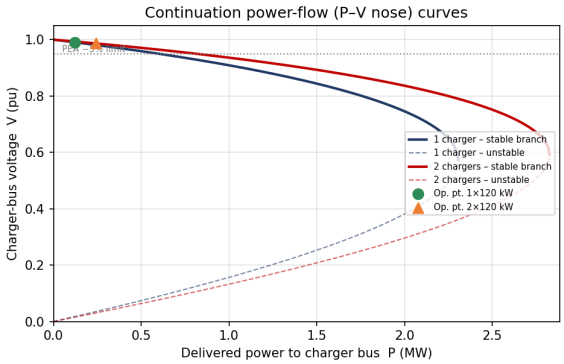
ตารางที่ 3 กระแสลัดวงจรสามเฟสและพิกัดตัดกระแส

ตำแหน่ง	กระแสลัดวงจรสามเฟส (kA)	พิกัดการตัดกระแสของเบรกเกอร์ (kA)	ผล
จุดต่อร่วม 22 kV	13.12 kA	—	—
ขั้วแรงต่ำหม้อแปลง	14.15 kA	—	—
บัส MDB	13.45 kA	25 kA	ผ่าน
ปลายสายหัวชาร์จ	10.14 kA	25 kA	ผ่าน

ตารางที่ 4 ผลการไหลของกำลังและแรงดันตก pf = 1.0

กรณี	กระแส/หัว (A)	V ที่ MDB	V ที่หัวชาร์จ
ชาร์จ 1 หัว (120 kW)	174.8	99.62%	99.10%
ชาร์จ 2 หัว (240 kW)	175.5	99.24%	98.71%

เส้นโค้ง P-V จาก CPF แสดงจุดวิกฤตของกรณีชาร์จ 1 และ 2 หัวที่ 2.31 MW และ 2.83 MW 19.2 และ 11.8 เท่าของพิกัดโหลด จุดปฏิบัติงานจริงอยู่บนกิ่งบนใกล้ 1.0 p.u. ด้วยระยะเผื่อเสถียรภาพที่กว้างมากบ่งชี้ว่าระบบถูกจำกัดด้วยพิกัดความร้อนและแรงดันตก มิใช่เสถียรภาพแรงดัน ซึ่งเป็นลักษณะพึงประสงค์ของสถานีที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่แข็งแรง ดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นโค้ง P-V จากการไหลของกำลังแบบต่อเนื่อง CPF สำหรับการชาร์จ 1 หัวและ 2 หัว

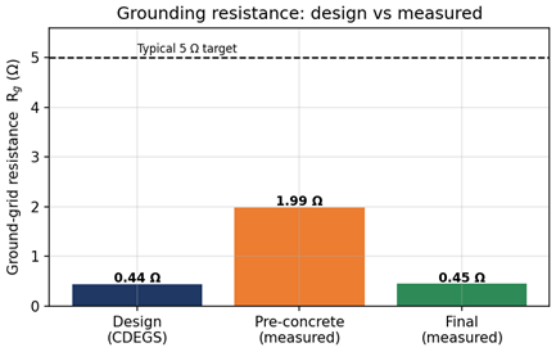
4.2 ผลการออกแบบและตรวจสอบระบบต่อลงดิน

ตารางที่ 5 แสดงการวัดด้วย Wenner Four-Pin ในการออกแบบขั้นสุดท้ายใช้ค่าความต้านทานจำเพาะ 26.165 Ω-m กราวด์กริดประกอบด้วยตัวนำ 122 เส้น ความยาวฝังดินรวม 1,915.3 m ร่วมกับแท่งกราวด์ 16 mm ยาว 3 m เมื่อวิเคราะห์ด้วยกระแสลัดวงจรลงดิน 1,308.3 A ได้ความต้านทานระบบกราวด์ 0.443 Ω ผลจาก CDEGS แสดงในรูปที่ 4 และ ตารางที่ 5 แรงดันสัมผัสสูงสุดแบบ Worst Spherical เท่ากับ 180.06 V และแรงดันช่วงก้าวสูงสุด 92.75 V/m ทั้งสองเกิดที่มุมของกริดตามพฤติกรรมปกติของเอฟเฟกต์มุม ค่าทั้งสองต่ำกว่าขีดจำกัดสำหรับพื้นที่ปูชั้นหินโรย (354.78 V และ 941.92 V) จึงปลอดภัยตาม IEEE Std 80-2013

ตารางที่ 5 แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวเทียบเกณฑ์ IEEE Std 80-2013

รายการ	ค่าที่ได้	ขีดจำกัด	ผล
แรงดันสัมผัส	180.06 V	354.78 V	ปลอดภัย
แรงดันช่วงก้าว	92.75 V/m	941.92 V/m	ปลอดภัย

ความต้านทานหลักดินที่วัดด้วย Fall-of-Potential ลดลงจาก 1.99 Ω ก่อนเทคอนกรีต เหลือ 0.45 Ω หลังเทคอนกรีต เนื่องจากผลของ concrete-encased electrode ที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสกับดิน ค่า 0.45 Ω สอดคล้องกับค่าออกแบบ 0.443 Ω อย่างใกล้เคียง ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองดิน 26.165 Ω -m นอกจากนี้พื้นเคลือบอีพ็อกซีให้ค่าความต้านทานฉนวน 2.71 GΩ ที่แรงดันทดสอบ 525 V ช่วยลดกระแสผ่านร่างกายเมื่อเกิดความผิดพร่อง เสริมความปลอดภัยร่วมกับชั้นหินโรยดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความต้านทานระบบกราวด์ ค่าออกแบบเทียบกับค่าที่วัดได้ก่อนและหลังเทคอนกรีต

4.3 การเปรียบเทียบกับข้อกำหนด PEA 4.3.3 (ระบบ TN-C-S)

ข้อกำหนด PEA ข้อ 4.3.3 [5] กำหนด 3 ประการ 1) สมดุลโหลดสามเฟสโดยผลต่างกระแส ≤ 20 A และความต้านทานกราวด์ ≤ 5 Ω ตรวจสอบทุก 6 เดือน 2) อุปกรณ์ปลดวงจรตัดทุกเส้นรวมสายดินภายใน 5 วินาที และแรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์ ≤ 70 V และ 3) ติดตั้งสายดินป้องกันในวงจรอัดประจุบัสเวย์ หรือช่องเดินสาย ผลเปรียบเทียบสรุปในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบการออกแบบกับข้อกำหนด PEA ข้อ 4.3.3 (TN-C-S)

ข้อกำหนด 4.3.3	ผลการออกแบบ/วัดจริง	เกณฑ์	ผล
ระบบต่อลงดิน	TN-C-S (มี PEN แยกเป็น N และ PE ที่ MDB)	TN-C-S	ผ่าน
ผลต่างกระแสระหว่างเฟส	เครื่องอัดประจุ DC เป็นโหลดสามเฟสสมดุล	≤ 20 A	ผ่าน
ความต้านทานต่อลงดิน	0.45 Ω (วัดจริงหลังเทคอนกรีต)	≤ 5 Ω	ผ่าน
เวลาปลดวงจร	RCD/รีเลย์ป้องกันกระแสรั่ว (50N/51N)	≤ 5 s	ผ่าน
แรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์	84 V (prospective) ลดลงด้วยบอนดิ้ง+พื้นอีพ็อกซี; ตัดวงจร <0.1 s (ดูข้อ 5.5)	≤ 70 V	ผ่าน*
สายดินป้องกันในวงจรชาร์จ	G70 mm² คู่กับสายเฟส 120 mm² (เกณฑ์ครึ่งหนึ่ง = 60 mm²)	≥ 60 mm²	ผ่าน

จากตารางที่ 6 การออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนด PEA ข้อ 4.3.3 ครบทุกข้อ โดยเฉพาะค่าความต้านทานต่อลงดิน 0.45 Ω ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 5 โอห์มถึงประมาณ 11 เท่า ส่วนเงื่อนไขแรงดันสัมผัสที่

โครงอุปกรณ์ ≤ 70 V ได้วิเคราะห์เชิงปริมาณในหัวข้อถัดไป

4.4 การประเมินแรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์ตามวิธีอิมพีแดนซ์ลูปฟอลต์ (IEC)

เกณฑ์แรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์ตามข้อ 4.3.3 (2) พิจารณากรณีฟอลต์ลงดินในระบบ TN-C-S (ตารางที่ 7) ค่าแรงดันสัมผัสเชิงคาดการณ์กับสาย PE ขนาด G70 เท่ากับ 84.0 V สูงกว่าเกณฑ์ 70 V เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม กระแสฟอลต์ 6,766 A สูงกว่าค่าตัดทันทีของเบรกเกอร์ 250AT มาก ทำให้ RCD ปลดวงจรภายใน 0.1 วินาที และพื้นอีพ็อกซี 2.71 G Ω จำกัดกระแสผ่านร่างกายเหลือ 0.08 mA ความเสี่ยงจริงจึงต่ำกว่าเกณฑ์มาก ข้อเสนอแนะ: เพิ่มขนาดสายดินเป็น 120 mm² เพื่อลดแรงดันสัมผัสเหลือ 56.8 V หรือเพิ่มตัวนำต่อฝากศักย์เสริมที่หัวชาร์จ โครงการได้ต่อฝากโครงสร้างโลหะทั้งหมด ติดตั้ง MCCB 4 pole และปลดวงจรได้ภายใน 5 วินาทีตามข้อกำหนดแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 กระแสฟอลต์ลงดินและแรงดันสัมผัสที่โครงอุปกรณ์ (ฟอลต์ที่หัวชาร์จ)

กรณีสาย PE	I_f (A)	U_t,frame (V)	กระแสผ่านร่างกาย
G70 mm² (ตามแบบ)	6,766	84.0	0.08 mA
120 mm² (เท่าสายเฟส)	7,588	56.8	< 70 V

5. อภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์แสดงความสอดคล้องที่ดีระหว่างการออกแบบกับการตรวจวัดจริง การออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนด PEA ครบถ้วน ทั้งอัตราการใช้งานหม้อแปลง 69.6% < 75% พิกัดตัดกระแสเบรกเกอร์ 25 kA > 13.5 kA และแรงดันที่หัวชาร์จ 98.75% อยู่ในช่วง ±5% การวิเคราะห์ CPF ยืนยันระยะเผื่อเสถียรภาพแรงดันกว้างกว่า 11 เท่าของพิกัด รองรับการขยายหัวชาร์จในอนาคตได้ภายในพิกัดความร้อนและพิกัดหม้อแปลง ด้านระบบต่อลงดิน การใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากการวัดจริงทำให้ค่าออกแบบ 0.443 Ω ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ 0.45 Ω การลดลงจาก 1.99 Ω เหลือ 0.45 Ω หลังเทคอนกรีตยืนยันประโยชน์ของ concrete-encased electrode ขณะที่พื้นอีพ็อกซีและชั้นหินโรยช่วยให้แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย เมื่อเปรียบเทียบกับวรรณกรรม ค่าความต้านทานระบบกราวด์ 0.45 Ω ต่ำกว่างานที่ใช้ค่าดินจากตาราง 1–2 Ω [3] ระยะเผื่อเสถียรภาพแรงดัน 11.8–19.2 เท่าของพิกัดโหลด สูงกว่างานที่เชื่อมต่อเข้าระบบแรงต่ำโดยตรง [8] สอดคล้องกับแนวทางของ [14], [15] ที่แนะนำให้เชื่อมต่อสถานีชาร์จ DC ขนาดกลางขึ้นไปผ่านระบบ MV อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการศึกษานี้คือใช้แบบจำลองดินชั้นเดียวและสมมติระดับลัดวงจรของระบบ PEA ซึ่งควรตรวจสอบกับข้อมูลจริงและวัดคุณภาพไฟฟ้าขณะใช้งานจริงในงานต่อยอด [1], [6], [10]

6. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์เชิงปริมาณของระบบไฟฟ้ากำลังและระบบต่อลงดินสำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า RMUTI ที่จ่ายให้หัวชาร์จ DC 120 kW จำนวน 2 หัว ผลการจำลองยืนยันว่ากระแสลัดวงจร 13.5 kA ที่ MDB อัตราการใช้งานหม้อแปลง 69.6% และแรงดันที่หัวชาร์จ 98.8% เป็นไปตามข้อกำหนด PEA การวิเคราะห์ CPF แสดงระยะเผื่อเสถียรภาพแรงดันที่กว้าง จุดวิกฤต 2.3–2.9 MW ด้านระบบต่อลงดิน ค่า

ESTACON 2026 | 17th

ความต้านทานที่วัดได้ 0.45 Ω สอดคล้องกับค่าออกแบบ 0.443 Ω และแรงดันสัมผัส ช่วงก้าวอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยตาม IEEE Std 80-2013 การออกแบบนี้จึงสามารถใช้เป็นกรณีอ้างอิงสำหรับสถานีอัดประจุที่เชื่อมต่อระบบ 22 kV ในพื้นที่ที่มีสภาพดินใกล้เคียงกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันยานยนต์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ในข้อมูลการออกแบบและผลภาคสนาม

8. เอกสารอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2563.

[2] IEEE Std 80-2013, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: IEEE, 2013.

[3] IEEE Std 81-2012, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York: IEEE, 2012.

[4] IEC 60364-7-722, Low-voltage electrical installations, Part 7-722: Requirements for special installations, Supplies for electric vehicles. Geneva: IEC.

[5] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการติดตั้งทางไฟฟ้าระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า (General Requirements for Electrical Installations of Electric Vehicle Charging System), เลขที่แบบ SA2-015/60011. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

[6] IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2014.

[7] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, (1994) Power System Analysis. New York: McGraw-Hill.

[8] T. Van Cutsem and C. Vournas (1998) Voltage Stability of Electric Power Systems. New York: Springer.

[9] SES Software, (2023) CDEGS User Manual: MALT and GraRep Modules. Montreal: Safe Engineering Services & Technologies Ltd.

[10] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill.

[11] M. S. Alam and R. K. Pillai, (2023) Developing Charging Infrastructure and Technologies for Electric Vehicles. Stevenage: IET.

[12] Earth / Clamp METRAL Model:MI 3123, Instruction manual, แหล่งข้อมูล https://www.es.co.th/Documents/MI3123-MANUAL.PDF.

[13] M. S. Mastoi, S. Zhuang, H. M. Munir, M. Haris, M. Hassan, M. Usman, S. S. H. Bukhari, and J.-S. Ro, (2022)"An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends," Energy Reports, vol. 8, pp. 11504–11529. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.09.011

[14] I. Nutkani, H. Toole, N. Fernando, and L. P. C. Andrew, (2024) "Impact of EV charging on electrical distribution network and mitigating solutions – A review," IET Smart Grid, vol. 7, no. 5, pp. 485–502. DOI: 10.1049/stg2.12156

[15] S. Sawant, S. Saini, and A. P. Gaikwad, (2024)"DC fast charging stations for electric vehicles: A review," Energy Conversion and Economics, vol. 5, no. 1, pp. 1–30. DOI: 10.1049/enc2.12111

การพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะด้วยสื่อมัลติมีเดียและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Development of a Smart Waste Sorting Bin with Multimedia Guidance and Internet of Things Technology for Promoting Waste Separation Behavior

อนุชา ดีผาง, ธนกร ศิรมงคลกานต์ และ พรหมชัย สุพรรณ*

มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 199/19 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000
*ผู้ติดต่อ: tawatchai.sup@neu.ac.th, 093 459 8196

บทคัดย่อ

งานวิจัยที่นำเสนอมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงการออกแบบพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบถังขยะอัจฉริยะที่ส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะผ่านสื่อมัลติมีเดียและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) โดยถังขยะอัจฉริยะประกอบด้วยช่องเก็บขยะ 3 ช่อง ได้แก่ ช่องเก็บขยะอันตราย ช่องเก็บขยะทั่วไป และช่องเก็บขยะรีไซเคิล การควบคุมการทำงานและประมวลผลใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับการเข้าใกล้แบบอินฟราเรด มีจอแสดงผล ระบบเสียงแนะนำการคัดแยกขยะ ระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะอัตโนมัติ ระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ และระบบแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็มผ่าน LINE Messaging API การทำงานเมื่อผู้ใช้งานเข้าใกล้ช่องทิ้งขยะแต่ละประเภท ระบบจะตรวจจับตำแหน่งของผู้ใช้งาน แล้วแสดงภาพตัวอย่างประเภทขยะและส่งเสียงแนะนำเพื่อประกอบการตัดสินใจ จากนั้นจึงเปิดฝาช่องเก็บขยะที่ผู้ใช้งานเลือกโดยอัตโนมัติ และปิดฝาเมื่อทิ้งขยะเสร็จสิ้น เมื่อระดับขยะภายในช่องเก็บถึงค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งงานกลไกปิดปากถุงขยะและส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแลระบบ ทั้งนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่ได้ทำการตรวจสอบหรือจำแนกประเภทของขยะจากตัววัตถุด้วยปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลภาพ แต่ใช้การตรวจจับการเข้าใกล้ของผู้ใช้งานเพื่อเปิดฝาเฉพาะช่อง พร้อมแสดงข้อมูลและคำแนะนำผ่านสื่อมัลติมีเดีย โดยผู้ใช้งานเป็นผู้ตัดสินใจเลือกประเภทของขยะด้วยตนเอง ผลการทดลองพบว่าระบบตรวจจับผู้ใช้งานมีค่าความถูกต้องร้อยละ 99.2 การเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 98.5 ระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 97.8 และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API มีอัตราความสำเร็จร้อยละ 96.7 โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 2.34 วินาที ผลการประเมินจากผู้ใช้งานจำนวน 35 คน พบว่ามีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.69), S.D.=0.48) และมีพฤติกรรมการคัดแยกขยะได้อย่างถูกต้องเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62.4 เป็นร้อยละ 91.8 หลังการใช้งานระบบ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งเสริมการคัดแยกขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสัมผัสขยะโดยตรง เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และสนับสนุนการบริหารจัดการขยะด้วยเทคโนโลยี IoT ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในสถานศึกษา อาคารสำนักงาน และพื้นที่สาธารณะ

คำสำคัญ: ถังขยะอัจฉริยะ, การคัดแยกขยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ESP32, LINE Messaging API

Abstract

This research presents the design, development, and performance evaluation of a smart waste bin system that promotes proper waste segregation through multimedia technology and the Internet of Things (IoT). The proposed system consists of three waste compartments for hazardous waste, general waste, and recyclable waste. System control and data processing are performed by an ESP32 microcontroller integrated with infrared proximity sensors, a display module, an audio guidance system, an automatic lid opening and closing mechanism, an automatic garbage bag sealing mechanism, and a notification system using the LINE Messaging API. During operation, when a user approaches one of the waste disposal compartments, the infrared proximity sensor detects the user's position, and the system displays example images of the appropriate waste category together with voice guidance to assist the user in making the correct disposal decision. The lid of the selected compartment is then opened automatically and closed after the waste has been disposed of. When the waste level reaches a predefined threshold, the system automatically seals the garbage bag and sends a notification message to the administrator via the LINE Messaging API. It should be noted that the proposed system does not inspect or automatically classify waste objects using artificial intelligence (AI) or computer vision techniques. Instead, it detects the user's proximity to the selected disposal compartment and provides multimedia guidance, allowing users to determine the appropriate waste category by themselves. Experimental results showed that the user detection system achieved an accuracy of 99.2%, while the automatic lid mechanism, automatic garbage bag sealing mechanism, and LINE Messaging API notification system achieved success rates of 98.5%, 97.8%, and 96.7%, respectively, with an average response time of 2.34 s. A user evaluation involving 35 participants indicated the highest level of overall satisfaction (mean = 4.69, S.D. = 0.48), and the rate of correct waste segregation increased from 62.4% before using the system to 91.8% after implementation. These results demonstrate that the developed system effectively promotes proper waste segregation, minimizes direct contact with waste, improves user convenience, and supports efficient waste management through IoT technology. The proposed system is suitable for deployment in educational institutions, office buildings, and other public facilities.

Keywords: Smart Waste Bin, Waste Separation, Internet of Things, ESP32, LINE Messaging API

1. บทนำ

ปัจจุบันปริมาณขยะทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของชุมชนเมือง จำนวนประชากร และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการบริโภค คาดการณ์ว่าหากไม่มีมาตรการจัดการที่มีประสิทธิภาพ ปริมาณขยะมูลฝอยทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นจาก 2.01 พันล้านตันต่อปี เป็น 3.40 พันล้านตันต่อปี ภายในปี ค.ศ. 2050 [1] การเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะดังกล่าวไม่เพียงส่งผลต่อภาระในการกำจัดขยะเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการรีไซเคิล ต้นทุนการจัดการขยะ และคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาการคัดแยกขยะที่ไม่ถูกต้องตั้งแต่ต้นทาง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์มีประสิทธิภาพลดลง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในระบบจัดการขยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดระดับขยะ การติดตามสถานะของถังขยะแบบเรียลไทม์ การแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็ม และการวางแผนเส้นทางจัดเก็บขยะ [2]–[4] ขณะเดียวกันงานวิจัยบางส่วนได้นำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์และการประมวลผลภาพมาใช้ในการจำแนกประเภทของขยะโดยอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการคัดแยก [5] สำหรับประเทศไทย แม้ว่าจะมีการพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะผ่านเทคโนโลยี IoT อย่างต่อเนื่อง [6]–[8] แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการตรวจวัดระดับขยะ การแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็ม และการบริหารจัดการข้อมูลของระบบ ขณะที่การใช้สื่อมัลติมีเดียเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะของผู้ใช้งาน รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการถุงขยะอัตโนมัติ ยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด

นอกจากการพัฒนาเทคโนโลยีแล้ว การส่งเสริมให้ผู้ใช้งานคัดแยกขยะได้อย่างถูกต้องยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจัดการขยะ แนวคิดด้านการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม โดยเฉพาะทฤษฎีการสะกิด (Nudge Theory) อธิบายว่า การออกแบบสภาพแวดล้อมหรือการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่เหมาะสม เช่น ภาพ เสียง สี หรือข้อความแนะนำ สามารถกระตุ้นให้บุคคลตัดสินใจเลือกพฤติกรรมที่พึงประสงค์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้มาตรการบังคับ[9]- แนวคิดดังกล่าวจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการขยะเพื่อสนับสนุนให้ผู้ใช้งานคัดแยกขยะได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการตรวจวัดระดับขยะ การแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็ม หรือการจำแนกประเภทของขยะด้วยปัญญาประดิษฐ์ ขณะที่งานวิจัยที่บูรณาการเทคโนโลยี IoT ร่วมกับสื่อมัลติมีเดียเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะของผู้ใช้งานยังมีจำนวนไม่มาก อีกทั้งยังไม่พบการพัฒนาระบบที่ผสานการแสดงภาพและเสียงแนะนำการคัดแยกขยะเข้ากับระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติและระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API ภายในระบบเดียวกัน ซึ่งถือเป็นช่องว่างของงานวิจัยที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งร่วมกับสื่อมัลติมีเดีย เพื่อสนับสนุนการคัดแยกขยะที่ต้นทางของผู้ใช้งาน ระบบใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเข้าใกล้เพื่อเปิดฝาช่องเก็บขยะตามตำแหน่งที่ผู้ใช้งานเลือก พร้อมแสดงภาพและเสียงแนะนำการคัดแยกขยะอย่าง

ESTACON 2026 | 17th

ถูกต้อง ทั้งนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่ได้ทำการตรวจสอบหรือจำแนกประเภทของขยะจากตัววัตถุด้วยปัญญาประดิษฐ์หรือระบบประมวลผลภาพ แต่ใช้สื่อมัลติมีเดียเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ใช้งานในการเลือกประเภทของขยะด้วยตนเอง นอกจากนี้ระบบยังมีฟังก์ชันปิดปากถุงขยะอัตโนมัติและแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API เมื่อปริมาณขยะภายในถังถึงระดับที่กำหนด เพื่อช่วยลดการสัมผัสขยะโดยตรง เพิ่มความสะดวกในการปฏิบัติงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการขยะในพื้นที่สาธารณะ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะสำหรับส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะ 3 ประเภท ได้แก่ ขยะอันตราย ขยะทั่วไป และขยะรีไซเคิล
2) เพื่อพัฒนาระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะอัตโนมัติ ระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API
3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมการคัดแยกขยะและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ในการจัดการขยะมีอยู่อย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะ เช่น การแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็ม การแจ้งตำแหน่งถังขยะตลอดจนการบริหารจัดการขยะ Addas et al. [2] ได้นำเสนอแนวทางการจัดการขยะที่ใช้ IoT ในการติดตามสถานะถังขยะแบบเรียลไทม์เพื่อการบริหารจัดการขยะในเมือง ขณะที่ Nesmachnow et al. [4] ได้ทบทวนเทคโนโลยีการจัดการขยะสมัยใหม่ และพบว่าระบบติดตามสถานะถังขยะผ่านเครือข่ายเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ Paul et al. [3] ได้นำเสนอถังขยะอัจฉริยะที่สามารถตรวจวัดระดับขยะและส่งข้อมูลไปยังผู้จัดการขยะผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อสนับสนุนการจัดเก็บขยะอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Alourani et al. [5] ได้พัฒนาระบบจัดการขยะอัจฉริยะที่ผสานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและปัญญาประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทขยะและการจัดการข้อมูลต่างๆ

สำหรับงานวิจัยในประเทศไทย Durongdumrongchai [6] ได้พัฒนาถังขยะอัตโนมัติระบบ IoT ที่สามารถเปิด–ปิดฝาถังอัตโนมัติและแจ้งสถานะการใช้งานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ขณะที่ Tanyapornhirun และ Uttamasiriseni [7] ได้พัฒนาระบบถังขยะ IoT สำหรับโรงเรียนประถมศึกษา ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลการทิ้งขยะเข้าสู่ระบบออนไลน์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ Pongsuwan et al. [8] ยังได้นำเสนอระบบติดตามสถานะถังขยะอัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการขยะในองค์กร

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่างานส่วนใหญ่มุ่งเน้นการตรวจสอบระดับปริมาณขยะ การแจ้งเตือนเมื่อถังขยะเต็ม และการบริหารจัดการข้อมูลขยะผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ให้ความสำคัญกับการส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะของผู้ทิ้งขยะผ่านสื่อมัลติมีเดีย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะที่ประกอบด้วยช่องเก็บขยะ 3 ประเภท ได้แก่ ช่องเก็บ

ขยะอันตราย ช่องเก็บขยะทั่วไป และช่องเก็บขยะรีไซเคิล โดยใช้สื่อมัลติมีเดียประกอบด้วยภาพและเสียงเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้การคัดแยกขยะ โดยมีระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะอัตโนมัติ มีระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ และมีระบบแจ้งเตือนเมื่อขยะเต็มช่องเก็บผ่าน LINE Messaging API เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะและส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะอย่างถูกต้อง

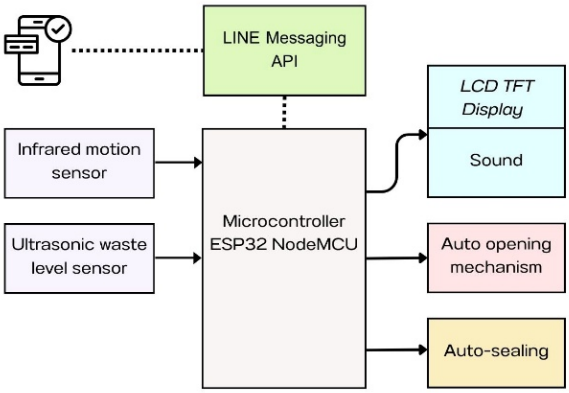
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สถาปัตยกรรมของระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาถังขยะอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะ โดยออกแบบให้มีช่องเก็บขยะจำนวน 3 ช่อง ได้แก่ ช่องเก็บขยะอันตราย ช่องเก็บขยะทั่วไป และช่องเก็บขยะรีไซเคิล ซึ่งแต่ละช่องสามารถทำงานได้อย่างอิสระผ่านระบบควบคุมส่วนกลางที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 NodeMCU เป็นหน่วยประมวลผลหลัก

สถาปัตยกรรมของระบบ ประกอบด้วยเซนเซอร์อินฟราเรดสำหรับตรวจจับผู้ใช้งาน มีจอแสดงผลแอลซีดีสำหรับแสดงภาพประเภทขยะพร้อมกับระบบเสียงแนะนำ มีระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะอัตโนมัติ มีกลไกปิดปากถุงขยะเมื่อปริมาณขยะในช่องเก็บเต็มพร้อมกับมีระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API โดยช่องเก็บขยะทั้ง 3 ช่อง มีลักษณะการทำงานเหมือนกันแบบแยกอิสระ

การทำงานเริ่มเมื่อผู้ใช้งานนำขยะที่จะทิ้งเข้าใกล้ฝาช่องเก็บขยะ เซนเซอร์อินฟราเรดจะตรวจจับการเคลื่อนไหวและส่งข้อมูลไปยัง ESP32 NodeMCU จากนั้นระบบจะแสดงภาพและเสียงแนะนำชนิดของขยะที่ช่องเก็บขยะนั้นให้ทิ้งได้ พร้อมกับเปิดฝาโดยอัตโนมัติ เมื่อปริมาณขยะภายในถังถึงค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งงานกลไกปิดปากถุงขยะและส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API ไปยังผู้ดูแลระบบ



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของระบบถังขยะอัจฉริยะ

3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์ของระบบได้รับการออกแบบเพื่อรองรับการใช้งานในพื้นที่สาธารณะ โดยโครงสร้างถังขยะแบ่งออกเป็น 3 ช่องตามประเภทของขยะ (แสดงดังรูปที่ 2) แต่ละช่องติดตั้งเซนเซอร์อินฟาเรดตรวจจับผู้ใช้งาน โดยมีเซนเซอร์วัดระดับขยะและชุดกลไกที่ทำงานด้วยมอเตอร์กระแสตรงสำหรับเปิด–ปิดฝาถัง มีจอแอลซีดีติดตั้งเหนือช่องทิ้งขยะแต่ละประเภทสำหรับแสดงสื่อมัลติมีเดีย



รูปที่ 2 โครงสร้างถังขยะอัจฉริยะ

3.3 การออกแบบระบบแสดงภาพและเสียง

ระบบได้พัฒนาสื่อมัลติมีเดียประกอบด้วยภาพและเสียงแนะนำประเภทขยะ เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และสร้างพฤติกรรมการคัดแยกขยะ เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบขยะที่ผู้ใช้งานนำมาทิ้งในช่องเก็บขยะ ระบบจะแสดงภาพตัวอย่างขยะที่สามารถทิ้งได้ในช่องนั้นบนจอแอลซีดี ตัวอย่างภาพที่แสดงเป็นดังรูปที่ 3 พร้อมส่งเสียงแนะนำผ่านลำโพง



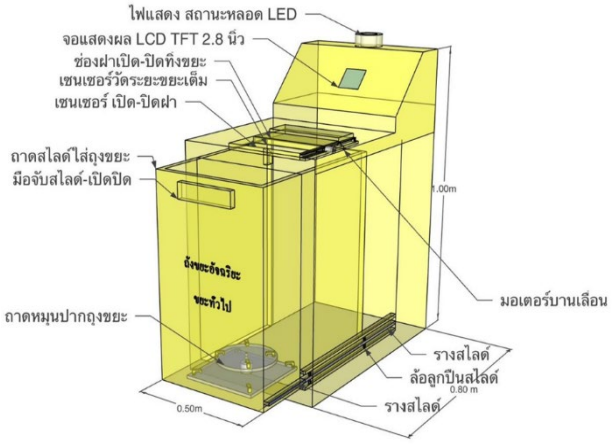
รูปที่ 3 การแสดงประเภทขยะอันตรายบนหน้าจอ

3.4 การออกแบบระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะ

ระบบเปิด–ปิดฝาถังขยะใช้เซนเซอร์อินฟราเรดร่วมกับมอเตอร์กระแสตรง โดยเมื่อเซนเซอร์ตรวจพบวัตถุภายในระยะที่กำหนด หน่วยประมวลผลจะสั่งให้มอเตอร์ขับเคลื่อนกลไกเปิดฝาช่องเก็บขยะช่วยลดการสัมผัสถังขยะโดยตรง ลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อโรค และเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน หลังจากผู้ใช้งานทิ้งขยะเสร็จสิ้นและไม่มีการตรวจพบการเคลื่อนไหวภายในช่วงเวลาที่กำหนด ระบบจะสั่งให้มอเตอร์ขับเคลื่อนกลไกอีกครั้งเพื่อปิดฝาช่องเก็บขยะ

3.5 การออกแบบระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ

ระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติมีหลักการทำงานของระบบเริ่มจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ทำหน้าที่ตรวจวัดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับผิวหน้าของขยะภายในถัง เมื่อระยะห่างลดลงจนถึงค่าที่กำหนด ซึ่งบ่งชี้ว่าถังขยะมีปริมาณขยะเต็ม หน่วยประมวลผลกลางจะสั่งให้ระบบปิดปากถุงขยะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติ กลไกการปิดปากถุงประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงความเร็วรอบต่ำ โดยแกนมอเตอร์เชื่อมต่อกับชุดถาดรองรับถุงขยะที่ออกแบบให้สามารถหมุนได้ โดยบริเวณก้นถุงจะถูกยึดติดกับถาดรองรับผ่านชุดล็อก เพื่อป้องกันการเลื่อนหลุดระหว่างการหมุน ขณะที่บริเวณปากถุงถูกยึดติดกับช่องทิ้งขยะอย่างมั่นคง เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน ถาดรองรับจะหมุนตาม ส่งผลให้ตัวถุงเกิดการบิดรัด จนปากถุงปิดสนิท สามารถป้องกันการรั่วไหลของขยะ การแพร่กระจายของกลิ่น และลดโอกาสการฟุ้งกระจายของเชื้อโรคหรือสิ่งปนเปื้อนออกสู่สภาพแวดล้อม หลังจากการปิดปากถุงเสร็จสมบูรณ์ หน่วยประมวลผลจะสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ พร้อมทั้งบันทึกสถานะของถังขยะว่าอยู่ในสภาวะเต็ม (Full Status) จากนั้นระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแลระบบ เพื่อแจ้งให้ดำเนินการนำถุงขยะออกและเปลี่ยนถุงขยะใหม่



รูปที่ 4 กลไกถังขยะอัจฉริยะ

3.6 ระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

ระบบแจ้งเตือนถูกพัฒนาขึ้นโดยประยุกต์ใช้ LINE Messaging API เพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะของถังขยะอัจฉริยะได้แบบเรียลไทม์ เมื่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจพบว่าปริมาณขยะถึงระดับที่กำหนด หน่วยประมวลผลกลางจะสั่งให้ระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติทำงาน และเมื่อกระบวนการปิดปากถุงเสร็จสมบูรณ์ ระบบจะเปลี่ยนสถานะเป็นถังขยะเต็ม พร้อมส่งข้อมูลแจ้งเตือนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมี ESP32 NodeMCU ทำหน้าที่เชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi และส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล HTTP ไปยัง LINE Messaging API เพื่อส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังบัญชี LINE ที่กำหนด โดยข้อความแจ้งเตือนประกอบด้วยข้อมูลถังเต็ม ช่วยให้ผู้ดูแลสามารถดำเนินการเปลี่ยนถุงขยะได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

3.7 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินประสิทธิภาพของระบบแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่

1) การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ตรวจจับผู้ใช้งาน
2) การทดสอบระบบแสดงภาพและเสียง
3) การทดสอบระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะ
4) การทดสอบระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ
5) การทดสอบระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API
6) การประเมินพฤติกรรมการคัดแยกขยะและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

กลุ่มตัวอย่างในการประเมินระบบประกอบด้วยนักศึกษาและบุคลากรจำนวน 35 คน โดยดำเนินการทดสอบการคัดแยกขยะก่อนและหลังการใช้งานระบบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ค่าความถูกต้อง (Accuracy) อัตราความสำเร็จ (Success Rate) และเวลาในการตอบสนอง (Response Time) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

4. ผลการทดลองและการประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของถังขยะอัจฉริยะดำเนินการเพื่อวัดความสามารถในการตรวจจับผู้ใช้งาน การแสดงผลภาพและเสียง การเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะอัตโนมัติ การปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ การส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API ตลอดจนผลต่อพฤติกรรมการคัดแยกขยะและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

4.1 ผลการทดสอบระบบตรวจจับผู้ใช้งาน

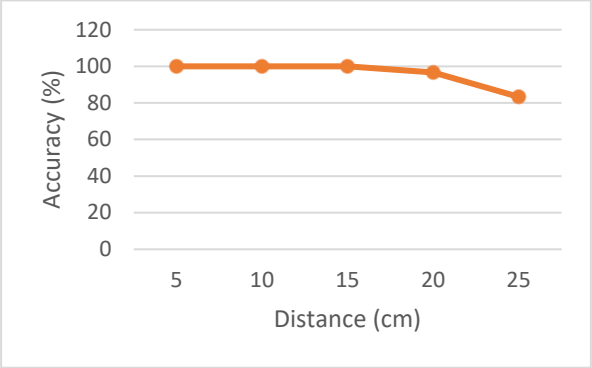
การทดสอบระบบตรวจจับผู้ใช้งานดำเนินการโดยกำหนดระยะการตรวจจับที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 เซนติเมตร ระยะละ 30 ครั้ง เพื่อประเมินความสามารถของเซนเซอร์อินฟราเรดในการตรวจจับการเคลื่อนไหวบริเวณช่องทิ้งขยะแต่ละประเภท

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบระบบตรวจจับผู้ใช้งาน

ระยะ (ซม.)	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	อัตราความสำเร็จ (%)
5	30	30	100
10	30	30	100
15	30	30	100
20	30	29	96.7
25	30	25	83.3

ผลการทดลองพบว่าระบบตรวจจับผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพสูงในช่วงระยะ 5–20 เซนติเมตร โดยมี

ค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 99.2% จึงกำหนดระยะการทำงานที่เหมาะสมไว้ที่ 20 เซนติเมตร



รูปที่ 5 ผลการทดสอบระบบตรวจจับผู้ใช้งาน

4.2 ผลการทดสอบระบบแสดงภาพและเสียงแนะนำ

การทดสอบระบบแสดงภาพและเสียงดำเนินการ จำนวน 100 ครั้ง โดยตรวจสอบความถูกต้องในการแสดงภาพประเภทขยะบนจอแอลซีดีและการเล่นเสียงแนะนำผ่านลำโพงเมื่อมีผู้ใช้งานเข้าใกล้ช่องขยะประเภทต่างๆ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบระบบแสดงภาพและเสียง

รายการ	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	อัตราความสำเร็จ (%)
การแสดงภาพ	100	100	100
การเล่นเสียง	100	100	100

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถแสดงภาพและเสียงได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 0.45 วินาทีหลังจากตรวจพบผู้ใช้งาน

4.3 ผลการทดสอบระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะ

การทดสอบระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะดำเนินการจำนวน 100 ครั้ง เพื่อประเมินความสามารถของมอเตอร์และกลไกเปิด-ปิดฝาช่องเก็บขยะ ผลการทดลองพบว่าระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะมีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 98.5% และมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 0.82 วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานจริงและช่วยลดการสัมผัสถังขยะโดยตรง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบระบบเปิด–ปิดฝา

รายการ	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	อัตราความสำเร็จ (%)
เปิดฝาถัง	100	99	99
ปิดฝาถัง	100	98	98

4.4 ผลการทดสอบระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ

การทดสอบระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติดำเนินการโดยจำลองสถานการณ์ถังขยะเต็มจำนวน 30 ครั้ง ในแต่ละประเภทของขยะ เพื่อประเมินความสามารถของมอเตอร์และกลไกหมุนปิดปากถุงขยะ

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ

ประเภทถังขยะ	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	อัตราความสำเร็จ (%)
ถังขยะอันตราย	30	29	96.7
ถังขยะทั่วไป	30	30	100
ถังขยะรีไซเคิล	30	29	96.7

ผลการทดลองพบว่าระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ มีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 97.8% และใช้เวลาเฉลี่ย 4.2 วินาที ในการปิดปากถุงให้ปิดสนิท ซึ่งช่วยลดการฟุ้งกระจายของกลิ่นและเพิ่มความปลอดภัยในการจัดการขยะ

4.5 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

การทดสอบระบบแจ้งเตือนดำเนินการโดยจำลองสถานการณ์ถังขยะเต็มจำนวน 30 ครั้งต่อประเภทถังขยะ เพื่อประเมินความถูกต้องและความรวดเร็วในการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแลระบบผ่าน LINE Messaging API

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

ประเภทช่องเก็บขยะ	จำนวนครั้งที่ทดสอบ	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	อัตราความสำเร็จ (%)
ขยะอันตราย	30	29	96.7
ขยะทั่วไป	30	29	96.7
ขยะรีไซเคิล	30	29	96.7

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถส่งข้อความแจ้งเตือนได้สำเร็จเฉลี่ย 96.7% และมีเวลาในการส่งข้อความเฉลี่ย 2.34 วินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

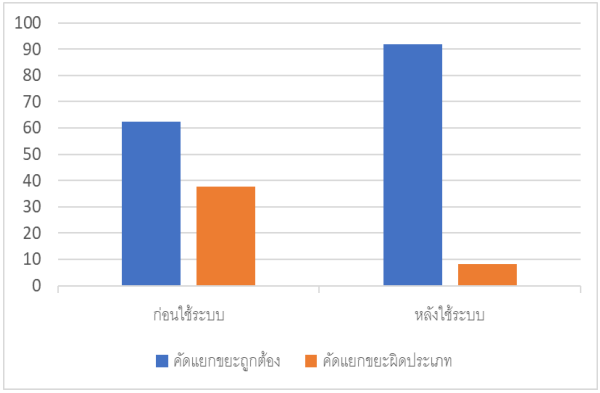
4.6 ผลการศึกษาพฤติกรรมการคัดแยกขยะและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

การศึกษาผลต่อพฤติกรรมการคัดแยกขยะดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 35 คน โดยเปรียบเทียบอัตราการคัดแยกขยะถูกต้องก่อนและหลังการใช้งานระบบถังขยะอัจฉริยะ

ตารางที่ 8 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมคัดแยกขยะ

รายการ	ก่อนใช้ระบบ (%)	หลังใช้ระบบ (%)
คัดแยกขยะถูกต้อง	62.4	91.8
คัดแยกขยะผิดประเภท	37.6	8.2

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ภาพ เสียง และระบบเปิด–ปิดฝาอัตโนมัติช่วยเพิ่มอัตราการคัดแยกขยะถูกต้องได้ 29.4%



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบพฤติกรรมคัดแยกขยะก่อนและหลังใช้งานระบบ

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ตารางที่ 9 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับ
ความสะดวกในการใช้งาน	4.78	0.41	มากที่สุด
ความชัดเจนของภาพแนะนำ	4.71	0.44	มากที่สุด
ความชัดเจนของเสียงแนะนำ	4.66	0.49	มากที่สุด
ความรวดเร็วของระบบ	4.63	0.52	มากที่สุด
ประสิทธิภาพการแจ้งเตือน	4.67	0.47	มากที่สุด
ความพึงพอใจโดยรวม	4.69	0.48	มากที่สุด

ผลการประเมินพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด โดยหัวข้อความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.78

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบถังขยะอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยมีประสิทธิภาพสูงทั้งในด้านการตรวจจับผู้ใช้งาน การแสดงผลด้วยสื่อมัลติมีเดีย การเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะแต่ละประเภทอย่างอัตโนมัติ การปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ และการแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

ผลการทดสอบระบบตรวจจับผู้ใช้งานพบว่ามีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 99.2% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้ ESP32 NodeMCU ร่วมกับเซนเซอร์อินฟราเรดในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับงานจัดการถังขยะ ระบบแสดงภาพและเสียงสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องมากกว่า 99% และมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 0.45 วินาที การใช้สื่อมัลติมีเดียสามารถช่วยเพิ่มการรับรู้ข้อมูลเกี่ยวกับประเภทขยะของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดสอบระบบเปิด–ปิดฝาถังอัตโนมัติพบว่ามีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 98.5% และมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 0.82 วินาที ซึ่งช่วยลดการสัมผัสถังขยะโดยตรงและลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อโรค ส่วนของระบบปิดปากถุงขยะอัตโนมัติมีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 97.8% และใช้เวลาเฉลี่ย 4.2 วินาทีต่อการปิดปากถุงหนึ่งครั้ง แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้กลไกและระบบอัตโนมัติเพื่อช่วยลดภาระของผู้ปฏิบัติงานและเพิ่มความปลอดภัยในการจัดการขยะโดยเฉพาะขยะอันตราย

ในด้านการสื่อสารข้อมูล ระบบสามารถส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API ได้สำเร็จเฉลี่ย 96.7% โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 2.34 วินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง ในส่วนของผลการศึกษาพฤติกรรมการคัดแยกขยะ พบว่าอัตราการคัดแยกขยะถูกต้องเพิ่มขึ้นจาก 62.4% เป็น 91.8% หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.4 หลังการใช้งานระบบ แสดงให้เห็นว่าสื่อมัลติมีเดียที่ประกอบด้วยภาพ เสียง และการตอบสนองแบบทันทีสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าใจประเภทของขยะได้ดียิ่งขึ้นและเกิดการเรียนรู้จากการใช้งานจริง

นอกจากนี้ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีค่าเฉลี่ยรวม 4.69 จาก 5.00 คะแนน แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานยอมรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นและสามารถใช้งานได้อย่างสะดวก โดยเฉพาะด้านความสะดวกในการใช้งานและความชัดเจนของข้อมูลที่นำเสนอผ่านภาพและเสียง

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การจำแนกประเภทขยะยังอาศัยการตัดสินใจของผู้ใช้งาน และยังไม่ได้ใช้ระบบการจำแนกขยะโดยอัตโนมัติ รวมทั้งการทดลองยังดำเนินการในพื้นที่จำกัดและกลุ่มตัวอย่างจำนวนไม่มากนัก ดังนั้นการพัฒนาระบบรู้จำภาพและการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงขนาดใหญ่จึงเป็นแนวทางที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบถังขยะอัจฉริยะที่ผสมผสานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเข้ากับสื่อมัลติมีเดีย เพื่อช่วยส่งเสริมการคัดแยกขยะให้ถูกต้องมากขึ้นในพื้นที่สาธารณะ ตัวระบบได้รับการออกแบบให้รองรับขยะ 3 ประเภท ได้แก่ ขยะอันตราย ขยะทั่วไป และขยะรีไซเคิล โดยใช้ ESP32 NodeMCU เป็นหน่วยควบคุมหลัก เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตรวจจับผู้ใช้งาน จอแสดงผลแอลซีดี ระบบ

เสียงแนะนำ กลไกเปิด–ปิดฝาอัตโนมัติ กลไกปิดปากถุงขยะอัตโนมัติ และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

จากผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพในทุกส่วนที่สำคัญ เซนเซอร์ตรวจจับผู้ใช้งานมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 99.2% ขณะที่ระบบเปิด–ปิดฝาช่องเก็บขยะมีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 98.5% ส่วนกลไกปิดปากถุงขยะอัตโนมัติสามารถทำงานได้สำเร็จเฉลี่ย 97.8% และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API มีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 96.7% โดยใช้เวลาในการส่งข้อความเฉลี่ย 2.34 วินาที ซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการใช้งานจริง เมื่อพิจารณาในมิติของผู้ใช้งาน ผลที่ได้สะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์ของการนำภาพ เสียง และการตอบสนองแบบอัตโนมัติมาใช้ร่วมกันอย่างชัดเจน อัตราการคัดแยกขยะได้ถูกต้องเพิ่มขึ้นจาก 62.4% ก่อนใช้งาน เป็น 91.8% หลังใช้งานระบบ แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานสามารถเรียนรู้และจดจำประเภทของขยะได้ดีขึ้นจากการใช้งานจริง ไม่ได้เป็นเพียงการรับข้อมูลจากป้ายประชาสัมพันธ์หรือคำแนะนำแบบทั่วไปเท่านั้น

ในด้านการยอมรับเทคโนโลยี ผู้เข้าร่วมประเมินจำนวน 35 คน มีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$= 4.69, S.D. = 0.48) โดยเฉพาะด้านความสะดวกในการใช้งานและความชัดเจนของสื่อแนะนำ สะท้อนว่าระบบสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ดีและไม่ก่อให้เกิดความยุ่งยากระหว่างการใช้งาน

โดยภาพรวม ระบบถังขยะอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกขยะเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการสัมผัสขยะโดยตรง ลดภาระในการจัดการถุงขยะเมื่อเต็ม และสนับสนุนการสร้างพฤติกรรมการทิ้งขยะอย่างถูกต้องในระยะยาว ผลการวิจัยจึงชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับสื่อมัลติมีเดียเพื่อยกระดับการจัดการขยะในสถานศึกษา หน่วยงานภาครัฐ และพื้นที่สาธารณะ ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะและการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) พัฒนาระบบรู้จำภาพด้วยปัญญาประดิษฐ์ เพื่อจำแนกประเภทขยะโดยอัตโนมัติและลดความผิดพลาดจากผู้ใช้งาน
2) ทดสอบระบบในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก เช่น โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า หรือหน่วยงานภาครัฐ เพื่อประเมินความเสถียรของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมจริง
3) ควรศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบ เพื่อสนับสนุนการขยายผลเชิงพาณิชย์และการประยุกต์ใช้ในระดับเมืองอัจฉริยะ
4) ควรเพิ่มระบบป้องกันไฟฟ้ารั่วหรือไฟฟ้าลัดวงจร เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบในการใช้งานระยะยาว

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และทรัพยากรที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญและกลุ่มตัวอย่างทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบและประเมินผลระบบ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

เอกสารอ้างอิง

[1] Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank.

[2] Addas, A., Khan, M. N., & Naseer, F. (2024). Waste management 2.0 leveraging internet of things for an efficient and eco-friendly smart city solution. PLoS ONE, 19(7), e0307608.

[3] Paul, L., Mohalder, R. D., & Alam, K. M. (2024). An IoT based smart waste management system for the municipality or city corporations. arXiv:2411.09710.

[4] Nesmachnow, S., Rossit, D., & Moreno-Bernal, P. (2025). A literature review of recent advances on innovative computational tools for waste management in smart cities. Urban Science, 9(1), 16.

[5] Alourani, A., Ashraf, M. U., & Aloraini, M. (2025). Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies. PeerJ Computer Science, 11, e2777.

[6] Durongdumrongchai, P. (2022). ถังขยะอัตโนมัติระบบไอโอที. วารสารวิจัยและนวัตกรรมการอาชีวศึกษา, 6(1), 31–42.

[7] Tanyapornhirun, N., & Uttamasiriseni, C. (2021). การพัฒนาต้นแบบระบบถังขยะไอโอทีและระบบจัดเก็บข้อมูลการทิ้งขยะแบบออนไลน์ของนักเรียนในโรงเรียนระดับประถมศึกษา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ, 7(1), 54–63.

[8] Pongsuwan, T., Tita, A., & Uthaiban, P. (2019). ระบบติดตามถังขยะอัจฉริยะ. PULINET Journal, 6(2), 41–50.

[9] Wang, X., Li, Y., & Zhang, Z. (2023). Can we "Nudge" people to better waste separation behaviours? Policy interventions mediated by habit, sense of separation efficiency and external environmental perceptions. Waste Management & Research, 41(12), 1780–1792. doi.org

การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอุณหภูมิและแรงดันของแบตเตอรี่โซลิดสเตตและลิเธียมไอออนด้วยแบบจำลองวงจรสมมูล

Comparative Analysis of Thermal and Voltage Characteristics in Solid-State and Lithium-Ion Batteries via Equivalent Circuit Modeling

ชัยพันธุ์ ประการะพันธ์[1], แสงเพ็ชร งอนชัยภูมิ[2] , สราวุฒิ แสงศาลา[3] และ บรรณญัติ บริบูรณ์[1,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
234 หมู่ 12 ตำบลสามพร้าว อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี 41000
[2] สาขาวิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
[3] สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีพิชญพิชญ์ 3 หมู่ 13 ตำบลหนองเม็ก อำเภอหนองหาน จังหวัดอุดรธานี 4113
*ผู้ติดต่อ: banyat.bo@udru.ac.th, 0650053835

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับที่สองควบคู่กับแบบจำลองความร้อนแบบก้อนพลังงาน เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอุณหภูมิและแรงดันระหว่างแบตเตอรี่โซลิดสเตต และแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนความจุ 2.5 Ah บนโปรแกรม Python แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นผ่านการตรวจสอบความถูกต้องกับชุดข้อมูลสาธารณะมาตรฐานสากล จำลองพฤติกรรมการคลายประจุด้วยกระแสคงที่อัตรา 1C ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม 3 ระดับ ได้แก่ 0°C, 25°C และ 45°C เพื่อประเมินผลกระทบเชิงพลวัต ผลการจำลองบ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิ 25°C แบตเตอรี่ลิ-เธียมไอออนสามารถรักษาเสถียรภาพของแรงดันได้ดีกว่า และมีแรงดันตกคร่อมต่ำกว่าโซลิดสเตตเล็กน้อย ขณะที่โซลิด-สเตตมีการสะสมอุณหภูมิแกนกลางตอนปลายสูงกว่าเนื่องจากความต้านทานรอยต่อของแข็งที่สูงกว่าตามธรรมชาติ สำหรับสภาวะอุณหภูมิ 0°C โซลิดสเตตเกิดภาวะแรงดันตกคร่อมสูงจากความต้านทานภายในที่พุ่งสูงขึ้น ส่งผลให้เข้าสู่จุดตัดแรงดันเร็วกว่าลิเธียมไอออน 400 วินาที ที่อุณหภูมิ 45°C แบตเตอรี่โซลิดสเตตแสดงลักษณะเฉพาะที่ยอดเยี่ยมโดยสามารถจ่ายประจุได้นานถึง 3,620 วินาที เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยเร่งการแพร่ของไอออนข้ามรอยต่อของแข็งตามกฎอาร์เรเนียส ทั้งยังมีความปลอดภัยสูงกว่าโดยไร้ความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะความร้อนวิกฤต ข้อค้นพบเชิงเปรียบเทียบนี้เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการพัฒนาขั้นตอนวิธีชดเชยพารามิเตอร์ไฟฟ้า-ความร้อนในระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ยุคใหม่

คำสำคัญ: แบตเตอรี่โซลิดสเตต, ลักษณะเฉพาะทางอุณหภูมิ, แรงดันขั้ว, แบบจำลองวงจรสมมูล, ระบบจัดการแบตเตอรี่

Abstract

This study applies a second-order equivalent circuit model combined with a lumped parameter thermal model to analyze and compare the temperature and voltage characteristics of a 2.5 Ah solid-state battery and a lithium-ion battery using Python. The model was validated using

international standard open-source datasets. To assess dynamic effects, constant-current discharge behavior was simulated at a 1C rate under three ambient temperatures: 0°C, 25°C, and 45°C. Simulation results demonstrate that at 25°C, the lithium-ion battery maintains superior voltage stability and experiences a slightly lower voltage drop than the solid-state battery. The solid-state battery, however, reaches a higher end-of-discharge core temperature due to its greater solid-solid interfacial resistance. At 0°C, the solid-state battery undergoes a significant voltage drop caused by increased internal resistance, leading to the cut-off voltage being reached approximately 400 seconds earlier than in the lithium-ion battery. In contrast, at 45°C, the solid-state battery achieves optimal performance, sustaining a discharge duration of up to 3,620 seconds. This improvement is attributed to enhanced ion diffusion across solid-state interfaces, as described by the Arrhenius law, and to improved safety by eliminating the risk of thermal runaway. These comparative results establish a foundational baseline for the development of electro-thermal parameter compensation algorithms in next-generation battery management systems.

Keywords: Solid-state battery, temperature characteristics, terminal voltage, equivalent circuit model, battery management system.

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบสะสมพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับที่พักอาศัยเป็นเทคโนโลยีสำคัญในการบริหารจัดการค่าไฟฟ้า และเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน แต่การใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแบบดั้งเดิมซึ่งมีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายอินทรีย์แบบเหลวก่อให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสภาวะความร้อนวิกฤตจนไม่สามารถควบคุมได้ [1] ซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดพร่องทางไฟฟ้า เช่น การลัดวงจร กระแสค่าสูงเกิน เป็นต้น ปัญหานี้ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมอย่างรวดเร็ว สารละลายของเหลวเกิดการสลายตัว และปลดปล่อยแก๊สไวไฟ ซึ่งอาจนำไปสู่การระเบิด และเกิดเพลิงไหม้ เป็นความเสี่ยงภัยที่ร้ายแรงต่อชีวิต และทรัพย์สินภายในบ้าน [1] ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีแบตเตอรี่โซลิดสเตตจึงถูกคาดหวัง และจับตามองในฐานะนวัตกรรมยุคถัดไป เนื่องจากเปลี่ยนมาใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ และมีความเสถียรทางความร้อนสูงมาก โครงสร้างของแข็งนี้ช่วยลดความเสี่ยงจากการรั่วไหล และการลัดวงจรภายในเซลล์ได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้แบตเตอรี่โซลิดสเตตตอบโจทย์ความต้องการด้านความปลอดภัยระดับสูงสุดสำหรับระบบพลังงานในที่พักอาศัย [2]

เทคโนโลยีแบตเตอรี่โซลิดสเตตได้รับการยอมรับว่าเป็นนวัตกรรมยุคถัดไปที่จะมาทดแทนแบตเตอรี่ลิ-เธียมไอออนแบบดั้งเดิมด้วยข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัย แต่การนำแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้ไปประยุกต์ใช้งานในระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่สำหรับที่พักอาศัย หรือยานยนต์ไฟฟ้า มีความท้าทายเกี่ยวกับการประเมิน และควบคุมพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนตามเวลาจริง การศึกษาวิจัยแบตเตอรี่โซลิดสเตตส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การวิจัยเชิงวัสดุศาสตร์ หรือการใช้แบบจำลองทางเคมีไฟฟ้าซึ่งมีความแม่นยำในระดับโมเลกุล แต่สมการมีความซับซ้อน และใช้เวลาประมวลผลมาก ส่งผลให้ไม่สามารถนำไปคำนวณตามเวลาจริงในไมโครคอนโทรลเลอร์ของระบบบริหารแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นตัวเลือกเหมาะที่สุดในการใช้งานจริงคือแบบจำลองวงจรสมมูล ซึ่งสามารถสร้างความสมดุลระหว่างความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมทางพลวัต และประสิทธิภาพในการประมวลผลที่รวดเร็ว [3] งานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันมักจำแนกการศึกษาแบบจำลองวงจรสมมูลแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และแบตเตอรี่โซลิดสเตตออกจากกัน หรือมุ่งเน้นพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น [4] ส่งผลให้ไม่มีข้อมูลการเปรียบเทียบเชิงปริมาณสำหรับกรอบการจำลองสถานการณ์ และโครงสร้างวงจรสมมูลเดียวกัน เพื่อชี้ให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปค่าพารามิเตอร์ภายในของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดนี้ เช่น ความต้านทานหลัก (R_0) ความต้านทานและความจุขั้วโพลาไรเซชัน (R_1, C_1) ความต้านทานและความจุการแพร่ (R_2, C_2) เป็นต้น ส่งผลต่อแรงดันขั้วแบตเตอรี่ และอัตราการเกิดความร้อนสะสมสะท้อนกลับ งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นโดยการนำแบบจำลองวงจรสมมูลแบตเตอรี่อันดับสองและแบบจำลองความร้อน เพื่อจำลองและเปรียบเทียบพฤติกรรมควบคู่ไฟฟ้า-ความร้อน สำหรับการเตรียมความพร้อมและปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบบริหารแบตเตอรี่จากลิเธียมไอออนไปสู่แบตเตอรี่โซ-ลิดสเตตได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยที่สุด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับความแตกต่างด้านพฤติกรรมทางพลวัตควบคู่

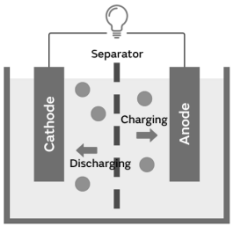
ไฟฟ้า-ความร้อนระหว่างแบตเตอรี่โซลิดสเตตและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยใช้การจำลองวงจรสมมูลอันดับที่สองร่วมกับแบบจำลองความร้อนด้วยรหัสคำสั่งของโปรแกรม Python เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ภายใน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกันสามระดับและกระตุ้นด้วยกระแสคงที่สองค่า ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับคือข้อมูลเชิงตัวเลขเปรียบเทียบที่ชี้ให้เห็นถึงความเสถียรของแรงดันขั้ว อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเซลล์ และขีดจำกัดความปลอดภัยทางความร้อนของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลพารามิเตอร์ที่แม่นยำในการนำไปออกแบบและพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ยุคถัดไปให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

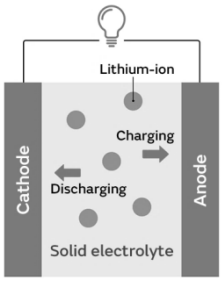
การวิเคราะห์พฤติกรรมควบคู่ไฟฟ้า-ความร้อนของแบตเตอรี่ต้องพิจารณาโครงสร้างทางกายภาพ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพยากรณ์ลักษณะเฉพาะของเซลล์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 หลักการทำงานและโครงสร้างแบตเตอรี่โซลิด-สเตตและลิเธียมไอออน

แบตเตอรี่โซลิดสเตตและลิเธียมไอออนมีหลักการพื้นฐานในการจัดเก็บและจ่ายพลังงานผ่านการเคลื่อนที่ของลิเธียมไอออนระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโธดเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นสารตัวนำไอออน [5] โครงสร้างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์เหลวซึ่งเป็นสารละลายอินทรีย์ และมีแผ่นกั้นพรุนเพื่อป้องกันการลัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 1(ก) [6] ข้อจำกัดสำคัญของโครงสร้างนี้คือสารละลายเหลวมีความไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและติดไฟได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [7] ในขณะที่แบตเตอรี่-โซลิดสเตตแทนที่แผ่นกั้น และอิเล็กโทรไลต์เหลว ด้วยอิเล็กโทรไลต์ของแข็ง เช่น เซรามิก โพลีเมอร์แข็ง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) [2] เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไอออนและโครงสร้างรองรับเชิงกล โครงสร้างดังกล่าวนี้แก้ปัญหาความเสี่ยงเนื่องจากการรั่วไหล การติดไฟและป้องกันการเพิ่มขึ้นของเกล็ดลิเธียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นแบตเตอรี่โซลิดสเตตจึงมีความปลอดภัยและเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน [8]



(ก) ลิเธียมไอออน



(ข) โซลิดสเตต

รูปที่ 1 โครงสร้างและส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและโซลิดสเตต

2.2. แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

การพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ด้วยแบบจำลองทางเคมีไฟฟ้ามีความซับซ้อน และใช้เวลาประมวลผลมาก งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่จึงเลือกใช้แบบจำลองวงจรสมมูลเนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมทางพลวัตได้แม่นยำ และประมวลผลได้รวดเร็วกว่า [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับสองซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อกันดังแสดงในรูปที่ 2 [9] สมการแรงดันขั้วของแบตเตอรี่มีความสำพันธ์กับพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V_b = V_{OC} - I_b R_o - V_1 - V_2 \tag{1}$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันขั้วแบตเตอรี่, V

V_{OC} คือ แรงดันเปิดวงจรขึ้นอยู่กับสถานะประจุ (SoC) และอุณหภูมิ (T) ขั้วแบตเตอรี่, V

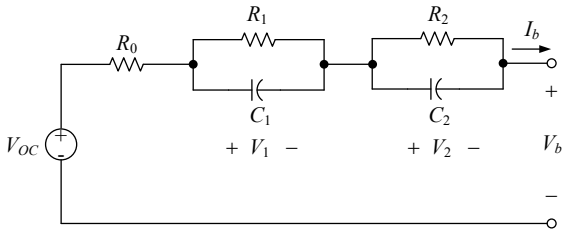
I_b คือ กระแสที่แบตเตอรี่จ่ายโหลด, A

R_o คือ ความต้านทานหลัก, Ω

V_1 คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน (R_1) และตัวเก็บประจุ (C_1) ขั้วโพลาไรเซชัน, V

V_2 คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน (R_2) และตัวเก็บประจุ (C_2) การแพร่, V

สมการแบบจำลองพฤติกรรมแรงดันตกคร่อมในวงจรขนานชุดที่หนึ่งสำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และชุดที่สองสำหรับการแพร่ความเข้มข้นไอออน แสดงในสมการที่ (2) - (3) ตามลำดับ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอันดับสองของแบตเตอรี่

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{I_b}{dt} - \frac{V_1}{R_1 C_1} \tag{2}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{I_b}{dt} - \frac{V_2}{R_2 C_2} \tag{3}$$

2.3 แบบจำลองทางความร้อน

พฤติกรรมทางความร้อนของแบตเตอรี่ถูกคำนวณด้วยแบบจำลองความร้อนพารามิเตอร์แบบก้อน โดยตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิภายในเซลล์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในการประเมินอุณหภูมิแกนกลางของเซลล์ [10]สมการของแบบจำลองสมดุลพลังงานความร้อนมีรายละเอียดนิพจน์ดังต่อไปนี้

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{conv} \tag{4}$$

เมื่อ m คือ มวลแบตเตอรี่, kg

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, J/(kg-K)

T คือ อุณหภูมิ, K

Q_{gen} คือ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่, J

Q_{conv} คือ พลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมโดยการพาความร้อน, J

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่ประกอบด้วยความร้อนเนื่องจากความต้านทาน และความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี [11] มีรายละเอียดดังสมการที่ (5)

$$Q_{gen} = I^2 R_0 + \frac{V_1^2}{R_1} + \frac{V_2^2}{R_2} + TI_b \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (5)$$

การคำนวณพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมโดยการพาความร้อนจะใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแบตเตอรี่ และอุณหภูมิแวดล้อมดังนี้ [12]

$$Q_{conv} = hA(T - T_{amb}) \quad (6)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/(m^2-K)

A คือ พื้นที่ของผิวสัมผัส, m^2

3. ผลการจำลองและการอภิปราย

การจำลองสถานการณ์พฤติกรรมพลวัตคู่ควบทางไฟฟ้า-ความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่โซลิดสเตตเปรียบเทียบกับเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะ และขีดจำกัดของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบพิจารณาพารามิเตอร์หลักสามชนิดคือ การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขั้ว การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในวงจรสมมูล และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแกนกลางเซลล์

การจำลองทดสอบภายใต้เงื่อนไขการคายประจุด้วยอัตรากระแสคงที่ 1C และ 2C โดยเริ่มต้นจากสถานะประจุเต็มที่ เพื่อให้เห็นภาพผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และความต้านทานภายใน การนำเสนอ และการอภิปรายผลจึงแบ่งตามสภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเริ่มต้นสามกรณีคือ ภาวะอุณหภูมิต่ำ (0°C) ภาวะอุณหภูมิห้อง (25°C) และภาวะอุณหภูมิสูง (45°C)

เพื่อให้แบบจำลองคู่ควบทางไฟฟ้า-ความร้อนบนแพลตฟอร์ม Python สามารถประมวลผลพฤติกรรมพลวัตได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลอันดับที่สองที่ภาวะอุณหภูมิห้อง 25°C และสถานะประจุ 100% รวมถึงเงื่อนไขของภาระโหลด และค่าขั้นเวลาในการคำนวณเชิงตัวเลขไว้ดังต่อไปนี้

1) ค่าพารามิเตอร์ภายในของเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และแบตเตอรี่โซลิดสเตต 2.5 Ah ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นแสดงในตารางที่ 1 [4]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เริ่มต้นของเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และแบตเตอรี่โซลิดสเตต

พารามิเตอร์	แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	แบตเตอรี่โซลิดสเตต
V_{OC}(V)	4.20	4.25
R_0 (Ω)	0.022	0.045
R_1 (Ω)	0.015	0.030
C_1 (F)	1,200	850
R_2 (Ω)	0.018	0.035
C_2 (F)	15,000	9,800

ภาระโหลดที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองคือภาระการคลายประจุด้วยกระแสคงที่ ซึ่งโปรแกรมคำนวณสัดส่วนการจ่ายกระแสแปรผันตามอัตราที่กำหนดในเงื่อนไขการทดสอบดังนี้

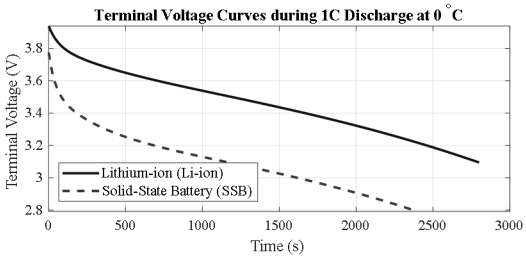
1) กรณีพิกัดกระแส 1C โปรแกรมกำหนดให้จ่ายกระแสคงที่ท่ากับ 2.5 A

2) กรณีพิกัดกระแส 2C โปรแกรมกำหนดให้จ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 5.0 A

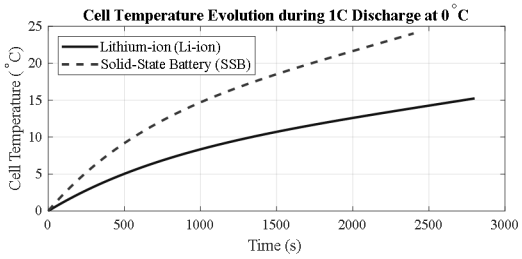
การจำลองจะคำนวณแรงดันไฟฟ้าขั้วแบบแปรผันตามเวลา โดยมีเกณฑ์การตัดการทำงานเพื่อความปลอดภัยทางเคมีไฟฟ้า โดยกำหนดจุดตัดแรงดันขั้นต่ำไว้ที่ 2.5 V สำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และ 2.7 V สำหรับแบตเตอรี่โซลิดสเตต ซึ่งหากแรงดันคำนวณลดลงมาถึงค่านี้ โปรแกรมจะยุติการจำลองทันที

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญในโดเมนไฟฟ้าและความร้อนควบคู่กัน กำหนดขอบเขตเวลาเชิงตัวเลขที่มีความละเอียดสูงเพื่อป้องกันการลู่เข้าที่ผิดพลาด ค่าขั้นเวลากำหนดไว้ที่ 1 วินาที ($\Delta t = 1$ s) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการจับพฤติกรรมพลวัตชั่วครู่ของวงจร RC และสอดคล้องกับอัตราการตอบสนองทางความร้อนของเซลล์ ระยะเวลาของการจำลองรวมแปรผันตามอัตรากระแส และความสามารถในการรักษาแรงดันของเซลล์จนกว่าจะถึงจุดตัดแรงดันขั้นต่ำ โดยขอบเขตเวลาสำหรับอัตรากระแส 1C คือ 3,300 - 3,600 s และอัตรากระแส 2C เท่ากับ 1,500 - 1,800 s

ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตทางความร้อนอุณหภูมิ 0°C 25°C และ 45°C แสดงในรูปที่ 3 – 5 ตามลำดับ

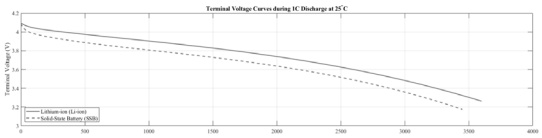


(ก) แรงดันขั้ว

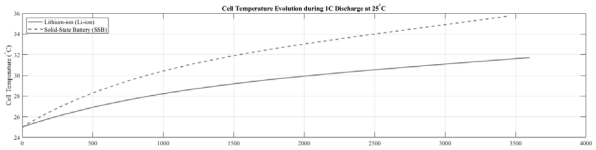


(ข) อุณหภูมิ

รูปที่ 3 ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 0°C

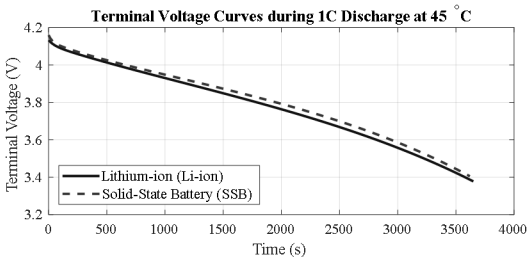


(ก) แรงดันขั้ว

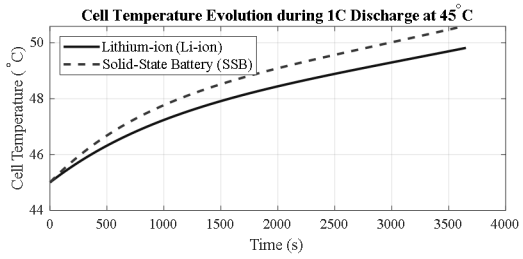


(ข) อุณหภูมิ

รูปที่ 4 ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 25°C



(ก) แรงดันขั้ว



(ข) อุณหภูมิ

รูปที่ 5 ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 45°C

สำหรับผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 0°C บ่งชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดทางกายภาพที่ร้ายแรงของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด พิจารณารูปที่ 3(ก) แรงดันขั้วที่วินาทีแรกของการจ่ายกระแส 1C แบตเตอรี่ทั้งสองชนิดเกิดปรากฏการณ์แรงดันตกฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แบตเตอรี่โซลิดสเตตที่แรงดันตกมากกว่าและเข้าสู่แรงดันจุดตัดขั้นต่ำ 2.7 V อย่างรวดเร็วที่เวลาประมาณ 2,400 วินาที ซึ่งเร็วกว่าลิเธียมไอออน 2,800 วินาที พฤติกรรมทางความร้อน และการเกิดความร้อนภายในในรูปที่ 3(ข) พบว่าอุณหภูมิแกนกลางของเซลล์ทั้งสองไต่ระดับสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและชันกว่ากรณีอุณหภูมิห้อง โดยอุณหภูมิของโซลิดสเตต 0°C ไปถึงค่าสูงสุดประมาณ 24°C ขณะที่ลิเธียมไอออนเพิ่มถึงอุณหภูมิประมาณ 15°

ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 25°C ในรูปที่ 4(ก) แบตเตอรี่โซลิดสเตตมีแรงดันตกคร่อมฉับพลัน และเชิงพลวัตมากกว่าลิเธียมไอออน เนื่องจากความต้านทานรอยต่อของแข็งสูงกว่า ส่งผลให้แบตเตอรี่โซลิดสเตตเข้าสู่แรงดันจุดตัดเร็วกว่าประมาณ 150 วินาที ในด้านพลวัตทางความร้อนในรูปที่ 4(ข) อุณหภูมิสุดท้ายของโซลิดสเตตเพิ่มขึ้นสูงถึง 36°C ขณะที่ลิเธียมไอออนเท่ากับ 32°C ซึ่งเป็นผลจากความร้อนของความต้านทานที่สูงกว่า และค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ต่ำกว่าตามหลักอุณหพลศาสตร์

ผลการจำลองพฤติกรรมพลวัตอุณหภูมิ 45°C ในรูปที่ 5(ก) บ่งชี้ว่าแบตเตอรี่โซลิดสเตตมีสมรรถนะใกล้เคียงลิเธียมไอออน โดยสามารถจ่ายประจุได้นานถึง 3,620 วินาที เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยกระตุ้นการนำไอออนข้ามรอยต่อของแข็งตามกฎอาร์เรเนียส ส่งผลให้ความต้านทานภายในและแรงดันตกคร่อมลดลงต่ำสุด ผลการจำลองด้านความร้อนในรูปที่ 5(ข) อุณหภูมิของทั้งสองเซลล์เพิ่มขึ้นเพียงประมาณ 5°C เนื่องจากความต้านทานที่ลดลงช่วยลดการสร้างความร้อนจูล แต่โซลิดสเตตแสดงจุดเด่นด้านความเสถียร

4. สรุปผล

แบบจำลองคู่ควบทางไฟฟ้า-ความร้อนของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และโซลิดสเตตขนาด 2.5 Ah ได้รับการยืนยันความแม่นยำ ที่ภาวะอุณหภูมิ 25°C เซลล์ลิเธียมไอออนสามารถจ่ายประจุได้อย่างมีเสถียรภาพ และมีแรงดันตกคร่อมต่ำกว่าโซลิดสเตตเล็กน้อย ขณะที่โซลิดสเตตมีอุณหภูมิสะสมตอนปลายสูงกว่าเนื่องจากความต้านทานโพลาไรเซชันภายในเนื้อสารที่สูงกว่าตามธรรมชาติ เมื่อพิจารณา

สภาวะอุณหภูมิสุดขั้วที่อุณหภูมิ 0°C เซลล์ทั้งสองเกิดแรงดันตกคร่อมรุนแรง โดยโซลิดสเตตเข้าสู่จุดตัดแรงดันเร็วกว่าลิเธียมไอออน 400 วินาที ความต้านทานสูงกระตุ้นให้เกิดความร้อนสะสมในตัวเองสูงถึง 24°C ซึ่งช่วยฟื้นฟูการนำไอออนในช่วงท้าย ที่อุณหภูมิ 45°C เซลล์โซลิดสเตตแสดงศักยภาพสูงสุดโดยจ่ายประจุได้นานถึง 3,620 วินาที ใกล้เคียงกับลิเธียมไอออน เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยเร่งการแพร่ของไอออนข้ามรอยต่อของแข็งตามกฎอาร์เรเนียส มีความปลอดภัยเหนือกว่าโดยไร้ความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะความร้อนวิกฤต การข้อค้นพบเชิงพลวัตคู่ควบนี้จึงเป็นฐานรากสำคัญในการพัฒนาอัลกอริทึมชดเชยพารามิเตอร์สำหรับระบบจัดการแบตเตอรี่ให้มีความแม่นยำ และปลอดภัยสูงสุดในการใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Wang, Q., et al., Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. Journal of Power Sources, 2012. 208: p. 210-224.

[2] Manthiram, A., X. Yu, and S. Wang, Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. Nature Reviews Materials, 2017. 2(4): p. 16103.

[3] Hu, X., S. Li, and H. Peng, A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. Journal of Power Sources, 2012. 198: p. 359-367.

[4] Wang, C., et al., Study in a novel lithium-ion semi-solid-state batteries: Specific equivalent circuit modeling and improved SOC estimation method. International Journal of Electrochemical Science, 2025. 20(6): p. 101001.

[5] Goodenough, J.B. and Y. Kim, Challenges for Rechargeable Li Batteries. Chemistry of Materials, 2010. 22(3): p. 587-603.

[6] Murata Manufacturing. Part 4: What are solid-state batteries? An expert explains the basics, how they differ from conventional batteries, and the possibility of practical application. 2022 [cited 2026 6/8/2026]; Available from: https://article.murata.com/en-us/article/basic-lithium-ion-battery-4.

[7] Ouyang, D., et al., A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures. Applied Sciences, 2019. 9(12): p. 2483.

[8] Janek, J. and W.G. Zeier, A solid future for battery development. Nature Energy, 2016. 1(9): p. 16141.

[9] Chen, M. and G.A. Rincon-Mora, Accurate electrical battery model capable of

predicting runtime and I-V performance. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. 21(2): p. 504-511.

[10] Bernardi, D., E. Pawlikowski, and J. Newman, A general energy balance for battery systems. Journal of the electrochemical society, 1985. 132(1): p. 5-12.

[11] Lin, X., et al., A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries. Journal of Power Sources, 2014. 257: p. 1-11.

[12] Ping, P., et al., Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method. Applied energy, 2014. 129: p. 261-273.

การพัฒนาระบบอ่านค่าเกจแบบเข็มสำหรับการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ

Development of an Analog Gauge Monitoring System for Voltage and Current Measurement Using Image Processing Techniques

ปัญญา หันตุลา[1,*], สนั่น จันทร์พรม[1], พุทธาวุฒิ ลีกุลธร[1] และ ธรรมกร ครองไตรภพ[1]

[1] สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: panya.ha@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดค่าเกจชนิดเข็มสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับกล้อง ESP32-CAM ที่มีต้นทุนต่ำ รองรับการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนหน้าปัดเกจวัดฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ได้บันทึกภาพหน้าปัดเกจแบบเวลาจริงผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังคอมพิวเตอร์แล้วทำการประมวลผลภาพด้วยเทคนิค HSV Threshold Segmentation ในการแยกส่วนที่เป็นเข็มวัด และใช้เทคนิค Canny Edge Detection เพื่อตรวจจับเส้นของเข็มวัดและคำนวณมุมของเข็มเพื่อแปลงเป็นค่าทางไฟฟ้า ข้อมูลที่ได้จะถูกแสดงผลเว็ปแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ จากผลการทดสอบกับเกจวัดกระแสไฟฟ้าขนาด 10 A พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.38% และทดสอบกับเกจวัดแรงดันไฟฟ้าช่วง 500 V มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.68% ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถอ่านค่าเกจแบบเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่มีการประยุกต์ใช้ Deep Learning (CNN) นั่นแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้เพียงพอสำหรับการใช้งานด้านการเฝ้าติดตามค่าทางไฟฟ้าในระบบจริง

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพ, เกจแบบเข็ม, ESP32-CAM, OpenCV, ระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์

Abstract

This research presented the development of an analog gauge monitoring system for measuring electrical voltage and current. The system applied image processing techniques to extract and read voltage and current values. An ESP32-CAM module, a low-cost microcontroller with an integrated camera, was used to capture images of the gauge. In this study, images of the gauge dial were captured via a Wi-Fi network to a computer for image processing. The image processing procedure used HSV-based threshold segmentation to isolate the needle region. Canny Edge Detection techniques were applied to detect a needle line and estimate its angle. Voltage and current value will be converted from angle value of needle as show in a gauge. The data from a processing will be shown with visualize graph and label display through a real-time web application dashboard. Experimental results using a 10 ammeter that showed that the average error was 2.38%. In addition, testing with a 500 V voltmeter showed an average error of 3.86%. The results demonstrated that the developed system is effective to read analog needle gauges and comparable to other research that applied Deep Learning techniques (CNN).

Keywords: Image Processing , Analog Gauge , ESP32-CAM, OpenCV, Real-time Detection.

1. บทนำ

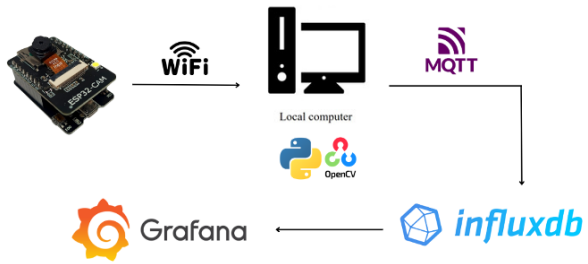
ในปัจจุบันการตรวจสอบสถานะการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะการอ่านค่าจากอุปกรณ์วัดแบบเข็ม เช่น เกจวัดแรงดันตู้ควบคุมไฟฟ้า ถือเป็นส่วนสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากจำเป็นต้องบันทึกข้อมูลด้วยตนเองจากการอ่านหน้าปัดของเกจวัด วิธีการดังกล่าวส่งผลให้เกิดข้อจำกัดหลายประการ อาทิเช่น สิ้นเปลืองเวลาในการปฏิบัติงานของพนักงาน ความไม่ต่อเนื่องของข้อมูล และความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ (Human Error) [1]-[2] ด้วยเหตุนี้ หลายงานวิจัยได้มุ่งเน้นการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) เพื่ออ่านค่าจากเกจแบบเข็มด้วยการใช้เทคนิคตรวจจับเส้น (Edge Detection) เพื่อระบุตำแหน่งของเข็มวัด [3]-[5] รวมถึงการประยุกต์ใช้ Deep Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการรู้จำลักษณะของเกจและเข็มวัด [6]-[7] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการประมาณมุมของเข็มและแปลงเป็นค่าทางกายภาพโดยใช้แบบจำลองเชิงเรขาคณิต [8] แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้านี้จะสามารถอ่านค่าเกจได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังพบข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความซับซ้อนของโมเดลที่ต้องใช้ทรัพยากรประมวลผลสูง โดยเฉพาะในระบบฝังตัว (Embedded Systems) ที่มีข้อจำกัดด้านหน่วยความจำและพลังงาน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาอัลกอริทึมที่มีความเรียบง่าย ใช้ทรัพยากรต่ำ สามารถนำไปใช้งานจริงได้ในระบบต้นทุนต่ำ โดยการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับอ่านค่าเกจแบบเข็มโดยใช้เทคนิค Image Processing ที่ไม่ต้องพึ่งพา Deep Learning ระบบที่พัฒนาออกแบบให้ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ ESP32-CAM เพื่อทำการตรวจจับตำแหน่งและมุมของเข็มวัดและแปลงผลลัพธ์เป็นค่าทางกายภาพ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า พร้อมส่งค่าที่อ่านได้ไปแสดงผลยัง Web Dashboard แบบเรียลไทม์

2. แนวคิดและการออกแบบ

2.1 โครงสร้างระบบ (System Architecture)

กระบวนการทำงานของระบบตรวจวัดค่าเกจชนิดเข็มสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะใช้กล้อง ESP32-CAM เป็นอุปกรณ์หลักในการบันทึกภาพหน้าปัดเกจแบบเข็ม ทำการส่งข้อมูลภาพแบบเวลาจริง (Real-time) ผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN: Wi-Fi) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลกลาง เพื่ออ่านค่าเกจวัดโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา Python ร่วมกับไลบรารี OpenCV ดำเนินการตรวจจับตำแหน่งของเข็มวัดและคำนวณมุมของเข็ม จากนั้นแปลงค่ามุมดังกล่าวเป็นค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ตามช่วงสเกลของเกจที่ต้องการ ค่าที่ได้จะถูกส่งผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังเซิร์ฟเวอร์เพื่อจัดเก็บลงในฐานข้อมูล Influx DB ซึ่งเป็นฐานข้อมูลแบบ NoSQL ออกแบบมาสำหรับจัดเก็บข้อมูลเชิงเวลา (Time-Series Data) และแสดงผลข้อมูลที่จัดเก็บผ่าน Web Application (Grafana Platform)



รูปที่ 1 ภาพรวมแนวคิดและองค์ประกอบของระบบ

2.2. อัลกอริทึมตรวจจับและประมาณค่าเกจวัด

อัลกอริทึมสำหรับตรวจจับและประมาณค่าเกจวัดเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าแบ่งกระบวนการออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การรับภาพ , การประมวลผลภาพ, การตรวจจับเข็ม และการประมาณค่า ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการดึงข้อมูลภาพจากกล้อง ESP32-CAM ผ่านโปรโตคอล HTTP ผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) จากนั้นภาพจะถูกตัดเฉพาะบริเวณที่สนใจ ซึ่งเป็นตำแหน่งของหน้าปัดเกจที่ต้องการอ่านค่า

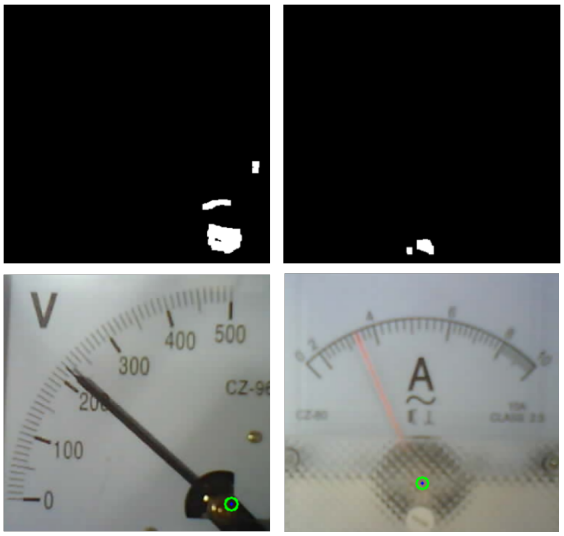


(ก) เกจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) เกจวัดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 2 ภาพตัวอย่างของเกจวัดแบบเข็ม

การตัดภาพช่วยลดภาระการคำนวณและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอก ภาพที่ได้จากกล้อง ESP32-CAM จะถูกแปลงให้เป็น HSV และใช้เทคนิค Threshold Segmentation เพื่อสร้าง Binary Mask สำหรับการสกัด (Extract) จุดที่คาดว่าจะเป็นตำแหน่งจุดหมุนของเกจ (Pivot)

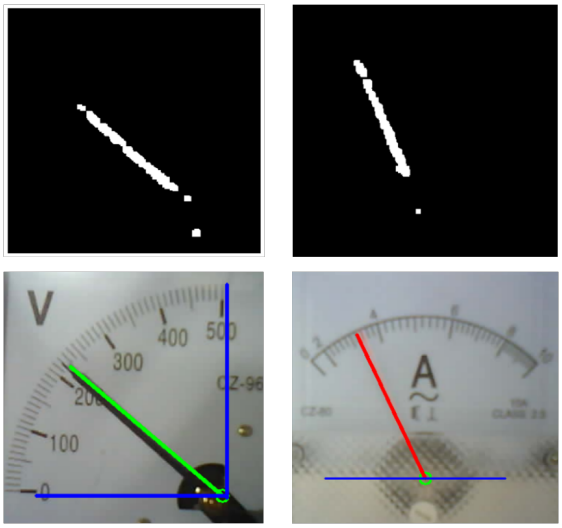
การสกัดข้อมูลลักษณะของเข็มวัด (Extraction) ทำได้โดยกำหนดช่วงของค่า Hue and Saturation และ Value ที่สอดคล้องกับสีของเข็มและใช้ Morphological Operations เพื่อเพิ่มความต่อเนื่องของวัตถุและลดสัญญาณรบกวน การหาจุดหมุนของเกจจะใช้ Canny Edge Detection เพื่อดึงคุณลักษณะของขอบในรูปภาพ ดังแสดงดังรูป



(ก) เกจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) เกจวัดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3 การสกัดบริเวณตำแหน่งจุดหมุนของเกจ

การตรวจจับและแยกตำแหน่งของเส้นตรงของเข็มใช้เทคนิค Hough Line Transform เพื่อค้นหาเส้นตรงที่เป็นไปได้ของเข็มวัด โดยพิจารณาจากจำนวน Pixel ความยาวขั้นต่ำของเส้นที่เป็นไปได้ หลังจากได้เส้นเข็มที่เหมาะสม ระบบจะพิจารณาตำแหน่งของปลายเข็ม โดยพิจารณาจากจุดปลายของเส้นที่อยู่ไกลจากจุดหมุนของเกจ



(ก) เกจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) เกจวัดกระแสไฟฟ้า

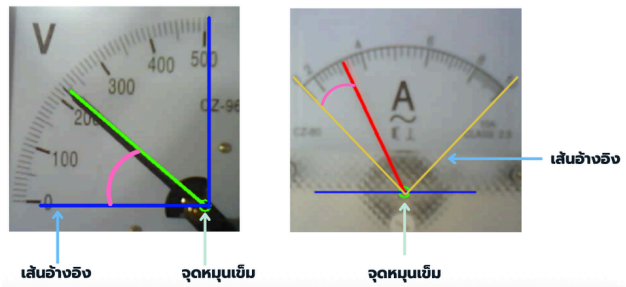
รูปที่ 4 การตรวจจับและแยกตำแหน่งของเส้นตรงของตำแหน่งเข็ม

การคำนวณมุมของเข็มวัดจะวิเคราะห์เชิงเรขาคณิตของเวกเตอร์ที่ลากจากจุดหมุนของเกจไปยังปลายเข็ม ดังนั้นมุมของเข็มคำนวณจากเวกเตอร์ระหว่างจุดหมุนและปลายเข็ม โดยใช้ฟังก์ชันดังสมการดังนี้

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_c - y_t}{x_t - x_c}\right) \qquad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ (x_c, y_c) คือ จุดศูนย์กลางของเกจ

(x_t, y_t) คือ ตำแหน่งปลายเข็ม



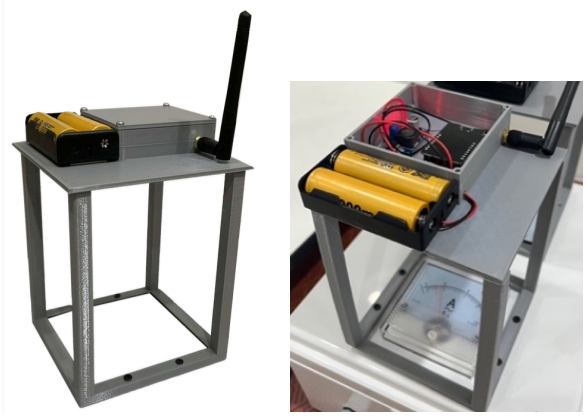
(ก) เกจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) เกจวัดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5 ตำแหน่งของมุมของเข็มวัดและเส้นอ้างอิง

ในการแปลงค่ามุมของเข็มให้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกับสเกลจริงของเกจจำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูล เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมุมและค่าทางกายภาพ ซึ่งค่ามุมที่ได้จะถูกแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธี Interpolation ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมและรองรับสเกลของเกจบางชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถเพิ่มความแม่นยำของการวัดได้

3. การออกแบบอุปกรณ์และการติดตั้ง

อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดค่าจากเกจชนิดเข็มโดยใช้กล้อง ESP32-CAM แสดงดังรูปที่ 6 อุปกรณ์ถูกออกแบบให้สามารถติดตั้งบนเกจวัดแบบเข็มได้โดยตรง พร้อมทั้งกำหนดตำแหน่งและมุมของกล้องให้สามารถมองเห็นหน้าปัดของเกจได้อย่างชัดเจน อุปกรณ์ทำงานโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายไร้สาย ทำให้สามารถส่งภาพจากหน้าปัดเกจไปยังระบบประมวลผลได้แบบเรียลไทม์ เพิ่มความสะดวกในการติดตั้งและสามารถขยายจำนวนจุดตรวจวัดได้อย่างยืดหยุ่นตามความต้องการของระบบตรวจวัด

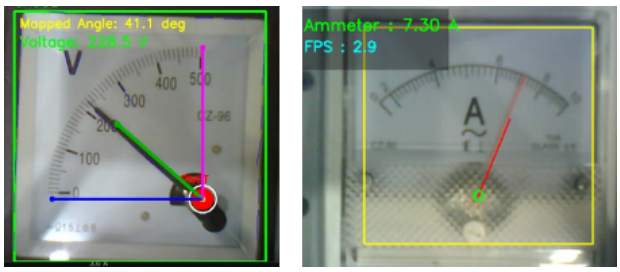


รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเกจแบบเข็มด้วยกล้อง ESP32-CAM

4. ผลการทดสอบงานวิจัย

4.1 ผลการทดสอบตรวจวัดเกจแบบเข็ม

การทดสอบในงานวิจัยนี้จะจำลองการเก็บข้อมูลภาพเกจแบบเข็มจำนวน 2 แบบ ได้แก่ เกจวัดแรงดันไฟฟ้า ขนาด 0-500 โวลต์ (V) ที่มีสเกลแบบเป็นเชิงเส้น (linear) และเกจวัดกระแสไฟฟ้า ขนาด 10 แอมแปร์ (A) ที่มีสเกลแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) และประเมินผลโดยใช้ค่า Mean Absolute Error (MAE) เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่อ่านได้จากระบบและค่าจริงจากเครื่องมือวัด พร้อมกันนี้จะมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้เทียบกับวิธีการของงานวิจัยอื่นๆ อาทิเช่น เทคนิคตรวจจับเส้น (Edge Detection) เพื่อระบุตำแหน่งของเข็มวัด รวมถึงการประยุกต์ใช้ Deep Learning จากผลการทดลองพบว่าที่กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 7.3 A ทดสอบวัดเกจแบบเข็มจำนวน 10 ครั้ง ค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้คือ 7.18 A ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.16 A มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.62% ในลักษณะเดียวกันเมื่อทดสอบอ่านค่าเกจวัดกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 4.2 A พบว่าค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้คือ 4.30 A ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 A และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.38% ดังแสดงในตารางที่ 2



(ก) เกจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) เกจวัดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 7 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับและประมาณค่าเกจวัดไฟฟ้า

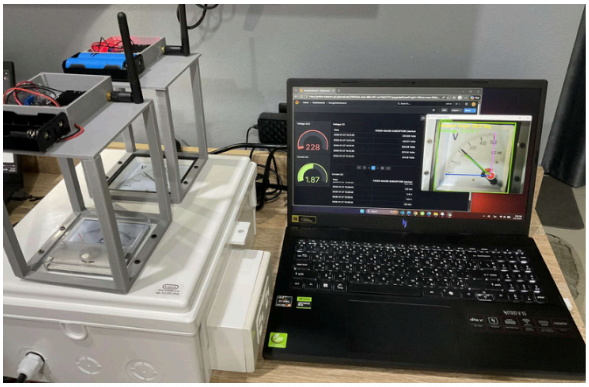
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 7.3 A

ลำดับที่	ค่ากระแสจริง (A)	ค่ากระแสที่อ่านได้ (A)	Absolute Error (A)	Absolute Error (%)
1	7.3	7.14	0.16	2.19%
2	7.3	7.13	0.17	2.33%
3	7.3	7.24	0.06	0.82%
4	7.3	7.17	0.13	1.78%
5	7.3	7.31	0.01	0.14%
6	7.3	7.11	0.19	2.60%
7	7.3	7.09	0.21	2.88%
8	7.3	7.27	0.03	0.41%
9	7.3	7.15	0.15	2.05%
10	7.3	7.23	0.07	0.96%
เฉลี่ย	7.3	7.184	0.118	1.62%

ผลการทดสอบอ่านค่าเกจวัดแรงดันไฟฟ้าพบว่า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเกจวัด สามารถอ่านค่าได้ประมาณ 220 V และเมื่อทดสอบด้วยอัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดเกจแบบเข็มจำนวน 10 ครั้งพบว่าสามารถอ่านค่าได้เฉลี่ย 228.5 V จะได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.5 V และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.86% จากผลการทดสอบอ่านค่าเกจวัดแรงดันไฟฟ้าชนิดเข็มมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย 97.13% มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.87% ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ [6] ที่มีการประยุกต์ใช้ Deep Learning (CNN) ที่มีความถูกต้องเฉลี่ย 95% นั่นแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ที่มีความเรียบง่าย ใช้ทรัพยากรต่ำ ให้ค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้ Deep Learning นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบเกจวัดกระแสไฟฟ้าที่มีสเกลแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.38% นั่นแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้สามารถผ่านค่าเกจที่มีสเกลแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard

ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเกจวัดแบบแบบเรียลไทม์จะถูกส่งไปจัดเก็บลงในฐานข้อมูล Influx DB แล้วนำข้อมูลที่จัดเก็บไว้จะถูกนำมาแสดงผ่านระบบ Grafana Dashboard ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟและค่าปัจจุบันแบบเรียลไทม์ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามตรวจสอบ และวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 การแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard

5. สรุป

ในบทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดค่าเกจชนิดเข็มสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยใช้กล้อง ESP32-CAM ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยกล้องทำหน้าที่บันทึกภาพหน้าปัดเกจและส่งภาพแบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังคอมพิวเตอร์ที่ใช้ภาษา Python และไลบรารี OpenCV เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งเข็มและคำนวณมุม จากนั้นแปลงเป็นค่าทางไฟฟ้าตามสเกลของเกจ ข้อมูลที่ได้ถูกส่งผ่าน MQTT ไปจัดเก็บในฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลผ่านแดชบอร์ดของ Grafana ผลการทดลองกับเกจวัดกระแสขนาด 10 A พบว่าที่กระแส 7.3 A ระบบอ่านค่าเฉลี่ยได้ 7.18 A มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.16 A หรือ 1.62% ส่วนที่กระแส 4.2 A อ่านค่าเฉลี่ยได้ 4.30 A มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.10 A หรือ 2.38% สำหรับเกจวัดแรงดันขนาด 0–500 V เมื่อแรงดันจริงประมาณ 220 V ระบบอ่านค่าเฉลี่ยได้ 228.5 V มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.31 V หรือ 2.87% ตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถอ่านค่าเกจแบบเข็มได้อย่างต่อเนื่องและมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากการวัดจริง และอัลกอริทึมที่พัฒนามีความถูกต้องใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น การประยุกต์ใช้ Deep Learning (CNN) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่ออ่านค่ามิเตอร์แบบเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ที่มีความเรียบง่าย ใช้ทรัพยากรต่ำ ลดความซับซ้อนของอัลกอริทึม ไม่ต้องใช้ทรัพยากรในการประมวลผลสูงและใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่เป็นระบบฝังตัว (Embedded Systems)

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานนครราชสีมา ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่จนบรรลุผลและประสบความสำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Kumar and B. Singh, “Manual vs Automated Industrial Monitoring Systems: A Comparative Study,” International Journal of Industrial Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 45–52, 2020.

[2] Wu, Chuan-Chun, et al. "Automatic recognition of traditional analog gauge and intelligent management by IOT method." Proceedings of the 8 th Multidisciplinary International Social Networks Conference. 2021.

[3] Lee, D. W., Kim, S. Jin., Han, Y. S., Lee, S.W., Jeon, S. B. and Seo, D. (2020). Automatic Reading Analog gauge with Handheld device, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA.

[4] Peixoto, João, et al. "End-to-end solution for analog gauge monitoring using computer vision in an iot platform." Sensors 23.24 (2023): 9858.

[5] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Springer, 2022.

[6] Peixoto, João, et al. "Development of an analog gauge reading solution based on computer vision and deep learning for an iot application." Telecom. Vol. 3. No. 4. MDPI, 2022.

[7] Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton. "ImageNet classification with deep convolutional neural networks." Communications of the ACM 60.6 (2017): 84-90.

[8] Prasad, SJ Suji, et al. "Design and Development of Novel Computer Vision-Based Automatic Calibration System for Analog Dial Pressure Gauge." Smart and Sustainable Manufacturing Systems 6.1 (2022):

การประสานงานที่เหมาะสมที่สุดตามเมตาฮิวริสติกของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง ภายใต้ข้อจำกัด CTI ในระบบ IEEE 14-Bus

Metaheuristic-Based Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Under CTI Constraints in the IEEE 14-Bus System

อดิศร พลเสนา[1], วิทวัส อุปพงษ์[2], ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[2], พงษ์ศักดิ์ พิลาล้ำ[3], ยุทธณา คงจีน[2,*], นพณัฐ จิตกรียาน[2], กิตติวงศ์ สุธรรมโน[1], วุฒิชัย สง่างาม[1], กฤติเดช บัวใหญ่[2] และ กาณฑ์ เกิดชื่น[2]

[1] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. นครราชสีมา 3000
[2] หน่วยวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 3000
[3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จังหวัดนครราชสีมา 3 หมู่ 2 ถ.มิตรภาพ ต.บ้านใหม่ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 3000

*ผู้ติดต่อ: yuttana.ko@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 044-233-000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกรอบการประสานงานของรีเลย์กระแสเกินที่เหมาะสมที่สุดแบบมีทิศทางในระบบ IEEE 14 บัส โดยวิเคราะห์กระแสลัดวงจรสามเฟสด้วยวิธีเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ และกำหนดปัญหาเป็นการหาค่าเหมาะสมเพื่อมุ่งลดเวลาการทำงานรวมของรีเลย์หลักภายใต้ข้อจำกัดช่วงเวลาประสานงาน (CTI) ในช่วง 0.30–1.00 วินาที ด้วยคุณลักษณะเวลา-กระแสแบบผกผันเวลามาตรฐานของ IEC การวิเคราะห์ถูกเปรียบเทียบระหว่างวิธีวนซ้ำแบบดั้งเดิม อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) และการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยฝูงอนุภาค (PSO) ผลการทดสอบพบว่า PSO ให้ผลดีที่สุดที่ 1.2229 วินาที ลดเวลาได้ร้อยละ 0.97 การใช้ฟังก์ชันลงโทษสำหรับขอบเขตบนของ CTI ช่วยป้องกันการปรับตั้งค่าเวลาของรีเลย์กระแสเกินที่สูงเกินความจำเป็น ส่งผลให้ระบบป้องกันตอบสนองได้อย่างรวดเร็วขึ้นโดยยังคงรักษาความเชื่อถือได้ของการประสานรีเลย์อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์โครงข่ายระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน

คำสำคัญ: การประสานงานรีเลย์กระแสเกิน, การเพิ่มประสิทธิภาพฝูงอนุภาค, การหาค่าที่เหมาะสม, ช่วงเวลาการประสานงาน, วิธีเมทริกซ์อิมพีแดนซ์, อัลกอริทึมทางพันธุกรรม

Abstract

This paper presents an optimal coordination framework for directional overcurrent relays in the IEEE 14-bus system. Three-phase short-circuit currents are analyzed using the bus impedance matrix method and define the problem as an appropriate value to reduce the total operating time of the main relay under the coordination time interval (CTI) constraints of 0.30–1.00 seconds, based on the IEC standard inverse time-current characteristics. The analysis was compared between traditional iterative

methods Genetic Algorithm (GA) and Particle Mass Optimization (PSO). The simulation results show that PSO achieves the best objective function value of 1.2229 seconds, yielding a 0.97% reduction in total operating time. The incorporation of a penalty function for the upper bound of CTI prevents unnecessarily high time dial settings for backup relays, resulting in faster protection system response while maintaining reliable relay coordination for the analysis of complex meshed power networks.

Keywords: Overcurrent relay coordination, particle swarm optimization, optimization, coordination time interval, Z-Bus matrix method, genetic algorithm.

1. บทนำ

การป้องกันกระแสเกินถือเป็นกลยุทธ์การป้องกันพื้นฐานที่ได้รับการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งรีเลย์กระแสเกินแบบกำหนดทิศทาง (Directional Overcurrent Relay, DOCR) ซึ่งสามารถจำแนกทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากหลายแหล่งได้อย่างแม่นยำ [1] วัตถุประสงค์หลักของการประสานงานรีเลย์คือการรับประกันว่ารีเลย์หลักทำงานก่อน และรีเลย์สำรองทำงานภายหลังด้วยช่วงเวลาประสานงาน (Coordination Time Interval, CTI) ที่เพียงพอ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่กำหนดข้อจำกัด CTI เพียงขอบเขตล่างโดยปราศจากขอบเขตบน ส่งผลให้รีเลย์สำรองได้รับการตั้งค่า Time Dial Setting (TDS) สูงเกินความจำเป็น อีกทั้งข้อมูลกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่มิได้จัดทำจากการวิเคราะห์บัสเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ (Z-Bus) อย่างเป็นระบบ ซึ่งอาจทำให้ผลลัพธ์ไม่สะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของระบบโครงข่าย

แนวทางในการแก้ปัญหาการประสานงาน DOCR อาศัยโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) [2] ซึ่งมีข้อจำกัดในเครือข่ายที่มีความซับซ้อนสูง วิธีการเมตาฮิวริสติกจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดยอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) แสดงสมรรถนะเหนือกว่า LP [3] และ การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าด้วยความซับซ้อนของการคำนวณที่ต่ำกว่า งานวิจัยต่อมาพัฒนาแนวทางแบบไฮบริด ได้แก่ ไฮบริด PSO [4], [5] การควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัว [6] Elite Marine Predators Algorithm (EMPA) [7] อัลกอริทึมหิ่งห้อย-พันธุกรรม [3] และการประเมินเปรียบเทียบอัลกอริทึมขั้นสูงอย่างเป็นระบบ [8] นอกจากนี้ Bayazidi et al. [2] ยังชี้ให้เห็นว่าการละเลยความไม่ต่อเนื่องของการตั้งค่ารีเลย์ดิจิทัลอาจนำไปสู่การประสานงานที่ผิดพลาดในทางปฏิบัติ

บทความนี้นำเสนอการกำหนดปัญหาการประสานงาน DOCR รูปแบบใหม่ โดยจัดทำข้อมูลกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Z-Bus อย่างเป็นระบบ พร้อมบังคับใช้ฟังก์ชันปรับโทษ CTI แบบสองด้านพร้อมกัน (0.30–1.00 วินาที) เพื่อป้องกันการกำหนดค่า TDS ที่สูงเกินความจำเป็น ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่มักกำหนดเฉพาะ CTI ขั้นต่ำ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้วยสามวิธี ได้แก่ อัลกอริทึมการวนซ้ำแบบดั้งเดิม อัลกอริทึมทางพันธุกรรม และการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยฝูงอนุภาค

2. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง (Directional overcurrent relays Mathematical Modelling)

บทความนี้นำเสนอหลักการที่เกี่ยวในเงื่อนไขของรีเลย์เพื่อนำไปใช้ในการประสานการทำงานด้วยเงื่อนไขเวลาที่เหมาะสมดังนี้

2.1 คุณลักษณะเวลา-กระแส (Time–Current Characteristic)

สมการเวลาทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางตามลักษณะกราฟผกผันมาตรฐาน IEC 60255-151 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$t_r = \frac{K \cdot TDS}{M^{\alpha} - 1} \quad (1)$$

เมื่อ t_r คือ เวลาการทำงานของรีเลย์ (วินาที)

TDS คือ ค่าปรับตั้งเวลาของรีเลย์กระแสเกิน (Over current relay)

M คือ อัตราส่วนของกระแสลัดวงจรต่อกระแสเริ่มทำงาน (Pickup current)

K, α คือ ค่าเส้นโค้งผกผันมาตรฐาน IEC (The IEC standard inverse curve) กำหนดที่ 0.14 และ 0.02 ตามลำดับ

2.2 เงื่อนไขการประสานสัมพันธ์ (Coordination Constraint)

สมการสำหรับคู่รีเลย์หลัก-สำรองแต่ละคู่ (p,b) ที่เกี่ยวข้องกับสถานการณ์ความผิดปกติ (f) และระยะขอบการประสานงานถูกกำหนดดังนี้

$$\Delta t_{p,b,f} = t_b\left(I_f^{(b)}\right) - t_p\left(I_f^{(p)}\right) \quad (2)$$

$$\Delta t_{p,b,f} \geq CTI_{\min} \quad (3)$$

เมื่อ $I_f^{(r)}$ คือ กระแสที่ถูกเห็นในขณะเกิดฟอลต์

$CTI_{\min}$ คือ ส่วนต่างเวลาการทำงานต่ำสุดระหว่างรีเลย์สำรองกับรีเลย์หลัก

ในขณะที่การศึกษานี้พยายามบังคับให้ขอบเขตส่วนต่างเวลาการทำงานระหว่างรีเลย์สำรองกับรีเลย์หลักเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่ารีเลย์สำรองสามารถตอบสนองต่อเวลาการทำงานไม่ยืดเยื้อโดยไม่จำเป็นโดยกำหนด $CTI_{\max}$ และ $CTI_{\min}$ ที่ 0.03 และ 1.00 ตามลำดับ

2.3 การกำหนดปัญหาค่าเหมาะสม (Optimization Problem Formulation)

ในการศึกษาปัญหาการประสานการทำงาน DOCR คือการสร้างเวลาประสานการทำงานของรีเลย์สำรองน้อยที่สุดภายใต้ข้อจำกัดส่วนต่างเวลาการทำงานระหว่างรีเลย์สำรองกับรีเลย์หลัก มีเงื่อนไขดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function):

$$\min_{TDS} F = \sum_{(f,p,b)\in\mathcal{P}} t_p\left(I_f^{(p)}, TDS_p\right) \quad (4)$$

ข้อจำกัด (Constraints):

$$CTI_{\min} \leq \Delta t_{p,b,f} \leq CTI_{\max}, \quad (f,p,b) \in \mathcal{P} \quad (5)$$

$$TDS_{\min} \leq TDS_r \leq TDS_{\max}, \quad r = 1,\ldots,n_R \quad (6)$$

ฟังก์ชันปรับโทษ (Penalty Function):

$$F_{\text{total}} = F + \lambda \sum_{(f,p,b)\in\mathcal{P}} \left[\max\left(0, CTI_{\min} - \Delta t\right)^2 + \max\left(0, \Delta t - CTI_{\max}\right)^2\right] \quad (7)$$

เมื่อ $\mathcal{P}$ คือ เซตของคู่รีเลย์หลัก-สำรอง

n_R คือ จำนวนรีเลย์ที่พิจารณา

TDS คือ การปรับตั้งค่าเวลาของรีเลย์กระแสเกิน (Time Dial Setting) กำหนดค่า 0.05 ถึง 1.00

λ คือ ตัวประกอบฟังก์ชันปรับโทษที่ 10^7

2.4 คุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT)

การกำหนดเงื่อนไขระดับความแม่นยำนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามมาตรฐาน IEC 60044-1 คือ

ระดับความแม่นยำ และ IEC 61869-2 คือปัจจัยขีดจำกัดความแม่นยำซึ่งจะมีรูปแบบ ดังนี้

$$Accuracy = \frac{P}{M} \times ALF \quad (8)$$

เมื่อ $Accuracy$ คือ ส่วนประกอบค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส

P/M คือ ระดับการป้องกัน (Protection class) หรือ ระดับการวัด (Measurement class)

ALF คือ ปัจจัยจำกัดความแม่นยำ (Accuracy Limit Factor) เป็นตัวคูณสูงสุดของกระแสปฐมภูมิที่กำหนดซึ่งยังคงรับประกันข้อผิดพลาดที่ 5% สามารถเลือกจาก IEC Class ได้ดังเช่น 5, 10, 15, 20

ประเด็นแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสจะเข้าสู่สภาวะการอิ่มตัว (Saturation) ส่งผลให้กระแสด้านทุติยภูมิไม่สามารถแปรผันตามกระแสด้านปฐมภูมิได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า ALF แล้วเลือกค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานดังนี้

$$ALF = \frac{I_{\text{fault,max}}}{I_{CT,\text{primary rating}}} \quad (9)$$

ค่ากระแสปิ๊กอัพของรีเลย์ในหน่วยแอมแปร์ด้านปฐมภูมิ สามารถคำนวณได้จากค่ากระแสปิ๊กอัพที่ตั้งไว้ทางด้านทุติยภูมิของรีเลย์ร่วมกับอัตราส่วนของ CT ในขณะที่ ตัวคูณค่ากระแสปิ๊กอัพของรีเลย์ (Plug setting multiplier: PSM) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างกระแสฟอลต์ด้านปฐมภูมิกับค่ากระแสปิ๊กอัพด้านปฐมภูมิดังนี้:

$$I_{\text{pickup,primary}} = I_{\text{p,sec}} \times CTR \quad (10)$$

$$CTR = I_{CT,\text{primary}} / I_{CT,\text{secondary}} \quad (11)$$

$$M = I_{fault,\text{primary}} / I_{pickup,\text{primary}} \quad (12)$$

เมื่อ CTR คือ อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส

M คือ ตัวคูณค่ากระแสปิ๊กอัพรีเลย์

อย่างไรก็ตาม ขอบเขตในการตั้งค่าในระบบที่พิกัดโหลดไม่มากกว่ากระแสฟอลต์ตั้งค่าตามสามการที่ (13) แต่ในระบบที่ทำการศึกษาได้เลือกโดยกำหนดเพื่อให้ปัญหาเป็นโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) พิจารณาค่า $M_{\min}$>1 เพื่อให้รีเลย์ทำงาน การตั้งค่าค่ากระแสปิ๊กอัพรีเลย์ถูกเลือกเพื่อให้เป็นไปตามข้อจำกัดในการปฏิบัติงานที่เสนอโดย Bayazidi et al. [2]

$$I_{\text{load, max}} \le I_{pick\ up\ primary} \le I_{f,\min} \quad (13)$$

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก

2.5.1 วิธีการวนซ้ำแบบดั้งเดิม (Classical Iterative Method)

กำหนดค่าเริ่มต้นของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง ($TDS_{\min}$) คือ 0.05 จากนั้นปรับเพิ่มค่า TDS ของรีเลย์สำรองแบบวนซ้ำ (δ) ด้วยขนาดขั้นคงที่ 0.005 เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขรีเลย์สำรองต้องทำงานช้ากว่ารีเลย์หลักตามช่วงเวลา $CTI_{\min}$ ที่กำหนด กำหนดจำนวนรอบการคำนวณที่ 5,000 รอบ เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดของระบบ

2.5.2 วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

ใช้การเข้ารหัสแบบค่าจริงโดยโครโมโซมแต่ละตัวแทนเวกเตอร์ของค่า TDS สำหรับรีเลย์ (n_R) จำนวน 8 ตัว และค่าของแต่ละยีนถูกจำกัดให้อยู่ในช่วงของ $TDS_{\min,\max}$ กำหนดขนาดประชากร 100 โครโมโซม คัดเลือกแบบทัวร์นาเมนต์ การครอสโอเวอร์หลายจุด (Multi-point crossover) และการกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียนที่ปรับค่าได้ (Adaptive gaussian mutation) และโครโมโซมชั้นยอดที่ดีที่สุด 10 อันดับแรกจะถูกส่งต่อไปยังรุ่นถัดไปโดยไม่

เปลี่ยนแปลง เพื่อเพิ่มโอกาสในการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมของ TDS

2.5.3 วิธีการฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

กลไกจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพื้นที่คำตอบ โดยกำหนดที่ 100 อนุภาค รอบการคำนวณที่ 300 รอบ อนุภาคแต่ละตัวแทนชุดค่าของ TDS สำหรับรีเลย์ที่พิจารณา การปรับปรุงความเร็วของอนุภาคคำนวณจากค่าน้ำหนักความเฉื่อย (ω) ที่ 1.0 ค่าคงที่เร่งความเร็ว c_1 และ c_2 ที่ 2.0 ร่วมกับเวกเตอร์สุ่ม $\mathbf{r}_1$ และ $\mathbf{r}_2$ ซึ่งมีการแจกแจงสม่ำเสมอในช่วง [0,1] โดยอนุภาคจะปรับตำแหน่งจากประสบการณ์ที่ดีที่สุดของตนเอง $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$ และคำตอบที่ดีที่สุดของกลุ่ม $\mathbf{g}^{\text{best}}$ เพื่อค้นหาค่า TDS ดังสมการการปรับปรุงความเร็วดังนี้

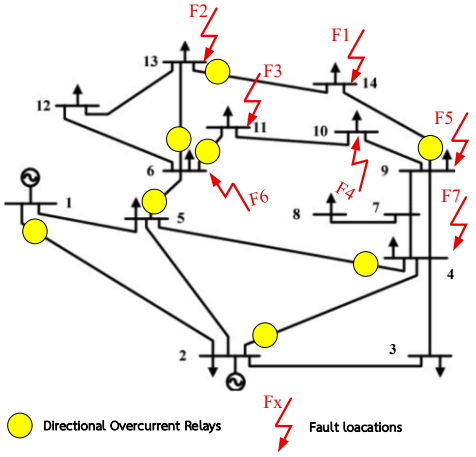
$$\mathbf{v}_i^{t+1} = w^t \mathbf{v}_i^t + c_1\mathbf{r}_1 \odot \left(\mathbf{p}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^t\right) + c_2\mathbf{r}_2 \odot \left(\mathbf{g}^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^t\right) \quad (14)$$

3. วิธีการดำเนินงาน

บทความนี้ใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ที่เป็นระบบทดสอบแบบโครงข่าย มีแหล่งจ่ายและเส้นทางกระแสฟอลต์หลายทิศทาง แสดงถึงความซับซ้อนเหมาะสมสำหรับตรวจสอบการประสานงานรีเลย์ โดยพิจารณาสายส่งที่สำคัญสำหรับกำหนดตำแหน่งรีเลย์ดังรูปที่ 1 และข้อมูลกระแสฟอลต์จากการจำลองดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม กระแสฟอลต์จากการคำนวณด้วยระบบทดสอบมาตรฐานเมื่อพิจารณาแล้วพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับกระแสโหลด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการจำลอง (ในระบบไฟฟ้าโครงข่ายจะพิจารณาได้ยากและอาจมองกระแสโหลดเป็นกระแสฟอลต์) จึงจำเป็นต้องพิจารณาด้วยค่ากระแสปิ๊กอัพของรีเลย์ นำเสนอในส่วนถัดไป

ตารางที่ 1 เมทริกซ์กระแสฟอลต์แบบ 3 เฟสสมดุล

Fault	Bus	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
F1	14	114.9	156.2	149.1	113.0	590.7	180.3	942.7	740.0
F2	13	133.8	165.9	622.0	427.3	1932.8	74.1	462.8	462.8
F3	11	140.5	185.4	101.2	239.9	63.3	1493.8	79.3	79.3
F4	10	191.4	265.8	330.9	101.6	206.5	827.9	258.7	258.7
F5	9	272.6	384.1	553.0	107.2	345.0	668.2	432.2	432.2
F6	6	278.1	328.5	378.5	1205.8	234.9	455.1	294.3	294.3
F7	4	989.3	1435.1	2598.0	848.4	135.6	262.7	169.9	169.9



รูปที่ 1 ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ในการทดสอบในการประสานการทำงานรีเลย์

3.1 กรอบการประสานงานแบบปรับตัว (Adaptive Coordination Framework)

กรอบการประสานงานการทำงานรีเลย์ที่เสนอสามารถดำเนินการใน 7 ขั้นตอน:

1. ป้อนข้อมูลโครงข่าย: อิมพีแดนซ์สาย รีแอกแตนซ์ย่อยชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดของระบบ IEEE 14 บัส

2. คำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร: วิธี Bus Impedance Matrix (Z-Bus) ถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณกระแสที่รีเลย์แต่ละตัวเห็นในระหว่างสถานการณ์ความผิดปกติแต่ละสถานการณ์ในเชิงวิเคราะห์

3. เลือกอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า: ปรับขนาด CT เป็นไปตาม IEC 60044-1 โดย พิกัดหลักของ CT ต้องไม่น้อยกว่า 125% ของกระแสโหลดสูงสุดบนสายป้องกันพิกัดทุติยภูมิ CT คงที่ที่ค่า 5 A

ตารางที่ 2 การเลือกอัตราส่วน CT และการตั้งค่า

Relay	Line	I_{CT}	CT Ratio	IEC Class	$I_{p,sec}$ (A)	$I_{p,pri}$ (A)
R1	1–2	811.60	1000/5	5P5	0.2750	55.0
R2	2–4	294.60	300/5	5P5	1.2500	75.0
R3	4–5	326.09	400/5	5P10	0.3750	30.0
R4	5–6	248.82	250/5	5P5	1.0000	50.0
R5	6–13	106.77	150/5	5P15	1.0000	30.0
R6	6–11	63.62	75/5	5P20	2.3333	35.0
R7	9–14	47.13	50/5	5P20	4.0000	40.0
R8	13–14	43.66	50/5	5P15	4.0000	40.0

4. ตั้งค่ากระแสปิ๊กอัพ: เพื่อให้รีเลย์แต่ละตัวตอบสนองได้อย่างน่าเชื่อถือต่อกระแสไฟขัดข้องต่ำสุดที่มองเห็นได้บนสายป้องกันในขณะที่ยังคงไม่ไวต่อกระแสโหลดสูงสุด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การกำหนดค่ากระแสปิ๊กอัพ

Relay	Line	CTR	$I_{p,sec}$ (A)	$I_{pickup,pri}$ (A)
R1	1–2	1000/5	0.2750	55
R2	2–4	300/5	1.2500	75
R3	4–5	400/5	0.3750	30
R4	5–6	250/5	1.0000	50
R5	6–13	150/5	1.0000	30
R6	6–11	75/5	2.3333	35
R7	9–14	50/5	4.0000	40
R8	13–14	50/5	4.0000	40

5. เลือกรีเลย์คู่หลัก–สำรอง: เพื่อให้รีเลย์แต่ละตัวตอบสนองได้อย่างเหมาะสม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเลือกรีเลย์คู่หลัก–สำรอง

Pair	Fault Bus	Primary Relay	Backup Relay
1	Bus 14	R8 (13–14)	R5 (6–13)
2	Bus 13	R5 (6–13)	R4 (5–6)
3	Bus 11	R6 (6–11)	R4 (5–6)
4	Bus 10	R6 (6–11)	R2 (2–4)
5	Bus 9	R7 (9–14)	R2 (2–4)
6	Bus 6	R4 (5–6)	R1 (1–2)
7	Bus 4	R3 (4–5)	R1 (1–2)

โดย R5 (สายส่ง 6–13) ทำหน้าที่เป็นตัวสำรองสำหรับ R8 ในขณะที่ R4 (สายส่ง 5–6) เป็นตัวสำรองสำหรับทั้ง R5 และ R6 ในขณะที่ R1 และ R2 เป็นรีเลย์สำรองที่ไกลที่สุดสำหรับ R3 R4 R6 และ R7 ตามลำดับ

6. เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม: ใช้วิธี Iterative GA และ PSO แก้ปัญหาแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว โดยปรับเฉพาะค่า TDS สำหรับรีเลย์ทั้งหมด 7 คู่ และใช้ฟอลต์สามเฟสสมดุล ในขณะที่การแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมต่าง ๆ จะถูกทดสอบซ้ำ 10 รอบ และเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้

7. การตรวจสอบการประสานงาน: การแก้สมการ TDS ขั้นสุดท้ายได้รับการตรวจสอบกับขอบเขตทั้งสองของข้อจำกัด CTI ในคู่สำรองหลักทั้งหมด

4. ผลการจำลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ TDS

การวิเคราะห์ TDS ที่เหมาะสมที่ได้รับจากแต่ละวิธีสำหรับรีเลย์ 8 ตัว สามารถนำเสนอดังนี้

ตารางที่ 5 ผลค่าที่เหมาะสม Time Dial Settings

Relay	Line	CTR	I_{CT} (A)	Iterative	GA	PSO
R1	1–2	1000/5	811.60	0.1700	0.2897	0.2477
R2	2–4	300/5	294.60	0.1100	0.1205	0.1363
R3	4–5	400/5	326.09	0.0500	0.0500	0.0500
R4	5–6	250/5	248.82	0.1900	0.1863	0.1861
R5	6–13	150/5	106.77	0.1850	0.1829	0.1827
R6	6–11	75/5	63.62	0.0500	0.0500	0.0500
R7	9–14	50/5	47.13	0.0500	0.0500	0.0500
R8	13–14	50/5	43.66	0.0500	0.0500	0.0500

ปัญหาที่พบในการประสานงานมีรีเลย์วิกฤติ (Critical relay) คือ R1, R2, R4 และ R5 ซึ่งทั้งหมดต้องการ TDS ที่สูงกว่าค่าต่ำสุดโดย R5 (สายส่ง 6–13) ต้องใช้ TDS ประมาณ 0.183 ในขณะที่ R4 (สายส่ง 5–6) กำหนดข้อจำกัด CTI พร้อมกันสองข้อที่บังคับให้ TDS เป็น 0.186 ในทุกวิธี ในส่วน R1 และ

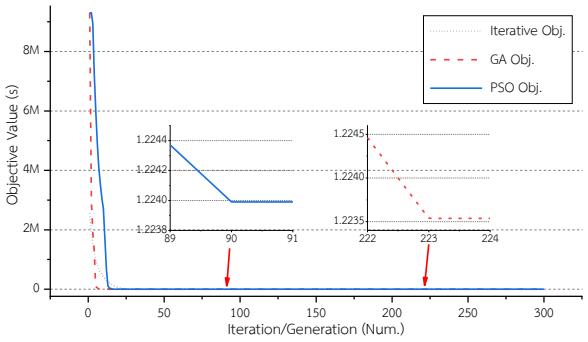
R2 เป็นรีเลย์สำรองที่ไกลที่สุดกำหนดค่า TDS แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการ PSO (R1: 0.2477, R2: 0.1363) เทียบกับ GA (R1: 0.2897, R2: 0.1205) บ่งชี้ว่าชุดค่าผสม TDS หลายชุดใกล้กับขอบเขตที่เป็นไปได้จะเป็นไปตามขอบเขต CTI ทั้งสองพร้อมกัน ในขณะที่ รีเลย์ R3, R6, R7, R8 ทั้งหมดมีค่า TDS คือ 0.05 ในทั้ง 3 วิธีการโดยรีเลย์เหล่านี้ไม่ใช่ข้อจำกัดที่มีผลต่อการประสานการทำงาน

4.2 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมาย

ตารางที่ 6 เวลาการทำงานของรีเลย์หลักทั้งหมด

วิธีการ	Objective (s)	Improvement vs. Iterative
Iterative	1.2349	-
GA	1.2235	0.92%
PSO	1.2229	0.97%

PSO บรรลุเป้าหมายเวลาการทำงานของรีเลย์หลักทั้งหมดต่ำสุดที่ 1.2229 วินาที ซึ่งคิดเป็นการปรับปรุง 0.97% จากกรณีแบบวนซ้ำ GA มีเวลาการทำงานทั้งหมดที่ 1.2235 วินาที ซึ่งแตกต่างจาก PSO เพียง 0.0006 วินาที ซึ่งยืนยันว่าวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้งสองระบุผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงที่สุดเท่ากัน ซึ่งยืนยันถึงการเพิ่มประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม ในขณะที่การลู่เข้าสู่คำตอบเมื่อพิจารณาการบรรลุค่าฟังก์ชันเป้าหมายนำเสนอดังรูปที่ 2 พบว่า PSO มีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เสถียรหลังจากค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำ 90 ครั้ง โดยใช้รอบเพียงประมาณ 30% ของการทำซ้ำ 300 ครั้ง ส่วน GA ต้องการค่าเฉลี่ย 223 รุ่น หรือประมาณ 74% เพื่อให้ได้ระดับความเสถียรที่เทียบเท่ากัน ดังนั้น PSO จึงบรรลุการบรรจบกันได้เร็วกว่า GA ในจำนวนการทำซ้ำในขณะเดียวกันก็ได้รับวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 2 การลู่เข้าสู่คำตอบของ GA และ PSO

4.3 การตรวจสอบมาร์จิ้นการประสานงาน

ตารางที่ 7 แสดงระยะขอบการประสานงานสำหรับคู่หลัก-สำรองทั้งเจ็ดคู่ในแต่ละวิธี มาร์จิ้นทั้งหมดเป็นไปตามข้อจำกัดฟังก์ชันปรับโทษ

ตารางที่ 7 ระยะขอบการประสานงาน (Seconds)

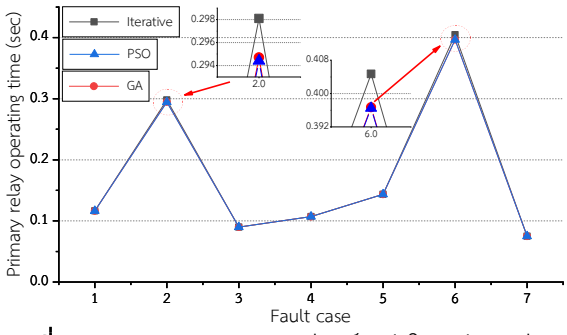
Pair	Primary–Backup	Fault (Bus)	Iterative	GA	PSO	Status
1	R8 ⟶ R5	14	0.3052	0.3004	0.3000	OK
2	R5 ⟶ R4	13	0.3086	0.3001	0.3000	OK
3	R6 ⟶ R4	11	0.7451	0.7287	0.7282	OK
4	R6 ⟶ R2	10	0.4937	0.5510	0.6377	OK
5	R7 ⟶ R2	9	0.3202	0.3643	0.4312	OK
6	R4 ⟶ R1	6	0.3177	0.8343	0.6563	OK
7	R3 ⟶ R1	4	0.3250	0.6067	0.5079	OK

4.4 เวลาการทำงานของรีเลย์หลัก

ตารางที่ 8 เวลาการทำงานของรีเลย์หลักเมื่อเกิดฟอลต์ (seconds)

Pair	Fault (Bus)	Primary Relay	CTR	I_{CT} (A)	I_{pickup} (A)	Iterative	GA	PSO
1	14	R8 (13–14)	50/5	43.66	40	0.1165	0.1165	0.1165
2	13	R5 (6–13)	150/5	106.77	30	0.2981	0.2947	0.2944
3	11	R6 (6–11)	75/5	63.62	35	0.0898	0.0898	0.0898
4	10	R6 (6–11)	75/5	63.62	35	0.1072	0.1072	0.1072
5	9	R7 (9–14)	50/5	47.13	40	0.1436	0.1436	0.1436
6	6	R4 (5–6)	250/5	248.82	50	0.4047	0.3967	0.3965
7	4	R3 (4–5)	400/5	326.09	30	0.0750	0.0750	0.0750
					Total	1.2349	1.2233	1.2229

ตารางที่ 8 และรูปที่ 2 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์หลักในแต่ละตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีส่วนร่วมของสถานการณ์ความผิดพลาดแต่ละสถานการณ์ต่อวัตถุประสงค์ทั้งหมด โดยเวลาที่ใช้ในการปรดวงจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดฟังก์ชันปรับโทษที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 2 เวลาการทำงานของรีเลย์หลักในแต่ละวิธีการ

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการประสานงานรีเลย์กระแสเกินในระบบ IEEE 14 บัส โดยหาค่า TDS ที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัด CTI แบบสองด้านด้วยวิธีวนซ้ำ GA และ PSO ผลการศึกษาพบว่าทั้งสามวิธีผ่านเงื่อนไข CTI ครบทั้ง 7 คู่รีเลย์ โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดของ PSO, GA และวิธีวนซ้ำเท่ากับ 1.2229, 1.2235 และ 1.2349 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีเมตาฮิวริสติกมีประสิทธิภาพการประสานงานสูงกว่าวิธีพื้นฐาน ขณะที่การกำหนด CTI แบบสองด้านช่วยรักษาการประสานงานและจำกัดความล่าช้าของรีเลย์สำรอง ทั้งนี้งานวิจัยในอนาคตควรขยายสู่การหาค่าเหมาะสมพร้อมกันของ TDS และกระแสปิ๊กอัพ รวมถึงการพิจารณากระแสฟอลต์แบบไดนามิกและการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมขั้นสูงอื่น ๆ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Wadood, et al., (2019). "Nature-Inspired Whale Optimization Algorithm for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Power Systems," Energies, vol. 12, no. 12, p. 2297, Jun.

[2] A. Bayazidi, et al., (2024). "Optimal coordination of directional overcurrent relays in power energy systems with emphasis on the discreteness of variables: Comprehensive comparisons," Heliyon, vol. 10, no. 19, p. e37972, Sep.

[3] T. Foqha, et al., (2023). "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm," Energies, vol. 16, no. 14, p. 5328, Jul.

[4] S. Xu, et al., (2022). "An Improved Technique of Hybridization of PSO for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays of IEEE Bus System," Energies, vol. 15, no. 9, p. 3076, Apr.

[5] K. Habib, et al., (2022). "Hybridization of PSO for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays," Electronics, vol. 11, no. 2, p. 180, Jan.

[6] S. Xu et al., (2023). "The Hybridization of PSO for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays of the IEEE Bus System," Energies, vol. 16, no. 9, p. 3726, Apr.

[7] O. Merabet, et al., (2023). "Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex networks using the Elite marine predators algorithm," Electric Power Systems Research, vol. 221, p. 109446, Aug.

[8] H. Kılıç, (2024). "Performance evaluation of advanced metaheuristic algorithms for directional overcurrent relay coordination in distribution networks," Scientific Reports, vol. 15, no. 1, p. 2717, Dec.

การพัฒนาระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้า (VCU) โดยใช้โปรแกรม CODESYS สำหรับชุดฝึกจำลองการควบคุมมอเตอร์

Development of an Electric Vehicle Control Unit (VCU) using CODESYS for Motor Control Simulation Training Kit

ศุภชัย เขียนนอก[1], อรรถวุฒิ แก้วบัวเพ็ชร[1], วรากร ทิพย์รักษ์[1] และ อ่อนลมี กมลอินทร์[1,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: onlamee.k@nrru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาชุดฝึกจำลองระบบหน่วยควบคุมยานยนต์ (Vehicle Control Unit: VCU) ด้วยสถาปัตยกรรมแบบ Master-Slave โดยใช้ Raspberry Pi 5 เป็น Master Controller และ ESP32 เป็น Slave รับสัญญาณเซนเซอร์ สื่อสารผ่าน CAN Bus ที่ 500 kbps ผ่านการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างค่าจำลอง (Simulation) และการวัดค่าจากฮาร์ดแวร์จริง ผลการทดสอบพิสูจน์ว่าระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC 800 W ได้ตามตำแหน่งเกียร์ D (สูงสุด 63 km/h, 6,000 RPM), R (จำกัด 32 km/h, 3,000 RPM) และ N (หยุดแรงบิดทันที) โดยไม่มี Packet Loss ระบบ Interlock ตัดการทำงานได้ทันทีเมื่อตรวจพบสภาวะผิดปกติ โดยมีความเร็วในการตอบสนอง (Response Time) น้อยกว่า 10 มิลลิวินาที

คำสำคัญ: หน่วยควบคุมยานยนต์ (VCU), CODESYS, ยานยนต์ไฟฟ้า, การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (CAN Bus), การควบคุมมอเตอร์

Abstract

This research presents the development of a Vehicle Control Unit (VCU) simulation training kit utilizing a Master-Slave architecture. The system employs Raspberry Pi 5 as the Master Controller and ESP32 as the Slave for sensor signal acquisition, with communication established via CAN Bus at 500 kbps. The system was validated through comparative testing between simulated results and real-world hardware measurements. Experimental results demonstrate that the controller effectively manages an 800W BLDC motor according to gear positions: Drive (D) reaching a maximum speed of 63 km/h at 6,000 RPM, Reverse (R) limited to 32 km/h at 3,000 RPM, and Neutral (N) ensuring an immediate torque cutoff. The communication exhibited zero packet loss, and the interlock safety mechanism functioned instantly upon detecting abnormalities, providing a response time of less than 10 milliseconds

Keywords: VCU, CODESYS, Electric Vehicle, CAN Bus, Motor Control.

1. บทนำ

วิกฤตสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่รุนแรงขึ้นในปัจจุบัน จึงทำให้ยานยนต์ไฟฟ้า (EV) กลายเป็นนวัตกรรมทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ด้วยระบบการทำงานที่ซับซ้อนกว่ารถยนต์ทั่วไป จึงจำเป็นต้องมีระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ หน่วยควบคุมยานยนต์ (VCU) จึงถูกพัฒนาขึ้นในฐานะ “ศูนย์กลางประมวลผลหลัก” ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์เพื่อวิเคราะห์และสั่งการไปยังหน่วยควบคุมมอเตอร์ (MCU) ให้ขับเคลื่อนตามความต้องการของผู้ขับขี่ได้อย่างแม่นยำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบควบคุมในรถยนต์ไฟฟ้าได้วิวัฒนาการจากการทำงานแยกส่วนมาสู่การบูรณาการที่ซับซ้อน โดย VCU และ MCU ต้องทำงานที่สอดประสานกันเพื่อประสิทธิภาพใน การจัดการแรงบิด (Torque Management) และการวิเคราะห์ปัญหาแบบเรียลไทม์ เพื่อความเสถียรของตัวรถขึ้นอยู่กับการสื่อสารผ่านระบบ CAN Bus ที่มีความหน่วงต่ำกว่า 5-10 มิลลิวินาที ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัย ISO 26262 ด้วยความต้องการเครื่องมือวิจัยที่เข้าถึงง่ายแต่มีประสิทธิภาพ คณะผู้จัดทำจึงประยุกต์ใช้ Raspberry Pi 5 ร่วมกับซอฟต์แวร์ CODESYS ตามมาตรฐาน IEC 61131-3 เพื่อพัฒนาชุดฝึกจำลอง VCU ที่มีเสถียรภาพระดับสากลและเหมาะสำหรับการเป็นสื่อการสอนเชิงวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม ชุดฝึกจำลอง VCU ในปัจจุบันมักมีราคาสูงและใช้ฮาร์ดแวร์เฉพาะทางทำให้สถานศึกษาเข้าถึงได้ยาก คณะผู้จัดทำจึงประยุกต์ใช้ Raspberry Pi 5 ร่วมกับซอฟต์แวร์ CODESYS โดยขอบเขตของการวิจัยนี้มุ่งเน้นการทดสอบพฤติกรรมในสภาวะคงตัว เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรอบมอเตอร์และความเร็วรถยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาชุดฝึกจำลองระบบ VCU โดยใช้โปรแกรม CODESYS บนมาตรฐานการสื่อสาร CAN Bus
2. เพื่อศึกษาระบบการควบคุมมอเตอร์ตามตำแหน่งเกียร์
3. เพื่อประเมินเสถียรภาพการสื่อสารข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผล Raspberry Pi 5 และ ESP32
4. เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนด้านระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าและเทคโนโลยี SoftPLC

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

1) บทบาทในการคำนวณแรงบิด VCU จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการตัดสินใจระดับสูง โดยวิเคราะห์สัญญาณจากคันเร่งร่วมกับตัวแปรสถานะรถ เช่น ความเร็วล้อ อุณหภูมิ และระดับพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อส่งคำสั่งแรงบิดที่แม่นยำไปยังหน่วยควบคุมมอเตอร์ (MCU) [1]

2) กลยุทธ์การจัดสรรแรงบิดในระบบขับเคลื่อนหลายล้อ การจัดการจะแบ่งเป็น การกระจายแบบคงที่ (Average Mode) ที่เน้นความง่ายแต่ประสิทธิภาพต่ำ และการกระจายแบบหาค่าเหมาะสม (Optimal) เช่น กลยุทธ์ ECMS ที่ลดการสูญเสียพลังงานและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงถึง 6.1% [2]

3) การตอบสนองแบบเรียลไทม์และความปลอดภัย โดยระบบต้องมีค่าความหน่วง (Latency)

ESTACON 2026 | 17th

ต่ำกว่า 5-10 มิลลิวินาที เพื่อความเสถียรในการขับขี่ พร้อมมีกลไก Interlock และ Limp Mode ที่จะลดหรือตัดกำลังมอเตอร์ทันทีหากพบความผิดปกติ เช่น อุณหภูมิสูงเกิน 80°C หรือการสื่อสารล้มเหลว

4) การควบคุมตามคุณลักษณะมอเตอร์ จะเน้นการตอบสนองแบบเชิงเส้น (Linear) ในช่วงความเร็วต่ำเพื่อให้ควบคุมง่าย และจะปรับเข้าสู่ช่วงเพิ่มกำลังสูงสุด (Constant Power Region) เมื่อใช้ความเร็วสูง เพื่อให้รถทำความเร็วสูงสุดได้อย่างมีเสถียรภาพ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าและการใช้โปรแกรม CODESYS ในงานควบคุมมอเตอร์ สามารถจำแนกประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) การยกระดับระบบควบคุมด้วยแพลตฟอร์ม CODESYS ปัจจุบันมีการมุ่งเน้นการใช้คอนโทรลเลอร์แบบฝังตัวที่รองรับมาตรฐาน IEC 61131-3 ผ่าน CODESYS เพื่อเสริมสมรรถนะการประมวลผลแบบเรียลไทม์และการควบคุมการเคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด [3-4] งานวิจัยนี้ได้ต่อยอดจากแนวคิดพื้นฐานของระบบแมกเนติคและ PLC แบบดั้งเดิมในอดีต ไปสู่การใช้งาน SoftPLC บน Raspberry Pi 5 เพื่อให้รองรับระบบสื่อสาร CAN Bus ที่จำเป็นสำหรับเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ [5]

2) การศึกษาของ Wu et al. (2025) [6] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานผ่านการจัดการแรงบิด โดยใช้กลยุทธ์การจัดการพลังงานขั้นสูงอย่าง ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) ในรถยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อ ช่วยให้การจัดสรรแรงบิดระหว่างมอเตอร์มีความแม่นยำสูงขึ้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการประมวลผลอัลกอริทึมที่ซับซ้อนบนคอนโทรลเลอร์โดยตรงสามารถยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ดีขึ้นเฉลี่ยถึง 6%

3) การบูรณาการ AI และการคำนวณจลนศาสตร์ขั้นสูง ด้วยเทคโนโลยีการควบคุมเริ่มเปลี่ยนผ่านสู่การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Machine Learning) บนภาษามาตรฐานของ PLC เพื่อสร้างระบบ Adaptive Control ที่เรียนรู้พฤติกรรมการขับขี่ได้ นอกจากนี้ภาษา Structured Text (ST) ยังพิสูจน์ให้เห็นว่ามีความแรงเพียงพอในการคำนวณจลนศาสตร์ที่ซับซ้อนแบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาระบบ Torque Vectoring ใน VCU รุ่นใหม่ [7] โดยการคำนวณความเร็วรถจากความเร็วรอบมอเตอร์อาศัยสมการทางฟิสิกส์พื้นฐาน ดังนี้

$$V = \frac{2\pi r \times RPM \times 60}{1000}$$

เมื่อ V คือความเร็ว (km/h), r คือรัศมีล้อ และ RPM คือ รอบการหมุนของมอเตอร์ ข้อมูลนี้จะถูกนำไปเขียนเป็นฟังก์ชันในภาษา Structured Text (ST) ของ CODESYS เพื่อแสดงผลบน Dashboard

4) การออกแบบซอฟต์แวร์แบบแยกส่วนและความปลอดภัยเชิงหน้าที่ ความมั่นคงของระบบ VCU ขึ้นอยู่กับความเสถียรของระบบสื่อสารและการออกแบบไลบรารีซอฟต์แวร์แบบ Modular ผ่านระบบ CANopen แนวทางนี้ช่วยให้โค้ดมีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Reusability) และลดความเสี่ยงจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ อีกทั้งการใช้ไลบรารีมาตรฐานยังช่วยเพิ่มความแม่นยำใน

การวินิจฉัยข้อผิดพลาด ซึ่งสอดคล้องกับ มาตรฐานความปลอดภัยเชิงหน้าที่ (Functional Safety) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ [8]

2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างงานวิจัย

งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปที่ระบบอุตสาหกรรมหรือฮาร์ดแวร์ราคาสูง แต่ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาชุดฝึก VCU บนแพลตฟอร์ม Raspberry Pi 5 และ ESP32 ร่วมกับเทคโนโลยี SoftPLC เพื่อสร้างสื่อการสอนที่เข้าถึงง่ายสำหรับสถานศึกษาในไทย โดยมีจุดเด่นในการบูรณาการทั้งระบบประมวลผลและการจำลองหน้าจอ Dashboard (Visualization) ไว้ในอุปกรณ์เดียวอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นรากฐานในการศึกษาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป

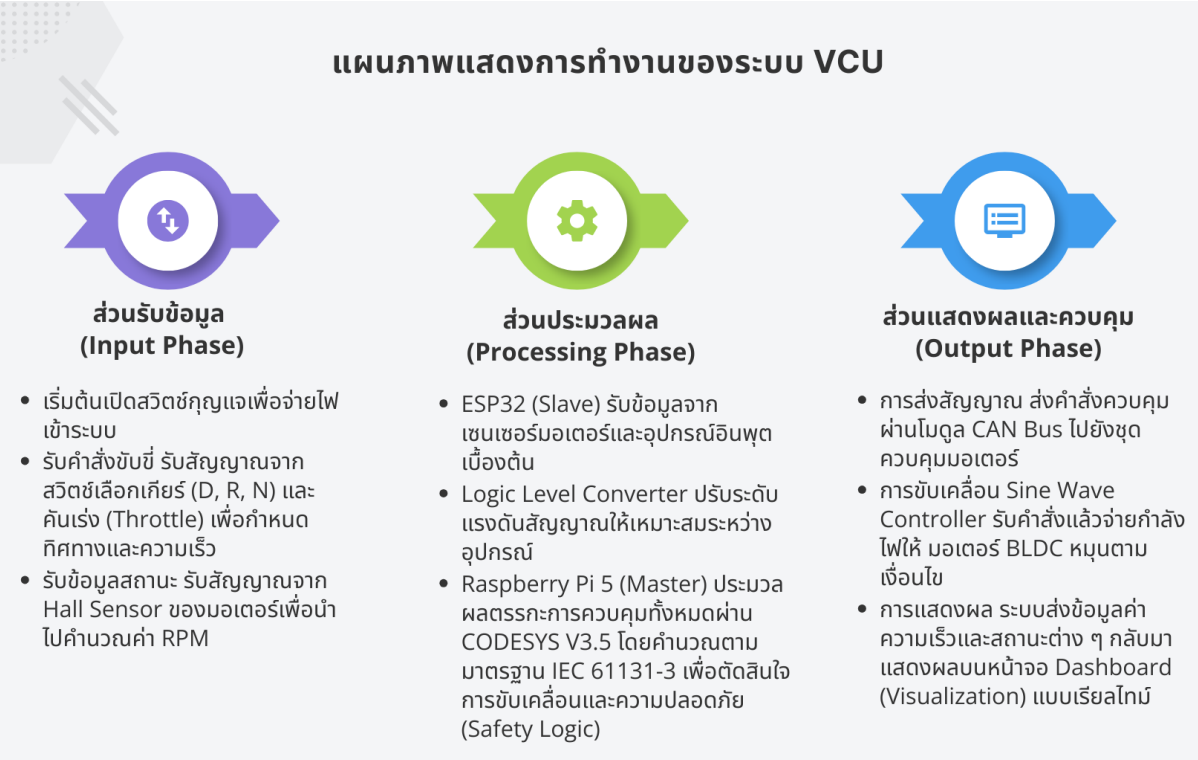
2.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดในงานวิจัยนี้ใช้สถาปัตยกรรมการออกแบบระบบ Master-Slave ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1) Input เป็นส่วนสำหรับรับสัญญาณจากสวิตช์กุญแจ, ตำแหน่งเกียร์ และคันเร่ง

2) Process เป็นส่วนสำคัญโดย Raspberry Pi 5 (Master) จะประมวลผลตรรกะความปลอดภัยผ่านโปรแกรม CODESYS และสื่อสารไปยังบอร์ด ESP32 (Slave) เพื่อรับข้อมูลจากเซนเซอร์ของมอเตอร์

3) Output เป็นส่วนที่ส่งคำสั่งผ่าน CAN Bus ไปยัง MCU เพื่อขับมอเตอร์ BLDC และแสดงผลความเร็วและรอบของมอเตอร์บน Dashboard



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบ VCU

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาระบบหน่วยควบคุมยานยนต์ (VCU) ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการผ่านขั้นตอนการออกแบบและทดสอบอย่างเป็นระบบ โดยเน้นการบูรณาการระหว่างฮาร์ดแวร์ประมวลผลประสิทธิภาพสูงและซอฟต์แวร์มาตรฐานอุตสาหกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบโครงสร้างระบบ

ผู้วิจัยออกแบบระบบโดยใช้หลักการ Master-Slave เพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำและปลอดภัยสูงสุด โดยส่วนรับข้อมูล (Input) จะรับสัญญาณจากเซนเซอร์คันเร่งแบบอะนาล็อก (0-100%) สวิตช์เลือกตำแหน่งเกียร์ (D, N, R) และสวิตช์กุญแจเพื่อเริ่มต้นระบบ ส่วนประมวลผล (Process) ในงานวิจัยนี้ใช้ Raspberry Pi 5 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง (Master) ทำหน้าที่รันซอฟต์แวร์ CODESYS V3.5 เพื่อคำนวณตรรกะการขับเคลื่อนและเงื่อนไขความปลอดภัย (Safety Logic) และใช้ ESP32 (Slave) ในการรับข้อมูลความเร็วรอบจากเซนเซอร์มอเตอร์เพื่อส่งต่อข้อมูลผ่านระบบสื่อสาร จากนั้นส่วนแสดงผลและควบคุม (Output) จะส่งคำสั่งควบคุมผ่านโปรโตคอล CAN Bus ไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Inverter) เพื่อสั่งการมอเตอร์ BLDC ขนาด 800 W และแสดงผลค่า RPM และความเร็ว (km/h) แสดงผลผ่านหน้าจอ Dashboard (Visualization)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองแบบเรียลไทม์ (Latency < 5-10 ms) ผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องมือดังนี้ ด้านซอฟต์แวร์ใช้โปรแกรม CODESYS V3.5 สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมตามมาตรฐาน IEC 61131-3 และ Arduino IDE สำหรับจัดการบอร์ด ESP32 ส่วนด้านฮาร์ดแวร์จะใช้ Raspberry Pi 5, บอร์ด ESP32, โมดูลสื่อสาร CAN Bus (MCP2515), และโมดูลแปลงสัญญาณ (Logic Level Converter 5V-3.3V) เพื่อป้องกันความเสียหายของพอร์ตสื่อสาร

3.3 การออกแบบตรรกะการควบคุม

ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมควบคุมโดยใช้ภาษา Structured Text (ST) และ Ladder Diagram (LD) การประมวลผลสถานะเกียร์ โดยระบบจะตรวจสอบตำแหน่งเกียร์ก่อนเริ่มทำงาน หากอยู่ในเกียร์ D มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาและทำความเร็วสูงสุดตามคันเร่ง แต่หากอยู่ในเกียร์ R ระบบจะจำกัดความเร็วรอบไว้ไม่เกิน 3,000 RPM เพื่อความปลอดภัย ส่วนระบบ Interlock ได้ออกแบบเงื่อนไขความปลอดภัยให้มอเตอร์หยุดทำงานทันทีเมื่อสวิตช์กุญแจปิด หรือระบบตรวจพบความผิดปกติ แม้จะมีการเหยียบคันเร่งค้างไว้

3.4 การตั้งค่าระบบสื่อสาร

ระบบสื่อสารใช้มาตรฐาน CAN Bus ที่ความเร็ว 500 kbps เป็นการส่งข้อมูลระหว่าง Raspberry Pi 5 และ ESP32 จะถูกบรรจุในแพ็กเกจข้อมูลขนาด 8 ไบต์ (CAN Frame ID 0x100) โดยข้อมูลที่รับส่งประกอบด้วย ค่าความเร็วรอบ (RPM), ความเร็วรถ (Speed), สถานะเกียร์, และเปอร์เซ็นต์คันเร่ง เพื่อให้การแสดงผลบนหน้าจอสัมพันธ์กับสภาวะจริงของมอเตอร์

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

ผู้วิจัยทำการทดสอบระบบผ่าน 2 ส่วนหลัก คือ การจำลองการทำงาน (Simulation) ผ่านฟังก์ชัน Visualization ใน CODESYS และการทดสอบกับฮาร์ดแวร์จริง เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่าง RPM

และ Speed รวมถึงตรวจสอบเสถียรภาพของการส่งข้อมูล CAN Bus ว่าปราศจากการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) ในสภาวะโหลดสูง การประเมินความน่าเชื่อถือทำโดยการส่งชุดข้อมูลความเร็วรอบซ้ำๆ จำนวน 1,000 แพ็กเกจข้อมูล เพื่อคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนและอัตราการสูญเสียข้อมูล

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบระบบหน่วยควบคุมยานยนต์ (VCU) ที่พัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม Raspberry Pi 5 และ ESP32 โดยใช้โปรแกรม CODESYS สามารถสรุปผลการทดลองตามหัวข้อสำคัญได้ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบระบบสื่อสาร CAN Bus

จากการทดสอบรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Raspberry Pi 5 (Master) และ ESP32 (Slave) ผ่านโปรโตคอล CAN Bus ที่ความเร็ว 500 kbps พบว่าระบบสามารถสื่อสารได้อย่างมีเสถียรภาพ ผลการตรวจสอบผ่าน Serial Monitor ยืนยันว่าค่าที่ส่งจากหน่วยประมวลผลต้นทางและค่าที่รับได้ปลายทางมีความถูกต้อง 100% (สถานะสำเร็จ) แม้ในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบสูงก็ไม่พบการสูญเสียของข้อมูล (Packet Loss) ซึ่งเป็นผลจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่สมดุลและโมดูลแปลงสัญญาณที่ช่วยลดสัญญาณรบกวน (Noise) ในสายสัญญาณ

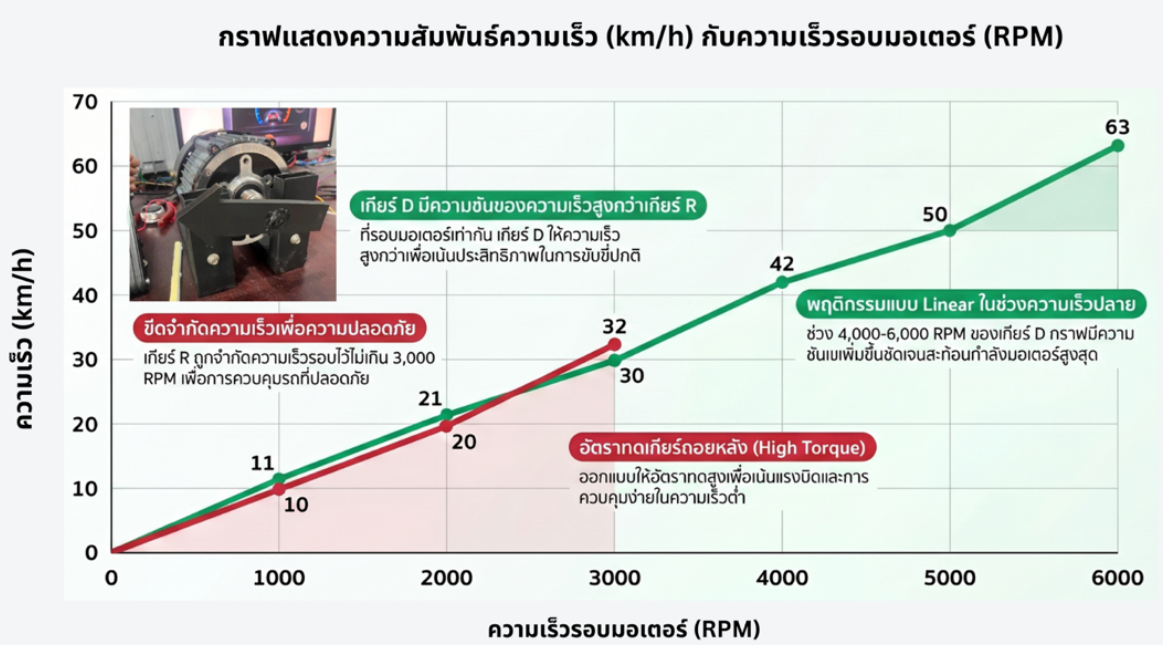
4.2 ผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์และระบบเกียร์ (D / R / N)

ระบบ VCU สามารถควบคุมทิศทางการหมุนและสมรรถนะของมอเตอร์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ดังนี้ ในส่วนของเกียร์ D (เดินหน้า) จะกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา สามารถทำความเร็วรอบสูงสุดได้ที่ 6,000 RPM สัมพันธ์กับความเร็วสูงสุด 63 km/h ส่วนเกียร์ R (ถอยหลัง) กำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยระบบได้กำหนดเงื่อนไขความปลอดภัยให้จำกัดความเร็วรอบไว้ไม่เกิน 3,000 RPM ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วสูงสุด 32 km/h และเกียร์ N (ว่าง) กำหนดให้ระบบหยุดการจ่ายแรงบิดและมอเตอร์หยุดนิ่งทันที แม้จะมีการเหยียบคันเร่งค้างไว้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุรศักดิ์ และคณะ. (2564) [5] ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่า R^2 =0.999 แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่แม่นยำสูงในช่วงเกียร์ D จากการตรวจสอบภาระการประมวลผลของ Raspberry Pi 5 พบว่ามีการใช้งาน CPU เฉลี่ยเพียงร้อยละ 12 แม้ในช่วงที่มีการสื่อสารข้อมูลหนาแน่น

4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) และความเร็ว (Speed)

จากการทดสอบจริงพบว่าระบบควบคุมสามารถจำกัดช่วงการทำงานและความเร็วสูงสุดได้แตกต่างกันตามตำแหน่งเกียร์ เพื่อวัตถุประสงค์ด้านสมรรถนะและความปลอดภัย งานวิจัยของ Yildirim et al. (2020) [7] ใช้วิธีการยืนยันผลการคำนวณใน CODESYS ผ่านการทดสอบจริงด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) และพบว่าผลลัพธ์มีความแม่นยำสูง ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้ที่ใช้การเปรียบเทียบค่า RPM และ Speed เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบการทำงานของ VCU แสดงในรูปที่ 2 โดยเกียร์เดินหน้า (Drive - D) มอเตอร์ทำงานได้ในช่วง 0 - 6,000 RPM โดยทำความเร็วได้ตั้งแต่ 0 - 63 km/h ส่วนเกียร์ถอยหลัง (Reverse - R) ระบบจำกัดรอบมอเตอร์ไว้ที่ 0 - 3,000 RPM ส่งผลให้ทำความเร็วได้สูงสุดเพียง 32 km/h ผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว

รอบของมอเตอร์กับความเร็ว แสดงให้เห็นลักษณะทางวิศวกรรมที่สำคัญ โดยความชันของกราฟ (Slope) กราฟของเกียร์ D มีความชันที่สูงกว่าเกียร์ R อย่างชัดเจน หมายความว่า ที่ความเร็วรอบ (RPM) เท่ากัน เกียร์ D จะให้ความเร็วที่สูงกว่าเกียร์ R เสมอ



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็ว (km/h) กับความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)

ซึ่งมีพฤติกรรมแบบ Non-linear ในเกียร์ D โดยในช่วงความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง (1,000 - 3,000 RPM) กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงความเร็วรอบสูง (4,000 - 6,000 RPM) กราฟจะมีความชันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงช่วงที่มอเตอร์สามารถแสดงกำลังออกมาได้เต็มที่ (Constant Power Region) ก่อนถึงจุดอิ่มตัว

4.4 ผลการทดสอบระบบความปลอดภัย

ระบบ Interlock ที่ออกแบบผ่าน CODESYS สามารถตอบสนองแบบเรียลไทม์ โดยเมื่อระบบเข้าสู่เงื่อนไขหยุดทำงานหรือมีการสั่งปิดสวิตช์กุญแจ มอเตอร์จะหยุดหมุนทันทีและแสดงค่าความเร็ว (km/h) และความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM) เป็นศูนย์ในทันทีบนหน้าจอ Dashboard แม้ผู้ทดสอบจะเหยียบคันเร่งค้างไว้ก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Limp Mode ที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 26262 แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งยืนยันถึงประสิทธิภาพในการป้องกันอุบัติเหตุจากความผิดปกติของอุปกรณ์อินพุต



รูปที่ 3 หน้าปัดแสดงค่าความเร็ว (km/h) และความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM) เป็นศูนย์ เมื่อระบบเข้าสู่เงื่อนไขหยุดทำงานหรือมีการสั่งปิดสวิตช์กุญแจ

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยและพัฒนา ระบบหน่วยควบคุมยานยนต์ (VCU) โดยใช้โปรแกรม CODESYS บนมาตรฐานการสื่อสาร CAN Bus ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญจากการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพด้านการควบคุมและสมรรถนะ

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้ทำงานสัมพันธ์กับตำแหน่งเกียร์ได้อย่างแม่นยำ และมีการตอบสนองแบบ Real-time ผลการทดสอบพบว่าใน เกียร์ D (เดินหน้า) สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 63 km/h ที่ความเร็วรอบ 6,000 RPM ในขณะที่ เกียร์ R (ถอยหลัง) ระบบได้จำกัดความเร็วรอบไว้ที่ 3,000 RPM เพื่อความปลอดภัย ส่งผลให้ทำความเร็วสูงสุดได้ 32 km/h นอกจากนี้ ระบบยังมีความแม่นยำสูงในการหยุดการจ่ายแรงบิดเมื่ออยู่ใน เกียร์ N (ว่าง) แม้จะมีการเหยียบคันเร่งค้างไว้

5.2 ความเสถียรของระบบสื่อสาร

การนำสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Raspberry Pi 5 มาทำงานร่วมกับ ESP32 ผ่านโปรโตคอล CAN Bus ที่ความเร็ว 500 kbps พบว่ามีความเสถียรสูงมาก ระบบสามารถรับ-ส่งข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผลและชุดควบคุมมอเตอร์ได้โดย ไม่พบการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss) แม้ในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบสูง และมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีเนื่องจากมีการใช้แรงดันไฟฟ้าที่สมดุลในสายสัญญาณ

5.3 มาตรฐานและความปลอดภัย

งานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าการใช้ซอฟต์แวร์ CODESYS ซึ่งรองรับมาตรฐานสากล IEC 61131-3 ช่วยให้การออกแบบตรรกะความปลอดภัย (Safety Logic) เช่น ระบบ Interlock มีประสิทธิภาพสูง โดยระบบสามารถตัดการทำงานของมอเตอร์ได้ทันทีเมื่อตรวจพบสภาวะไม่ปลอดภัยหรือไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด

5.4 การนำไปใช้ประโยชน์

ชุดฝึกจำลองระบบ VCU ที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่เพียงแต่เป็นต้นแบบที่สามารถนำไปต่อยอดใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าจริงระดับอุตสาหกรรมได้เท่านั้น แต่ยังเป็นสื่อการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรม ที่มีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจการทำงานของระบบ VCU, การเขียนโปรแกรม SoftPLC และเทคโนโลยีการสื่อสารในยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุรศักดิ์และคณะ. (2564) [5] ในอนาคตมีแผนที่จะนำชุดฝึกนี้ไปทดสอบประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้กับกลุ่มนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์จำนวน 30 คน เพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการเป็นสื่อการสอน และจะขยายผลไปสู่การสื่อสารโปรโตคอล Bluetooth Low Energy (BLE) สำหรับการตรวจสอบข้อมูลผ่านสมาร์ทโฟน

6. การเขียนเอกสารอ้างอิง

[1] Vaibhav. (2025). How do VCU and MCU in electric vehicles function hand in hand? Embitel. https://www.embitel.com/blog/embedded-blog/how-do-vcu-and-mcu-in-electric-vehicles-function-hand-in-hand

[2] Li, Z., Wang, Y., & Chen, H. (2025). A novel optimal control strategy of four drive

motors for an electric vehicle. Applied Sciences, 15(7), 3505.

[3] Méndez Cam, J. R., & Santos López, F. M. (2025). "Inverse kinematics calculation in IEC 61131-3 Structured Text: KinIn." SoftwareX, 31: 102252.

[4] CODESYS Forge. (2024). Self-Balancing Robot Project with CODESYS. Accessed June 11, 2026. Available from https://forge.codesys.com/

[5] สุรศักดิ์ คำภู, สถาพร สรรพมุข, สุเมธ ทองมี, และ ภาณุเดช เทียนคำ. (2564). การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส ด้วยแมกเนติคคอนแทคเตอร์และพีแอลซี [ปริญญานิพนธ์ปริญญาตรี], มหาวิทยาลัยสยาม.

[6] Wu, J., Yang, Y., Zhu, W., Xiao, M., Zhang, L., & Fan, D. (2025). Development of motion control function library based on PLCopen specification. Measurement and Control, 58(3), 339–351.

[7] Yildirim, M., Oksuztepe, E., & Kurum, H. (2020). Design of electronic differential system for an electric vehicle with four independently controlled in-wheel PMSM. Proceedings of the IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), 1–5.

[8] Trusca, M., et al. (2025). A modular approach to motor control: The CANopenDrivers library. Advances in Service and Industrial Robotics, Conference paper, 466–473.

การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลที่มีการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว: กรณีศึกษาระบบ IEEE 33 บัส

Comparative Analysis of Power Flow Calculation Methods for Radial Distribution Systems with Distributed Generation: A Case Study of the IEEE 33-Bus System

อดิศร พลเสนา[1], จิตติพงษ์ เกาะสูงเนิน[2], ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[2], นพณัฐ จิตกรียาน[2], กิตติวงศ์ สุธรรมโน[1,*], ยุทธณา คงจีน[2], วุฒิชัย สง่างาม[1], พงษ์ศักดิ์ พิลาล้ำ[3], กฤติเดช บัวใหญ่[2] และ กาณฑ์ เกิดชื่น[2]

[1] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 3000
[2] หน่วยวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 3000
[3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จังหวัดนครราชสีมา 3 หมู่ 2 ถ.มิตรภาพ ต.บ้านใหม่ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 3000
*ผู้ติดต่อ: kittiwong.su@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวางแผนและดำเนินงานระบบจำหน่ายไฟฟ้า บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีคำนวณโหลดโฟลว์ 5 วิธี ได้แก่ วิธีการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า (BFS) วิธีเมทริกซ์กระแสเข้าสู่บัสถึงกระแสเข้าสู่สาขาและเมทริกซ์กระแสไหลในสาขาถึงแรงดันที่บัส (BIBC/BCBV) วิธีนิวตันราฟสัน (NR) วิธีเกาส์-ไซเดล (GS) และ วิธีจำลองการฉีดกระแสไฟฟ้า (CIM) โดยประยุกต์ใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า IEEE 33 บัสแบบเรเดียล ภายใต้ 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีฐาน กรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (DG) ขนาด 500 kW ที่บัส 18 ในโหมด PQ ที่ และโหมด PV ทุกวิธีใช้ค่าคลาดเคลื่อนการลู่เข้าที่ 10^6 p.u. ผลการศึกษาพบว่า BFS, BIBC/BCBV, NR และ CIM ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกันในกรณีฐาน โดยมีกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย 202.677 kW และแรงดันต่ำสุด 0.9131 p.u. ที่บัส 18 ซึ่งสอดคล้องกับผลอ้างอิง [8] การติดตั้ง DG โหมด PQ สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียลงร้อยละ 32.63 ขณะที่ DG โหมด PV สามารถควบคุมแรงดันที่บัส 18 ได้เท่ากับ 1.0 p.u. และลดกำลังสูญเสียได้ร้อยละ 29.17 ด้านประสิทธิภาพเชิงเวลา วิธี BFS ใช้เวลาคำนวณต่ำสุดที่ 0.14 ms เร็วกว่า NR ประมาณ 169 เท่า และเร็วกว่า GS ประมาณ 1,381 เท่า ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า BFS เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่ต้องการความรวดเร็วและความถูกต้อง ขณะที่ผลกระทบของ DG ขึ้นอยู่กับโหมดการควบคุมและวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ระบบ

คำสำคัญ: BFS, BIBC/BCBV, CIM, GS, NR, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย, ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล, โหมด PQ, โหมด PV

Abstract

Power flow analysis is a fundamental tool for the planning and operation of electrical distribution systems. This paper presents a comparative analysis of five load flow calculation methods, namely Backward-Forward Sweep (BFS), Bus Injection to Branch Current/Branch Current to Bus Voltage (BIBC/BCBV), Newton-Raphson (NR), Gauss-Seidel (GS), and Current Injection Method (CIM). These methods are applied to the IEEE 33-bus radial distribution system under three case studies: the base case, the installation of a 500 kW distributed generation (DG) unit at Bus 18 operating in PQ mode, and the same DG unit operating in PV mode. All methods use a convergence tolerance of 10^6 p.u. The results show that BFS, BIBC/BCBV, NR, and CIM provide consistent results in the base case, with an active power loss of 202.677 kW and a minimum voltage of 0.9131 p.u. at Bus 18, which are consistent with the reference results of [8]. The installation of DG in PQ mode reduces the active power loss by 32.63%, while DG in PV mode regulates the voltage at Bus 18 to 1.0 p.u. and reduces the power loss by 29.17%. In terms of computational efficiency, BFS achieves the shortest calculation time of 0.14 ms, which is approximately 169 times faster than NR and 1,381 times faster than GS. The results indicate that BFS is suitable for radial distribution system analysis requiring both speed and accuracy, while the impact of DG depends on its control mode and the objective of the system analysis.

Keywords: Backward-Forward sweep, BIBC/BCBV, current injection, Gauss-Seidel, Newton-Raphson, distributed generation, electrical radial distribution system, PQ mode, PV mode.

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งจ่ายพลังงานจากสถานีไฟฟ้าย่อยไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าปลายทาง การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวางแผน ออกแบบ และดำเนินงานระบบดังกล่าว เนื่องจากช่วยให้ทราบค่าแรงดัน กระแส และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในทุกจุดของระบบ [1,2] ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation: DG) เช่น โซลาร์เซลล์และกังหันลมขนาดเล็ก เปลี่ยนลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจากทิศทางเดียวเป็นแบบสองทิศทาง ส่งผลต่อโปรไฟล์แรงดันและระดับการสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกวิธีคำนวณโหลดโฟลว์ที่เหมาะสมกับระบบที่มี DG จึงสำคัญทั้งด้านความถูกต้องและประสิทธิภาพเชิงเวลา [3,4]

วิธีคำนวณโหลดโฟลว์ที่นิยมใช้กับระบบเรเดียลได้แก่ วิธีการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณแรงดันแบบไปข้างหน้า (Backward-forward sweep: BFS) ซึ่งอาศัยโครงสร้างแบบต้นไม้เพื่อการจัดลำดับสายส่งของระบบ ในขณะที่การอาศัยเมทริกซ์กระแสเข้าสู่บัสถึงกระแสเข้าสู่สาขา (Bus injection to branch injection matrix: BIBC) และ เมทริกซ์กระแสไหลในสาขาถึงแรงดันที่บัส (Branch current to bus voltage matrix: BCBV) หรือเรียกว่า

BIBC/BCBV ซึ่งใช้เมทริกซ์ความสัมพันธ์กระแสสาขา-แรงดันบัสคำนวณโดยตรง ในขณะที่วิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson: NR) ที่ใช้เมทริกซ์จาโคเบียนและลู่เข้าแบบกำลังสอง วิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel: GS) ที่ปรับค่าแรงดันบัสตามลำดับด้วยเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ และวิธีจำลองการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current Injection Method: CIM) ที่ทำงานในระบบพิกัดฉากร่วมกับเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ของสายส่ง [2], [5]

งานวิจัยที่เปรียบเทียบทั้งห้าวิธีอย่างเป็นระบบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยเฉพาะเมื่อมี DG ทั้งโหมดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟ (Active and Reactive Power Control Mode: PQ) และ โหมดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้า (Active Power and Voltage Control Mode: PV) ซึ่งยังมีจำกัด บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องและความเร็วของทั้งห้าวิธีบนระบบ IEEE 33 บัส ประกอบการวิเคราะห์ผลของ DG โหมด PQ และ PV ต่อการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและโปรไฟล์แรงดัน ตลอดจนนำเสนอแนวทางเลือกวิธีคำนวณที่เหมาะสมกับลักษณะงาน

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟและรีแอ็กทีฟที่บัสสามารถคำนวณจากแรงดันบัสและค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่งตามสมการที่ (1) และ (2) ส่วนการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมของระบบคำนวณจากผลรวมกำลังสองของกระแสในแต่ละสาขาคูณด้วยความต้านทานหรือรีแอกแตนซ์ของสาขานั้น ดังสมการ (3) และ (4) ซึ่งเป็นพื้นฐานร่วมของทุกวิธีที่นำเสนอ [1,2], [5]

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^{n} |V_j| \left(G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij} \right) \quad (1)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^{n} |V_j| \left(G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij} \right) \quad (2)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k \in \mathcal{E}} |I_k|^2 R_k \quad (3)$$

$$Q_{loss} = \sum_{k \in \mathcal{E}} |I_k|^2 X_k \quad (4)$$

เมื่อ P_i, Q_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอ็กทีฟ

V คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส

G_{ij}, B_{ij} คือ องค์ประกอบแอดมิตแตนซ์

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง

R, X คือ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์

$P_{\text{loss}}, Q_{\text{loss}}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอ็กทีฟสูญเสียของระบบ

2.2 วิธี Backward-Forward Sweep (BFS)

BFS เป็นกระบวนการวนซ้ำสองขั้นตอนคือ การกวาดย้อนกลับ (Backward sweep) คำนวณกระแสสะสมในแต่ละสาขาจากกระแสฉีดที่บัสปลายทางตามสมการ (5) และ (6) และการกวาดไปข้างหน้า (Forward sweep) ปรับปรุงแรงดันบัสจากแรงดันบัสต้นทางและกระแสสาขาตามสมการ (7) ทำซ้ำจนผลต่างแรงดันระหว่างรอบน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนที่กำหนด ดังสมการ (8) [1], [6,7]

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (5)$$

$$I_{br,k} = I_i + \sum_{m \in \mathcal{C}(i)} I_{br,m} \quad (6)$$

$$V_j = V_{p(j)} - Z_k \cdot I_{br,k} \quad (7)$$

$$\max_{i \in \mathcal{N}} \left\| |V_i^{(\nu+1)}| - |V_i^{(\nu)}| \right\| < \varepsilon \quad (8)$$

เมื่อ P_i, Q_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอ็กทีฟ

I_i คือ กระแสไฟฟ้าที่บัสหรือกระแสโหลด

I_{br} คือ กระแสไฟฟ้าของสายส่งที่พิจารณา

V คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสใด ๆ

Z คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่ง

2.3 วิธีเมทริกซ์ BIBC/BCBV

วิธีนี้สร้างเมทริกซ์ BIBC ที่แปลงกระแสฉีดที่บัสเป็นกระแสในสาขา และเมทริกซ์ BCBV ที่แปลงกระแสสาขาเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันบัส การคูณเมทริกซ์ทั้งสองได้เมทริกซ์ตัวประกอบการสูญเสียแรงดันโดยตรงตามสมการ (9) ทำให้คำนวณแรงดันบัสทั้งหมดได้โดยไม่ต้องวนซ้ำหลายรอบดังสมการ (10) และมีข้อได้เปรียบในการวิเคราะห์ความไวของระบบ [8]

$$[B]=[BIBC][I], \quad [DV]=[BCBV][B]=[DLF][I] \tag{9}$$

$$V=V_0\times 1\text{-}[DLF][I] \tag{10}$$

เมื่อ $[B]$ คือ เมทริกส์กระแสในสาขา

$[BIBC]$ คือ เมทริกส์กระแสเข้าสู่บัสถึงกระแสเข้าสู่สาขา

$[BCBV]$ คือ เมทริกส์กระแสไหลในสาขาถึงแรงดันที่บัส

$[I]$ คือ เมทริกส์กระแสเข้าสู่บัส

$[\Delta V]$ คือ เมทริกส์ผลต่างแรงดันไฟฟ้าจากบัสอ้างอิง

$[DLF]$ คือ เมทริกซ์ตัวประกอบการสูญเสียแรงดัน

2.4 วิธี Newton-Raphson (NR)

NR แก้สมการดุลกำลังไฟฟ้าแบบไม่เชิงเส้นด้วยการประมาณเชิงเส้นรอบจุดทำงานปัจจุบันโดยใช้เมทริกซ์จาโคเบียนตามสมการ (11) ซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์ย่อยของ P และ Q เทียบกับมุมเฟส (θ) และขนาดแรงดัน $(|V|)$ วิธีนี้ลู่เข้าแบบกำลังสองทำให้ใช้จำนวนรอบน้อย แต่การสร้างและแก้เมทริกซ์จาโคเบียนทุกรอบทำให้มีภาระคำนวณต่อรอบสูง โดยเฉพาะกับระบบที่มีอัตราส่วน R/X สูงดังเช่นระบบจำหน่ายไฟฟ้า [5]

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_1 & J_2\\ J_3 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta|V|\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$J_{1,ij}=\frac{\partial P_i}{\partial\theta_j},\quad J_{2,ij}=\frac{\partial P_i}{\partial|V_j|},\quad J_{3,ij}=\frac{\partial Q_i}{\partial\theta_j},\quad J_{4,ij}=\frac{\partial Q_i}{\partial|V_j|} \tag{12}$$

เมื่อ ΔP, ΔQ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอคทีฟ

V, θ คือ ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า

J คือ องค์ประกอบจาโคเบียนเมทริกซ์

2.5 วิธี Gauss-Seidel (GS)

GS ปรับปรุงค่าแรงดันที่บัส i ทีละบัสตามลำดับโดยใช้ค่าแรงดันบัสข้างเคียงและกำลังไฟฟ้าที่กำหนด (S_i^{sch}) ผ่านเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ Y ตามสมการ (14) วิธีนี้มีโครงสร้างเรียบง่ายแต่ลู่เข้าแบบเชิงเส้นที่ช้า จึงต้องใช้จำนวนรอบสูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น [2]

$$I_i=\left(\frac{S_i^{sch}}{V_i}\right)^* \tag{13}$$

$$V_i^{(\nu+1)}=\frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{\left(S_i^{sch}\right)^*}{\left(V_i^{(\nu)}\right)^*}-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}Y_{ij}V_j^{(\nu)}\right] \tag{14}$$

เมื่อ I_i, V_i คือ กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

S_i^{sch} คือ กำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่กำหนด

Y คือ แอดมิตแตนซ์ของสายส่ง

2.6 วิธี Current Injection Method (CIM)

CIM คำนวณกระแสมิตแมตซ์ในระบบพิกัดฉากโดยแยกส่วนจริง และส่วนจินตภาพของกระแสที่แต่ละบัสจากกำลังไฟฟ้าที่กำหนดและแรงดันปัจจุบันตามสมการ (17) จากนั้นแก้ระบบสมการเชิงเส้น

ร่วมกับเมทริกซ์ Y-bus วิธีนี้ลู่เข้าแบบเชิงเส้นแต่มีความเสถียรดีกว่า GS [9]

$$I_i^{re} = \frac{-P_{\text{load},i} \cdot e_i - Q_{\text{load},i} \cdot f_i}{e_i^2 + f_i^2} \quad (15)$$

$$I_i^{im} = \frac{-P_{\text{load},i} \cdot f_i + Q_{\text{load},i} \cdot e_i}{e_i^2 + f_i^2} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} & -\mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{re} \\ \mathbf{I}^{im} \end{bmatrix} \quad (17)$$

เมื่อ I_i^{re}, I_i^{im} คือ กระแสไฟฟ้าจริงและจินตภาพที่ฉีดเข้าบัส

e, f คือ แรงดันไฟฟ้าจริงและจินตภาพ

P_{load}, Q_{load} คือ กำลังไฟฟ้าของโหลด

$\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$ คือ องค์ประกอบแอดมิตแตนซ์

2.7 แบบจำลอง DG

การจำลอง DG แบ่งเป็นโหมด PQ ซึ่งกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟและรีแอ็กทีฟคงที่ และโหมด PV ซึ่งควบคุมแรงดันที่บัส DG ให้คงที่ตามค่าที่กำหนด โดยใช้วงรอบนอกปรับค่ากำลังรีแอ็กทีฟตามความสัมพันธ์ความไวของแรงดันต่อกำลังรีแอ็กทีฟ ดังสมการ (18) และ (19) จนแรงดันที่บัสลู่เข้าสู่ค่าที่กำหนด [3,4]

$$S_{VQ} = \partial V_E / \partial Q_{DG} \approx \left(V_E^{(+\delta Q)} - V_E\right) / \delta Q \quad (18)$$

$$Q_{DG}^{(t+1)} = Q_{DG}^{(t)} + \left(V_{\text{set}} - V_E^{(t)}\right) / S_{VQ} \quad (19)$$

เมื่อ S_{VQ} คือ ความไวของแรงดันไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ DG

V_E คือ แรงดันไฟฟ้าจริงที่ต้องการควบคุมของ DG

Q คือ กำลังรีแอ็กทีฟของ DG กำหนดขอบเขตที่ ± 0.5 p.u.

δ คือ อัตราค่าการเปลี่ยนแปลง

V_{set} คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ควบคุม

t คือ รอบการคำนวณ

2.8 เปรียบเทียบคุณลักษณะ

การเปรียบเทียบคุณลักษณะของวิธีคำนวณโหลดโฟลว์แต่ละแบบนำเสนอได้ดังตารางที่ 1 พบว่า BFS และ BIBC/BCBV เหมาะกับระบบจำหน่ายแบบรัศมี เนื่องจากมีรูปแบบสมการไม่ซับซ้อนและการลู่เข้าเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามทุกวิธีสามารถรองรับ DG ในโหมด PV ได้ผ่านการปรับค่าแบบวงรอบนอก

ตารางที่ 1 สรุปคุณลักษณะของวิธีคำนวณโหลดโฟลว์

คุณลักษณะ	BFS	BIBC/ BCBV	NR	GS	CIM
รูปแบบสมการ	การไล่ตามสาขา	เมทริกซ์ DLF	มิสแมตช์เชิงขั้ว	Y-bus ตามลำดับ	Y-bus พิกัดฉาก
การลู่เข้า	เชิงเส้น	เชิงเส้น	กำลังสอง	เชิงเส้น (ช้า)	เชิงเส้น
การจัดการ R/X	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ต่ำ	ปานกลาง	ดี
จาโคเบียน	ไม่มี	ไม่มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
DG โหมด PV	วงรอบนอก	วงรอบนอก	วงรอบนอก	วงรอบนอก	วงรอบนอก

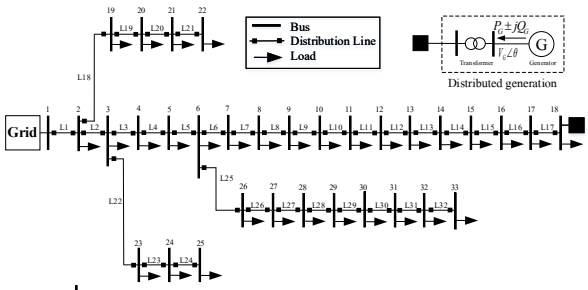
3. วิธีการศึกษา

3.1 ระบบทดสอบ IEEE 33 บัส

ระบบทดสอบที่ใช้คือระบบจำหน่ายไฟฟ้า IEEE 33 บัส แบบเรเดียลของ Baran และ Wu ประกอบด้วย 33 บัส และ 32 สาขา ที่ระดับแรงดันฐาน 12.66 kV และกำลังไฟฟ้าฐาน 10 MVA บัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง (slack bus) เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าย่อย มีโหลดรวมทั้งระบบ 3,715 kW และ 2,300 kVAr กระจายตามบัสต่าง ๆ ระบบนี้นิยมใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบวิธีคำนวณโหลดโฟลว์เนื่องจากมีอัตราส่วน R/X สูงตามลักษณะระบบจำหน่ายจริง [2-5], [11] แสดงดังรูปที่ 1

อย่างไรก็ตามการจำลองทั้งหมดดำเนินการด้วยโปรแกรม Python โดยพัฒนาชุดคำสั่งคำนวณทั้งห้าวิธีบนเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวกันเพื่อความเป็นธรรมในการเปรียบเทียบเวลา โดยเวลาคำนวณของ BFS, BIBC/BCBV และ CIM เฉลี่ยจาก 30 รอบ ในขณะที่ NR และ GS เฉลี่ยจาก 5 รอบเนื่องจากใช้

เวลาต่อรอบสูงกว่ามาก ซึ่งทุกวิธีใช้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ $1.0\angle 0°$ p.u.



รูปที่ 1 ระบบจำหน่าย IEEE 33 บัส แบบเรเดียล

3.2 การกำหนดกรณีศึกษา

การประเมินผลกระทบของ DG ต่อสมรรถนะของระบบในการศึกษานี้กำหนดสามกรณีดังตารางที่ 2 กรณีที่ 1 เป็นกรณีฐานไม่มี DG กรณีที่ 2 ติดตั้ง DG ขนาด 500 kW ที่บัส 18 ในโหมด PQ ที่ตัวประกอบกำลังคงที่ 0.85 และกรณีที่ 3 ติดตั้ง DG หน่วยเดียวกันในโหมด PV โดยกำหนดแรงดันที่บัส 18 ไว้ที่ 1.0 p.u. ทุกกรณีใช้ค่าคลาดเคลื่อนภายใน 10^{-6} p.u. และกรณีที่ 3 ใช้ค่าคลาดเคลื่อนวงรอบนอกเพิ่มเติม 10^{-6} p.u. [12]

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ DG ที่บัส 18

พารามิเตอร์/กรณี	1	2 (PQ)	3 (PV)
P_{DG} (kW)	-	500	500
Q_{DG} (kVAr)	-	309.87	วงรอบนอกกำหนด
ตัวประกอบกำลัง	-	0.85 lag.	-
V_{set} (p.u.)	-	-	1.0
ε ภายใน (p.u.)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
ε ภายนอก (p.u.)	-	-	10^{-6}

3.3 ดัชนีประเมินผล

ดัชนีประเมินผลสำหรับใช้ประกอบการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละกรณีศึกษาสามารถนำเสนอได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ดัชนีประเมินผล

ดัชนี	สูตร	ความหมาย
P_{loss} (kW)	$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_{br}} I_k^2 R_k \quad [kW]$	กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวม
Q_{loss} (kVAr)	$Q_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_{br}} I_k^2 X_k \quad [kVAr]$	กำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟสูญเสียรวม
V_{min} (pu)	$V_{\min} = \min_{i\in\{1,\ldots,n\}} \lvert V_i \rvert \quad [pu]$	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่ำสุด
V_{bus18} (pu)	$V_{DG} = \lvert V_{18} \rvert \quad [pu]$	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ DG
PLRI (%)	$PLRI = \frac{P_{\text{loss}}^{(I)} - P_{\text{loss}}^{(\text{case})}}{P_{\text{loss}}^{(I)}} \times 100\%$	ดัชนีลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า
Time (ms)	ค่าเฉลี่ยเวลาในการลู่เข้าสู่คำตอบ	เวลาในการคำนวณ

4. ผลการจำลองและการอภิปราย

4.1 ความถูกต้องของกรณีฐาน (กรณีที่ 1)

ส่วนนี้นำเสนอผลการจำลองของกรณีฐานเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทั้งห้าวิธีกับค่าอ้างอิงของ Baran และ Wu [8] ดังตารางที่ 4 พบว่า BFS, BIBC/BCBV, NR และ CIM ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเดียวกันสอดคล้องกับงานอ้างอิงของ Baran และ Wu ส่วน GS ไม่สามารถลู่เข้าตามเกณฑ์ 10^{-6} p.u. ภายใน 883 รอบ

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์กรณีที่ 1

วิธี	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kVAr)	V_{min} (p.u.)	รอบ	เวลา (ms)
BFS	202.6771	135.1409	0.913090	6	0.140
BIBC/BCBV	202.6771	135.1409	0.913090	6	0.157
NR	202.6771	135.1410	0.913090	3	23.69
GS	202.2211*	134.8343*	0.913223*	883	193.43
CIM	202.6771	135.1409	0.913090	6	3.144
Baran & Wu [8]	202.67	-	0.9131	-	-

หมายเหตุ: * GS ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ 10^{-6} p.u. ภายใน 2,000 รอบ

4.2 กรณีที่ 2 การจำลอง DG ด้วยโหมด PQ

ผลลัพธ์ของกรณีที่ 2 ติดตั้ง DG ขนาด 500 kW ที่บัส 18 ในโหมด PQ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า BFS ใช้เวลาในการลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วที่สุด ในขณะที่ตัวประกอบกำลังที่กำหนดจะ

ส่งผลให้การฉีดกำลังรีแอ็กทีฟที่ใกล้เคียงค่าเหมาะสมที่สุด เหล่านี้เป็นผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์กรณีที่ 2 DG โหมด PQ

วิธี	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kVAr)	V_{min} (pu)	V_{18} (pu)	รอบ	เวลา (ms)
BFS	136.5347	91.2588	0.927587	0.969418	6	0.129
BIBC/BCBV	136.5347	91.2588	0.927587	0.969418	6	0.147
NR	136.5347	91.2588	0.927587	0.969418	3	23.93
GS	136.2159	91.0509	0.927670	0.969545	801	193.51
CIM	136.5347	91.2588	0.927587	0.969418	6	3.738

4.3. กรณีที่ 3 การจำลอง DG ด้วยโหมด PV

ผลลัพธ์ของกรณีที่ 3 ซึ่งติดตั้ง DG ในโหมด PV โดยควบคุมแรงดันที่บัส 18 ให้เท่ากับ 1.0 p.u. แสดงดังตารางที่ 6 พบว่าวงรอบนอกสำหรับปรับ Q ในโหมด PV เพิ่มภาระการคำนวณประมาณ 9-10 เท่าในทุกวิธี ในขณะที่ BFS เป็นวิธีที่เร็วที่สุดแม้ว่าต้องใช้จำนวนรอบในการเข้าสู่คำตอบที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม การฉีด Q_{DG} ในปริมาณมาก (868.60 kVAr) จะทำให้เกิดกระแสรีแอ็กทีฟไหลย้อนในสายส่ง 15-17 ส่งผลให้การสูญเสียในสาขาดังกล่าวเพิ่มขึ้น [3]

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์กรณีที่ 3 DG โหมด PV

วิธี	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kVAr)	V_{min} (p.u.)	V_{18} (p.u.)	Q_{DG} (kVAr)	รอบ	เวลา (ms)
BFS	143.5390	101.9562	0.932395	1.0000	868.603	42	1.343
BIBC/BCBV	143.5390	101.9562	0.932395	1.0000	868.603	42	1.605
NR	143.5390	101.9562	0.932395	1.0000	868.603	21	228.61
GS	143.0803	101.6135	0.932466	1.0000	866.176	5,362	1580.55
CIM	143.5390	101.9562	0.932395	1.0000	868.603	42	29.23

4.4. การเปรียบเทียบโดยรวม

สรุปผลลัพธ์ทั้งหมดของทุกวิธีในทั้งสามกรณีศึกษาเพื่อให้เห็นภาพรวมของความถูกต้องและประสิทธิภาพเชิงเวลาในทุกสภาวะการทำงานดังตารางที่ 7 พบว่า BFS เป็นวิธีที่เร็วที่สุดด้วยความถูกต้องเท่ากัน ในขณะที่ GS ใช้จำนวนรอบในการลู่เข้าสู่คำตอบที่มากส่งผลต่อเวลาในการทำงานที่มากที่สุด

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบแต่ละกรณีศึกษา

วิธี	กรณี	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kVAr)	V_{min} (p.u.)	รอบ	เวลา (ms)
BFS	1	202.677	135.141	0.913090	6	0.140
	2	136.535	91.259	0.927587	6	0.129
	3	143.539	101.956	0.932395	42	1.343
BIBC/ BCBV	1	202.677	135.141	0.913090	6	0.157
	2	136.535	91.259	0.927587	6	0.147
	3	143.539	101.956	0.932395	42	1.605
NR	1	202.677	135.141	0.913090	3	23.69
	2	136.535	91.259	0.927587	3	23.93
	3	143.539	101.956	0.932395	21	228.61
GS	1	202.221	134.834	0.913223	883	193.43
	2	136.216	91.051	0.927670	801	193.51
	3	143.080	101.614	0.932466	5362	1580.55
CIM	1	202.677	135.141	0.913090	6	3.144
	2	136.535	91.259	0.927587	6	3.738
	3	143.539	101.956	0.932395	42	29.23

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ภายใต้กรณีศึกษาการติดตั้ง DG โหมด PQ และ PV ผลการศึกษาพบว่า BFS, BIBC/BCBV, NR และ CIM ให้ผลลัพธ์ด้านกำลังสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกัน ขณะที่ GS มีข้อจำกัดด้านการลู่เข้าและใช้จำนวนรอบคำนวณสูงกว่าวิธีอื่นอย่างชัดเจน การติดตั้ง DG จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันของระบบได้ โดยโหมด PQ จะสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ดีกว่าโหมด PV ในกรณีศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม DG ในโหมด PV มีความสามารถในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสติดตั้งได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นโหมด PQ จะเหมาะกับงานที่เน้นลดการสูญเสีย ส่วนโหมด PV จะเหมาะกับงานที่เน้นควบคุมแรงดัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงเวลา พบว่า BFS เป็นวิธีที่

เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เนื่องจากให้ผลลัพธ์ถูกต้องและใช้เวลาคำนวณน้อยที่สุด ส่วน BIBC/BCBV เหมาะกับงานวิเคราะห์ความไวของระบบ NR เหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำแต่มีภาระคำนวณสูง และ CIM เป็นอีกทางเลือกที่มีความเสถียรกว่า GS ซึ่งไม่เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงหรือการคำนวณแบบเรียลไทม์ เนื่องจากใช้จำนวนรอบมากเกินไปและยังมีค่าคลาดเคลื่อนหลงเหลือ ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีคำนวณโหลดโฟลว์และโหมดการทำงานของ DG ให้เหมาะสมกับงานวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

6. เอกสารอ้างอิง

[1] B. Fang, C. Zhao, and S. H. Low, (2025). "Convergence of backward/forward sweep for power flow solution in radial networks," IEEE Trans. Control Netw. Syst., vol. 12, no. 2, pp. 1780–1791,

[2] A. A. El-Fergany, (2025). "Reviews on load flow methods in electric distribution networks," Arch. Comput. Methods Eng., vol. 32, pp. 1619–1633,

[3] S. A. Salimon, G. A. Adepoju, I. G. Adebayo, H. O. R. Howlader, S. O. Ayanlade, and O. B. Adewuyi, (2023). "Impact of distributed generators penetration level on the power loss and voltage profile of radial distribution networks," Energies, vol. 16, no. 4, art. 1943, Feb.

[4] A. Owosuhi, Y. Hamam, and J. Munda, (2024.) "A new framework for active loss reduction and voltage profile enhancement in a distributed generation-dominated radial distribution network," Appl. Sci., vol. 14, no. 3, art. 1077,

[5] C. Coutinho de Oliveira, A. Bonini Neto, D. A. Alves, C. R. Minussi, and C. A. Castro, (2023) . "Alternative current injection Newton and fast decoupled power flow," Energies, vol. 16, no. 6, art. 2548, Mar.

[6] K. Murari, N. P. Padhy and S. Kamalasadan, (2023). "A backward-forward sweep based power flow algorithm for generalized AC-DC distribution network with distributed generations," IEEE Trans. Power Del.,

[7] K. Murari and S. Kamalasadan, (2021) . "Graph Based Power Flow Approach for Single Phase Distribution System with Distributed Generators (DGs) Considering All Load Types," 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), pp. 1-8, Vancouver, BC, Canada.

[8] A. Şeker, T. Gözel, and M. H. Hocaoğlu, (2021) . "BIBC matrix modification for network topology changes: Reconfiguration problem implementation," Energies, vol. 14, no. 10, art. 2738, May.

[9] B. Zargar et al., (2021). "Linear iterative power flow approach based on the current injection model of load and generator," IEEE Trans. Power Syst.

[10] H. Lotfi, M. E. Hajiabadi, and H. Parsadust, (2024). "Power distribution network reconfiguration techniques: A thorough review," Sustainability, vol. 16, no. 23, art. 10307, Nov.

[11] S. A. Adegoke, Y. Sun, A. S. Adegoke, and D. Ojeniyi, (2024) . "Optimal placement of distributed generation to minimize power loss and improve voltage stability," Heliyon, vol. 10, art. e39298,

[12] J. P. Mahato, Y. K. Poudel, R. K. Mandal, and M. R. Chapagain, (2024) . "Power loss minimization and voltage profile improvement of radial distribution network through the installation of capacitor and distributed generation (DG)," Arch. Adv. Eng. Sci., vol. 3, no. 4, pp. 265–273.

การออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบกลไกหุ่นยนต์ควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ

Design and Implementation of a Robotic Mechanism Controlled by a Programmable Logic Controller (PLC) Integrated with an Image Processing System

คณิศร วิปัดทุม, วัชระพงศ์ วงษ์สินชัย, ธานนณ์ ชวนกระโทก, ณัฐวุฒิ สวัสดี, ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย, วุฒิชัย สง่างาม, ประจวบ อินระวงค์, นพณัฐ จิตกรียาน, กิตติวงศ์ สุธรรมโน, และ ธงชัย คล้ายคลึง*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: thongchai.ky@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0819972336

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบแขนกลควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ โดยใช้กล้องเป็นอุปกรณ์รับภาพและนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการประมวลผลด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ การเปรียบเทียบระบบปัญญาประดิษฐ์แบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อระบุพิกัดตำแหน่งของเป้าหมายแบบเรียลไทม์ จากนั้นระบบจะส่งข้อมูลพิกัดไปยังพีแอลซีเพื่อประมวลผลและสั่งการชุดขับเคลื่อนให้กลไกแขนกลเคลื่อนที่เข้าปะทะเป้าหมายโดยอัตโนมัติ ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นที่สามารถบูรณาการการทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบการประมวลผลภาพ (Image Processing) มีความแม่นยำในการตรวจจับเป้าหมายเฉลี่ยร้อยละ 93.99 และมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 77.46 มิลลิวินาที ระบบกลไกหุ่นยนต์ต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบหุ่นยนต์อัจฉริยะและระบบอัตโนมัติสำหรับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: ระบบแขนกล, พีแอลซี, การประมวลผลภาพ, การเรียนรู้เชิงลึก, ระบบเวลาจริง

Abstract

This research paper presents the design and implementation of a robotic mechanism controlled by a programmable logic controller (PLC) integrated with an image processing system. A digital camera captures real-time images, and a computer vision algorithm detects the target coordinates. The performance of a deep learning-based artificial intelligence (AI) method is compared with that of conventional image processing techniques for real-time target detection. The detected coordinates are transmitted to the PLC, which controls the servo drives to move the robotic arm automatically. Experimental results demonstrate stable system operation and effective integration between the vision and control subsystems. The proposed system achieved an average target detection accuracy of 93.99% with an average processing time of 77.46 ms, demonstrating its suitability for real-time industrial applications. The developed prototype provides a practical framework for intelligent robotic and industrial automation systems.

Keywords: Robotic Mechanism, PLC, Image Processing, Deep Learning, Real-Time System

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรม 4.0 (Industry 4.0) ภาคอุตสาหกรรมการผลิตมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพผ่านการเชื่อมต่อข้อมูลและระบบอัจฉริยะ โดยมีระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automation System) เป็นฟันเฟืองหลักในการขับเคลื่อนกระบวนการให้มีความแม่นยำและลดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ อุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญในฐานะ "สมองกล" ของระบบคือ พีแอลซี หรือ Programmable Logic Controller (PLC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมดิจิทัลที่ทำหน้าที่รับข้อมูล ประมวลผลลอจิก และสั่งการอุปกรณ์เอาต์พุตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อบูรณาการระบบควบคุมดังกล่าวร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing) จะช่วยยกระดับการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมการทำงานให้มีความชาญฉลาดยิ่งขึ้น

วิวัฒนาการของพีแอลซี เข้ามาทดแทนระบบรีเลย์แบบดั้งเดิมที่ซับซ้อน ช่วยลดภาระการเดินสายฮาร์ดแวร์และเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับปรุงลำดับการทำงานผ่านซอฟต์แวร์ นอกจากนี้พีแอลซี ยังถูกออกแบบให้มีความทนทานและความน่าเชื่อถือสูง สามารถทำงานได้อย่างเสถียรภายใต้สภาวะแวดล้อมในงานอุตสาหกรรมที่รุนแรง ทั้งในด้านอุณหภูมิ สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า และแรงสั่นสะเทือน โดยพีแอลซีในปัจจุบันยังรองรับการเชื่อมต่อกับระบบ Industrial IoT (IIoT), SCADA และระบบคลาวด์ เพื่อสนับสนุนการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time Monitoring) และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการยกระดับสู่โรงงานอัจฉริยะ (Smart Factory)

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำเทคโนโลยีประมวลผลภาพมาใช้ร่วมกับแขนกลอย่างแพร่หลาย แต่การควบคุมผ่านพีแอลซีในงานที่ต้องการการตอบสนองความเร็วสูงและมีความน่าเชื่อถือในระดับอุตสาหกรรม ยังคงมีความท้าทายในด้านความหน่วงของการสื่อสารข้อมูล จากประเด็นปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นโอกาสในการพัฒนา โดยบทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบแขนกลควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ โดยใช้กล้องร่วมกับปัญญาประดิษฐ์แบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นการเปรียบเทียบระบบตรวจจับในการระบุพิกัดตำแหน่งของเป้าหมายเพื่อส่งข้อมูลให้พีแอลซีทั้ง 2 ระบบ ประมวลผลและสั่งการชุดขับเคลื่อนของระบบแขนกลให้เคลื่อนที่เข้าปะทะเป้าหมายได้อย่างแม่นยำและตอบสนองแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่เป็นต้นแบบในการศึกษาการประยุกต์ใช้งานพีแอลซี ร่วมกับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบหุ่นยนต์อัจฉริยะเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบและส่วนประกอบ

การออกแบบและสร้างระบบแขนกลควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ อาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีด้านระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความรวดเร็วใน

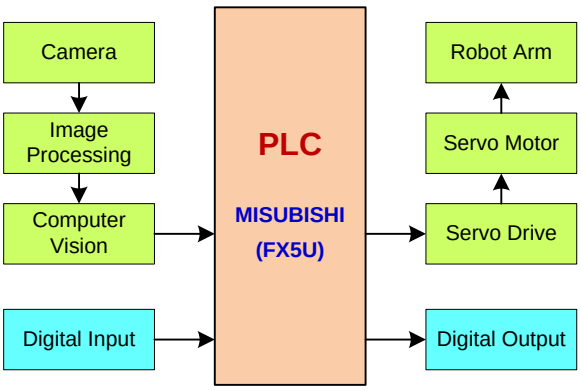
การควบคุมพิกัดการเคลื่อนที่ของกลไกแขนกล โดยโครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงสร้างทางกล ระบบควบคุมหลัก และระบบประมวลผลภาพ

โครงสร้างทางกล (Mechanical Structure) ถูกออกแบบเป็นกลไกแขนกลสำหรับการเคลื่อนที่เข้าปะทะเป้าหมาย ผลิตจากวัสดุโลหะผสมร่วมกับวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) เพื่อให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง สามารถรองรับแรงบิดและแรงกระแทกจากการเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบขับเคลื่อนติดตั้งมอเตอร์เซอร์โว (Servo Motor) จำนวน 2 แกน เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y ทำให้แขนกลสามารถเข้าสู่พิกัดตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

ระบบควบคุมหลัก (Main Control System) ประยุกต์ใช้พีแอลซี รุ่น Mitsubishi FX5U ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลลอจิกและควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ โดย PLC จะรับสัญญาณพิกัดตำแหน่งจากระบบประมวลผลภาพ จากนั้นจะคำนวณและส่งสัญญาณควบคุมพิกัดและความเร็ว (Pulse/Direction) ไปยังเซอร์โวไดรฟ์ (Servo Drive) เพื่อสั่งการให้มอเตอร์เซอร์โวตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ

ระบบประมวลผลภาพ (Image Processing System) ติดตั้งกล้องดิจิทัลบริเวณส่วนบนของโครงสร้างเพื่อรับภาพมุมมองด้านบน (Top-view) ของพื้นที่ปฏิบัติงาน สัญญาณภาพจะถูกถ่ายทอดผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 ETH ผ่านระบบเครือข่ายอีเทอร์เน็ต (Ethernet) เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเพื่อประมวลผลด้วยโมเดลปัญญาประดิษฐ์แบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ด้วยอัลกอริทึม YOLO (You Only Look Once) ในการตรวจจับและระบุพิกัดตำแหน่งของเป้าหมายแบบเรียลไทม์ เมื่อระบบคำนวณพิกัดเป้าหมายได้แล้ว จะส่งข้อมูลไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO เพื่อทำการแปลงระดับสัญญาณดิจิทัล (Signal Conditioning) และส่งผ่านวงจรอัปโตคัปเปลอร์ (Optocoupler) เพื่อแยกแยะสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ก่อนเข้าสู่ช่องสัญญาณอินพุตของพีแอลซี

การออกแบบโครงสร้างระบบในลักษณะนี้ เป็นการแยกส่วนการประมวลผลภาพที่มีความซับซ้อน (High-level Processing) ออกจากระบบควบคุมการเคลื่อนที่ทางกล (Low-level Control) ทำให้สามารถลดภาระการทำงาน (CPU Load) ของพีแอลซี และเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ภาพความละเอียดสูง ส่งผลให้ระบบแขนกลสามารถตรวจจับเป้าหมาย ตัดสินใจ และตอบสนองเชิงกลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

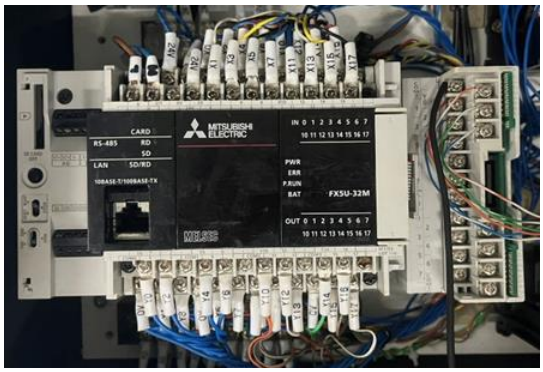


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบกลไกหุ่นยนต์

2.2 โปรแกรมเมเบิลโลจิกคอนโทรลเลอร์

พีแอลซี เป็นระบบคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรมที่ออกแบบให้ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมรุนแรง [1] มี

โครงสร้างภายในประกอบด้วย CPU หน่วยความจำ และโมดูล I/O ซึ่งทำงานร่วมกันผ่านวงรอบรอบการสแกน (Scan Cycle) 3 ขั้นตอน ได้แก่ การอ่านสัญญาณอินพุต (Input Scan) การประมวลผลโปรแกรม (Program Execution) และการปรับปรุงค่าเอาต์พุต (Output Scan) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 PLC Mitsubishi FX5U ที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้พีแอลซี Mitsubishi รุ่น FX5U เป็นหน่วยประมวลผลหลักควบคุมกลไกแขนกล เนื่องจากประมวลผลลอจิกพื้นฐานได้ความเร็วสูงถึง 34 ns/step และมีฟังก์ชันเด่นที่เอื้อต่อระบบควบคุม ดังนี้:

1.Built-in Ethernet Port: รองรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง ช่วยให้สามารถขยายขีดความสามารถการรับส่งข้อมูลพิกัดร่วมกับระบบประมวลผลภาพภายนอกได้ในอนาคต

2.High-Speed Pulse Output: มีวงจรขับสัญญาณพัลส์ในตัว 4 แกน รองรับความถี่สูงสุด 200 kHz ทำให้ PLC สามารถส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่ง (Pulse) และทิศทาง (Direction) ไปยังเซอร์โวไดรฟ์เพื่อควบคุมมอเตอร์เซอร์โวแกน X และ Y ได้โดยตรง ช่วยลดขนาดระบบควบคุมและลดความหน่วงในการส่งทอดสัญญาณ

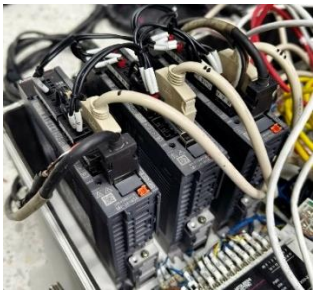
การประยุกต์ใช้หน่วยประมวลผลดังกล่าว ทำให้ระบบสามารถรับค่าพิกัดป้อนกลับทางภาพ (Visual Feedback) และสั่งการชุดขับเคลื่อนเชิงกลได้อย่างเสถียรและตอบสนองแบบเรียลไทม์[1]

2.3 เซอร์โวไดรฟ์และมอเตอร์เซอร์โว

เซอร์โวไดรฟ์ (Servo Drive) ทำหน้าที่รับคำสั่งควบคุมพัลส์จากพีแอลซีเพื่อแปลงเป็นสัญญาณขับเคลื่อนและควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control) ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วให้มีความแม่นยำและเสถียรภาพสูง[2] ส่วนมอเตอร์เซอร์โว (Servo Motor) จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดพิกัดตำแหน่ง เช่น เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลย้อนกลับ (Feedback Signal) ไปเปรียบเทียบกับค่าพิกัดเป้าหมาย (Set Point) และทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยอัตโนมัติ ทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พิกัดที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว [2]



รูปที่ 3 มอเตอร์เซอร์โว



รูปที่ 4 เซอร์โวไดรฟ์

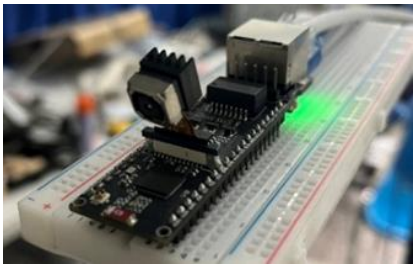
ในงานวิจัยนี้ ระบบประยุกต์ใช้มอเตอร์เซอร์โว จำนวน 2 ชุด สำหรับควบคุมพิกัดการเคลื่อนที่ของกลไกแขนกล ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนในแนวแกน X และมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนในแนวแกน Y โดยพีแอลซีจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณพัลส์สั่งการไปยังเซอร์โวไดรฟ์ตามค่าพิกัดเป้าหมายที่ได้รับมาจากระบบประมวลผลภาพ เพื่อขับเคลื่อนกลไกแขนกลให้เคลื่อนที่เข้าชกเป้าหมายแบบเรียลไทม์

2.4 ระบบประมวลผลภาพและปัญญาประดิษฐ์

ระบบประมวลผลภาพหรือคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้ระบบอัตโนมัติสามารถรับรู้ วิเคราะห์ และตีความข้อมูลจากภาพดิจิทัลได้ [4] โดยระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

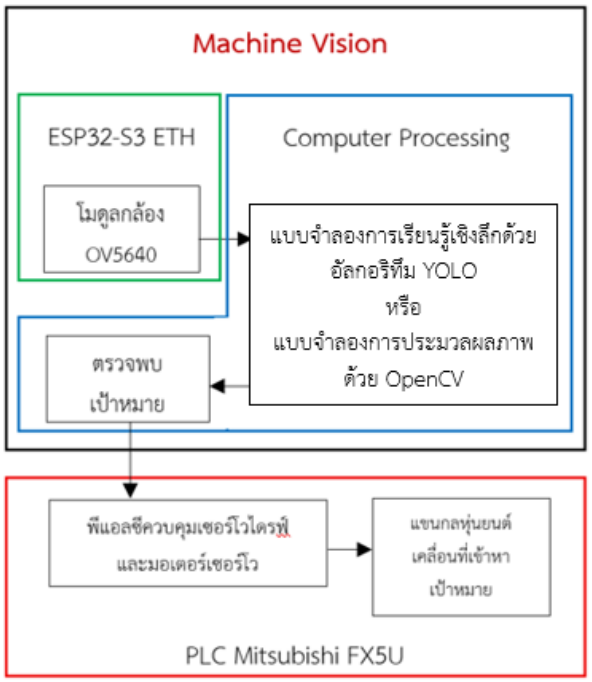
2.4.1 ฮาร์ดแวร์ระบบภาพ

ผู้วิจัยได้เลือกใช้กล้อง OV5640 เป็นอุปกรณ์รับภาพอินพุตเพื่อให้ได้ภาพที่มีความคมชัดและเหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ โดยเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 ETH เพื่อถ่ายทอดสัญญาณภาพผ่านระบบเครือข่ายอีเทอร์เน็ต (LAN)



รูปที่ 5 กล้อง OV5640 และบอร์ด ESP32-S3 ETH

การเลือกใช้การสื่อสารนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดความหน่วงเวลา (Latency) และช่วยให้การส่งผ่านข้อมูลภาพมีความเสถียรสูงกว่าการใช้เครือข่ายไร้สาย ข้อมูลภาพจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Notebook Computer) ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลักในการวิเคราะห์ภาพแบบเรียลไทม์ การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบในลักษณะนี้จะช่วยลดภาระในการประมวลผล (CPU Load) ของไมโครคอนโทรลเลอร์และเป็นการดึงเอาศักยภาพการคำนวณภาพความละเอียดสูงมาใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเพื่อให้รองรับการประมวลผล [8-9] ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



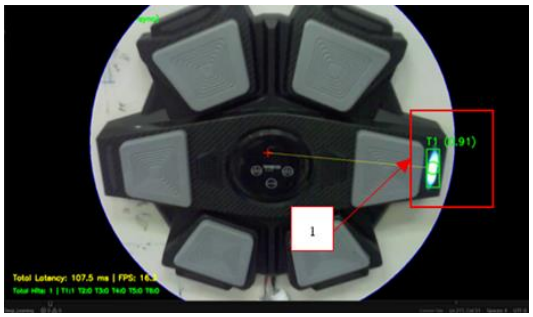
รูปที่ 6 แผนผังลำดับขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบ

2.4.3 แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกด้วยอัลกอริทึม YOLO

การออกแบบเพื่อฝึกแบบจำลอง YOLOv8n ด้วยชุดข้อมูลภาพจำนวน 3,000 ภาพ แบ่งเป็นชุดฝึกจำนวน 2,400 ภาพ และชุดตรวจสอบจำนวน 600 ภาพ โดยออกแบบและกำหนดขนาดภาพอินพุต

เท่ากับ 640×640 พิกเซล และดำเนินการฝึกจำนวน 50 รอบ พบว่าแบบจำลองให้ผลดีที่สุดในรอบที่ 45 โดยมีค่า Precision ร้อยละ 87.61 มีค่า Recall ร้อยละ 91.47, ค่า mAP@0.50 ร้อยละ 96.69 และค่า mAP@0.50:0.95 ร้อยละ 92.26 ตามลำดับ ขณะที่ค่า F1-Score สูงสุดประมาณ 0.89 ที่ค่า Confidence threshold ประมาณ 0.389 [6-7]

ผลลัพธ์ของ YOLO ประกอบด้วยกรอบตรวจจับคลาส และค่าความเชื่อมั่น [6-7] งานนี้กำหนดคลาส T1-T6 ตามเอกลักษณ์เชิงตำแหน่งของเป้าชกทั้ง 6 จุด มิใช่ตามชนิดของแสง เพราะไฟสีน้ำเงินมีลักษณะคล้ายกัน การกำหนด 6 คลาสช่วยให้ส่งรหัสเป้าหมายไปยังพีแอลซีได้ทันที ดังรูปที่ 7 ที่แสดงถึงการตรวจจับระบุเป็นหมายเลข 1

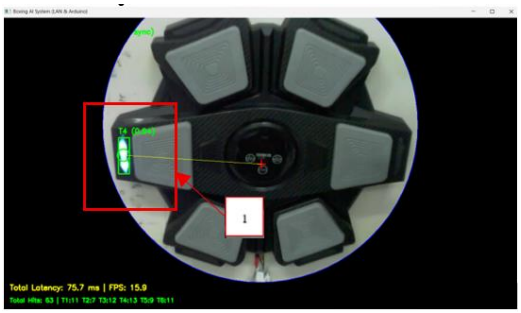


รูปที่ 7 การตรวจจับและจำแนกพิกัดเป้าหมายทั้ง 6 คลาส ด้วยอัลกอริทึม YOLO

2.4.3 แบบจำลองการประมวลผลภาพด้วย OpenCV

ผู้วิจัยประยุกต์ใช้ OpenCV ร่วมกับวิธี HSV Thresholding สำหรับตรวจจับบริเวณแสงสีฟ้าภายในภาพ โดยแปลงภาพจากปริภูมิสี BGR เป็น HSV ระหว่าง 85, 30, 200 ถึง 130, 255, 255 แล้วกำหนดช่วงค่าสีเพื่อสร้างภาพไบนารีเฉพาะบริเวณสีฟ้า จากนั้นใช้การกรองสัญญาณรบกวน การตรวจหาคอนทัวร์ และการคำนวณจุดศูนย์กลางของพื้นที่แสงที่ตรวจพบ

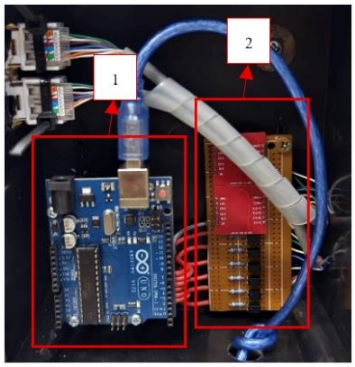
งานวิจัยนี้กำหนดพื้นที่สนใจแบบวงกลม หรือ Circular ROI จำนวน 6 ตำแหน่ง ให้สอดคล้องกับตำแหน่งเป้าชก T1-T6 เมื่อระบบตรวจพบแสงสีฟ้าภายใน ROI ใด จะระบุหมายเลขเป้าหมายนั้นและส่งรหัสไปยังพีแอลซีโดยตรง วิธีดังกล่าวช่วยลดการตรวจจับวัตถุสีน้ำเงินที่อยู่นอกเป้าหมาย ลดภาระการประมวลผล และเหมาะสำหรับการตรวจจับแบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 8 ที่แสดงถึงการตรวจจับระบุเป็นหมายเลข 1



รูปที่ 8 การตรวจจับและจำแนกพิกัดเป้าหมายทั้ง 6 คลาส ด้วย OpenCV

2.4.4 กระบวนการอินเตอร์เฟสและการส่งข้อมูลสู่พีแอลซี

เมื่อระบบประมวลผลภาพระบุพิกัดเป้าหมายเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลพิกัดนั้นจะถูกส่งต่อไปยังบอร์ด Arduino UNO เพื่อทำหน้าที่แปลงระดับสัญญาณดิจิทัล (Signal Conditioning) จากนั้นสัญญาณจะผ่านวงจรออปโตคัปเปลอร์ (Optocoupler) เพื่อแยกแยะสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) และลดทอนสัญญาณรบกวน ก่อนเข้าสู่ช่องดิจิทัลอินพุตของพีแอลซีเพื่อประมวลผลลอจิกและสั่งการขับเคลื่อนกลไกแขนกลเข้าเป้าหมายต่อไป [1],[8] ดังรูปที่ 9 โยหมายเลข 1 คือ บอร์ด Arduino UNO และหมายเลข 2 คือ วงจรออปโตคัปเปลอร์



รูปที่ 9 ชุดบอร์ดอินเตอร์เฟส Arduino UNO และวงจรออปโตคัปเปลอร์

3. ระเบียบวิธีวิจัยและการทดสอบ

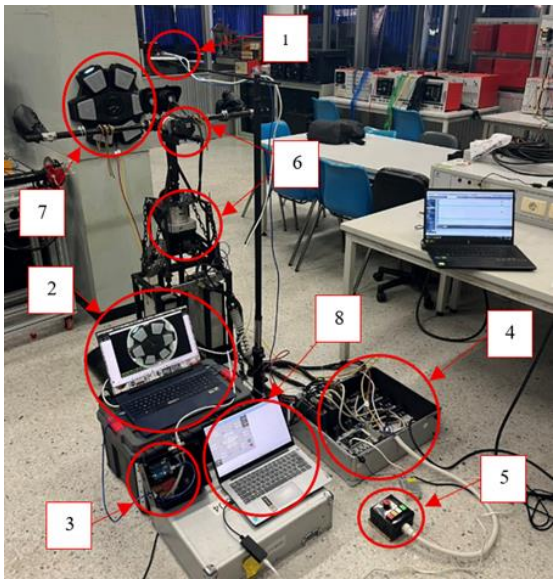
การทดสอบและประเมินผลสมรรถนะของระบบแขนกลควบคุมด้วยพีแอลซีร่วมกับระบบประมวลผลภาพ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบระบบขับเคลื่อนเชิงกลของมอเตอร์ และการทดสอบระบบตรวจจับพิกัดเป้าหมาย

3.1 การทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โว

เพื่อต้องการทราบความแม่นยำและความเร็วในการเข้าสู่พิกัดของกลไกแขนกลในแนวแกน X และแกน Y โดยการโปรแกรมและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การควบคุมพิกัดตำแหน่งและความถี่ของสัญญาณพัลส์เอาต์พุตความเร็วสูง ผ่านซอฟต์แวร์ GX Works3 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณสั่งการที่มีต่อความเร็ว ความเที่ยงตรง และลักษณะการตอบสนองเชิงเวลาของมอเตอร์เซอร์โวทั้ง 2 แกน โดยมีการทดสอบระบบตรวจจับบนอัลกอริทึม YOLO และ OpenCV ในการเปรียบเทียบ

3.2 การทดสอบระบบประมวลผลภาพและตรวจจับตำแหน่งเป้าหมาย

เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองคอมพิวเตอร์วิทัศน์และอัลกอริทึม YOLO ในการตรวจจับและจำแนกพิกัดเป้าหมายที่กำหนดไว้ทั้ง 6 ตำแหน่ง (6 คลาส) และมีการเปรียบเทียบร่วมกับการประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยใช้ OpenCV การตรวจจับแสงสีฟ้า การทดสอบทั้ง 2 อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจำลอง ผลการทดสอบในส่วนนี้จะถูกนำมาประเมินขีดความสามารถของระบบในด้านดัชนีความถูกต้องในการจำแนก (Accuracy) ความเร็วในการประมวลผลของโมเดลปัญญาประดิษฐ์ และความหน่วงในการส่งทอดข้อมูลพิกัด (Latency) เพื่อพิสูจน์ความเสถียรของระบบบูรณาการโดยรวมในการตอบสนองเข้าชกเป้าหมายแบบเรียลไทม์ รายละเอียดดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ส่วนประกอบของระบบกลไกหุ่นยนต์

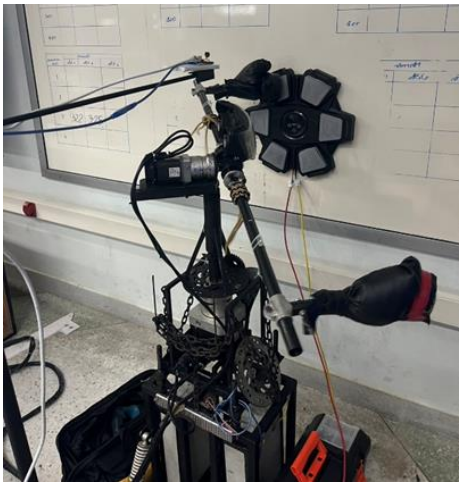
จากรูปที่ 10 เป็นการจัดวางอุปกรณ์เพื่อการทดลองการทำงาน ประกอบด้วย หมายเลข 1 คือ โมดูลกล้อง OV5640 และบอร์ด ESP32-S3-ETH หมายเลข 2 คือคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เป็นระบบประมวลผลภาพหรือคอมพิวเตอร์วิทัศน์ หมายเลข 3 คือ บอร์ด Arduino UNO และวงจรออปโตคัปเปลอร์

หมายเลข 4 คือ PLC Mitsubishi FX5U และเซอร์โวไดรฟ์ หมายเลข 5 คือ Emergency Push Button Switch และ Push Button Switch เริ่มการทำงานและหยุดการทำงาน หมายเลข 6 คือ มอเตอร์เซอร์โว หมายเลข 7 คือ เป้าชก หมายเลข 8 คือ คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การควบคุมมอเตอร์เซอร์โวทั้ง 2 แกน ในการทดสอบ

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของ มอเตอร์เซอร์โว

ผลจากการทดสอบระบบขับเคลื่อนเชิงกลของมอเตอร์ดังรูปที่ 11 พบว่าเมื่อกำหนดความถี่สัญญาณพัลส์ที่ระดับ 10,000 PWM มอเตอร์เซอร์โวเกิดเสียงผิดปกติ (Abnormal Noise) และไม่สามารถขับเคลื่อนกลไกชกได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต้องหยุดการทดสอบที่ระดับดังกล่าว



รูปที่ 11 การทดสอบการทำงานของระบบกลไกหุ่นยนต์

สาเหตุอาจเกิดจากความเร็วที่กำหนดสูงเกินขีดความสามารถของระบบขับเคลื่อน ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดได้เพียงพอในการเร่งและหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกลภายใต้ภาระโลดจริง รวมถึงเกิดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเซอร์โวไดรฟ์ที่ยังไม่เหมาะสมกับความเร็วในการทำงานระดับสูง ดังนั้นจึงพิจารณาว่า 9,500 PWM เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานของระบบ ดังตารางที่ 1 เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการชกเป้าหมายสูงสุด มีการทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความถูกต้องสูงสุด ผลการการทดสอบระบบตรวจจับบนอัลกอริทึม YOLO และ OpenCV ในการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โว YOLO

ความถี่ของสัญญาณพัลส์ (PWM)	ระยะเวลาการชก (นาที)	ค่าเฉลี่ยที่ชกได้ (จำนวนครั้ง)
8,000	3	323
8,500	3	328
9,000	3	341
9,500	**3**	**345**

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โว OpenCV

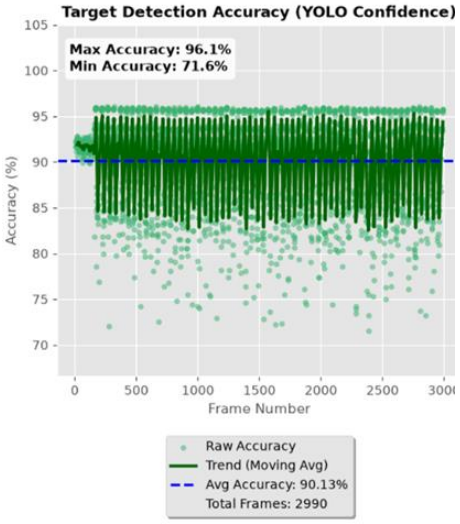
ความถี่ของสัญญาณพัลส์ (PWM)	ระยะเวลาการชก (นาที)	ค่าเฉลี่ยที่ชกได้ (จำนวนครั้ง)
8,000	3	331
8,500	3	336
9,000	3	347
9,500	**3**	**353**

4.2 การประมวลผลภาพและตรวจจับวัตถุเป้าหมาย

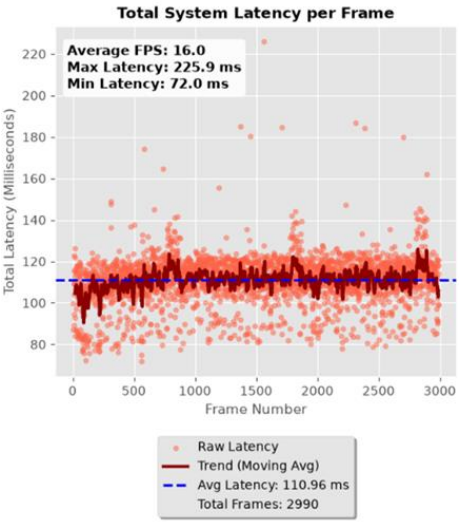
4.2.1 อัลกอริทึม YOLO

ผลการทดสอบระบบประมวลผลภาพและการตรวจจับวัตถุเป้าหมายบนอัลกอริทึม YOLO โดยนำ

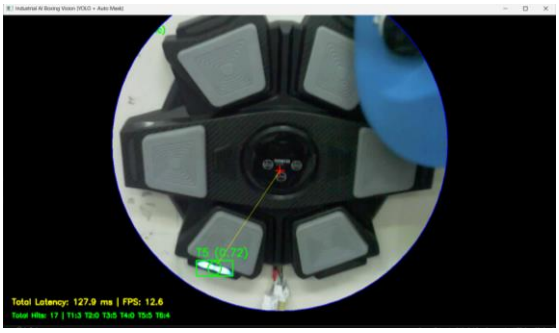
ค่าจากตารางที่ 1 มาทดลองซ้ำและหาค่าเฉลี่ย โดยรวมทั้งระบบ พบว่าความสามารถของระบบในด้านดัชนีความถูกต้องในการจำแนก (Accuracy) มีความแม่นยำในการตรวจจับเป้าหมายเฉลี่ยร้อยละ 90.13 มีความเร็วในการประมวลผลของโมเดลปัญญาประดิษฐ์และความหน่วงในการส่งข้อมูลพิกัด (Latency) มีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 110.96 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องในการจำแนกเป้าหมายและอัตราเฟรมเรท YOLO



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหน่วงในการจำแนกเป้าหมายและอัตราเฟรมเรท YOLO

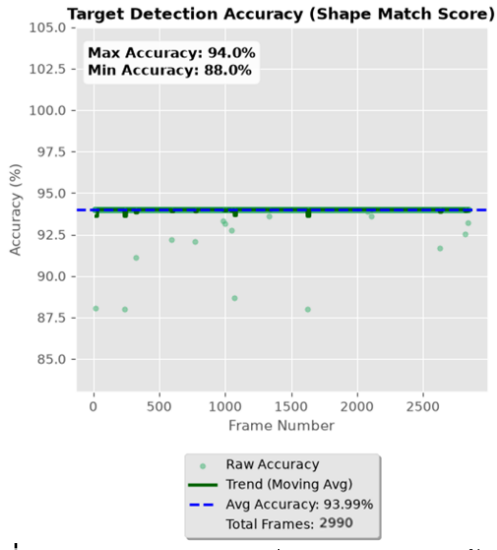


รูปที่ 14 กรณีอัลกอริทึม YOLO มีวัตถุสีฟ้าเข้ามารบกวนบนเป้าชก

จากรูปที่ 14 เป็นกรณีอัลกอริทึม YOLO มีวัตถุสีฟ้าเข้ามารบกวนบนเป้าชก แต่การตรวจจับแสงสีฟ้าบนเป้าชกสามารถตรวจจับและทำงานได้ปกติ โดยที่ไม่ตรวจจับวัตถุสีฟ้าที่แทรกเข้ามา

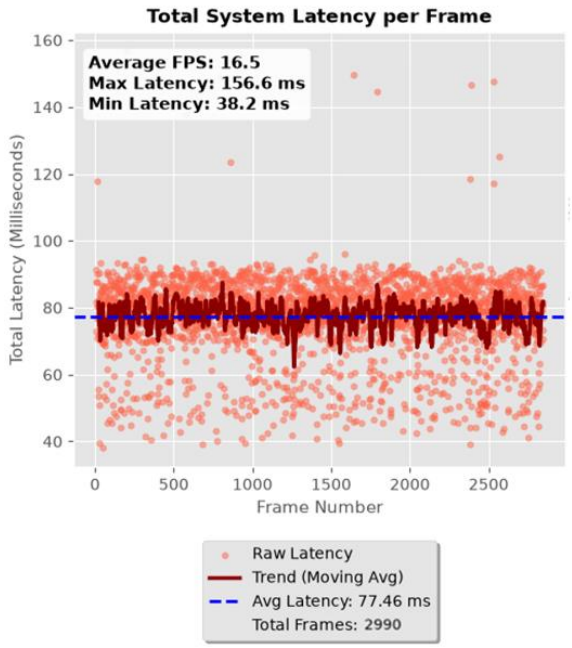
4.2.2 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

ผลการทดสอบระบบประมวลผลภาพและการตรวจจับวัตถุเป้าหมายบนการประมวลผลภาพ (Image Processing) ด้วย OpenCV การตรวจจับแสงสีฟ้า โดยนำค่าจากการทดสอบในตารางที่ 2 มาทำการทดลองซ้ำและหาค่าเฉลี่ยโดยรวมทั้งระบบ

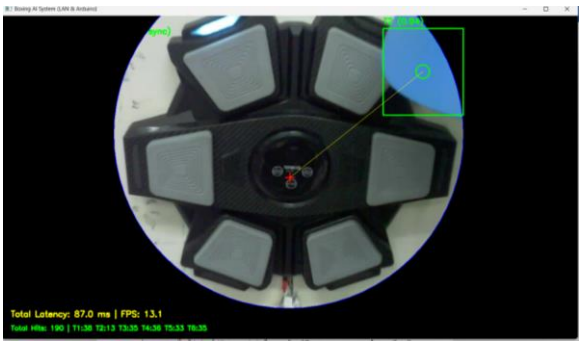


รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องในการจำแนกเป้าหมายและอัตราเฟรมเรท OpenCV

ผลลัพธ์พบว่าความสามารถของระบบในด้านดัชนีความถูกต้องในการจำแนก (Accuracy) มีความแม่นยำในการตรวจจับเป้าหมายเฉลี่ยร้อยละ 93.99 มีความเร็วในการประมวลผลของโมเดลปัญญาประดิษฐ์และความหน่วงในการส่งข้อมูลพิกัด (Latency) มีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 77.46 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหน่วงในการจำแนกเป้าหมายและอัตราเฟรมเรท OpenCV



รูปที่ 17 กรณีการประมวลผลภาพด้วย OpenCV มีวัตถุสีฟ้าเข้ามารบกวนบนเป้าชก

จากรูปที่ 17 เป็นการประมวลผลภาพด้วย OpenCV มีวัตถุสีฟ้าเข้ามารบกวนบนเป้าชก แต่การตรวจจับแสงสีฟ้าบนเป้าชกไม่สามารถตรวจจับได้ โดยที่การตรวจจับนั้นไปตรวจจับวัตถุสีฟ้าที่แทรกเข้ามาแทนที่การตรวจจับบนเป้าชก

5. สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาระบบแขนกลอัตโนมัติ โดยมีหัวใจสำคัญคือการบูรณาการระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมเข้ากับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ระบบทำงานโดยใช้โมดูลกล้อง OV5640 ร่วมกับบอร์ด ESP32-S3 ETH เพื่อส่งสัญญาณภาพผ่านเครือข่ายอีเทอร์เน็ตเข้าสู่คอมพิวเตอร์แม่ข่าย เมื่อระบบประมวลผลภาพระบุพิกัดเป้าหมายสำเร็จ ข้อมูลจะถูกส่งผ่านบอร์ด Arduino UNO และวงจรออปโตคัปเปลอร์ เข้าสู่ช่องสัญญาณดิจิทัลอินพุตของ PLC Mitsubishi รุ่น FX5U ซึ่งการใช้ฮาร์ดแวร์ PLC ระดับอุตสาหกรรมนี้ช่วยสร้างสัญญาณพัลส์ความเร็วสูงเพื่อสั่งการมอเตอร์เซอร์โวแกน X และ Y ให้เข้าปะทะเป้าหมายได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพสูง

ผลการทดสอบด้านสมรรถนะการควบคุมเชิงกลพบว่าการจ่ายสัญญาณพัลส์สั่งการที่ความถี่ 9,500 Hz เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงาน โดยระบบสามารถขับเคลื่อนเข้าปะทะเป้าหมายได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพสูงสุด ในขณะที่การเพิ่มความถี่ไปที่ระดับ 10,000 Hz จะส่งผลให้มอเตอร์เกิดเสียงผิดปกติและสูญเสียเสถียรภาพในการขับเคลื่อน

ระบบตรวจจับและประมวลผลภาพ ได้ทำการประเมินเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกด้วยอัลกอริทึม YOLO และการประมวลผล

ภาพแบบดั้งเดิมด้วย OpenCV ผลการทดสอบเชิงปริมาณชี้ให้เห็นว่า การประมวลผลภาพด้วย OpenCV ให้ความแม่นยำในการตรวจจับเป้าหมายเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 93.99 และมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ยที่รวดเร็วเพียง 77.46 มิลลิวินาที ซึ่งทำเวลาได้ดีกว่าอัลกอริทึม YOLO ที่มีความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 90.13 และเวลาตอบสนองรวม 110.96 มิลลิวินาที

การทดสอบความทนทานต่อสิ่งรบกวน (Robustness) ด้วยการนำวัตถุสีฟ้าเข้ามาแทรกสอดบริเวณเป้าชก พบว่าอัลกอริทึม YOLO มีความเสถียรและทนทานกว่า โดยสามารถแยกแยะและตรวจจับแสงของเป้าหมายได้ตามปกติโดยไม่สับสนกับวัตถุแปลกปลอมที่เข้ามาแทรก ในทางกลับกัน การประมวลผลด้วย OpenCV กลับเกิดความผิดพลาดอย่างชัดเจน เนื่องจากระบบหันไปตรวจจับวัตถุสีฟ้าที่นำมาแทรกสอดแทนพิกัดเป้าหมายจริง

ดังนั้น จากผลสัมฤทธิ์จากระบบหุ่นยนต์ต้นแบบนี้พิสูจน์ให้เห็นถึงศักยภาพในการสื่อสารและการประมวลผลข้อมูลที่มีระบบการควบคุมแบบเรียลไทม์ได้ชัดเจน ซึ่งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้นี้ไปขยายผลประยุกต์ใช้งานจริงในระบบการผลิตและการควบคุมอัตโนมัติ แต่อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานควรพิจารณาเลือกใช้ OpenCV สำหรับสภาพแวดล้อมที่สามารถควบคุมแสงและสีที่ส่งผลตาอการรบกวนได้เพื่อเน้นความเร็วสูงสุด ตลอดจนการเลือกใช้ YOLO ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งรบกวนเชิงแสงและสี ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษาระดับความแม่นยำในการใช้งานหรือการคัดแยกชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูงในระบบงานอุตสาหกรรมอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

[1] Mitsubishi Electric Corporation, MELSEC iQ-F FX5U User's Manual (Hardware), Tokyo, Japan: Mitsubishi Electric Corp., 2023.

[2] Mitsubishi Electric Corporation, MELSERVO-J4 Servo Amplifier Instruction Manual, Tokyo, Japan: Mitsubishi Electric Corp., 2023.

[3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, 4th ed. New York, NY, USA: Pearson, 2018.

[4] B. G. Batchelor and P. F. Whelan, Intelligent Vision Systems for Industry, London, U.K.: Springer, 2000.

[5] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016.

[6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779–788.

[7] G. Jocher et al., “Ultralytics YOLO Documentation,” Ultralytics, 2024.

[8] Espressif Systems, ESP32-S3 Series Datasheet, Shanghai, China: Espressif Systems, 2024.

[9] OmniVision Technologies, OV5640 Camera Module Datasheet, Santa Clara, CA, USA: OmniVision Technologies, 2023.

การลดพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

Reducing Electricity in Wastewater Treatment System of Solar Cell Aerator

ภุมรินทร์ ทวิชศรี[1,*], ศิลปชัย กลิ่นไกล[2], วีระพงศ์ ทองสา[3]

[1,2,3] สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ เลขที่ 1 หมู่ที่ 20 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

phummarin@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านระบบโซล่าเซลล์มาใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องเติมอากาศ เพื่อทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าปกติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ ติดตั้ง และทดสอบระบบการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าหลัก และลดต้นทุนค่าไฟฟ้า โดยมีการดำเนินงานภายในระบบบำบัดน้ำเสียของสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว โดยการศึกษาข้อมูลทางเทคนิค การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งระบบแผงโซล่าเซลล์ และการทดสอบการทำงานของระบบโดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างระบบไฟฟ้าปกติกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยไม่มีผลกระทบจากระบบบำบัดน้ำเสีย จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ระบบเติมอากาศด้วยพลังงานโซล่าเซลล์สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 2,524 kWhต่อเดือน คิดเป็น จำนวนเงิน 10,727 บาทต่อเดือน คิดเป็น 37.5% และช่วยส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดภายในองค์กร ยังสามารถสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, ระบบบำบัดน้ำเสีย, การลดพลังงาน, เครื่องเติมอากาศ, พลังงานทดแทน

Abstract

This research investigates the reduction of electricity consumption in a wastewater treatment system by utilizing solar energy via a photovoltaic (PV) system to drive an aerator, substituting the use of conventional electricity. The objectives are to design, install, and test an alternative energy system to replace the main grid power and reduce electricity costs. This study was conducted within the wastewater treatment facility of the Wang Nam Yen Dairy Cooperative in Sa Kaeo Province. The methodology involved analyzing technical data, designing the solar power system, installing the solar panels, and testing the system's performance by comparing energy consumption between the conventional grid and the solar energy system, ensuring no adverse effects on the wastewater treatment process. The results demonstrated that the solar-powered aeration system successfully reduced electricity consumption by 2,524 kWh per month, equivalent to a cost savings of 10,727 Baht per month, representing a 37.5% reduction. Furthermore, this project promotes the internal adoption of clean energy and supports sustainable development by implementing renewable energy in the industrial sector to mitigate long-term environmental impacts.

Keywords: Solar Energy, Wastewater Treatment System, Energy Reduction, Aerator, Renewable Energy

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

งานวิจัยด้านการใช้เครื่องกังหันน้ำเติมอากาศที่ใช้แผงโซล่าเซลล์ขนาด 570 วัตต์ ร่วมกับแบตเตอรี่เก็บพลังงานเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง โดยความโดดเด่นคือการเพิ่มระบบควบคุมและสั่งการความเร็วรอบมอเตอร์ผ่านสัญญาณไร้สาย (Wireless Control) ได้ในระยะ 100 เมตร ช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดการน้ำเสียและเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] งานวิจัยเครื่องกลเติมอากาศชนิดกังหันน้ำบนทุ่นลอยพลาสติก ขับเคลื่อนด้วยดีซีมอเตอร์ขนาด 350 วัตต์ โดยอาศัยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสวิตช์รีเลย์เพื่อสั่งการทำงานของมอเตอร์ผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ร่วมกับการใช้พลังงานสะอาดจากแสงอาทิตย์เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมและลดการใช้ไฟฟ้าหลัก [2] นวัตกรรมการบำบัดน้ำเสียที่ประยุกต์ใช้ระบบเติมอากาศแบบหัวพ่นฝอย (Spray Aeration) จำนวน 10 หัวพ่น ติดตั้งบนทุ่นลอย โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จากโซล่าเซลล์เก็บลงแบตเตอรี่ และนำเทคโนโลยี IoT (Internet of Things) ผ่านบอร์ด ESP32 และแอปพลิเคชัน Blynk มาใช้ควบคุมการเปิด-ปิด รวมถึงรายงานสภาพน้ำแบบเรียลไทม์ และงานวิจัยเชิงวิศวกรรมที่ศึกษาการนำแผงโซล่าเซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ขนาด 260 วัตต์ มาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) ขนาด 350 วัตต์ เพื่อหมุนกังหันน้ำบำบัดน้ำเสีย โดยมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนควบคู่ไปกับการคำนวณระยะเวลาคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางให้เกษตรกรนำไปใช้งานจริง [3-4] งานวิจัยเชิงทดลองที่ศึกษาและทดสอบหาความสามารถในการกระจายและเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในแนวดิ่งและแนวราบของกังหันน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเลือกทำการศึกษาในบ่อน้ำทิ้งของโรงพยาบาล เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำในสภาวะจริง [5-7] จากแนวทางงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การใช้โซล่าเซลล์สำหรับเครื่องเติมออกซิเจนในน้ำระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย สามารถจัดการน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนรวมถึงการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม ชุมชน หรือพื้นที่เกษตรกรรม โครงการนี้ได้รับความสนใจเนื่องจากมีแนวทางการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทั่วไป ซึ่งทำให้เกิดผลดีทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีแนวทางประยุกต์ใช้ในบำบัดน้ำเสียของสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าภายในโรงงาน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

2.2 เพื่อสร้างติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

2.3 เพื่อทดสอบระบบการทำงานเครื่องเติมอากาศและผลการลดพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

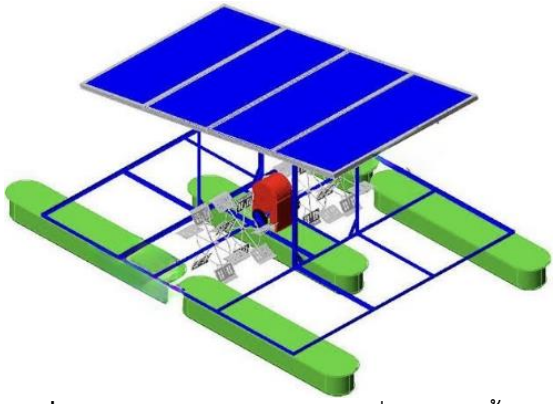
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล

การดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลมาทำการออกแบบและแนวทางการออกแบบระบบควบคุมการทำงาน การวางแผน และกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานที่มีความเหมาะสม จากการออกแบบในส่วนต่างๆ เพื่อใช้เป็นคำสั่งควบคุมมอเตอร์ เมื่อนำทุกส่วนมาประกอบกันแล้วได้ทำการทดลองถึงความเป็นไปได้ที่เหมาะสมก่อนนำมาทดสอบจริง จากการศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการลดพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

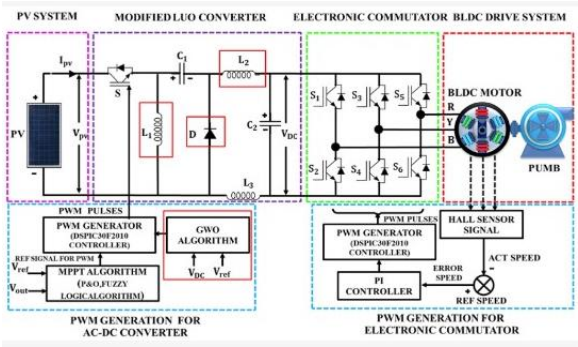
3.2 ขั้นตอนการทำงาน

3.2.1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์ แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 1



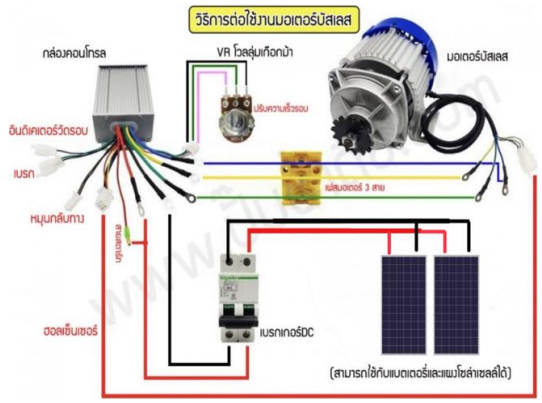
รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

3.2.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานการของเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

3.2.3 วิธีการต่อใช้งานมอเตอร์บัสเลส



รูปที่ 3 วิธีการต่อใช้งานมอเตอร์บัสเลส

3.2.4 ภาพของอุปกรณ์ต้นแบบ



รูปที่ 4 ภาพรวมของอุปกรณ์ต้นแบบ

4. ผลการวิจัย

การศึกษาเน้นการเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ่อบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเสียที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยออกนอกโรงงาน โดยเก็บข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่า pH, อุณหภูมิ, DO (Dissolved Oxygen), สีของน้ำ และค่า TDS (Total Dissolved Solids) ในระยะเวลา 1 เดือนก่อนการติดตั้ง และผลการทดสอบ 1 เดือนหลังจากการติดตั้ง โดยการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีเครื่องเติมอากาศที่ใช้พลังงานไฟฟ้าหลัก 4 เครื่อง เปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียที่ทดสอบการใช้ระบบบัดน้ำเสียที่ใช้เครื่องเติมอากาศใช้ระบบไฟฟ้าปกติ 3 เครื่อง และใช้เครื่องเติมอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 1 เครื่อง

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนติดตั้งเครื่องเติมอากาศโซล่าเซลล์

จากการเก็บข้อมูลระยะเวลา 1 เดือน ในเดือนมกราคม 2569 ก่อนติดตั้งเครื่องเติมอากาศ พบว่าคุณภาพน้ำในบ่อ Aerator และ Oxidation มีลักษณะดังนี้

4.1.1 ค่า pH อยู่ในช่วง 7.85–8.41

4.1.2 ค่า DO มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.00–4.50 mg/l.

4.1.3 สีของน้ำ น้ำมีสีน้ำตาลตลอดระยะเวลาเก็บข้อมูล แสดงถึงการมีสารอินทรีย์ที่ยังไม่ได้ย่อยสลายสูง

4.1.4 ค่า TDS มีค่าในช่วง 1,100–1,300 mg/l.

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

หลังจากติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์เป็นระยะเวลา 1 เดือน เดือนกุมภาพันธ์ 2569 ดังนี้

4.2.1 ค่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 7.80–8.25

4.2.2 ค่า DO มีค่าอยู่ในช่วง 4.00–6.50 mg/l

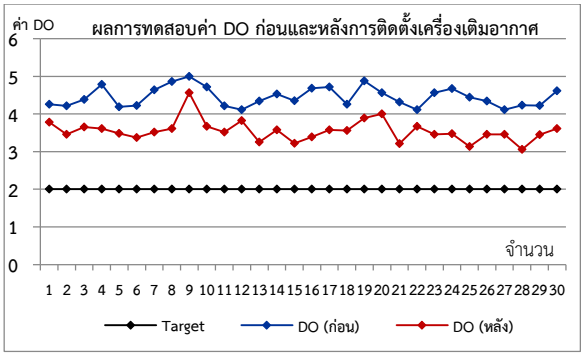
4.2.3 สีของน้ำ มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล

4.2.4 ค่า TDS มีค่าในช่วง 1,100–1,250 mg/l

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 การทดสอบค่า DO

จากผลการทดสอบค่า DO ในน้ำก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์โดยมีการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง พบว่าค่า DO ก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องเติมอากาศมีค่ามากกว่า 2 mg/l. ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยผลการทดสอบค่า DO แสดงดังรูปที่ 5

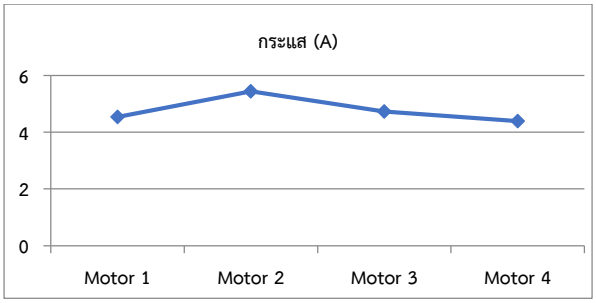


รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า DO ก่อนและหลังการติดตั้งเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์

5.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าระบบเติมอากาศแบบเดิม วันที่ 2-6 กุมภาพันธ์ 2569 แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานไฟฟ้า วันที่ 2-6/02/2569

ค่ากระแสไฟฟ้า					
เวลา	Motor1 3.7 kw (A)	Motor2 3.7 kw (A)	Motor3 3.7 kw (A)	Motor4 3.7 kw (A)	DO (mg/l)
02/06/2569	4.53	5.44	4.76	4.34	4.23
03/06/2569	4.56	5.47	4.71	4.39	4.33
04/06/2569	4.52	5.46	4.76	4.43	4.26
05/06/2569	4.55	5.42	4.70	4.40	4.21
06/06/2569	4.53	5.41	4.72	4.39	4.22
ค่าเฉลี่ย	**4.53**	**5.44**	**4.73**	**4.39**	**4.25**



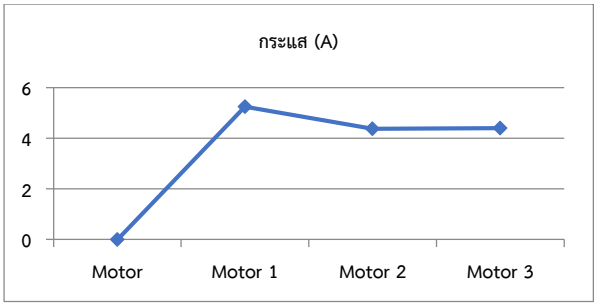
รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของ Motor1-4

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 5 แสดงผลการเก็บค่ากระแสไฟฟ้าของ Motor1-4 โดยมอเตอร์ที่ใช้งานมีขนาด 3.7kW และมีผลของกระแสใช้งานตั้งแต่วันที่ 2-6/02/2569 จากผลการเก็บค่ากระแสไฟฟ้าพบว่า Motor1 มีค่ากระแสเฉลี่ย 4.53A, Motor2 มีค่ากระแสเฉลี่ย 5.44A, Motor3 มีค่ากระแสเฉลี่ย 4.73A, Motor4 มีค่ากระแสเฉลี่ย 4.39A

5.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าระบบเติมอากาศ โดยใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์ จำนวน 1 เครื่อง วันที่ 7-11 กุมภาพันธ์ 2569 แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานไฟฟ้า วันที่ 7-11/02/2569

ค่ากระแสไฟฟ้า					
เวลา	Motor1 3.7 kw (A)	Motor2 3.7 kw (A)	Motor3 3.7 kw (A)	Motor4 3.7 kw (A)	DO (mg/l)
07/06/2569	-	5.38	4.33	4.39	4.10
08/06/2569	-	5.11	4.56	4.39	4.23
09/06/2569	-	5.39	4.19	4.40	4.15
10/06/2569	-	5.19	4.35	4.41	4.21
11/06/2569	-	5.20	4.46	4.44	4.29
ค่าเฉลี่ย	-	**5.25**	**4.37**	**4.40**	**4.19**



รูปที่ 6 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของ Motor1-4 โดยใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์จำนวน 1 เครื่อง

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 6 แสดงผลกระแสไฟฟ้าของ Motor1-3 มีขนาด 3.7kW และใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์ 1 เครื่อง ทดแทน Motor1 โดยทดลองการใช้งานตั้งแต่วันที่ 7-11/02/2569 พบว่า Motor2 มีค่ากระแสเฉลี่ย 5.25A, Motor3 มีค่ากระแสเฉลี่ย 4.37A, Motor4 มีค่ากระแสเฉลี่ย 4.43A

5.5 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้า ก่อนและหลังการใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์จำนวน 1 เครื่อง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานไฟฟ้าใช้งานก่อนและหลัง

ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh)				
ข้อมูล	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	อัตราค่าไฟ (บาทต่อหน่วย)	ค่าไฟฟ้า (บาทต่อเดือน)
ก่อนทดลอง	13.231	9,526.38	4.25	40,487
หลังทดลอง	9.725	7,002.37	4.25	29,760
ผลการวิเคราะห์	ลดลง	ลดลง	-	ลดลง
ค่าเฉลี่ย	3.505	2,524	4.25	10,727

จากผลการทดสอบการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์จำนวน 1 เครื่อง ในระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่า เมื่อใช้งานเครื่องเติมอากาศด้วยโซล่าเซลล์ทดแทน Motor เครื่องที่ 1 ขนาด 3.7kW สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้า โดนสามารถลดกำลังไฟฟ้าของ Motor ลง 3.505kW ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 2,524 kWhต่อเดือน และสามารถลดค่าไฟฟ้าลง 10,727 บาทต่อเดือน

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องเติมอากาศพลังงานโซล่าเซลล์มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบบำบัด โดยสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ส่งผลให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ และช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของน้ำให้มีความเหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ประโยชน์มากขึ้น นอกจากนี้การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนระบบเติมอากาศยังช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ลดต้นทุนด้านพลังงานในระยะยาว โดยมอเตอร์ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ 1 ตัว จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 2,524 kWhต่อเดือน เป็นจำนวนเงิน 10,727 บาทต่อเดือน คิดเป็น 37.5% และการประยุกต์ใช้ระบบเติมอากาศร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและสนับสนุนกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า เครื่องเติมอากาศพลังงานโซล่าเซลล์สามารถใช้งานช่วยลดการใช้พลังงานในระบบบำบัดน้ำเสียและสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นควรส่งเสริมการนำระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียหรือแหล่งน้ำที่มีปัญหาคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านพลังงานไฟฟ้าหรือพื้นที่ห่างไกล

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศพลังงานโซล่าเซลล์ในสภาพแวดล้อมและประเภทของแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาตัวชี้วัดคุณภาพน้ำเพิ่มเติม เช่น ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ชัยยงค์ เสริมผล, จิระเดช สังคะโห, และ พลวัฒน์ ศรีโยหะ, "การพัฒนากังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมผ่านสัญญาณไร้สาย," *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, vol. 14, no. 2, pp. 173–189, สิงหาคม 2563.

[2] ธวัชชัย สอนสนาม, ปราโมทย์ ภูสมมา, ปฏิภาณ นิสภกุล, และ ชูเกียรติ อินทรชัย, "เครื่องเติมอากาศในน้ำชนิดกังหันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์," *วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, vol. 1, no. 3, pp. 57–66, กันยายน–ธันวาคม 2565.

[3] อาทิตย์ อรุณศิวกุล, "เครื่องบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการเพิ่มอากาศแบบหัวพ่นควบคุมผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก*, vol. 1, no. 1, pp. 38–52, เมษายน 2564.

[4] กิตติชัย เจริญเขียว, ศราวุธ ชลภักดิ์, ศราวุธ อารามรมย์, และ ปราโมทย์ ภูสมมา, "การเติมออกซิเจนในน้ำด้วยกังหันน้ำพลังงานแสงอาทิตย์," *วารสารสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (J-REC)*, vol. 2, pp. 45–52, 2565.

[5] กัลยา ธนาสินธ์, อมรรัตน์ คำบุญ, ณัฐดนัย สิงห์คลีวรรณ, และ สายัณ พุทธลา, "กังหันน้ำเติมออกซิเจนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับบ่อน้ำ," *วารสารวิชาการเทพสตรี I-TECH*, vol. 17, no. 2, pp. 95–105, 2565.

[6] จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว, สุทธิเกียรติ ชลลาภ, สุดาพร อร่ามรุณ, และ ประสิทธิ์ ภูสมมา, "การออกแบบและสร้างเครื่องกังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์," ใน *รายงานการประชุม การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 (EENET)*, 2566, หน้า 714–717.

[7] ญาณวุฒิ สุพิชญางกูร, จักรกฤษ ปันเจียง, และ ธนภัทร สุวรรณฉิม, "กังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก," *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต*, vol. 25, no. 2, pp. 1–14, กรกฎาคม–ธันวาคม 2565.

เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กโตรพลาสมา ในโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ

MOBILE POLLUTION SUCTION AND REMOVAL MACHINE BY APPLYING ELECTRO-PLASMA TECHNOLOGY IN METAL CUTTING AND ASSEMBLY PLANT

ศิศีโรตม์ เกตุแก้ว*[1]

[1]155/172 ซอยคู้บอน 27 แยก 11 ถนนคู้บอน แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10230

*E-mail : siseerotketkaew14@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0945524634

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กโตรพลาสมา ในโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ ประกอบด้วย 5 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ชุดแผ่นกรองเบื้องต้นและชุดแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง HEPA ทำหน้าที่ดักฝุ่นละอองขนาด 10 ไมครอน และขนาด 5 ไมครอน ส่วนที่ 2 คือ ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ โดยใช้กระบวนการโคโรนาดิสชาร์จ ทำหน้าที่ผลิตประจุไฟฟ้าความเข้มสูง ใช้สำหรับลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดใหญ่และก๊าซพิษต่างๆ ให้มีปริมาณน้อยลง ส่วนที่ 3 ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก โดยใช้เทคโนโลยีระบบสนามไฟฟ้าสถิตย์ ทำหน้าดักฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน ส่วนที่ 4 ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง โดยใช้กระบวนการโอโซเนชั่น ทำหน้าที่ผลิตก๊าซโอโซนความเข้มสูง ใช้สำหรับกำจัดก๊าซพิษต่างๆ และส่วนที่ 5 วงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งได้นำหลักการฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ผลิตสัญญาณพัลส์ความถี่สูงสำเร็จรูป ที่สามารถปรับดิวตี้ไซเคิลและความถี่สูงได้ โดยจากการทดสอบได้เลือกใช้ดิวตี้ไซเคิล 60% ที่ความถี่สวิตชิ่ง 25 กิโลเฮิร์ต เพราะเป็นค่าที่มีความเหมาะสมที่ทำให้ชุดเซลล์ต่างๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง จากนั้นนำสัญญาณพัลส์ที่ได้มาผ่านวงจรขยายสัญญาณ เพื่อใช้กระตุ้นการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP350 และส่งผลทำให้สามารถควบคุมการทำงานของหม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง สำหรับใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังชุดเซลล์โคโรนาพัลส์และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติกให้ทำงาน ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้ คือ เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่นี้มีประสิทธิภาพในการดักฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 98.59 เปอร์เซ็นต์ ที่วัดจากเครื่องวัดฝุ่นละอองที่ได้มาตรฐาน และสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย ได้เป็นอย่างดี โดยทำการทดสอบกับห้องตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะที่มีขนาดพื้นที่ 240 ลูกบาศก์เมตร ในเวลา 90 นาที ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้ผ่านการทดสอบวิเคราะห์การใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม วิเคราะห์มาตรฐานความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า การทดสอบการเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และความทนทานต่อไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เป็นที่เรียบร้อย ที่ห้องทดสอบของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) สวทช. และในอนาคตสามารถนำไปพัฒนาขึ้นบัญชีนวัตกรรมไทยและต่อยอดเป็นนวัตกรรมเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: โคโรนา อิเล็กโตรสแตติก พลาสมา มลพิษ ฝุ่นละออง ก๊าซพิษ

Abstract

This research paper presents a mobile pollution suction and removal machine by applying electro-plasma technology in metal cutting and assembly plant. It consists of 5 parts: Part 1: Pre-filter set and HEPA high-efficiency air filter set, which are responsible for trapping large dust particles of 10 microns and small dust particles of 5 microns; Part 2: corona pulse cell set using the corona discharge process, which produces high-intensity electric charges, used to reduce the amount of large dust particles passing through Part 1; Part 3: Electrostatic cell set using the electrostatic field system technology, which traps small dust particles of 2.5microns; Part 4: High-intensity plasma sell set using the ozonation process, which produces high-intensity ozone gas, used to remove toxic gases; and Part 5: High-voltage power generation circuit, which uses the flyback converter principle, consisting of ready-made high-frequency pulse signal generators that can adjust the duty cycle and high frequency. The test, a duty cycle of 60% at a switching frequency of 25 kHz was selected because it is the most suitable value by making the cells work with high efficiency, then the pulse signal is passed through the signal amplifier circuit to stimulate the operation of the Power MOSFET # IRFP350 and results in controlling the operation of the high frequency switching transformer to produce high voltage for supplying electrical power to the corona pulse cell set and the electrostatic cell set to work. The test results show that this mobile vacuum cleaner and air purifier has an efficiency of 98.59 percent in capturing PM2.5 dust particles as measured by a standard dust measuring device. It can also effectively reduce carbon dioxide, benzene, and ammonia gases. The test results showed that this a mobile pollution suction and removal machine can reduce PM2.5 dust particles. The dust trapping efficiency was measured at 98.59 percent by a standard dust meter and it can reduce carbon dioxide, carbon monoxide, benzene and ammonia gas very well. The test was conducted in a 240-cubic-meter metal cutting and assembly room within 90 minutes. This research project has successfully passed the overall electrical power analysis, electrical leakage safety standards analysis, grounding preparation tests, and electrical durability tests for user safety at the testing room of the Electrical and Electronic Product Testing Center (PTEC), NSTDA. In the future, it can be developed into a Thai innovation account and further developed into commercial innovations in the future.

Keywords: corona, electrostatic, plasma, pollution, dust, toxic gas

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหามลพิษที่มีปริมาณที่สูง ส่งผลอันตรายต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ รวมถึงชุมชนที่พักอาศัยขยายวงกว้างในสังคมเมือง ทำให้ชุมชนและสังคมเมืองไม่น่าอยู่ โดยเฉพาะผลกระทบที่ใกล้ตัวเรามากที่สุด คือ มลภาวะที่เจือปนมาในอากาศบางครั้งเรามองเห็นหรือมองไม่เห็นก็ดี ที่เราหายใจสูดก๊าซพิษเข้าไปในร่างกายทำลายอวัยวะภายในร่างกาย เช่น ทางเดินหายใจ ปอด และทำลายมลภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบ รวมถึงชั้นบรรยากาศของโลกให้เสื่อมโสมลงทุกที โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระทำของมนุษย์ การเผาไม้ทำลายป่าทำให้เกิดหมอกควัน การปล่อยปะละเลยของโรงงานอุตสาหกรรม และมลพิษจากกระบวนการตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ จนเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ร่วมกันในบริเวณนั้น มลภาวะก็สามารถแบ่งได้หลายประเภทคือ มลภาวะทางอากาศ ฝุ่นละออง เสียง กลิ่น และควัน เป็นต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่ามลพิษต่างๆ เหล่านี้ มีผลต่อสุขภาพของประชาชนทั่วไปที่อยู่ในชุมชนโดยรอบโรงงานและทำลายบรรยากาศโลก จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ได้ เพื่อช่วยลดมลพิษต่างๆ ทำให้สิ่งแวดล้อมทางอากาศดีขึ้น (สังคมคาร์บอนต่ำ) และส่งผลให้สุขภาพของประชาชนในชุมชนดีขึ้น และเป็นส่วนสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซพิษต่างๆ สู่บรรยากาศโลกอีกทางหนึ่งด้วย และในอนาคตเครื่องดูดและกำจัดก๊าซพิษสามารถส่งผลไปใช้ในกลุ่มเปราะบาง เช่น โรงพยาบาล สถานเด็กเล็ก สถานผู้สูงวัย จะสามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่ไม่เกิน 50 ตารางเมตร และการถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับประชาชน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

สำหรับโครงการวิจัยนี้ ได้นำชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง สำหรับดักฝุ่นละอองและกำจัดก๊าซพิษ ซึ่งเน้นการออกแบบและการสร้างเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ดักฝุ่นละอองและกำจัดก๊าซพิษ เพื่อให้เกิดผลดีต่อสุขภาพของผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อมของชุมชน โดยตัวเครื่องจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบและพัฒนาสร้างวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งได้นำระบบผลิตสัญญาณพัลส์สำเร็จรูป เป็นตัวสร้างพัลส์มอดูเลชั่นและเป็นวงจรควบคุมการสวิตช์ของเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรฟลายคอนเวอร์เตอร์ โดยมีหม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่เหนี่ยวนำสัญญาณพัลส์ เพื่อสร้างไฟฟ้าแรงสูงไปจ่ายให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ส่วนที่ 2 เป็นการออกแบบและพัฒนาสร้างชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ โดยใช้ตะแกรงอะลูมิเนียมมาสร้างสนามไฟฟ้า เพื่อผลิตไอออนความเข้มสูง สำหรับใช้ลดควันพิษและฝุ่นละอองขนาดใหญ่ ส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบและพัฒนาชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ซึ่งใช้ท่อกระจกใสที่นำท่อตาข่ายสแตนเลสใส่อยู่ด้านในและด้านนอกท่อกระจกใสเพื่อผลิตพลาสมาความเข้มสูง สำหรับใช้ลดก๊าซพิษต่างๆ และส่วนที่ 4 เป็นการออกแบบและพัฒนาสร้างชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก สำหรับดักฝุ่นละออง PM2.5 ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมวางขนานกัน เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM1.0 PM2.5 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย เมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น (ก่อนเปิดและหลังเปิดเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ให้สามารถลดปัญหาการรั่วไหลของมลพิษทางอากาศ ในอุตสาหกรรมการตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะสู่ชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ เป็นมิตรกับสังคมและสิ่งแวดล้อม

2.2 เพื่อการพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กโตรพลาสมา มาใช้ลดฝุ่นละอองและก๊าซพิษชนิดต่างๆ

2.3 เพื่อทดสอบความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า (IEC60335-1) ทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม (Power Consumption) การทดสอบการเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และการทดสอบความทนทานไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และรองรับการผลิตจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ออกแบบและสร้างวงจรผลิตไฟฟ้าแรงสูงร่วมกับไมโครคอนโทรเลอร์ เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

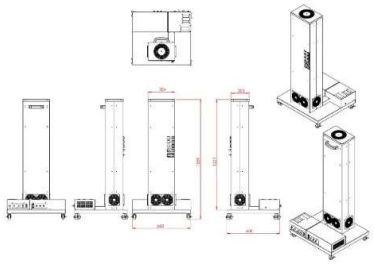
3.2 ออกแบบและสร้างโครงสร้างเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ให้สามารถรองรับกับวงจรผลิตไฟฟ้าแรงดันสูง และอุปกรณ์ต่างๆ ระบบควบคุม และระบบอื่นๆ ของชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

3.3 ออกแบบและสร้างชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน และสามารถลดฝุ่นละออง และลดก๊าซพิษ ได้จริง

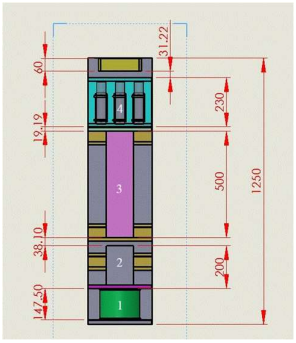
3.4 ทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม ทดสอบความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า การทดสอบการเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และความทนทานต่อไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน และเพื่อรองรับการผลิตจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต พร้อมทั้งทดสอบและเก็บผลการทำงานของเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่

4. แนวคิด นวัตกรรม ความเป็นไปได้ของโครงการ ความพร้อมด้านเทคโนโลยี (บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องดูดและกำจัดมลพิษ) ดังรูปที่ 1

หลักการและขั้นตอนการทำงานของเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ได้มี 4 ส่วน คือ

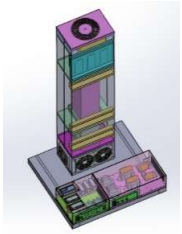
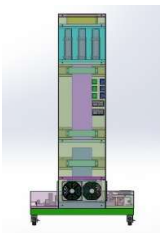


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างภายนอก และ (ข) ส่วนประกอบโครงสร้างภายในของเครื่องดูดและกำจัดมลพิษฯ คือ หมายเลข 1 คือ ชุดกรองฝุ่นละออง หมายเลข 2 คือ ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ หมายเลข 3 คือ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และหมายเลข 4 ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

รูปที่ 2 การออกแบบโครงสร้างในส่วนต่างๆ และโครงสร้างภายในและภายนอกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ และชุดกรองฝุ่นละออง ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง และชุดควบคุม

ส่วนที่ 1 ส่วนชุดเซลล์โคโรนาพัลส์

ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ หลักการทำงาน โดยการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อให้อากาศบริเวณรอบๆ แผ่นตะแกรงอะลูมิเนียมที่ขนานกันอยู่เกิดการแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงสนามไฟฟ้าความเข้มสูงบริเวณแผ่นตะแกรงอะลูมิเนียม ทำให้สามารถดึงฝุ่นละอองขนาดใหญ่ PM10 และทำให้สามารถผลิตประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบที่มีความเข้มสูง โดยอนุภาคทั้งบวกและลบจะถูกพ่นกระจายออกมาสู่อากาศ ถูกล้อมรอบด้วยไอน้ำในอากาศ เป็นกลุ่มอนุภาคพลาสม่าคลัสเตอร์ และทำปฏิกิริยาอันเกิดไฮดรอกซิลกรุ๊ป (Hydroxyl group) ซึ่งจะไปมีผลทางเคมีต่อมลพิษ ทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลของสารเคมี ที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ควันรถ กลิ่นขยะ กลิ่นบุหรี่ กลิ่นสีใหม่ในบ้าน รวมถึงเชื้อโรคต่าง ๆ ด้วย

ส่วนที่ 2 ส่วนของชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก

ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ได้นำกระบวนการสนามไฟฟ้าร่วมกับไฟฟ้าสถิตย์ จะเป็นการทำให้อากาศบริเวณรอบๆ แผ่นอะลูมิเนียมที่ขนานกัน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุ โดยการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติกและทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของอากาศผ่านเข้าไปจะทำให้อากาศเกิดการแตกตัว โดยหลักการที่ว่าอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุเป็นบวกเช่นนี้ เรียกว่า การไอออไนซ์ ส่วนกระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มขึ้นเรียกว่า กระบวนการไอออไนเซชั่นและกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอน ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้และเมื่ออากาศที่มีความสกปรก เช่น ฝุ่นควันและมลภาวะปะปนอยู่ผ่านเข้าไปในเซลล์สนามไฟฟ้า อากาศเหล่านี้จะหมุนเวียนผ่านแผ่นกรองหยาบขั้นต้น ซึ่งทำหน้าที่กรองฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนที่มีอนุภาคใหญ่ทางด้านหน้า จากนั้นอากาศเหล่าจะถูกให้พลังงานจากสนามไฟฟ้า ซึ่งมีความเข้มสูงจนเกิดการแตกตัว และเกิดการอัดประจุไฟฟ้าให้กับฝุ่นละอองต่างๆ จากนั้น ฝุ่นละอองที่ได้รับการอัดประจุไฟฟ้าแล้ว จะเคลื่อนที่เข้าไปติดอยู่บนชุดแผ่นดักฝุ่นที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม จึงจะได้อากาศที่สะอาดปราศจากฝุ่นละออง (เมื่อฝุ่นละอองที่เกาะติดที่ตะแกรงอะลูมิเนียมมีปริมาณที่มาก สามารถนำมาเคาะออกได้ และนำฝุ่นละอองไปสู่กระบวนการกำจัดในอุตสาหกรรมต่อไป)

ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก (ส่วนของการดักฝุ่นละออง PM2.5) ทำหน้าที่ดักฝุ่น ประกอบด้วย ชุดแผ่นอะลูมิเนียมที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงบวก และ

แรงดันไฟฟ้าแรงสูงลบวางสลับกันไป โดยแผ่นอะลูมิเนียมดักฝุ่นจะใช้ควรมีความหนาน้อย เพื่อไม่ให้มีแรงต้านการไหลของอากาศมากจนทำให้เกิดกระแสลมปั่นป่วน และจะทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นลดลง ดังนั้นกำหนดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมดักละอองฝุ่นให้มีค่าเท่ากับ 0.08 เซนติเมตร โดยนำทฤษฎีสนามไฟฟ้า มาใช้ในการออกแบบและสร้างชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก โดยใช้หลักการสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดระหว่างช่องอิเล็กโตรดเท่ากัน ดังสมการ E_{max} เท่ากับ $E = V/d$ เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างแผ่นอิเล็กโตรด, d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด, E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด และ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

ส่วนที่ 3 ส่วนชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง หลักการทำงานจะคล้ายกับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ แต่สิ่งที่แตกต่างคือ ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ได้นำหลักการกระบวนการโคโรนาดิสชาร์จมาใช้งาน โดยชุดผลิตพลาสมาได้นำท่อกระจกใสที่มีความหนา 1 เซ็นติเมตร และมีท่อตาข่ายสแตนเลสใส่อยู่ด้านในและด้านนอกท่อกระจกใส และใช้วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์สปาร์คมาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง สามารถผลิตความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงกว่าชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศที่อยู่ระหว่างท่อตาข่ายแตนเลสด้านในและด้านนอกของท่อกระจกใส ทำให้สามารถผลิตพลาสมาความเข้มได้สูง ซึ่งมีคุณสมบัติลดก๊าซพิษต่างๆ ในอากาศได้เป็นอย่างดี

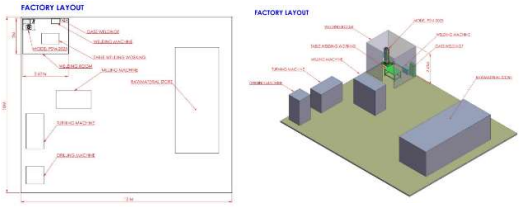
โดยชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ได้นำทฤษฎีหลักการเกิดก๊าซโอโซน ซึ่งก๊าซโอโซน คือ ก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้นจะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจนแตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ O_2 กลายเป็น O_3 ซึ่งชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ประกอบด้วยท่อกระจกใสที่มีความหนา 1 เซนติเมตร และมีท่อตะแกรงอะลูมิเนียมใส่อยู่ด้านในและด้านนอกท่อกระจกใส โดยมีแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์สปาร์คจ่ายไฟฟ้าแรงสูงไปที่ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ทำให้เกิดก๊าซโอโซนความเข้มสูง ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าของชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง จะเป็นไปตามสมการ $E = V/(d \times \eta^*)$ เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า V คือ แรงดันไฟฟ้าแรงสูง d คือ ระยะห่างระหว่างท่ออะลูมิเนียมที่นำอิเล็กโตรดปลายแหลมมาใส่ไว้ตรงกลาง และ η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

5. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ดำเนินการสำรวจพื้นที่ (ระบบปิด) ของโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



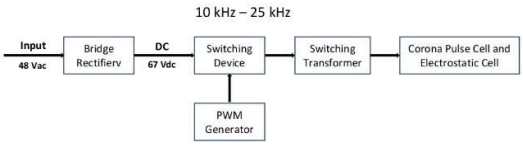
รูปที่ 3 สำรวจพื้นที่ของโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ



รูปที่ 4 ภาพโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ และขนาดพื้นที่ Layout

5.1 ดำเนินการออกแบบและสร้างวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

วงจรผลิตไฟฟ้าแรงสูง ได้นำหลักการวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มาใช้ โดยใช้ชุดระบบผลิตพัลส์วิดมอดูเลชั่นสำเร็จรูป ควบคุมการสวิตชิ่ง โดยมีเพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP350 เป็นอุปกรณ์ในการนำกระแสสุดท้ายจะผ่านหม้อแปลงสวิตชิ่งแรงดันสูง เพื่อผลิตทำให้ได้ไฟฟ้าแรงดันสูง หลักการทำงานโดยรวม ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5

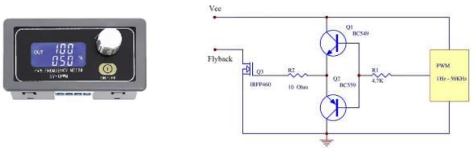


รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

จากรูปที่ 5 เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เข้าหม้อแปลงไฟฟ้า 220 โวลต์ / 48โวลต์ แล้วผ่านวงจรเร็กติไฟร์และฟิลเตอร์ ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 67 โวลต์ เพื่อนำไปจ่ายให้กับด้านอินพุตของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีระบบผลิตสัญญาณ PWM โดยค่าความถี่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 เฮิร์ต ถึง 150 กิโลเฮิร์ต และค่าดิวตี้ไซเคิลสามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 % ถึง 100 % เป็นวงจรควบคุมแบบ PWM (Pulse Width Modulation) ให้กับเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรคอนเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก

5.1.1 การออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ระบบผลิตสัญญาณ PWM และวงจรขับเกท

โดยค่าความถี่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 เฮิร์ต ถึง 150 กิโลเฮิร์ต และค่าดิวตี้ไซเคิลสามารถปรับได้ตั้งแต่ 1 % ถึง 100 % ดังรูปที่ 6

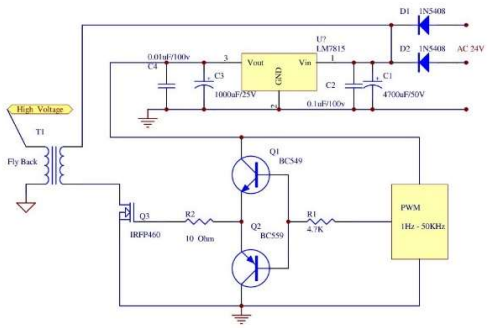


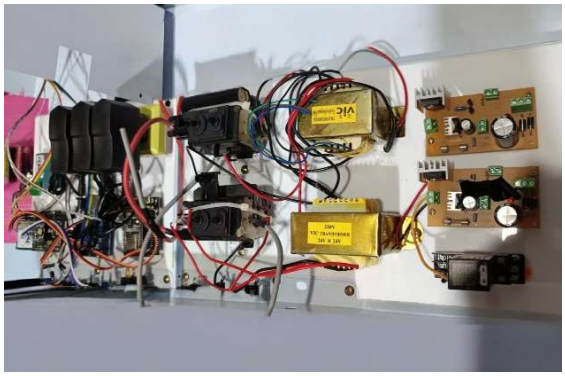
รูปที่ 6 ระบบผลิตสัญญาณ PWM [5] และออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต

5.1.2 หม้อแปลงฟลายแบคสวิตชิ่งความถี่สูง

เลือกใช้หม้อแปลงฟลายแบคแรงดันสูง TLF14565 มาใช้งาน ซึ่งลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงมีย่านการทำงานที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต V_{in} เท่ากับ 48 V_{AC} และ V_{out} เท่ากับ 2 กิโลโวลต์ ถึง 15 กิโลโวลต์โดยที่ระดับไฟฟ้าแรงดันสูงด้านเอาต์พุต สามารถปรับเพิ่มหรือลดได้ โดยอาศัยการปรับค่าความถี่สวิตชิ่งของวงจรควบคุม

5.1.3 วงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 7

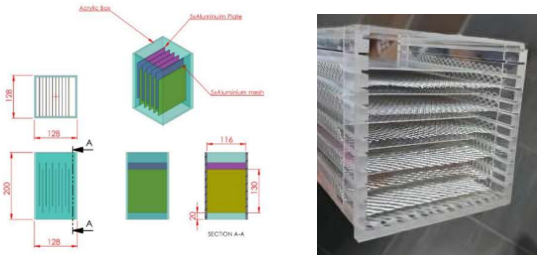




รูปที่ 7 วงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ออกแบบ และวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้น สำหรับใช้จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก

5.2 ดำเนินการออกแบบและพัฒนาชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ที่นำไปใช้งาน

ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ประกอบไปด้วยแผ่นตะแกรงสแตนเลสวางขนานกัน โดยวางขนานกันจำนวนชุดละ 6 แผ่น โดยระยะห่างระหว่างแผ่นตะแกรงสแตนเลสเท่ากับ 1 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นเซลล์ดึงฝุ่นละอองขนาดใหญ่ PM10 และผลิตประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบที่มีความเข้มสูง เพื่อใช้ดักฝุ่นละอองขนาดใหญ่และลดก๊าซพิษต่างๆ ดังรูปที่ 8

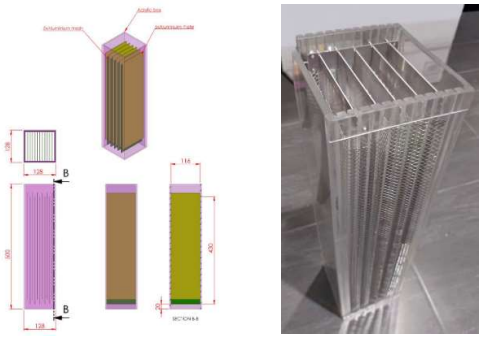


รูปที่ 8 ชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ที่ออกแบบ และชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ที่สร้างขึ้น

5.2.1 ส่วนที่ 2 ส่วนของชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก

ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ทำหน้าที่ดักฝุ่นละออง PM2.5 ประกอบด้วย ชุดแผ่นอะลูมิเนียมที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงบวก และแรงดันไฟฟ้าแรงสูงลบวางสลับกันไป โดยแผ่นอะลูมิเนียมดักฝุ่นละอองควรมีความหนาน้อย เพื่อไม่ให้มีแรงต้านการไหลของอากาศมากจนทำให้เกิดกระแสลมปั่นป่วน และจะทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นละอองลดลง ดังนั้นกำหนดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมดักละอองฝุ่นให้มีค่าเท่ากับ 0.08 เซนติเมตร โดยนนำทฤษฎีสนามไฟฟ้า (ไฟฟ้าสถิตย์) มาใช้ในการออกแบบและสร้างชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก โดยใช้หลักการสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดระหว่างช่องอิเล็กโตรดเท่ากัน ดังรูปที่ 9

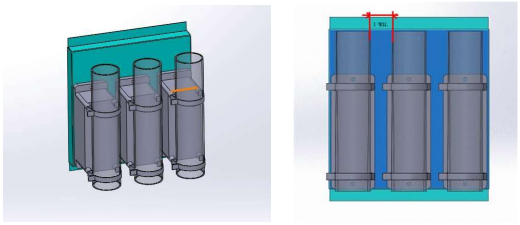
โดยชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก (โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม เท่ากับ 1.25 เซนติเมตร และเลือกใช้ย่านแรงดันไฟฟ้าแรงสูง คือ 2 กิโลโวลต์ ถึง 3 กิโลโวลต์ จะทำให้เกิดแรงสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการดักฝุ่นละออง PM2.5)



รูปที่ 9 ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติกที่ออกแบบ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติกที่สร้างขึ้น

5.2.2 ส่วนที่ 3 ส่วนชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง หลักการทำงานจะคล้ายกับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ แต่สิ่งที่แตกต่างคือ ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ได้นำหลักการกระบวนการโคโรนาดิสชาร์จมาใช้งาน โดยชุดผลิตพลาสมาได้นำท่อกระจกใสที่มีความหนา 1 เซนติเมตร และมีท่อตาข่ายสแตนเลสใส่อยู่ด้านในและด้านนอกท่อกระจกใส และใช้วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์สปาร์คมาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง สามารถผลิตความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงกว่าชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศที่อยู่ระหว่างท่อตาข่ายแตนเลสด้านในและด้านนอกของท่อกระจกใส ทำให้สามารถผลิตพลาสมาความเข้มได้สูง ซึ่งมีคุณสมบัติลดก๊าซพิษต่างๆ ในอากาศได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง

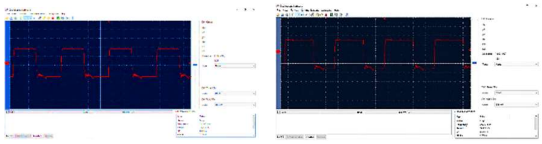
5.3 ออกแบบและสร้างโครงสร้างเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ให้สามารถรองรับกับวงจรผลิตไฟฟ้าแรงดันสูง อุปกรณ์ต่างๆ ระบบควบคุม ระบบอื่นๆ และชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ ชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก และชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างภายนอกเครื่องดูดและกำจัดมลพิษ และโครงสร้างภายในเครื่องดูดและกำจัดมลพิษที่ประกอบขึ้น

6. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบวัดรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกทและขาซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟต ของวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขณะจ่ายให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก (ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ ถึง 60 เปอร์เซ็นต์) ดังรูปที่ 12

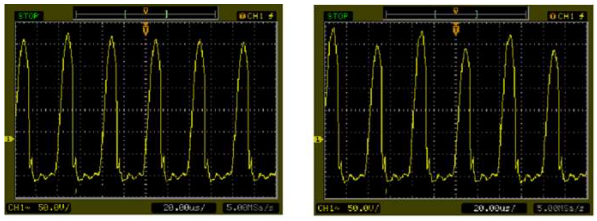


(ก) (ข)

รูปที่ 12 สัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟตของวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขณะจ่ายให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ((ก) ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ และ (ข) ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ดิวตี้ไซเคิล 60 เปอร์เซ็นต์)

รูปที่ 12 เป็นสัญญาณ V_{GS} ของเพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRFP350 ในวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยผลการทดสอบจะเห็นว่ารูปสัญญาณที่ได้เป็นรูปสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต สามารถปรับดิวตี้ไซเคิลได้ตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้น โดยสามารถนำไปควบคุมการผลิตความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและการลดก๊าซพิษต่างๆ ได้

6.1 ผลการทดสอบวัดรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแรงสูงของวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขณะจ่ายให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก (ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต โดยปรับดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ และ 60 เปอร์เซ็นต์) ดังรูปที่13



(ก) (ข)

รูปที่ 13 (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้านเอาต์พุต ($V_{OUT\,(p\text{-}p)}$) 3.3 กิโลโวลต์ ของหม้อแปลงสวิตชิ่งแรงดันสูง ที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ และ (ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้านเอาต์พุต ($V_{OUT\,(p\text{-}p)}$) 3.52 กิโลโวลต์ ของหม้อแปลงสวิตชิ่งแรงดันสูง) ที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ที่ดิวตี้ไซเคิล 60 เปอร์เซ็นต์ขณะต่อของชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และเซลล์อิเล็กโตรสแตติก

รูปที่ 13 เป็นการวัดสัญญาณภาคเอาต์พุต คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเอาต์พุต (V_{OUT}) ของหม้อแปลงสวิตชิ่งแรงดันสูง โดยผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงเอาต์พุตเพิ่มขึ้นด้วย ขณะต่อชุดเซลล์โคโรนาพัลส์และเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและการลดก๊าซพิษต่างๆ ได้

6.2 ผลการทดสอบปรับความดิวตี้ไซเคิลของวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 25 กิโลเฮิร์ต เพื่อป้อนให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ดังตารางที่ 1

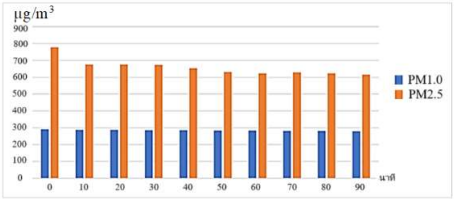
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบปรับความดิวตี้ไซเคิลของวงจรผลิตแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยคงค่าความถี่ไว้ที่ 25 กิโลเฮิร์ต เพื่อป้อนให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก (ได้เลือกใช้ดิวตี้ไซเคิลไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นเพลทในชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก)

ดิวตี้ไซเคิล (%)	$V_{in\ (rms)}$ (V)	$I_{in\ (rms)}$ (A)	V_{OUT} (kV_{p-p})
10	220	0.65	2.76
20	220	0.72	2.82
30	220	0.89	3.2
40	220	0.93	3.28
50	220	1.23	3.3
60	220	1.29	3.52

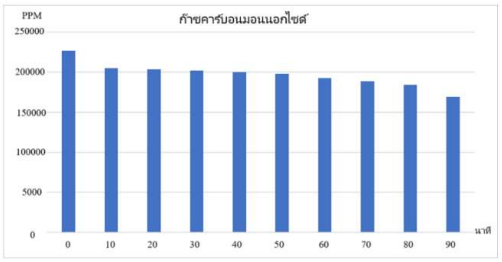
ความหมายของพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 มีดังนี้ ดิวตี้ไซเคิล คือ ใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้านเอาท์พุท (%), $V_{in(rms)}$ คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (โวลต์) (V), $I_{in(rms)}$ คือ กระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (แอมแปร์) (A), V_{OUT} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (กิโลโวลต์) (kV_{p-p})

ในตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่อทำการปรับดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้น และคงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตไว้ มีผลทำให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเอาต์พุตสูงเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ

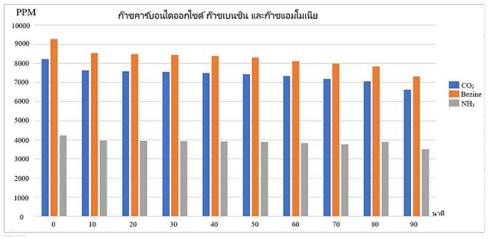
6.3 ผลการทดสอบวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM1.0 PM2.5 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย เมื่อใช้เวลาทดสอบ 90 นาที ดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15



รูปที่ 14 กราฟผลวัดค่าฝุ่นละออง PM1.0 PM2.5



(ก)



(ข)

รูปที่ 15 (ก) กราฟผลการทดสอบวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และ (ข) กราฟผลการทดสอบวัดค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย

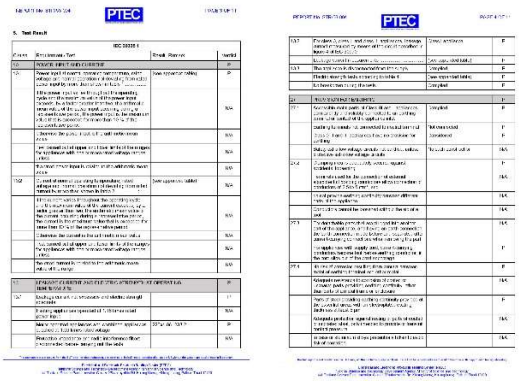
ในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 จะเห็นว่าปริมาณฝุ่นละออง PM1.0 และ PM2.5 ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย จะลดลง เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น (ในขณะเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ทำงานในห้องตัดและประกอบชิ้นส่วนโลหะที่มีการเชื่อมไฟฟ้า)

6.4 ผลการทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม (Power Consumption) ผลการทดสอบความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า (IEC 60335-1) ผลการทดสอบการเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และผลการทดสอบความทนทานไฟฟ้า ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) (PTEC), ELECTRIC AND ELECTRONIC PRODUCTS TESTING CENTER,สวทช. (NSTDA) ดังนี้





ผลการทดสอบ คือ เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ที่ได้ออกแบบสร้างและพัฒนาขึ้นนี้ ได้ผ่านการทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม (Power Consumption) ความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า (IEC60335-1) การเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และความทนทานไฟฟ้า เป็นที่เรียบร้อย





รูปที่ 16 การทดสอบที่ห้องตัดและประกอบชิ้นส่วนโลหะที่มีการเชื่อมไฟฟ้า (ระบบปิด) ของโรงงานตัดและประกอบขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะอุตสาหกรรม

7. สรุปผล

จากการทดสอบเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ พบว่า เมื่อปรับดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ ในขณะต่อชุดเซลล์พลาสมาความเข้มสูง ทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น (ปริมาณ

ก๊าซโอโซนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซพิษต่างๆ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเบนซิน และก๊าซแอมโมเนีย ลดลง เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น) ซึ่งเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่นี้ได้นำชุดแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง HEPA มาใช้เป็นส่วนเสริมให้กับชุดเซลล์โคโรนาพัลส์ และชุดเซลล์อิเล็กโตรสแตติก ทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นละออง PM2.5 มากกว่า 98 % (โดยเวลาในการทดสอบ 90 นาที) ขนาดพื้นที่ในการทดสอบ 240 ลูกบาศก์เมตร (ระบบปิด)

เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ ผ่านการทดสอบการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวม (Power Consumption) การทดสอบความปลอดภัยด้านการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า การทดสอบการเตรียมการสำหรับการต่อลงดิน และการทดสอบความทนทานไฟฟ้า เป็นที่เรียบร้อย ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) (PTEC)

ในอนาคตเครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่นี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อสังคม สิ่งแวดล้อม และชุมชนได้เป็นอย่างดี ซึ่งช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชน อีกทั้งยังสามารถพัฒนาเป็นเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

8. ข้อเสนอแนะ

เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ได้ เมื่อใช้งานมา 1 ปี ผู้ใช้ต้องนำมาดำเนินการ ดังนี้ ข้อที่ (1) ตรวจเช็ควงจรไฟฟ้าแรงดันสูง และอุปกรณ์ต่างๆ ข้อที่ (2) ล้างทำความสะอาดเซลล์สนามไฟฟ้าโคโรนาและเซลล์ผลิตประจุไฟฟ้า และข้อที่ (3) เปลี่ยนชุดแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง HEPA

เพราะฉะนั้น เครื่องดูดและกำจัดมลพิษแบบเคลื่อนที่ได้ มีความคุ้มค่าและคุ้มทุน เพราะถ้าวงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ต่างๆ พังเสียหาย สามารถซ่อมและเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ในราคาไม่สูง เพราะอุปกรณ์ที่ใช้มีจำหน่ายภายในประเทศ

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2568

10. เอกสารอ้างอิง

[1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, & William P. Robbins. (1995). *Power Electronics*. John Wiley & Sons, INC.

[2] J. Marcos Alonso, Jesus Cardesín, Emilio Lopez Corominas, Manuel Rico-Secades, & Jorge García. (2004). *Low-Power High-Voltage High-Frequency Power Supply for Ozone Generation*. IEEE Transactions on Industry Applications. 40(2).

[3] ST.Louis. (1989). *High Frequency Switching Power Supply*. McGraw-Hill.

[4] Siseerot Ketkaew. (2012). Plasma Ozonizer Using Micro-Converter for Ammonia (NH_3) Decreasing in Shrimp Food Production. *Procedia Engineering 32,* 148-154.

[5] XY-KPWM สัญญาณเครื่องกำเนิดไฟฟ้า1-ช่อง 1Hz-150KHz PWM ความถี่รอบการทำงานปรับโมดูลจอแสดงผล LCD พร้อมสวิตช์เปิด/ปิด. https://thai.alibaba.com/product-detail/XY-KPWM-Signal-Generator-1-Channel-62507729348.html

การพัฒนาสายอากาศแผ่นวงจรพิมพ์ให้อัตราขยายสูงโดยการเซาะร่องรูปตัวที เพื่อใช้ภายในอาคารสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล

Development of a High-Gain Printed Circuit Board Antenna Using a T-Shaped Slot for Indoor Digital Television Reception

ศรันย์ คัมภีร์ภัทร[1,*], วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ[1], ธนาฒน์ สุกนวล[1], ไมตรี ธรรมมา[1], ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา[2], อภิเดช บุญเจือ[2], สัญชัย รำเพยพัด[2], นิกร แก้วแพรก[3], การัณย์ หอมชาติ[4] ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[5] และ ชญาณี ศิริบุรม[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[2] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[3] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[5] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี
321 มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย
*ผู้ติดต่อ: E-mail saran.ka@rmuti.ac.th, 096-954-5154, 044-233-000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและพัฒนาสายอากาศแผ่นวงจรพิมพ์อัตราขยายสูงใช้ภายในอาคารเพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และติดตั้งได้สะดวก โดยออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลแบบสล็อตไม่สมมาตรกัน ความยาวสายอากาศ 220 mm และกว้าง 25 mm ด้วยวิธีการ SSFG และปรับเปลี่ยนขนาด เซาะร่องทางด้านซ้ายมือและขวามือรูปตัวที และทำการป้อนฟีดสายอากาศด้วยหัว SMA (SMA feeder) จากด้านล่างที่มีแถบความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 470–862 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ -24 dB จากการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สายอากาศ CST Microwave Studio ทำให้สายอากาศที่นำเสนอนี้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา

คำสำคัญ: สัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล, สายอากาศไดโพล, Step-shaped feed gap, ความกว้างสล็อต, แผ่นวงจรพิมพ์, อัตราขยายสูง

Abstract

This research aims to study and develop a high-gain printed circuit board (PCB) antenna for indoor digital television reception with a simple structure and ease of installation. The proposed design is based on an asymmetric slot dipole antenna with dimensions of 220 mm in length and 25 mm in width. The antenna is designed using the Stepped Slot Feed Ground (SSFG) technique, with T-shaped

slots etched on both the left and right sides to enhance performance. The antenna is fed using an SMA connector (SMA feeder) from the bottom. The operating frequency range of the antenna is 470–862 MHz, covering the digital television band. The simulated results, obtained using CST Microwave Studio, show that the antenna achieves a return loss of -24 dB. Consequently, the proposed antenna offers advantages in terms of compact size and lightweight characteristics.

Keywords: Digital television signal, dipole antenna, step-shaped feed gap, slot width, printed circuit board (PCB), high gain

1. บทนำ

ระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล (Digital Terrestrial Television: DTV) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นเทคโนโลยีการกระจายสัญญาณโทรทัศน์สมัยใหม่ที่เข้ามาทดแทนระบบแอนะล็อกแบบเดิมในประเทศไทย อันเป็นการยกระดับประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่อย่างมีนัยสำคัญ ในอดีตการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศไทยใช้ระบบแอนะล็อก โดยมีสถานีหลักจำนวน 6 ช่อง ได้แก่ ช่อง 3, ช่อง 5, ช่อง 7, ช่อง 9, NBT และไทยพีบีเอส ซึ่งแต่ละช่องใช้แถบความถี่กว้างถึง 8 MHz ต่อหนึ่งช่องรายการ

อย่างไรก็ตาม ระบบ DTV นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้คลื่นความถี่ด้วยเทคนิคการบีบอัดข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital Compression) ทำให้สามารถออกอากาศได้หลายช่องรายการภายในแถบความถี่เดียวกัน (8 MHz) โดยรองรับได้ประมาณ 10–15 ช่อง พร้อมทั้งให้คุณภาพของภาพและเสียงที่สูงขึ้นในระดับความคมชัดสูง (High Definition: HD) การเปลี่ยนผ่านจากระบบแอนะล็อกสู่ระบบดิจิทัลจึงมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดและมีมูลค่าสูง อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และเพิ่มความเสถียรของการรับชมสัญญาณแม้ในสภาวะที่มีการเคลื่อนที่

อย่างไรก็ตาม ระบบดิจิทัลยังคงมีข้อจำกัดในพื้นที่อับสัญญาณ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถรับชมสัญญาณได้เลย แตกต่างจากระบบแอนะล็อกที่ยังสามารถรับชมได้แม้คุณภาพสัญญาณจะลดลง สำหรับประเทศไทย ระบบ DTV ถูกกำหนดให้ใช้งานในย่านความถี่ UHF ช่วง 470–862 MHz ดังนั้น อุปกรณ์รับสัญญาณโดยเฉพาะสายอากาศจำเป็นต้องสามารถรองรับย่านความถี่ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้องมีแถบความถี่กว้าง (wide bandwidth) และมีคุณลักษณะการแผ่กระจายกำลังงานที่เหมาะสม [1]–[4]

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้ให้ความสำคัญกับการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบดิจิทัล โดยดำเนินการทั้งในด้านการพัฒนาโครงข่ายภาคส่งให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ และการสนับสนุนภาครับสัญญาณ โดยเฉพาะการส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์รับสัญญาณ เช่น สายอากาศและเครื่องรับดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงบริการของประชาชน [5]–[8]

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าสายอากาศสำหรับการใช้งานภายในอาคาร โดยเฉพาะสายอากาศไดโพลแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Dipole Antenna) ยังมีข้อจำกัดในด้านความกว้างแถบความถี่และอัตราขยาย (gain) ที่ไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ของระบบ DTV ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศดังกล่าว โดยนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับเทคนิคการเซาะร่องรูปขั้นบันได (Step-shaped Feed Gap) บริเวณแขนของสายอากาศ เพื่อควบคุมการตอบสนองความถี่ในแต่ละช่วงการทำงาน โดยร่องขนาดใหญ่บริเวณแขนด้านหนึ่งใช้ควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ต่ำ ขณะที่ร่องขนาดเล็กบริเวณอีกด้านใช้ควบคุมความถี่ในช่วงสูง

การออกแบบดังกล่าวไม่เพียงช่วยเพิ่มความกว้างแถบความถี่และปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์

(impedance matching) ให้ดีขึ้นตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ แต่ยังคงโครงสร้างที่เรียบง่าย กะทัดรัด และเหมาะสมต่อการผลิตจริง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบ DTV ภายในอาคาร [8]–[9]

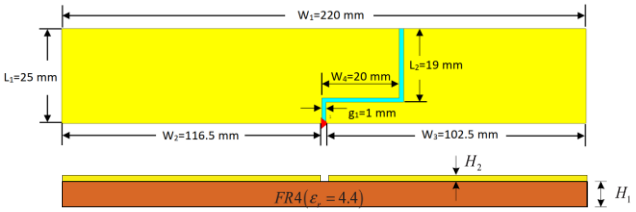
2. การออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศสำหรับการรับสัญญาณในระบบโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินที่ต้องการแถบความถี่กว้าง ได้พัฒนาบนพื้นฐานของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Dipole Antenna) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ต่อยอดจากสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น [10] โดยกำหนดรูปแบบเริ่มต้นตามแนวทางในงานวิจัยอ้างอิง [11] ทั้งนี้ พารามิเตอร์สำคัญที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ ความยาวและความกว้างของสายอากาศ ซึ่งออกแบบให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ความถี่กลาง 650 MHz เพื่อให้ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการของระบบ DTV ตั้งแต่ 470–862 MHz

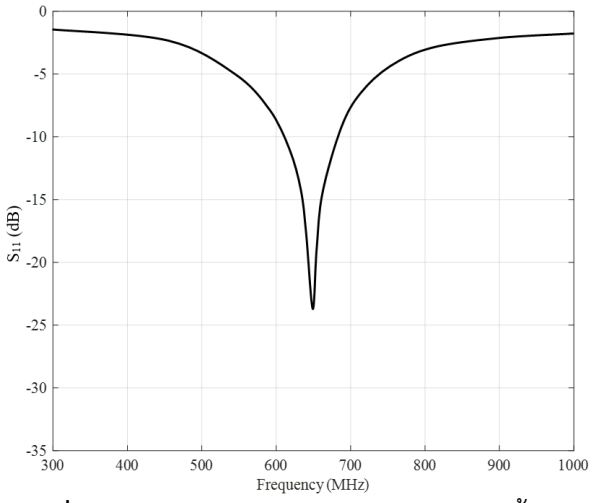
สายอากาศถูกติดตั้งบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 mm โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) เท่ากับ 4.4 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($tan\delta$) เท่ากับ 0.02 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงความถี่ดังกล่าว สำหรับพารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศ กำหนดค่าไว้ดังนี้: W_1 = 220 mm, W_2 = 116.5 mm, W_3 = 102.5 mm, L_1 = 25 mm, g_1 = 1 mm, H_1 = 1.6 mm และ H_2 = 0.035 mm

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ได้ โดยมีค่าการสะท้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 550–807 MHz ซึ่งบ่งชี้ถึงการทำงานที่มีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ช่วงความถี่ที่ได้ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ทั้งหมดของระบบ DTV (470–862 MHz) ดังแสดงในรูปที่ 2

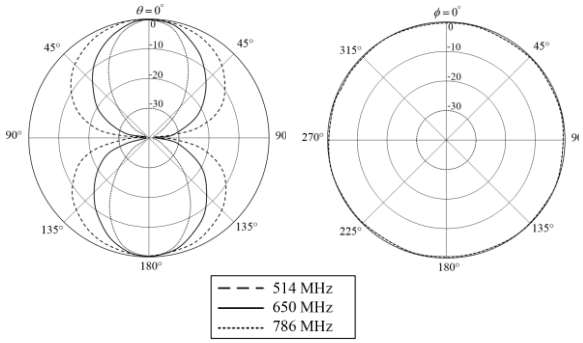
นอกจากนี้ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศได้ถูกวิเคราะห์ที่ความถี่ 514 MHz, 650 MHz และ 786 MHz โดยพบว่าอัตราขยาย (Gain) มีค่าเท่ากับ 2.6 dBi, 2.9 dBi และ 2.7 dBi ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าสายอากาศมีสมรรถนะอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม ยังมีความจำเป็นต้องปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมแถบความถี่ทั้งหมดและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศ



รูปที่ 1 สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศตั้งต้น



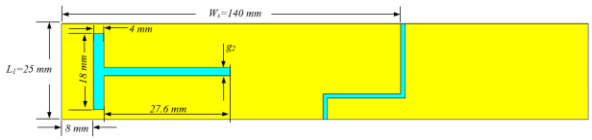
รูปที่ 2 ผลการจำลองค่า S_{11} ของสายอากาศตั้งต้น



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

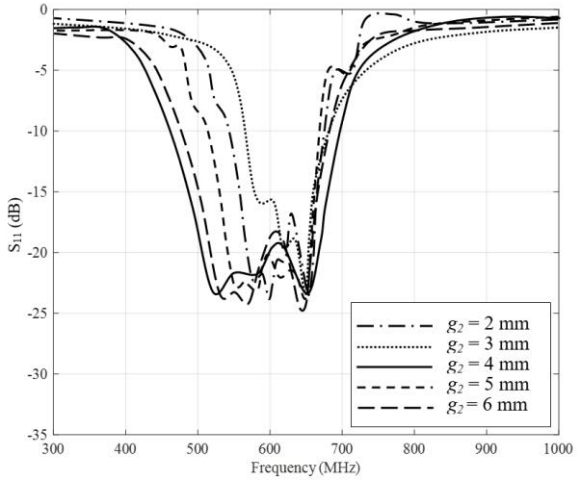
รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศตั้งต้น

จากรูปที่ 4 แสดงการปรับเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้แนวคิดการออกแบบมาจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์แสดงดังรูปที่ 1 มาทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมด้านขวาของไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงแถบความถี่ต่ำ



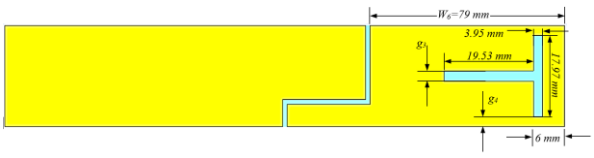
รูปที่ 4 แนวคิดการออกแบบมาจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_2

ขั้นแรกใช้เทคนิคโดยการกำหนดค่าการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งบริเวณส่วนของแขนด้านขวาแล้วเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแนวนอนเป็นลักษณะรูปตัวทีเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ด้านแถบความถี่ต่ำของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_2 ที่ขนาด 2 mm ถึง 6 mm ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_2 เท่ากับ 4 mm ดังรูปที่ 5

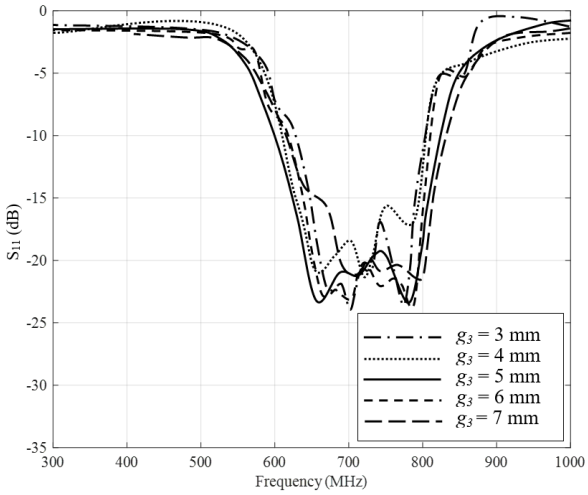


รูปที่ 5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_2

จากรูปที่ 6 แสดงการปรับเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศไดโพลมาทำการเซาะร่องรูปตัวทีด้านซ้ายของไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ช่วงแถบความถี่สูง ขั้นตอนต่อมาเพิ่มเทคนิคการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแนวตั้งแบบกำหนดค่าเริ่มต้นที่ด้านซ้ายแล้วเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแนวนอนเป็นลักษณะรูปตัวทีเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ด้านแถบความถี่สูงของสายอากาศสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อช่วยปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_3 ที่ขนาด 3 mm ถึง 7 mm ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_3 เท่ากับ 5 mm ดังรูปที่ 7

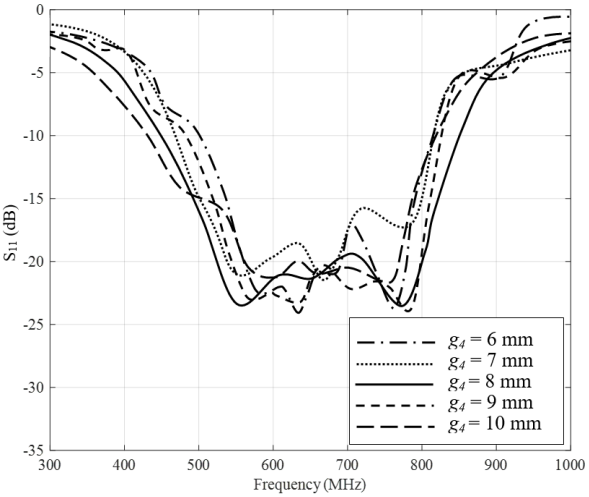


รูปที่ 6 แนวคิดการออกแบบมาจากสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_3



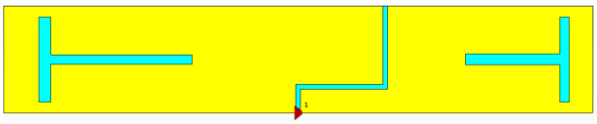
รูปที่ 7 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_3

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการปรับช่องระยะจากขอบถึงการเซาะร่องรูปตัวทีด้านขวาเพื่อควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ด้านแถบความถี่สูงของสายอากาศสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อช่วยปรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ g_4 ที่ขนาด 6 mm ถึง 10 mm ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ g_4 เท่ากับ 8 mm ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อเปลี่ยน g_4

จากขั้นตอนการออกแบบและปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุด ได้โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ที่นาเสนอ แสดงได้ดังรูปที่ 9

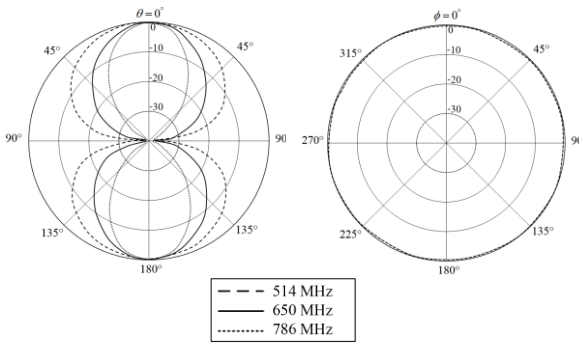


รูปที่ 9 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น

สายอากาศไดโพลแบบแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้ออกแบบในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบช่องว่างที่จุดกึ่งกลาง (Center Feed-gap: g_1) โดยกำหนดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าให้เท่ากับ 50 Ω เพื่อให้สอดคล้องกับระบบสายส่งมาตรฐาน พารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศได้รับการปรับค่าอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถทำงานครอบคลุมตลอดช่วงแถบความถี่ปฏิบัติการของระบบโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินในย่าน 470–862 MHz โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบประกอบด้วย L_2 = 19 mm, W_2 = 116.5 mm, W_3 = 102.5 mm, W_4 = 20 mm, W_5 = 140 mm, W_6 = 79 mm, g_2 = 2 mm, g_3 = 5 mm และ g_4 = 8 mm การวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศดำเนินการในบริเวณสนามระยะไกล (Far-field region) จากสมการ $R \geq (2D^2 / \lambda)$ ซึ่งระยะห่าง R สำหรับการพิจารณาสนามระยะไกลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเชิงกายภาพของสายอากาศและความยาวคลื่นของความถี่ใช้งาน โดย D แทนขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ และ λ แทนความยาวคลื่น ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานใน

ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

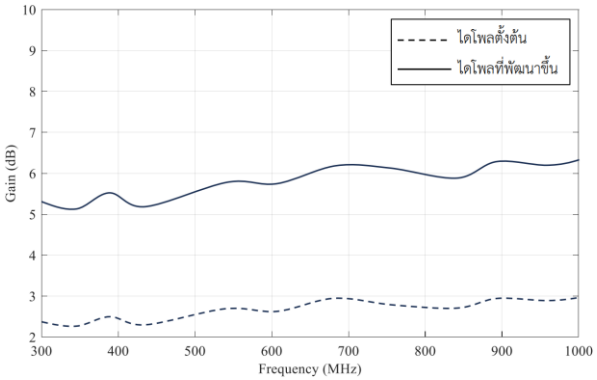
ผลการจำลองถูกนำมาพิจารณาใน 3 ช่วงความถี่ตัวแทนของย่านความถี่ปฏิบัติการ ได้แก่ ความถี่ต่ำ 514 MHz ความถี่กลาง 650 MHz และความถี่สูง 786 MHz เพื่อใช้เปรียบเทียบลักษณะการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในแต่ละช่วงความถี่ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศที่มีความสอดคล้องกับการใช้งานในระบบ DTV โดยรายละเอียดของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแสดงดังรูปที่ 10



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 10 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 11 ผลการจำลองของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ พบว่าผลการจำลองมีอัตราขยายอยู่ระหว่าง 5.2 dB ถึง 6.26 dB ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการ 470 MHz ถึง 862 MHz โดยผลการจำลองที่ความถี่ 514 MHz 650 MHz และ 786 MHz มีค่าอัตราขยาย เท่ากับ 5.4 dB, 6.2 dB และ 6.21 dB ตามลำดับ



รูปที่ 11 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแผ่นวงจรพิมพ์ตั้งต้นเทียบกับของสายอากาศต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น

3. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถบความถี่กว้างสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินในย่านความถี่ UHF โดยพัฒนาจากโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นวงจรพิมพ์ และประยุกต์ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมรูปตัวทีบริเวณแขนทั้งสองด้านของสายอากาศ เพื่อควบคุมการเกิดความถี่เรโซแนนซ์และขยายแถบความถี่การทำงานให้ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ ผลการออกแบบแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีประสิทธิภาพดีในช่วงความถี่ 470–862 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ปฏิบัติการของระบบ DTV นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอัตราขยายในทิศทางที่ต้องการ ส่งผลให้สมรรถนะโดยรวมของสายอากาศดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้การออกแบบได้ทำการวิเคราะห์และปรับแต่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างเป็นระบบส่งผลให้สายอากาศมีโครงสร้างที่กะทัดรัด โดยงานวิจัยนี้เป็นเพียงการจำลองผลเท่านั้น และจัดทำการสร้าง

ESTACON 2026 | 17th

ต้นแบบและการวัดผลจริงในงานวิจัยอนาคตต่อไป สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินในปัจจุบัน

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติและคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลในการทำงานวิจัย ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ ส่งผลให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Duangtang P. and Wongsan R. (2019). “Design of Band-notched Planar Dipole Antenna for DTV Application,” International Electrical Engineering Congress (iEECON-2019), 6-8 March, 2019.

[2] Kampeephat S., Todsungnoen S., Kamphikul P. and Sarikha W., (2021). “A Study of Impedance Bandwidth Improvement of Printed Dipole Antenna for DTV,” 18th International Conference on Electrical Engineering /Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 19-22 May 2021, pp. 341-344.

[3] Pimpol S. and Wongsan R., (2014). “Band - Notched Printed Dipole Antenna with EBG Reflector,” (ECTI-CON-2014) 11th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 17 July 2014.

[4] Pimpol S. and Wongsan R. (2021). “A Broadband Printed Dipole Antenna with Rectangular Slots for DTV Signal Reception,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 38, no. 2, pp. 23–33, 2021.

[5] Achimugu S., Usman A. U., Zubair S., David M., Abdulbaki A. O., and Abdullahi H. M. (2024). “A Multiband T-Shaped Antenna Array for 6G Mobile Communication,” *arXiv preprint arXiv:2405.20157*, 2024.

[6] Adegboye O. A., Udofia K. M., and Obot A. (2025). “Inverted C-Shaped Slots Loaded Exponential Tapered Triple Band Notched Ultra-Wideband Antenna,” *arXiv preprint arXiv:2511.11844*, 2025.

[7] Kamphikul P., Kampeephat S., andWongsan R., (2019). “Efficiency Improvement of Patch Antenna with Metamaterial Technique for Modern Wireless Communication Applications,” in Proc. of the Progress in Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy, June, 2019.

[8] Wongsan R., Duangtang P. and Mesawad P., (2015). “Dimension reduction of conical horn antennas by adding structure of metamaterial,” IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), Bandung, 2015, pp. 214-217.

[9] F. Fan, Z. Yan, (2017). “High Gain Circularly Polarized Slot Antenna Based on Microstrip-ridge Gap Waveguide Technology,” 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017, pp. 1669-1672.

[10] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons. New York.

[11] Yun-Wen C., and Wong K. L. (2007). “ Wideband Printed Dipole Antenna for DTV Signal Reception.” IEEE 2007.

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้น สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย

Design of a Microstrip Antenna Using a Double Inverted U-Shaped Slot Technique for Wireless Communication Systems

ศรันย์ คัมภีร์ภัทร[1,*], วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ[1], ธนาฒน์ สุกนวล[1], ไมตรี ธรรมมา[1], นิกร แก้วแพรก[3], ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา[2], อภิเดช บุญเจือ[2], สัญชัย รำเพยพัด[2] การัณย์ หอมชาติ[4] ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[5] และ จริญญา หาญกุล[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[2] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[3] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[5] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
321 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย
*ผู้ติดต่อ: E-mail saran.ka@rmuti.ac.th, 096-954-5154, 044-233-000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องในรูปตัวยูคว่ำ 2 ชั้น เพื่อสำหรับใช้งานในแถบความถี่กว้างยิ่งโดยให้สามารถรองรับการทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 2.8 GHz ถึง 11.5 GHz ความกว้างแถบความถี่ 127.6% โดยสามารถใช้งานได้กับการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g/a ที่ความถี่ 5.15-5.35 GHz และที่ความถี่ 5.725-5.825 GHz นอกจากนี้ยังรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารวายแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE802.16e ที่ความถี่ 3.3 GHz – 3.7 GHz และความถี่ 5.25-5.85 GHz สายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบขั้วเดียวที่ซับสเตรตมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.5 และสูง 1.6 มิลลิเมตร สายอากาศถูกออกแบบจำลองและวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งให้ค่าการสูญสียย้อนกลับที่น้อยกว่า -10 dB ค่า VSWR น้อยกว่า 2 ตลอดแถบความถี่ใช้งาน โดยผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมพบว่าสามารถนำเอาสายอากาศนี้ไปใช้งานได้เลยเพื่อรองรับระบบการสื่อสารไร้สาย

คำสำคัญ: แถบความถี่กว้างยิ่ง, โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย, เทคโนโลยีการสื่อสารไวแมกซ์, สายอากาศไมโครสตริป, เซาะร่องรูปตัวยูคว่ำ

Abstract

This research article presents the design of an antenna using a double inverted U-shaped slot technique to achieve wideband performance. The proposed antenna is capable of operating over a frequency range from 2.8 GHz to 11.5 GHz, corresponding to a fractional bandwidth of 127.6%. It supports wireless local area network (WLAN) communications based on the IEEE 802.11b/g/a standards at frequency bands of 5.15–5.35 GHz and 5.725–5.825 GHz. In addition, it is compatible with WiMAX technology under the IEEE 802.16e standard, operating at frequency ranges of 3.3–3.7 GHz and 5.25–5.85 GHz. The antenna is designed as a monopole microstrip antenna fabricated on a substrate with a dielectric constant of 4.5 and a thickness of 1.6 mm. The design and performance analysis were carried out using CST Microwave Studio. The results show that the antenna achieves a return loss of less than –10 dB and a voltage standing wave ratio (VSWR) of less than 2 across the entire operating bandwidth. Simulation results indicate that the proposed antenna is suitable for practical implementation in wireless communication systems.

Keywords: Ultra-wideband (UWB), wireless local area network (WLAN), WiMAX communication technology, microstrip antenna, inverted U-shaped slot.

1.บทนำ

ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน ระบบไร้สายหลากหลายประเภทจึงมีการใช้งานที่ความถี่แตกต่างกัน เช่น ระบบนำร่องด้วยดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบเครือข่ายไร้สายเฉพาะพื้นที่ (WLAN) รวมถึงเทคโนโลยี WiMAX เป็นต้น โดยเฉพาะในย่านความถี่แถบกว้างพิเศษ (Ultra-Wideband: UWB) ซึ่งครอบคลุมการใช้งานทั้งระบบ WLAN และ WiMAX สามารถรองรับการรับ-ส่งข้อมูลได้ที่อัตราความเร็วสูง และได้รับการจัดสรรความถี่สำหรับใช้งานในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติยังมีการใช้งานภายในช่วงความถี่ที่ค่อนข้างแคบ ได้แก่ เทคโนโลยี WiMAX ที่ใช้ความถี่ในช่วง 3.3–3.7 GHz และ 5.25–5.85 GHz ขณะที่ WLAN ใช้ในช่วง 5.15–5.35 GHz และ 5.725–5.825 GHz ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากจึงให้ความสนใจในการออกแบบสายอากาศที่สามารถรองรับการทำงานได้ครอบคลุมทุกย่านความถี่ดังกล่าว เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานที่หลากหลาย [1]-[2] โดยสายอากาศที่ได้รับความนิยมในการออกแบบคือสายอากาศชนิดแผ่นพิมพ์ (Printed Antenna) เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ราคาประหยัด และสามารถผลิตได้ง่าย [3]-[4] แนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการ คือการนำเทคนิคการปรับปรุงโครงสร้างของแพตช์ เช่น การออกแบบเป็นรูปทรง C-shape, U-shape, Y-shape รวมถึงการเซาะร่องในรูปแบบต่าง ๆ เช่น รูปหกเหลี่ยม [5]-[11] งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์แบบขั้วเดี่ยว โดยใช้การป้อนสัญญาณแบบสตริปไลน์ร่วมกับหัวต่อ SMA ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ตัวแพตช์ได้รับการออกแบบโดยใช้เทคนิคการเซาะร่องหลากหลายรูปแบบ ทั้งในบริเวณแพตช์สายอากาศและระนาบกราวด์ เพื่อเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ให้สามารถรองรับช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

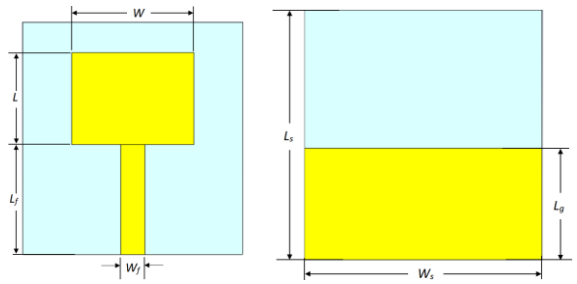
2. การออกแบบสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศ วัสดุที่เลือกใช้สร้างสายอากาศเป็นสายอากาศที่ทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมาก และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานที่ความถี่กว้างได้โดยที่แผ่นพิมพ์มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) = 4.5 และสูง (h) =1.6 มิลลิเมตร ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 5.25 GHz แล้วทำการคำนวณขนาดความกว้าง W และความยาว L ของแพตช์รูปสี่เหลี่ยมและคำนวณขนาดของกราวน์ ($W_g \times L_g$) สำหรับขนาดของสายนำสัญญาณแบบสายไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณเท่ากับ 50 โอห์ม จะได้ความกว้าง (W_f) และความยาว (L_f) เมื่อทำการจำลองผลจากโปรแกรมสำเร็จรูปจะได้ค่าจากตัวแปรที่เหมาะสมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการจำลองผล

ตัวแปร	ค่าที่ได้จากการจำลอง
W_s	41 mm
L_s	41 mm
ε_{reff}	3.2
L_{eff}	16.13 mm
ΔL	0.73 mm
W	25.4 mm
L	16 mm
W_g	38 mm

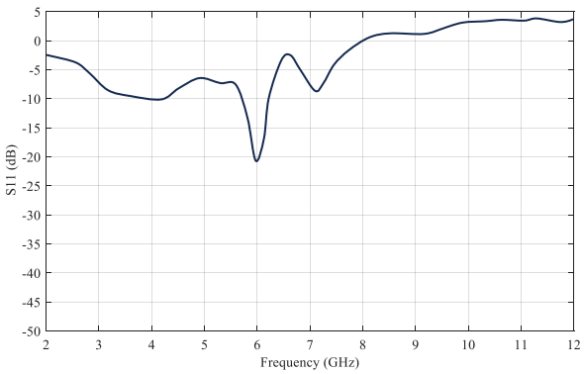
L_g	18.2 mm
W_f	3.48 mm
L_f	22 mm



(ก) (ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล

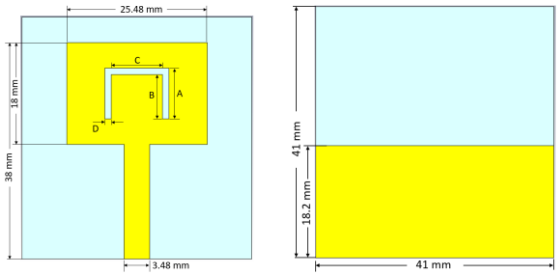
จากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST เพื่อหาค่า S_{11} จากรูปที่ 2 พบว่าตลอดทั้งช่วงของความถี่ที่เราต้องการค่า S_{11} มีค่าน้อยกว่า -10 dB อยู่ในช่วงความถี่ตอบสนองประมาณ 6 GHz ซึ่งเป็นผลให้ค่า VSWR น้อยกว่า 2 ในช่วงความถี่ดังกล่าวเท่านั้นดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบมาโดยการจำลองเริ่มต้นนั้นไม่สามารถใช้งานได้ดั้งนั้นจึงต้องทำการปรับรูปร่างของสายอากาศใหม่ซึ่งจะต้องใช้เทคนิคการออกแบบให้สามารถขยายความกว้างแถบความถี่แบบต่างๆ มาช่วยในการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการเซาะร่องเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก



รูปที่ 2 ค่า S_{11} ของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ

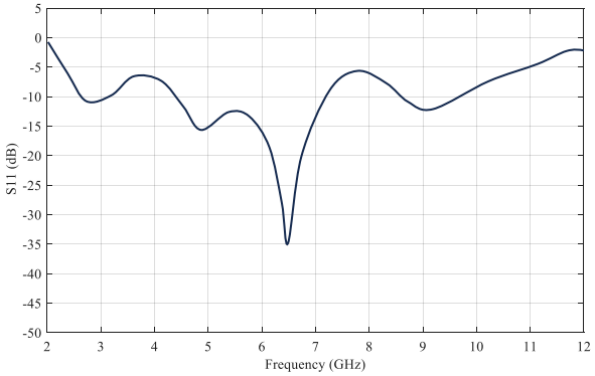
3.การออกแบบสายอากาศโดยการใช้เทคนิคการขยายแถบความถี่

โดยเริ่มต้นจากทำการเซาะร่องรูปร่างตัวยูคว่ำในตัวแพตช์ตรงกลางของสายอากาศ โดยสายอากาศที่ได้มีขนาดของแพตช์ 41x41 ตารางมิลลิเมตร และกราวนด์มีขนาด 41x18.2 ตารางมิลลิเมตร พบว่าการปรับขนาดของร่องรูปตัวยูคว่ำชั้นที่หนึ่งส่งผลให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ A = 11 mm, B = 5.3 mm, C = 9.6 mm, และ D = 1.96 mm เพื่อการปรับจูนสายอากาศให้ตอบสนองช่วงแถบความถี่ที่ต้องการ [8]-[9] แสดงดังรูปที่ 3



(ก) (ข)

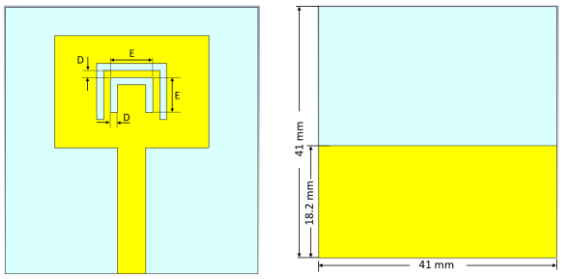
รูปที่ 3 โครงสร้างของสายอากาศที่ถูกปรับขนาดและเซาะร่องแบบต่างๆ



รูปที่ 4 ค่า S_{11} ของสายอากาศที่ถูกปรับขนาดและเซาะร่องแบบต่างๆ

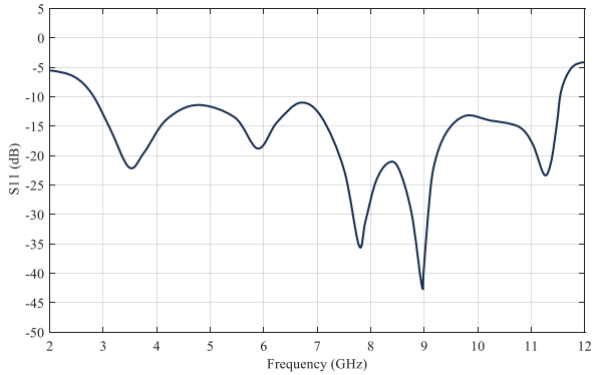
จากรูปที่ 4 แสดงค่าการตอบสนอง S_{11} ของสายอากาศที่ได้รับการปรับขนาดและเซาะร่องในรูปแบบต่างๆ โดยพบว่าค่า S_{11} มีค่าน้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ใช้งานส่วนใหญ่ ยกเว้นในช่วง 3.5–4.5

GHz และ 7.2–8.5 GHz ซึ่งยังไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการเซาะร่องในครั้งแรก พบว่าสามารถลดค่า S_{11} ให้ต่ำกว่า -10 dB ได้เกือบตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ ยกเว้นบางช่วงที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์ ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้เทคนิคการเซาะร่องแบบเดิมต่อเนื่องในครั้งที่สอง เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้ในทุกย่านความถี่เป้าหมาย สำหรับการเซาะร่องครั้งที่สองรูปตัวยู (U-shape) คว่ำชั้นที่สอง เพื่อช่วยเพิ่มแถบความถี่ที่ตอบสนองต่อความต้องการ โดยจากผลการจำลอง พบว่าการปรับขนาดของร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้นส่งผลให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ D = 1.96 mm และ E = 2.03 mm ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลลัพธ์การวัดค่า S_{11} ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่า S_{11} มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 2.8–11.5 GHz และค่า VSWR อยู่ต่ำกว่า 2 ตลอดช่วงเช่นเดียวกัน สำหรับค่า gain ที่ความถี่ต่างๆ ภายในช่วงการใช้งานนั้น พบว่ามีค่ามากกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 8

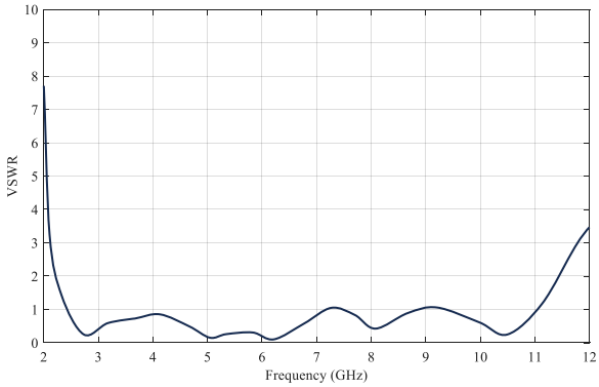


(ก) (ข)

รูปที่ 5 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการเซาะร่องครั้งที่ 2

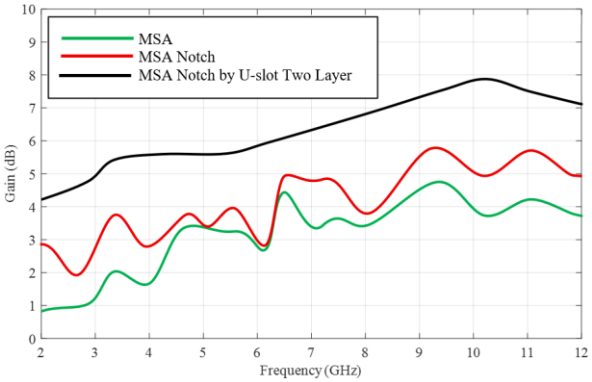


รูปที่ 6 ค่า S_{11} ของสายอากาศที่ถูกปรับขนาดและเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำที่แพตช์

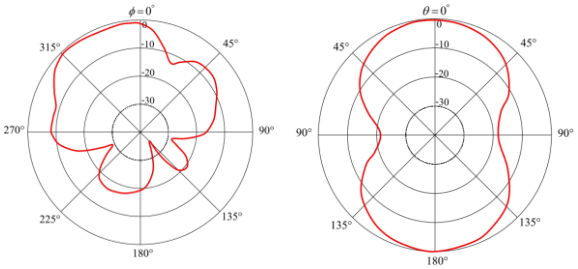


รูปที่ 7 ค่า VSWR ที่ได้จากการออกแบบโดยปรับใช้เทคนิคการเซาะร่องครั้งที่ 2

จากนั้นทำการจำลองผลการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบโดยจำลองที่ความถี่ 3.1 GHz, 5.25 GHz และ 10.6 GHz มีทิศทางการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 9

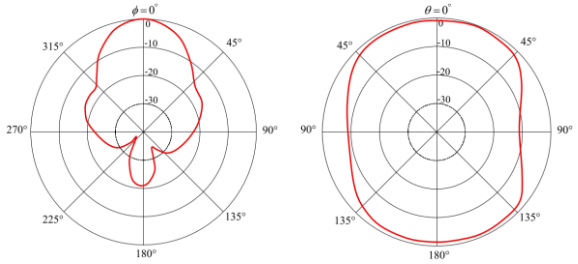


รูปที่ 8 อัตราขยายที่ได้จากการออกแบบโดยปรับใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้น



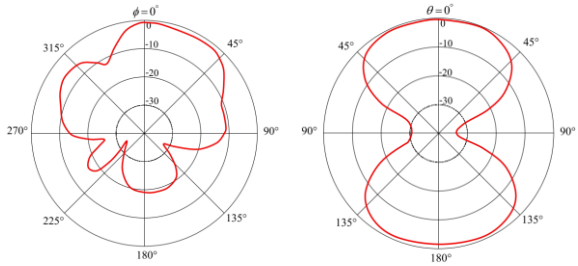
ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ก) ที่ความถี่ 3.1 GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก

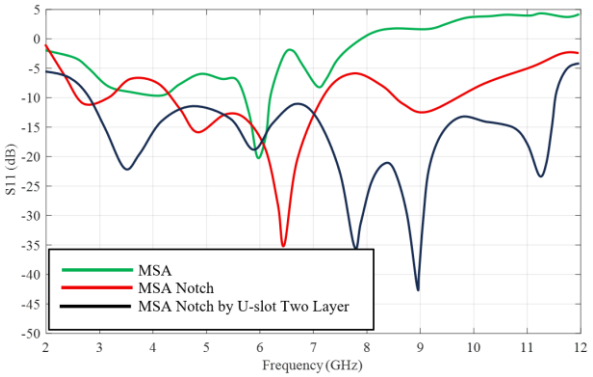
(ข) ที่ความถี่ 5.25 GHz



ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ค) ที่ความถี่ 10.6 GHz

รูปที่ 9 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ความถี่ (ก) 3.1 GHz, (ข) 5.25 และ (ค) 10.6 GHz



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่า S_{11} ของสายอากาศที่ถูกปรับขนาดและเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้นที่แพตช์

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และผลการเปรียบเทียบ S_{11} แสดงในรูปที่ 10 นั้น พบว่าสายอากาศที่ถูกปรับขนาดและเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้นที่แพตช์มีการแมตช์ของสายอากาศที่ดีขึ้น มีอัตราขยายที่สูงขึ้นที่ความถี่ 5.25 GHz เป็น 5.6 dB หรือสูงขึ้น 2.4 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศดั้งเดิม ที่ความถี่ 5.725-5.825 GHz มีอัตราขยายอยู่ที่ 5.5-5.8 dB จากผลที่ได้นั้นสามารถนำรูปแบบของสายอากาศที่ได้จำลองไปประยุกต์ใช้งานได้กับการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.11b/g/a ที่ความถี่ 5.15-5.35 GHz และที่ความถี่ 5.725-5.825 GHz นอกจากนี้สายอากาศนี้ยังรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารวายแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE802.16e ที่ความถี่ 3.3 GHz – 3.7 GHz มีอัตราขยายอยู่ที่ 5.5-5.6 dB และความถี่ 5.25-5.85 GHz มีอัตราขยายอยู่ที่ 5.6-5.8 dB จากผลจะเห็นได้ว่ามีมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากเดิมในช่วงความถี่การสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายและในส่วนของเทคโนโลยีการสื่อสารวายแมกซ์ประมาณ 3 dB เพิ่มขีดความสามารถได้ดีมากยิ่งขึ้น

4. สรุป

การออกแบบอากาศไมโครสตริปที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างยิ่งด้วยวิธีการเซาะร่อง เพื่อขยายแถบความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำจากแผ่นพิมพ์ จากการนำการเซาะร่องรูปตัวยูคว่ำสองชั้นที่กึ่งกลางแพตช์ของสายอากาศ จากผลการจำลองพบว่าค่า S_{11} กลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงแถบความถี่ 127.6% (2.8-11.5 GHz) สายอากาศมีขนาดเล็กสามารถทำงานได้ดี สำหรับการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยี WLAN และ WiMAX

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาอาจารย์ทุกๆ ท่านในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ ให้คำแนะนำและแนวคิดที่มีประโยชน์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา และทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลในการทำงานวิจัย ส่งผลให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. การอ้างอิง

[1] รัฐพล จินะวงศ์และอานวย เรืองวารี. (2552). “การพัฒนาสายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่ป้อนด้วยสายนาสัญญาณระนาบร่วมแบบแถบความถี่กว้าง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON-32), 28-30 ตุลาคม, ประเทศไทย.

[2] Ruengwaree A., Naktong W. and Namsang A. (2013). “A TE-shaped monopole antenna with semicircle etching technique on ground plane for UWB applications.” Proceeding of the International Symposium on Antenna and Propagation, Oct 2013.

[3] Ruvio G. and Ammann M.J. (2003). “A Novel Wideband Semi-Planar Miniaturized Antenna.” IEEE Trans. Antennas and Propag. Vol. 55, No 10, Oct 2003.

[4] Triuvalar P., Raghavan S. and Gopinath M. (2013). “ CPW-Fed Folded UWB Monopole Slot Antenna for Wimax and WLAN Applications.” International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECON). 25-26 March 2013.

[5] Awad N. M., Abdelazeez M. K. (2016). “ Multislot microstrip antenna for ultra-wide band applications.” Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 2016.

[6] Abbas A. S. and Abdelazeez M. K. (2015). “ Bandwidth enhancement of single notch planar UWB antenna with single step feed line.” IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT). 3-5 Nov. 2015.

[7] Soh P. J., Vandenbosch G. A.E and Oro J. H. (2011). “ Design and Evaluation of Flexible CPW-fed Ultrawide Band (UWB) Textile Antennas.” IEEE International RF and Microwave Conference (RFM 2011), 12th - 14th Dec. 2011, Malaysia.

[8] Aboufoul T. and Alomainy A. (2012). “ Reconfigurable Notched Tapered Slot Ultra-Wideband Antenna for Cognitive Radio Applications.” IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium. 12 Nov. 2012.

[9] Gozash F., Po K. and Mohan A. S. (2014). “Design of a UWB Printed G-shaped Monopole Antenna using Characteristic Mode.” International workshop on Antenna Theory. 20 Nov 2014.

[10] Fan T. Q., Jiang B., Liu R., Xiu J., Lin Y., Xu H. (2022). “ A Novel Double U-Slot Microstrip Patch Antenna Design for Low-Profile and Broad Bandwidth Applications.” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 70, Issue 4, April 2022, pp 2543 – 2549.

[11] Xiaoang L., Chao L. (2010). “Design of high gain multiple U-slot microstrip patch antenna for wireless system.” International Conference on Computational Problem-Solving, Li Jiang, China, 3-5 December 2010.

[10] Goswami S., Mandal S. K., Banerjee S. (2025). “A Truly S-shaped Slot-loaded Broadband Microstrip Antenna for 5G Communication.” Journal Advanced Electromagnetics (AEM), Vol. 14 No. 3, AUGUST 2025.

[11] Adegboye O. A., Udofia K. M., Obot A. (2023). “ Inverted C-Shaped Slots Loaded Exponential Tapered Triple Band Notched Ultra Wideband (UWB) Antenna.” International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT.ORG), Volume 12, Issue 04, April 2023.

การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลในเทคโนโลยีซิกบีโดยใช้โครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูหลายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบฟาร์ม

Gain Enhancement of a Monopole Antenna for ZigBee Technology Using a Perforated Multi-Size Superstrate Structure for Smart Farming Applications

ศรันย์ คัมภีร์ภัทร[1,*], วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ[1], ธนาฒน์ สุกนวล[1], ไมตรี ธรรมมา[1], นิกร แก้วแพรก[3], ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา[2], อภิเดช บุญเจือ[2], สัญชัย รำเพยพัด[2] การัณย์ หอมชาติ[4] ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[5] และ จริญญา หาญกุล[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[2] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[3] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[5] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี
321 มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย
*ผู้ติดต่อ: E-mail saran.ka@rmuti.ac.th, 096-954-5154, 044-233-000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้อธิบายการปรับปรุงออกแบบการเพิ่มอัตราขยายสายอากาศโมโนโพลในเทคโนโลยีซิกบีที่มีความยาวหนึ่งในสี่ส่วนของความยาวคลื่น สำหรับการสื่อสารไร้สารในการประยุกต์ใช้งานในฟาร์ม ด้วยโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูวงกลมหลายขนาดในแนวตั้งซึ่งจัดเป็นอภิวัสดุชนิดหนึ่ง ที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศในเรื่องการเพิ่มอัตราขยายได้ และยังช่วยลดระดับโหลบด้านข้างด้านหลัง และคลื่นผิว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจำลองผลสายอากาศและมีความถี่ปฏิบัติการ 922.5 MHz ซึ่งสามารถรองรับกับเทคโนโลยีซิกบีในการประยุกต์ใช้งานในระบบฟาร์มได้ จากโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสายอากาศดังกล่าวนั้นมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้นและยังให้อัตราขยายความถี่ปฏิบัติการ 922.5 MHz เท่ากับ 12.31 dB ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากสายอากาศโมโนโพลเดิมประมาณ 7.78 dB

คำสำคัญ: การเพิ่มอัตราขยาย, สายอากาศโมโนโพล, ซิกบี, โครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรู, การประยุกต์ใช้งานในฟาร์ม

Abstract

This study presents an improved design for enhancing the gain of a quarter-wavelength monopole antenna for ZigBee technology, intended for wireless communication applications in smart farming. The proposed design incorporates a superstrate structure with vertically arranged circular

perforations of varying sizes, forming a type of metamaterial. This structure is employed to improve antenna performance by increasing gain while simultaneously reducing side lobes, back lobes, and surface waves. The antenna was designed and simulated to operate at a frequency of 922.5 MHz, which is compatible with ZigBee technology for agricultural applications. Simulation results obtained from a commercial software package demonstrate that the proposed antenna achieves improved impedance matching and provides a gain of 12.31 dB at the operating frequency of 922.5 MHz. This represents an enhancement of approximately 7.78 dB compared to the conventional monopole antenna.

Keywords: Gain enhancement, monopole antenna, ZigBee technology, perforated superstrate structure, smart farming applications.

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งได้รับความสนใจและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายสาขา การขยายตัวของ IoT ส่งผลให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานต่ำ และสามารถเชื่อมต่อสื่อสารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]-[4]

อย่างไรก็ตาม ระบบ IoT ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญในด้านการใช้พลังงานของอุปกรณ์ปลายทางและระยะทางการสื่อสารของสัญญาณวิทยุ ซึ่งส่งผลต่อความครอบคลุมและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยี LoRa (Long Range) จึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการสื่อสารระยะไกลและใช้พลังงานต่ำ ทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ IoT

องค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สายคือ “สายอากาศ” ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการส่ง และแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับเป็นพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการรับ โดยสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศแบบเส้นลวด ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่าย ขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และสามารถติดตั้งใช้งานได้สะดวก [5]-[9]

จากการศึกษาพบว่าสายอากาศโมโนโพลทำหน้าที่เป็นเรโซเนเตอร์สำหรับการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยติดตั้งบนระนาบกราวด์ ซึ่งความยาวของตัวนำที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมรรถนะของสายอากาศ โดยเฉพาะสายอากาศโมโนโพลที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของสายอากาศดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับขนาดของระนาบกราวด์ โดยระนาบกราวด์ขนาดใหญ่จะช่วยเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ แต่ในทางปฏิบัติอาจมีข้อจำกัดด้านขนาดและความสะดวกในการติดตั้ง

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดของอภิวัสดุ (Metamaterials) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พบในธรรมชาติ โดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์สำคัญ เช่น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ε) ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (μ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (n) ผ่านการออกแบบโครงสร้างระดับจุลภาค อภิวัสดุสามารถถูกออกแบบเพื่อให้เกิดการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามต้องการ เช่น การสร้างคุณสมบัติค่าพารามิเตอร์เป็นลบ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสายอากาศ [10]-[11]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าโครงสร้างอภิวัสดุที่มีลักษณะสอดคล้องกับลำคลื่นของสายอากาศสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์เสริม และช่วยเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศได้ โดยเฉพาะเมื่อทำการติดตั้งบริเวณด้านหน้าหรือโดยรอบของสายอากาศ [12]-[18]

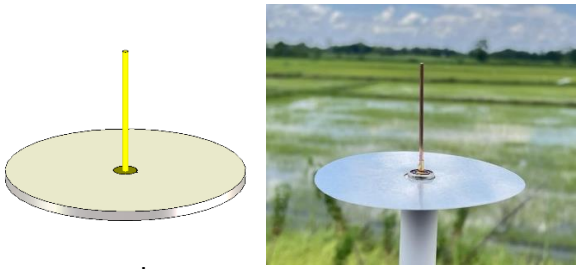
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลสำหรับใช้งานในเทคโนโลยีซิกบีโดยประยุกต์ใช้โครงสร้างอภิวัสดุแบบผสม ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้ (1) โครงสร้างหลุมโลหะ (Metallic Hole Structure) เพื่อเพิ่มความกว้างแถบความถี่และปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ และ (2) โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

แนวตั้ง (Vertical Wire Medium Structure) เพื่อใช้ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยได้ทำการปรับพารามิเตอร์และตำแหน่งติดตั้งของโครงสร้างดังกล่าวอย่างเหมาะสม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มแถบความถี่ ปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ และเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศโมโนโพลแบบดั้งเดิม

2. การออกแบบสายอากาศโมโนโพล

จากรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (λ/4) ที่ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ปฏิบัติการ 922.5 MHz โดยตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm และติดตั้งบนระนาบกราวด์รูปทรงวงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น (λ)

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงให้เห็นสมรรถนะของสายอากาศในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient: S_{11}) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ โดยสายอากาศที่ออกแบบมีแถบความถี่ใช้งาน (Bandwidth) เท่ากับ 15 MHz (ที่ระดับ -10 dB) และมีอัตราขยาย (Gain) สูงสุดเท่ากับ 4.53 dB

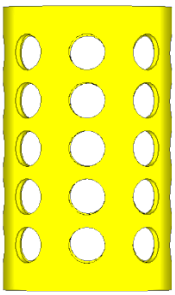


รูปที่ 1 สายอากาศโมโนโพล λ /4

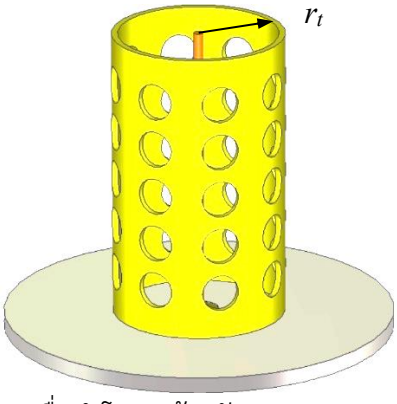
3. การออกแบบอภิวัสดุและผลการจำลองระบบสายอากาศโมโนโพล

3.1 อภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้งและสายอากาศโมโนโพล

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ได้เลือกที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศโมโนโพล λ /4 งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงในส่วนของความกว้างแถบและการแมตช์อิมพีแดนซ์ก่อน ด้วยการนำอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมขนาดเท่ากันในแนวตั้งแบบทรงกระบอกมาวางครอบสายอากาศดังรูปที่ 2 โดยอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้งมีความสูงเท่ากับความสูงของโมโนโพล คือ λ /4 และมีระยะห่างของหลุมและความกว้างกับยาวของหลุมจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าเท่ากับ λ /20 โดยมีรัศมีความโค้งของทรงกระบอกเท่ากับ r_t= λ /22 จากการจำลองผลพบว่าเมื่อนำอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้งแบบทรงกระบอกมาวางครอบสายอากาศส่งผลให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 29 MHz เพิ่มขึ้นจากสายอากาศโมโนโพลเดิมประมาณ 14 MHz มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้น และนอกจากนี้ ยังส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 7.77 dB ดังตารางที่ 1



(ก) อภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้ง

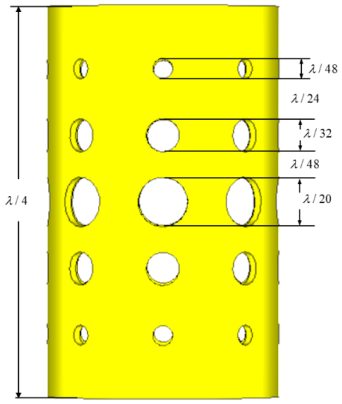


(ข) เมื่อนำโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้งมาวางล้อมรอบโมโนโพล

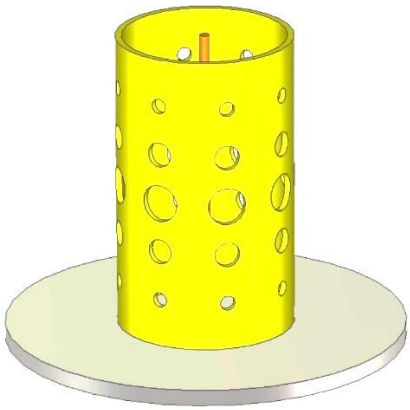
รูปที่ 2 สายอากาศโมโนโพล λ /4 และอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมในแนวตั้ง

3.2 อภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรอบตัวหลายระดับและสายอากาศโมโนโพล

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรอบตัวหลายระดับ เนื่องจากถ้าทำการเจาะรูในระดับขนาดที่เท่ากันก็สามารถช่วยเพิ่มอัตราขยายได้เลยมีแนวคิดต่อว่าถ้าปรับขนาดของรูให้ไม่เท่ากันเพิ่มผลักดันให้ลำคลื่นนั้นออกไปและช่วยลดระดับโหลบด้านข้างลงได้เพื่อช่วยเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลได้ ดังรูปที่ 3(ก) จากงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [12]–[13] พบว่าจำนวนชั้นของโครงสร้างอภิวัสดุที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันตามที่แสดงในรูปที่ 3(ก) และมีความยาวรวมเท่ากับความยาวของสายอากาศโมโนโพล รูปที่ 3(ข) แสดงโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลต้นแบบที่ถูกพัฒนา โดยประกอบร่วมกับอภิวัสดุโครงสร้างแบบผสม ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างตัวกลางครอบแบบเจาะรูหลายระดับในแนวตั้งล้อมรอบสายอากาศ จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า



(ก) อภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดแนวตั้ง



(ข) สายอากาศโมโนโพล λ /4 และอภิวัสดุ

รูปที่ 3 สายอากาศโมโนโพล λ /4 ต้นแบบ

พบว่าสายอากาศต้นแบบมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 12.31 dBi ซึ่งเพิ่มขึ้น 7.78 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศโมโนโพลเดี่ยว และเพิ่มขึ้น 4.54 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศโมโนโพลที่ใช้โครงสร้างอภิวัสดุแบบตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมขนาดเท่ากันในแนวตั้ง ส่งผลให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40 MHz เพิ่มขึ้นจากสายอากาศโมโนโพลเดิมประมาณ 25 MHz มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้อภิวัสดุโครงสร้างแบบผสมสามารถปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศได้

อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสายอากาศต้นแบบแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ขณะที่รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบ ในเชิงการวิเคราะห์ระยะการสื่อสารสามารถพิจารณาได้จากสมการ Friis สำหรับสภาวะเส้นตรง (Line-of-Sight: LOS) ดังสมการ

$$Pr(dBm) = Pt(dBm) + Gt(dBi) + Gr(dBi) - 20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

โดยที่ Pt คือกำลังส่ง, Gt และ Gr คืออัตราขยายของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ, d คือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ และ λ คือความยาวคลื่น

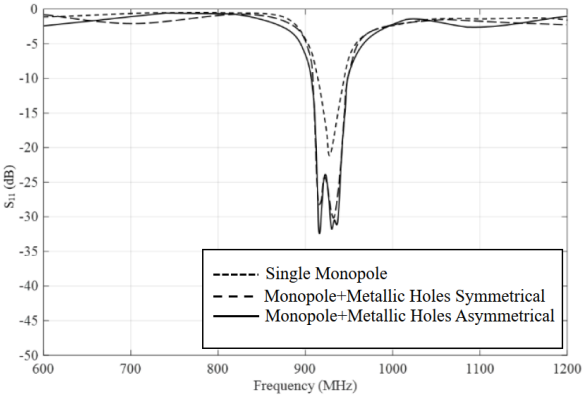
เมื่อกำหนด Pt = 30 dBm, Gt = 12.01 dBi, Gr = 0 dBi, Pr = −90 dBm และที่ความถี่ 922.5 MHz ($\lambda \approx 0.325$ m) จะได้

$$-90 = 30 + 12.01 + 0 - 20\log_{10}(4\pi d/0.325)$$

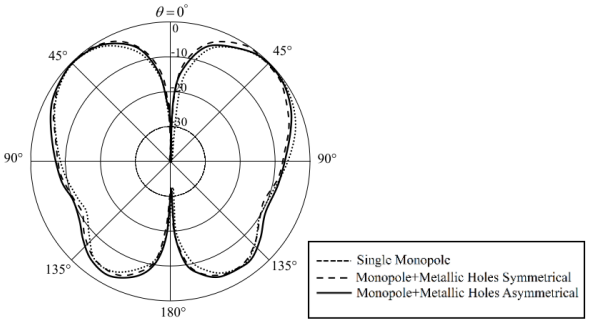
จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาระยะ d ได้ประมาณ 103 กิโลเมตร ผลการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับผลการจำลอง และแสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอมีศักยภาพในการเพิ่มระยะครอบคลุมของระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะ LOS



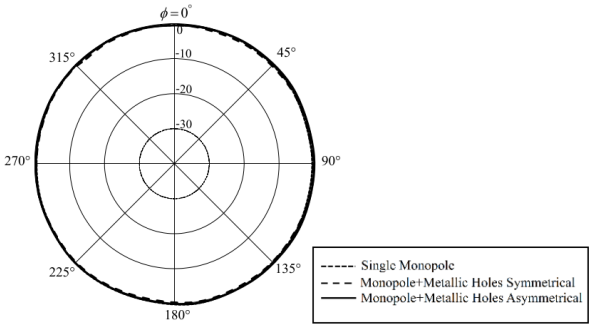
รูปที่ 4 สายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

ตารางที่ 1 ผลการจำลอง

สายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$	ช่วงความถี่ใช้งาน (MHz)	ความกว้างแถบ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
โมโนโพลเดี่ยว	925-940	15	4.53
โมโนโพลและอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรูปวงกลมขนาดเท่ากันในแนวตั้ง	921-950	29	7.77
โมโนโพลและอภิวัสดุโครงสร้างตัวกลางครอบเจาะรูรอบตัวหลายระดับ **(สายอากาศต้นแบบ)**	910-950	40	12.31

4. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโมโนโพลความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) โดยประยุกต์ใช้เทคนิคอภิวัสดุแบบผสม ซึ่งประกอบด้วยสองโครงสร้างหลัก ได้แก่ (1) อภิวัสดุแบบเจาะรูวงกลมขนาดเท่ากันในแนวตั้ง เพื่อช่วยเพิ่มความกว้างแถบความถี่และปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และ (2) อภิวัสดุแบบเจาะรูหลายระดับล้อมรอบตัวนำในแนวตั้ง ซึ่งมีบทบาทในการควบคุมและบีบลำคลื่น ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น สายอากาศต้นแบบถูกออกแบบและจำลองที่ความถี่ปฏิบัติการ 922.5 MHz โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มความกว้างแถบความถี่ได้ถึง 40 MHz (ที่ระดับ −10 dB) พร้อมทั้งปรับปรุงลักษณะการแมตช์อิมพีแดนซ์ให้ดีขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งพิจารณาได้จากค่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ลดลงเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้เป็น 12.31 dB หรือสูงถึงอีก 7.78 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศโมโนโพลแบบดั้งเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอภิวัสดุแบบผสมที่นำเสนอสามารถปรับปรุงสมรรถนะการแผ่รังสีของสายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยยังคงรักษาขนาดที่กะทัดรัดของโครงสร้างไว้ได้ ดังนั้น โครงสร้างที่นำเสนอจึงมีศักยภาพในการยกระดับประสิทธิภาพของสายอากาศโมโนโพล ทั้งในด้านแถบความถี่ การแมตช์อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายย่านความถี่ UHF เช่น LoRaWAN

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวคิดอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ได้เอื้อเฟื้อ

อุปกรณ์และทรัพยากรที่ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ผลการวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Kudpik R., Meesawad P., and Wongsan R., (2017). “ Bandwidth Enlargement of λ /4 Monopole above Ground Plane with Metallic Holes Structure.” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP-2017), Phuket, Thailand, 21 December 2017.

[2] Weiner M., Monopole Antennas, (2003). 1st ed., The MITRE Corporation Massachusetts, U.S.A., 2003.

[3] Zivkovic Z., et al., (2012). “ Radiation pattern and impedance of a quarter wavelength monopole antenna above a finite ground plane.” (SoftCOM 2012), 20th International Conference on Software, Telecommunica-tions and Computer Networks, pp 1-5.

[4] Muhammad A., (2016). “Report on Quarter Wave Monopole Antenna.”

[5] Farahani S., (2008). “ ZigBee Wireless Networks and Transceivers.” Newnes.

[6] Valentino T., (2001). “ Short Medium Frequency AM Antennas, IEEE Transactions on Broadcasting.” Vol. 47, No. 3, pp. 263 – 284.

[7] Yang F. et al., (2009). “ Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering.” Cambridge University Press, Cambridge.

[8] นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์. (2553). “อภิวัสดุ (Metamaterials).” วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 52-60.

[9] ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ อัครเอกฒาลิน. (2554). “อภิวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (Metamaterials for Antenna Applications).” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, หน้า 472-482.

[10] นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. (2552). “วัสดุเหนือธรรมชาติ.” วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 133-149.

[11] Kampeephat S., Kamphikul P., and Wongsan R., (2017). “ Gain improvement for conventional rectangular horn antenna with additional two-layer wire medium structure.” (PIERS) Progress in Electro - magnetics Research Symposium, Singapore, pp. 2493 - 2497.

[12] Duangtang P., Mesawad P., Wongsan R., (2016). “ Gain Improvement of Conical Horn Antennas by Adding Wire Medium Structure.” 13th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Tele-communications and

Information Techno-logy, Chiang Mai, Thailand, 2016.

[13] Beruete M., Campillo I., Navarro-Cia M., Falcone F. and Sorolla M., (2007). “ Moldling left-or right-handed metamaterials by stacked cutoff metallic hole arrays.” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, 6 June 2007.

[14] Beruete E., Campillo I., Rodriguez-Seco J.E, Perea E., Navarro-Cia M., Nunez-Manrigue I.J. and Sorolla M., (2007). “ Enhanced gain by double-periodic stacked subwavelength hole array.” IEEE Microwave and wireless components letters, Vol. 17, 12 December 2007.

[15] Simovski C.R., et al., (2012). “ Wire Meta-materials Physics and Applications.” Advanced Materials, Vol. 24, Issue 31, August 2012, pp. 4229 – 4248.

[16] Kampeephat, S. et al., (2019). “ Enhancement of Monopole Antenna Gain with Additional Vertical Wire Medium Structure.” Progress in Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy, June 2019, pp. 2687 – 2690.

[17] Duangtang, P., Lawanwisut, S., & Kampeephat, S. (2025). “A novel two-layer vertical wire medium for enhancing monopole antenna gain in LoRa WAN-based IoT applications.” Suranaree Journal of Science and Technology, 33 (2), 010412, 1-12.

[18] N. Hou, Y. Wang, X. Xia, S. Yu, Y. Zheng, and T. Gu, (2025). “MoLoRa: Intelligent Mobile Antenna System for Enhanced LoRa Reception in Urban Environments.” in *Proc. ACM SenSys*, 2025.

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

Development of a Real-time Gas Leakage Detection Device with Notification via Blynk Application

กัญญ์ภัคญา อินนุรักษ์[1*], เอมธีรดนย์ ดีดพิมาย[2], ส.สุศิวลี นิลเล็ก[3], กัลยกร เรียนเงิน[4] และกมลวรรณ แก้วทับทิม[5]

[1] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[2] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[3] อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[4] นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[5] นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5
*ผู้ติดต่อ : krupoom2016@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0855929245

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอันตรายจากแก๊สรั่ว ระบบประกอบด้วยบอร์ด ESP32 เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊ส MQ-2 และระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk, Telegram รวมถึงไฟ LED และ Buzzer การทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการโดยจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของแก๊ส และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจำนวน 10 คน ด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยและร้อยละ ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถตรวจจับความเข้มข้นของแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สตั้งแต่ 500 ppm ขึ้นไป ระบบสามารถแจ้งเตือนผ่าน Blynk และ Telegram ได้อย่างถูกต้องภายในเวลาไม่เกิน 2 วินาที พร้อมแสดงผลแบบเรียลไทม์ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะได้ทุกที่ทุกเวลา ผลการประเมินความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 4.46 อยู่ในระดับดี และด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริงมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 4.55 สรุปได้ว่า อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและแจ้งเตือนการรั่วไหลของแก๊สได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในพื้นที่เสี่ยง และสามารถนำไปต่อยอดสู่ระบบความปลอดภัยอัจฉริยะได้ในอนาคต

คำสำคัญ *:* การตรวจจับแก๊สรั่ว, IoT, การแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์, MQ-2, Blynk

Abstract

This study aimed to develop a real-time gas leakage detection system based on Internet of Things (IoT) technology for safety monitoring and early warning. The system employed an ESP32 microcontroller, an MQ-2 gas sensor, and notification services via Blynk application and Telegram applications. System performance was evaluated through simulated gas leakage scenarios, while user satisfaction was assessed using a five-point Likert scale questionnaire completed by 10 users. Data were analyzed using descriptive statistics. The results showed that the system effectively detected gas concentrations and provided real-time alerts when gas levels exceeded 500 ppm. Notifications were successfully delivered through Blynk and Telegram within 2 seconds. The overall user satisfaction score

was 4.46, indicating a high level of satisfaction, with the highest score (4.55) related to the system's potential for practical implementation and future development. In conclusion, the developed system demonstrated accurate gas detection, rapid notification, and strong potential for enhancing safety in high-risk environments and supporting future smart safety applications.

Keywords: Gas leak control, IoT, Real-time notification, MQ-2, Blynk

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการรั่วไหลของแก๊สในสถานประกอบการและชุมชนเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ เพลิงไหม้ การระเบิด และผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแก๊สรั่วแบบเรียลไทม์จึงมีความสำคัญต่อการป้องกันความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงหรือพื้นที่อับอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบเฝ้าระวังภัย พบว่ามีการศึกษาระบบตรวจจับก๊าซและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันรูปแบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การพัฒนาแอปพลิเคชันแจ้งเตือนระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศของวุฒิกร อนันตสิริชัย (2562) และการสร้างเครื่องตรวจจับและแจ้งเตือนแก๊สปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลผ่านแอปพลิเคชันไลน์ของสมควร เทียมมล และคณะ (2566) อย่างไรก็ตาม ระบบส่วนใหญ่ในอดีตมักเผชิญข้อจำกัดสำคัญในด้านความล่าช้าของการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายสื่อสาร การขาดฟังก์ชันการบันทึกภาพรวมสถานะและแนวโน้มความเข้มข้นในรูปแบบกราฟประวัติย้อนหลัง (History Graph) แบบเรียลไทม์ตลอดจนข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้เฝ้าระวังในพื้นที่อับอากาศที่มีความเสี่ยงสูงภายในสถานประกอบการขนาดใหญ่ ซึ่งถือเป็นช่องว่างสำคัญทางงานวิจัย (Research Gap) ที่ยังไม่สามารถตอบโจทย์การบริหารจัดการความปลอดภัยอัจฉริยะ (Smart Safety) ได้อย่างครบวงจร

เพื่อแก้ปัญหาและปิดช่องว่างงานวิจัยดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และเซ็นเซอร์ MQ-2 โดยออกแบบระบบแจ้งเตือนแบบมัลติแชนแนล (Multi-channel Notification) ที่ผสานการทำงานร่วมกันระหว่างการส่งสัญญาณทางกายภาพในพื้นที่ปฏิบัติงานผ่านไฟไซเรนและเสียงไซเรน (Buzzer) กับการส่งการแจ้งเตือนระยะไกลข้ามแพลตฟอร์มผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และ Telegram บนสมาร์ตโฟนพร้อมกัน ระบบที่นำเสนอนี้ถูกนำไปติดตั้งและทดลองใช้งานจริงในพื้นที่อับอากาศที่มีความเสี่ยงสูง ณ บริษัท อุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลและแจ้งเตือนเหตุผิดปกติได้อย่างแม่นยำภายในระยะเวลาตอบสนองไม่เกิน 2 วินาที อีกทั้ง ยังมีความสามารถในการจัดเก็บและส่งออกข้อมูลประวัติค่าความเข้มข้นของก๊าซย้อนหลังผ่านระบบคลาวด์ (Cloud Data Export) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์แนวโน้มเพื่อการป้องกันอุบัติภัยเชิงรุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในสถานประกอบการได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและเทคโนโลยีหลักที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาบูรณาการระบบ ดังนี้

2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กแบบโอเพนซอร์ส (Open-source) ที่ใช้ชิปประมวลผล Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาสูงสุด 240 MHz จุดเด่นสำคัญคือมีโมดูลการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi (804.11 b/g/n) และ Bluetooth (BLE) ในตัว ทำให้เหมาะสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT) นอกจากนี้ยังมีพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter : ADC) ที่มีความละเอียดสูงถึง 12 บิต ให้ค่าเอาต์พุตดิจิทัลในช่วง 0 ถึง 4095 ระดับ ซึ่งมีความละเอียดแม่นยำสูงกว่าบอร์ดตระกูลเดิมที่มักมีความละเอียดเพียง 10 บิต

2.2 เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ MQ-2 เป็นโมดูลตรวจวัดแก๊สในตระกูลสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Gas Sensor) โครงสร้างภายในประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ ดีบุกไดออกไซด์ (SnO_2)

และขดลวดความร้อน (Heater) เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนในอากาศบริสุทธิ์ จะมีความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่เมื่อมีโมเลกุลของแก๊สไวไฟ เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) แก๊สโพรเพน แก๊สมีเทน หรือควัน มาสัมผัสกับหน้าเซ็นเซอร์ จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของแก๊สในอากาศ วงจรภายในจะทำการแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปให้ออกมาเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าแอนะล็อก (V_{out}) ส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้นในหน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm) ตามกราฟลักษณะสมบัติของผู้ผลิต

2.3 แพลตฟอร์มและแอปพลิเคชัน Blynk Blynk คือ แพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT Platform) ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการเชื่อมต่อและการควบคุมอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ระยะไกลผ่านระบบคลาวด์ (Blynk Cloud) โครงสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ Blynk App ใช้สำหรับออกแบบหน้าจอแสดงผล และDashboard บนสมาร์ตโฟนด้วย Widget ต่าง ๆ เช่น กราฟ หรือกล่องข้อความ Blynk Server ทำหน้าที่เป็นตัวกลางรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดควบคุมกับสมาร์ตโฟนที่มีสถาปัตยกรรมแบบ Latency ต่ำ และ Blynk Libraries ชุดคำสั่งสำหรับการสื่อสารบนบอร์ดควบคุม รองรับการแจ้งเตือนแบบทันที (Push Notification) เมื่ออุปกรณ์ส่งคำสั่งผ่านเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้สามารถเฝ้าระวังภัยแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วัตถุประสงค์และสมมติฐานของการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาและพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สที่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สในรูปแบบเรียลไทม์

2) เพื่อออกแบบระบบแจ้งเตือนด้วยเสียงเมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สเกินค่าที่กำหนดจะส่งสัญญาณเสียงไซเรน พร้อมกับสัญญาณไฟแสดงสถานะ

3) เพื่อพัฒนาระบบการแสดงผลข้อมูลการตรวจพบค่าแก๊ส ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

3.2 สมมติฐานของการวิจัย

1) เครื่องตรวจจับแก๊สที่ออกแบบสามารถตรวจวัดค่าแก๊สในอากาศได้อย่างแม่นยำ และแสดงผลแบบเรียลไทม์

2) ระบบควบคุมที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตรวจจับเมื่อค่าแก๊สเกินระดับที่กำหนด

3) ระบบสามารถแสดงค่าแก๊สผ่านไปยังแอปพลิเคชัน Blynk ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเฝ้าระวังคุณภาพอากาศได้ทุกที่และทุกเวลา

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ขอบเขตของการวิจัย

ด้านเนื้อหา

1) ตรวจจับแก๊สผ่านอุปกรณ์ MQ2 โดยบอร์ด ESP32 ในการประมวลผลร่วมกับบอร์ด ESP32

2) ตรวจจับชนิดของแก๊ส เช่น แก๊สหุงต้ม, LPG และแก๊สมีเทน หรือควันไฟ

3) แจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์ไซเรน และไฟไซเรน

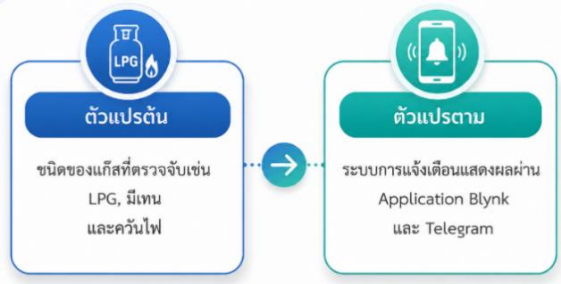
ด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

บริษัท อุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด เป็นบริษัทอุตสาหกรรมผลิตอาหารแปรรูป มีบางจุดงานที่เป็นจุดอับ ไม่มีอากาศถ่ายเท และมีความเสี่ยงต่อการเกิดการรั่วไหลของแก๊ส

ประชากร (Population) บริษัทอุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด

กลุ่มตัวอย่าง (Sample) พนักงาน จำนวน 10 คน บุคคลที่ทำงานภายใต้ความเสี่ยงที่อาจจะเกิดการรั่วไหลของแก๊สหรือควันมลพิษ

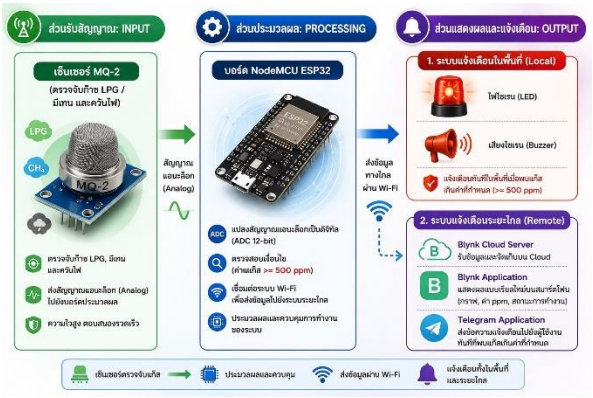
4.2 กรอบแนวคิด



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

4.3 การออกแบบและโครงสร้างการทำงานของระบบ

ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk คณะผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างการทำงานของระบบโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนรับสัญญาณ (Input) ส่วนประมวลผลกลาง (Processing) และส่วนแสดงผลข้อมูลและแจ้งเตือนภัย (Output) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Flowchart การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์

จากบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานในรูปที่ 2 คณะผู้วิจัยได้จัดแบ่งโครงสร้างทางเทคโนโลยีออกเป็น 3 ส่วนหลัก เพื่อแสดงการทำงานของระบบแบบเรียลไทม์อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

1) ส่วนรับสัญญาณ (Input) ใช้เซ็นเซอร์ MQ-2 ทำหน้าที่เฝ้าระวังและตรวจจับความเข้มข้นของแก๊สในอากาศ โดยมีคุณสมบัติความไวต่อกลุ่มก๊าซไวไฟ เช่น แก๊สหุงต้ม (LPG) แก๊สมีเทน และควันไฟ เซ็นเซอร์จะทำการแปลงค่าสารเคมีที่ตรวจวัดได้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณแอนะล็อก (แรงดันไฟฟ้า) แล้วส่งเข้าสู่พอร์ตอินพุตแปลงสัญญาณ (ADC 12-bit) ของส่วนประมวลผลหลัก

2) ส่วนประมวลผลกลาง (Processing) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 (32-bit) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางประมวลผลหลัก โดยจะรับสัญญาณแอนะล็อกเข้ามาแปลงค่าระดับตัวเลขดิจิทัล (0 - 4095) ผ่านฟังก์ชันคณิตศาสตร์เชิงวิศวกรรมอ้างอิงตาม Datasheet เพื่อให้ได้ค่าหน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่ถูกต้อง และทำการตรวจสอบเงื่อนไขความปลอดภัย หากพบว่าค่าแก๊สสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ($\geq$ 500 ppm) บอร์ดจะสั่งการส่งข้อมูล (Data Flow) ออกไปยังส่วนแจ้งเตือนทันที

3) ส่วนแสดงผลข้อมูลและแจ้งเตือนภัย (Output) เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในด้านความปลอดภัย ระบบจึงถูกออกแบบมาให้มีการแจ้งเตือนแบบมัลติแชนแนล (Multi-channel) โดยแยกออกเป็น 2 รูปแบบหลัก คือ

ระบบแจ้งเตือนในพื้นที่ปฏิบัติงาน (Local Output) บอร์ด ESP32 จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปกระตุ้นวงจรเพื่อสั่งการให้ไฟไซเรน (LED) แสดงสัญญาณฉุกเฉินทางสายตา และเสียงไซเรน (Buzzer) สร้างความถี่เสียงระดับสูงเพื่อเตือนภัยทางเสียงให้พนักงานในพื้นที่รับทราบทันที

ระบบแจ้งเตือนระยะไกลผ่านระบบคลาวด์ (Remote Cloud Output) บอร์ด ESP32 จะทำการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผ่านโมดูล Wi-Fi ในตัว เพื่อนำส่งชุดข้อมูลขึ้นสู่ Blynk Cloud Server จากนั้นจะทำการอัปเดต Dashboard บนแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแสดงระดับความเข้มข้นแก๊สแบบเรียลไทม์ พร้อมส่งคำสั่งผ่าน API ไปยังแอปพลิเคชัน Telegram เพื่อส่งข้อความแจ้งเตือนสถานการณ์ฉุกเฉินเข้าสู่สมาร์ตโฟนของผู้ดูแลระบบโดยตรงภายในระยะเวลาไม่เกิน 2 วินาที

4.4 การสร้างเครื่องมือการสร้างเครื่องมือและการคำนวณ

ในการสร้างเครื่องมือสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สรั่วแบบเรียลไทม์และส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบ พัฒนา และกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบดังนี้

4.4.1 รายละเอียดและหน้าที่ของอุปกรณ์ในระบบ

1) เซ็นเซอร์ MQ-2 ทำหน้าที่ตรวจจับระดับความเข้มข้นของแก๊สไวไฟในอากาศ

2) บอร์ด NodeMCU ESP32 ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณหลักและเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi เพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต

3) ไฟไซเรน ทำหน้าที่เตือนภัยแสดงสถานะฉุกเฉินด้วยสัญญาณไฟและเสียงในพื้นที่ปฏิบัติงานเมื่อพบค่าแก๊สเกินเกณฑ์

4) เสียงไซเรน ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สร้างเสียงดังระดับสูง ใช้เตือนภัยฉุกเฉิน กินไฟต่ำ แจ้งเตือนทันทีเมื่อพบค่าแก๊สเกินเกณฑ์

5) แอปพลิเคชัน Blynk ทำหน้าที่รับข้อมูลทางไกล และแสดงค่าความเข้มข้นแก๊สบนสมาร์ตโฟน รวมถึงส่งการแจ้งเตือน (Push Notification) เมื่อค่าที่ตรวจจับได้เกินกว่าที่กำหนด

6) แอปพลิเคชัน Telegram ทำหน้าที่ส่งข้อความแจ้งเตือนอัตโนมัติ โดดเด่นด้านความเร็ว ความปลอดภัย และมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน โดยมีระบบ Cloud ช่วยเก็บข้อมูลและเข้าถึงได้จากหลายอุปกรณ์พร้อมกัน

4.4.2 การคำนวณและแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นค่าความเข้มข้นก๊าซ (ppm)

ในการอ่านค่าความเข้มข้นของแก๊สจากเซ็นเซอร์ MQ-2 ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งมีความละเอียดของตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ขนาด 12 บิต (ค่าดิจิทัลระหว่าง 0 - 4095) คณะผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการแปลงค่าทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้หน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm) ตามลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ระบุใน Datasheet ของผู้ผลิต ดังนี้

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) แปลงค่าดิจิทัลแอนะล็อก (0–4095) ที่อ่านได้จากขาพอร์ตของ ESP32 ให้เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าจริง (0–3.3 V) ด้วยสมการที่ (1)

$$V_{out} = \text{Analog Value} \times \frac{3.3}{4095}$$

การคำนวณค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ขณะวัดก๊าซ (Rs) ระดับความเข้มข้นของก๊าซจะทำให้ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำบนหน้าสัมผัสเซ็นเซอร์ MQ-2 เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคำนวณหาค่าความต้านทานปัจจุบันได้จากสมการที่ (2)

$$R_S = \left(\frac{3.3 - V_{out}}{V_{out}}\right) \times R_L$$

(โดยกำหนดให้ R_L คือความต้านทานโหลดบนบอร์ดโมดูล ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1 kΩ)

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซด้วยสมการยกกำลัง (Power Law Regression) จากกราฟลักษณะคุณสมบัติ (Sensitivity Characteristics) บน Log-Log Scale ใน Datasheet ของเซ็นเซอร์ MQ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความต้านทาน (R_S/R_0) และค่าความเข้มข้นของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3)

$$\text{ppm} = a \times \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^b$$

กำหนดให้ค่าคงที่จากการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting Constant) ของก๊าซ LPG คือ a=574.25 และ b=−2.22 โดยค่า R_0 คือค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ในอากาศบริสุทธิ์ (Fresh Air) ซึ่งระบบจะทำการคำนวณค่าเริ่มต้น (Calibration) เป็นเวลา 20 วินาทีทุกครั้ง เมื่อเริ่มเปิดเครื่องใช้งาน

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	คุณสมบัติ	รูปภาพอุปกรณ์
1	บอร์ด ESP32	มีไมโครคอนโทรลเลอร์ 32-bit รองรับ WiFi / Bluetooth และควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ และประมวลผลข้อมูลรวมไปถึงการเชื่อมต่อกับ Application Blynk	
2	เซ็นเซอร์ MQ-2	สามารถตรวจจับก๊าซไวไฟ เช่น LPG, Propane, Methane, Hydrogen, Smoke สามารถตรวจจับระดับความเข้มข้นของแก๊สช่วง 0-20,000 PPM, และมีเอาต์พุตแบบดิจิทัลและแอนะล็อกทำหน้าที่ตรวจจับระดับความเข้มข้นของแก๊ส	
3	ไฟไซเรน (แดง)	ไฟหมุนหรือกระพริบ สีเสียงหรือไม่มีเสียง สีแดง สว่างสูง ใช้ถามเตือนกรณีแสดงสถานะฉุกเฉินด้วยไฟ (และเสียง) เมื่อพบว่าก๊าซเกินเกณฑ์	
4	เสียงไซเรน	อุปกรณ์สร้างเสียงดังระดับสูง ใช้เตือนกรณีฉุกเฉิน กันไฟต่ำแจ้งเตือนกันก็ด้วยเสียงไซเรนเมื่อพบก๊าซเกินเกณฑ์	
5	Application Blynk	รองรับ Application IoT ใช้แสดงผลข้อมูลแบบ Real-time รับการแจ้งเตือนเมื่อก๊าซเกินค่ากำหนด และแสดงข้อมูลบนมือถือรูปแบบเรียลไทม์	
6	Application Telegram	เป็นแอปพลิเคชันส่งข้อความที่เด่นด้านความเร็ว ความปลอดภัย รองรับการส่งข้อความ รูปภาพ วิดีโอ เสียง มีระบบ Cloud ช่วยเก็บข้อมูลและเข้าถึงได้จากหลายอุปกรณ์พร้อมกัน รองรับการสร้างกลุ่มและช่วยเสริมการสื่อสาร อาจรับการแจ้งเตือนจากบอทที่สร้าง Telegram เหมาะทั้งการใช้งานทั่วไป งานเรียน งานวิจัย และงานด้านเทคโนโลยี IoT	 Telegram

รูปที่ 3 อุปกรณ์และวงจรของอุปกรณ์การตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์

4.5 การตรวจสอบเครื่องมือและการเก็บรวบรวมข้อมูล

4.5.1 การตรวจสอบเครื่องมือ

ทดสอบระบบโดยจำลองสถานการณ์ที่มีแก๊สรั่วในปริมาณต่าง ๆ เช่น

1) ใช้ไฟแช็กปล่อยแก๊สเบา ๆ ใกล้เซ็นเซอร์

2) ใช้แอลกอฮอล์หรือสเปรย์ปรับอากาศเพื่อจำลองกลุ่มไอแก๊สจากนั้นตรวจสอบว่าเซ็นเซอร์ MQ-2 ตรวจจับได้ตรงตามความเป็นจริงหรือไม่จริง

3) แอปพลิเคชัน Blynk แสดงผลหน้าจอค่าความเข้มข้นได้ถูกต้อง

4) ระบบส่งการแจ้งเตือน (Notification) ตามค่าที่ตั้งไว้

5) ทดสอบการทำงานของระบบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง

6) ตรวจสอบว่า NodeMCU ยังสามารถเชื่อมต่อกับ Wi-Fi ได้ตลอด

7) ตรวจสอบว่าเซ็นเซอร์ไม่แสดงค่าผิดเพี้ยนเมื่อไม่มีแก๊สเกินค่ากำหนด

8) การตรวจสอบการตอบสนอง (Response Time)

9) Telegram บันทึกเวลาที่ระบบใช้ในการตอบสนองหลังจากเซ็นเซอร์ตรวจพบแก๊ส

10) เปรียบเทียบเวลาระหว่างการตรวจจับส่งสัญญาณเสียงไซเรน/ไฟไซเรน ส่งข้อความแจ้งเตือนไปยัง Telegram และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

11) พบว่าระบบมีค่าเวลาตอบสนองเฉลี่ยไม่เกิน 2 วินาที ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.5.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

แสดงการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม แบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับของลิเคิร์ต (Likert, 1967)

การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการประเมินคุณภาพ การหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้การแปลความหมายของระดับความพึงพอใจจากแนวคิดของเบสท์ (Best, 1986) การให้ความหมายโดยการให้ค่าเฉลี่ยเป็นรายด้านและรายข้อ



รูปที่ 4 การส่งมอบชิ้นงานให้แก่กลุ่มตัวอย่าง

4.5.3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ในการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์ในสภาวะการปฏิบัติงานจริง คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) จากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นพนักงานปฏิบัติงานในพื้นที่เสี่ยงภัยอับอากาศ ณ บริษัท อุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด จำนวน 10 คน ครอบคลุมการประเมิน 4 ด้าน

ESTACON 2026 | 17th

ได้แก่ ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริง ด้านความปลอดภัย ด้านการสื่อสารและการแจ้งเตือน และด้านความสะดวกในการใช้งาน โดยผลสัมฤทธิ์ของคะแนนเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ปรากฏรายละเอียดสอดคล้องกันตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริง	4.55	0.53	ดีมาก
2. ด้านความปลอดภัย	4.50	0.52	ดีมาก
3. ด้านการสื่อสารและการแจ้งเตือน	4.40	0.50	ดี
4. ด้านความสะดวกในการใช้งาน	4.37	0.49	ดี
เฉลี่ยรวมทุกด้าน	**4.46**	**0.51**	**ดี**

4.5.4 สรุปผลการประเมินความพึงพอใจ

ผลการประเมินคุณภาพการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk จากประชากรจำนวน 10 คน โดยภาพรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.46 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.51 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของระบบอยู่ในระดับดี เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริง มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 4.55 อยู่ในระดับดีมาก รองลงมาคือ ด้านความปลอดภัย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 อยู่ในระดับดีมาก ด้านการสื่อสารและการแจ้งเตือน และด้านความสะดวกในการใช้งาน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.40 และ 4.37 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับดี

5. ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ข้อมูล

1) เพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของแก๊สที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์

2) เพื่อประเมินความแม่นยำในการแจ้งเตือนของระบบ

3) เพื่อแปรผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าก๊าซในช่วงเวลาต่าง ๆ

4) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) Serial Monitor ของ Arduino IDE ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัญญาณ Analog ที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ MQ-2 ผ่าน บอร์ด ESP32 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มข้นแก๊สในขณะทดสอบจริงแบบวินาทีต่อวินาที

2) Physical Indicators (ไซเรน) ใช้สังเกตการณ์ตอบสนองทางกายภาพของไฟไซเรน (สีแดง) และเสียงไซเรน (Buzzer) เมื่อค่าแก๊สเกิน 500 PPM เพื่อวัดความหน่วงของเวลา (Latency) ระหว่างการตรวจจับและการส่งสัญญาณเตือนในพื้นที่

3) Blynk Dashboard ใช้ฟีเจอร์ History Graph Widget ในการวิเคราะห์แนวโน้มการขึ้นลงของค่าแก๊สในช่วงเวลาต่าง ๆ และดูการแสดงผลสถานะแบบ Real-time เพื่อประเมินความเสถียรของการเชื่อมต่อข้อมูล

4) แอปพลิเคชัน Telegram ใช้ตรวจสอบความถูกต้องและความรวดเร็วในการส่งข้อความแจ้งเตือน (Push Notification) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชันควบคุม (Blynk) และแอปพลิเคชันสื่อสาร (Telegram)

5) Blynk Cloud Export (CSV) ใช้ในการดึงข้อมูลย้อนหลังที่ระบบบันทึกไว้ นำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าเฉลี่ย ความแม่นยำในการตรวจจับ และจัดทำตารางเปรียบเทียบสถานะความปลอดภัยต่อร่างกายตามเกณฑ์ที่กำหนด

ลำดับ	ประเภทข้อมูล	รายละเอียด	หน่วย/รูปแบบ
1	ค่าความเข้มข้นของแก๊ส (MQ-2)	ค่าความเข้มข้นของแก๊สในรูปแบบ Analog ที่อ่านจากเซ็นเซอร์ MQ-2 ผ่าน ESP32	ADC (0–4095)
2	Timestamp	วันและเวลาที่ระบบอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ ทุก 1 วินาที	DateTime
3	Alert Status (สถานะการแจ้งเตือน)	แจ้งเตือนเมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊ส สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (เช่น > 500)	ON / OFF
4	Siren Status (สถานะเสียงไซเรน)	ควบคุมการเปิด–ปิดเสียงไซเรน เมื่อพบการรั่วไหลของแก๊ส	ON / OFF

รูปที่ 5 ตารางข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ค่า PPM ที่ได้จากการประมวลผลผ่านสมการที่ (1) ถึง (3)

เวลา (s)	ค่าแก๊ส (PPM)	สถานะระบบ	เกณฑ์ความปลอดภัยต่อร่างกาย	รายละเอียดการแจ้งเตือน
0	250	ปลอดภัย	ระดับปกติ ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย	ระบบปกติ, ไซเรนเงียบ
5	380	ปลอดภัย	ระดับเฝ้าระวัง ปลอดภัยต่อร่างกาย	ระบบปกติ, ไซเรนเงียบ
10	450	ปลอดภัย	ระดับเฝ้าระวัง ปลอดภัยต่อร่างกาย	ระบบปกติ, ไม่แจ้งเตือน Application
15	520	อันตราย	เริ่มส่งผลเสีย หากสูดดมนานอาจมึนงง	ไซเรนดัง, แจ้งเตือนผ่าน Application
20	500	อันตราย	อันตราย มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ	ไซเรนดัง, แจ้งเตือนผ่าน Application

หมายเหตุ: ค่าแก๊ส (PPM) ได้จากการประมวลผลสัญญาณ Analog ของเซ็นเซอร์ MQ-2 ด้วยการสอบเทียบค่ามาตรฐาน

รูปที่ 6 ตารางการวิเคราะห์และการแปลผลข้อมูล

จากรูปภาพที่ 5 แสดงตารางด้านผลกระทบต่อร่างกาย ระดับความปลอดภัย (ต่ำกว่า 500 PPM) เป็นช่วงที่ความเข้มข้นของแก๊สในอากาศยังอยู่ในระดับที่ร่างกายมนุษย์สามารถรับได้โดยไม่เกิดอาการผิดปกติ ระบบจึงถูกตั้งค่าให้เฝ้าระวังแต่ยังไม่มีการส่งสัญญาณเตือนภัย เพื่อลดการรบกวนในขณะปฏิบัติงานปกติ ระดับเกณฑ์การเตือนภัย (เริ่มที่ 500 PPM) ระบบถูกตั้งค่าให้เริ่มทำงานทันทีที่ค่าถึง 500 PPM และจุดที่เริ่มส่งผลกระทบต่อร่างกาย เช่น อาการวิงเวียนศีรษะ หากอยู่ในพื้นที่นั้นเป็นเวลานาน การแจ้งเตือนในช่วงนี้จึงเป็นการป้องกันก่อนที่ปริมาณแก๊สจะสูงจนถึงขั้นวิกฤต และระดับอันตราย (มากกว่า 600 PPM ขึ้นไป) เมื่อค่าแก๊สสูงขึ้นเกินกว่าระดับที่ร่างกายจะรับได้ ซึ่งอาจส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจหรือทำให้หมดสติได้ ระบบจะยังคงแจ้งเตือนอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้พนักงานรีบออกจากพื้นที่อาคารถ่านหินทันทีตามแผนความปลอดภัย

ผลลัพธ์	รายละเอียด
ด้านการทำงานของระบบ (System Functionality)	สามารถในการตรวจจับความเข้มข้นของแก๊สที่หลากหลาย เช่น LPG, มีเทน, และควัน ได้อย่างน่าเชื่อถือและการประมวลผลข้อมูล และประมวลผลเป็นสถานะ ปลอดภัย หรือ "อันตราย" โดยใช้เกณฑ์ที่ตั้งไว้ (เช่น 500 PPM)
ด้านประโยชน์ที่ได้รับ (Benefits and Impacts)	เพิ่มความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน แจ้งเตือนล่วงหน้าช่วยป้องกันความเสี่ยงของการเกิดเพลิงไหม้ การระเบิด หรืออันตรายต่อสุขภาพที่เกิดจากการสูดดมแก๊สที่เป็นพิษ และการจัดการปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเกิดการ
ด้านประโยชน์ที่ได้รับ (Benefits and Impacts)	แจ้งเตือน ผู้ใช้งานสามารถติดต่อขอความช่วยเหลือหรือดำเนินการแก้ไขเบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว
ความปลอดภัย	แจ้งเตือนทันทีเมื่อค่าแก๊สผิดปกติ และมีการแจ้งเตือนทั้งแบบภายในพื้นที่ (เสียงและไฟไซเรน) และแบบระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน
ความสะดวก	ความรวดเร็วในการตอบสนอง สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นแก๊สได้อย่างรวดเร็ว ผู้ใช้สามารถตรวจสอบระดับแก๊สและสถานะของระบบได้ตลอดเวลาผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ แม้จะไม่ได้อยู่ในพื้นที่
การวิเคราะห์ การพัฒนาเพิ่มเติม	เก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มค่าแก๊สเหมาะสมกับการใช้งาน ระบบมีต้นทุนต่ำ ติดตั้งง่าย และมีความทนทาน เหมาะสำหรับติดตั้งในที่อยู่อาศัย สำนักงานขนาดเล็ก หรือห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 7 ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.3 ผลการทดสอบระบบการตรวจจับควันและแก๊ส

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับควันและแก๊สอย่างเป็นระบบ โดยกำหนดให้มีการจำลองสถานการณ์และปล่อยแก๊สเพื่อทดสอบการทำงานในแต่ละรายการ รายการละ 50 ครั้ง (รวมการทดลองทั้งสิ้น 150 ครั้ง) เพื่อประเมินความถูกต้อง แม่นยำ และความเสถียรในการทำงานอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งประสิทธิภาพการแจ้งเตือนข้ามโครงข่ายไปยังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และ Telegram เมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 ppm โดยผลการทดสอบเชิงสถิติต่าง ๆ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและจำนวนครั้งในการตรวจจับควันและแก๊ส

ลำดับ	รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	จำนวนครั้ง	ผลการตรวจจับ	ร้อยละ	ผลการ
			ที่ทดสอบ	ที่ถูกต้อง	ความแม่นยำ	ทดสอบ
1	การตรวจจับแก๊ส ด้วยเซ็นเซอร์ MQ-2	ใช้ไฟแช็กปล่อยแก๊สเบา ๆ ใกล้เซ็นเซอร์ในปริมาณต่าง ๆ	50	50	100%	ผ่าน
2	การแสดงผล บน Application Blynk	ตรวจสอบค่าความเข้มข้นของแก๊สที่แสดงบน Blynk Dashboard	50	49	98%	ผ่าน
3	ระบบแจ้งเตือน (Notification)	ทดสอบเมื่อค่าความเข้มข้นแก๊ส ≥500 ppm แล้วดูการส่ง Push Alert	50	50	100%	ผ่าน
4	ระยะเวลาการตอบสนอง (Response Time)	วัดเวลาตั้งแต่เซ็นเซอร์ตรวจพบแก๊สจนถึงได้รับการแจ้งเตือนข้ามโครงข่าย	50	50	100% (ไม่เกิน 2 วินาที)	ผ่าน
5	ความเสถียรของระบบ (Stability Test)	ทดสอบปล่อยแก๊สและให้ระบบทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	50	50	100%	ผ่าน
รวม	**ประสิทธิภาพภาพรวมของระบบ**	**การทดสอบทุกสถานการณ์**	**250**	**249**	**100%**	**ผ่าน**

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงสถิติของอุปกรณ์ตรวจจับภัยจากการจำลองสถานการณ์ปล่อยแก๊สรายการละ 50 ครั้ง (รวมทั้งสิ้น 250 ครั้ง) พบว่าเซ็นเซอร์ MQ-2 และระบบแจ้งเตือนทางกายภาพ (ไฟและเสียงไซเรน) รวมถึงระบบ Push Notification สามารถทำงานได้ถูกต้องสมบูรณ์ คิดเป็นร้อยละความแม่นยำสูงถึง 100% โดยมีเพียงรายการแสดงผลค่าความเข้มข้นบน Application Blynk ที่พบความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหน่วงของสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในบางช่วงเวลา 1 ครั้ง (คิดเป็นร้อยละ 98%) ส่งผลให้ระบบตรวจจับภัยในภาพรวมมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 99.60% ซึ่งยืนยันความเสถียรและความน่าเชื่อถือของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นได้อย่างชัดเจน

5.4 ผลการทำงานของระบบ

ในการประเมินฟังก์ชันการทำงานของระบบตรวจจับและแจ้งเตือนภัย คณะผู้วิจัยได้ทำการบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบตามระดับความเข้มข้นของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และควันไฟในสถานการณ์จำลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการตอบสนองตามเงื่อนไขของซอฟต์แวร์ที่ออกแบบไว้ โดยผลการทำงานของระบบแสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทำงานและการตอบสนองของระบบแยกตามระดับความเข้มข้นของก๊าซ

ช่วงค่าความเข้มข้น (ppm)	สถานะความปลอดภัย	การทำงานของอุปกรณ์ในพื้นที่ (Local)	การแจ้งเตือนระยะไกล (Remote Cloud)	ระยะเวลาตอบสนอง (Response Time)
0–299	ปกติ (Normal)	ไฟสถานะ LED สีเขียวติดสว่าง ไซเรนเตือนภัยเงียบ	Blynk Dashboard แสดงค่าปกติ ไม่มีการส่งข้อความผ่าน Telegram	แบบเรียลไทม์
300–499	เฝ้าระวัง (Warning)	ไฟสถานะ LED สีเหลืองติดสว่าง ไซเรนเตือนภัยเงียบ	Blynk Dashboard อัปเดตค่าเพิ่มขึ้น ไม่มีการส่งข้อความผ่าน Telegram	แบบเรียลไทม์
≥500	อันตราย (Danger)	ไฟสถานะ LED สีแดงติดสว่าง ไซเรน (Buzzer) ส่งเสียงดังทันที	Blynk ส่ง Push Notification,Telegram Bot ส่งข้อความเตือนภัย	ไม่เกิน 2 วินาที

จากตารางที่ 2 สามารถอธิบายกลไกและประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด NodeMCU ESP32, เซ็นเซอร์ MQ-2 และแพลตฟอร์มเครือข่ายไร้สายอย่างมีนัยสำคัญได้ดังนี้

สถานะความปลอดภัยปกติและเฝ้าระวัง (ค่าก๊าซต่ำกว่า 500 ppm) ระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทำงานสอดคล้องกัน โดยบอร์ด ESP32 จะอ่านค่าแอนะล็อกและประมวลผลเป็นหน่วย ppm ส่งขึ้นไปแสดงผลเป็นกราฟและตัวเลขบนหน้าจอ Dashboard ของแอปพลิเคชัน Blynk ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ โดยระบบควบคุมในพื้นที่จะแสดงเพียงสัญญาณไฟเตือนเพื่อไม่ให้เกิดความตื่นตระหนก และไม่มีการส่งข้อความรบกวนผู้ใช้งาน

สถานะฉุกเฉิน/อันตราย (ค่าก๊าซมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 ppm) เมื่อเซ็นเซอร์ตรวจวัดอนุภาคก๊าซรั่วไหลจนถึงเกณฑ์อันตราย บอร์ด ESP32 จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเข้าสู่สถานะเฝ้าระวังภัยขั้นสูงทันที โดยการส่งสัญญาณไฟฟ้าขับไฟไซเรน และส่งเสียงเตือนภัยความถี่สูง (Buzzer) ในพื้นที่อับอากาศของสถานประกอบการ เพื่อเตือนพนักงานโดยรอบ ควบคู่ไปกับการสื่อสารข้ามโครงข่ายผ่านโปรโตคอล Wi-Fi เพื่อส่งสัญญาณแจ้งเตือนแบบทันที (Push Notification) บนแอปพลิเคชัน Blynk และเรียกใช้ API ส่งข้อความแจ้งเตือนภัยอัตโนมัติเข้าสู่ระบบกลุ่มของแอปพลิเคชัน Telegramบนสมาร์ตโฟนของผู้ดูแลระบบพร้อมกัน โดยมีระยะเวลาหน่วงในการตอบสนอง (Response Time) ข้ามแพลตฟอร์มเฉลี่ยไม่เกิน 2 วินาที ซึ่งความเร็วในการตอบสนองระดับนี้ช่วยให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถเข้าไประงับเหตุและอพยพพนักงานได้อย่างทันท่วงที ลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติภัยร้ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk คณะผู้วิจัยสามารถสรุปผลในภาพรวม ดังนี้

1) ผลการทดสอบระบบตรวจจับควันและแก๊สพบว่า เซ็นเซอร์ MQ-2 สามารถตรวจจับความเข้มข้นของแก๊สและควันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สมีค่าเท่ากับ 500 ppm ระบบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

2) ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Telegram และแอปพลิเคชัน Blynk ได้อย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้อง โดยมีระยะเวลาในการตอบสนองไม่เกิน 2 วินาที หลังจากตรวจพบค่าความเข้มข้นของแก๊สเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้

3) ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวมอยู่ในระดับดี ($\bar{x}$ = 4.46, S.D. = 0.51) โดยเฉพาะ

ESTACON 2026 | 17th

ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริงมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$ = 4.55, S.D. = 0.53) และด้านความปลอดภัย ($\bar{x}$ = 4.50, S.D. = 0.52) แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานแก๊สได้อย่างเหมาะสม

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังความปลอดภัยและป้องกันอุบัติภัยจากการรั่วไหลของแก๊สไวไฟในพื้นที่ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยง จากผลการดำเนินงานประมวลสรุปได้ว่า ระบบฮาร์ดแวร์สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สและควันไฟได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยการบูรณาการร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์ MQ-2 และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 ซึ่งสามารถประมวลผลสัญญาณและนำส่งชุดข้อมูลเพื่อแสดงผลระดับก๊าซแบบเรียลไทม์ได้จริง

เมื่ออุปกรณ์ตรวจพบค่าความเข้มข้นของแก๊สมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 ppm ระบบจะสั่งการให้สัญญาณไฟและเสียงไซเรน (Buzzer) ในพื้นที่ทำงานทันที ควบคู่ไปกับการส่งข้อความแจ้งเตือนภัยอัตโนมัติ (Push Notification) ข้ามแพลตฟอร์มไปยังแอปพลิเคชัน Telegram และแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ตโฟนของผู้ใช้งานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจากผลการทดลองสุ่มซ้ำพบว่า ระบบมีร้อยละความแม่นยำภาพรวมสูงถึงร้อยละ 99.60 มีระยะเวลาในการตอบสนอง (Response Time) ข้ามโครงข่ายเฉลี่ยไม่เกิน 2 วินาที และสามารถทำงานต่อเนื่องได้ตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่เกิดความขัดข้อง

นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างพนักงานจำนวน 10 คน ณ บริษัทอุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวมอยู่ในระดับดี โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.46 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.51 โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนสูงที่สุดอยู่ในระดับดีมาก คือ ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริง ($\bar{x}$ = 4.55) ซึ่งดัชนีชี้วัดทางสถิติเชิงประจักษ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า นวัตกรรมระบบตรวจจับภัยที่พัฒนาขึ้นมีความเสถียร แม่นยำ รวดเร็ว และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำไปใช้งานควบคุมรักษาความปลอดภัยในสถานประกอบการจริง

6.2 อภิปรายผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สแบบเรียลไทม์แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk คณะผู้วิจัยได้นำผลมาอภิปรายผลตามกรอบแนวคิด วัตถุประสงค์ และสมมติฐานการวิจัย โดยแบ่งออกเป็นประเด็นสำคัญดังนี้

1) ด้านประสิทธิภาพการตรวจวัดและความแม่นยำแบบเรียลไทม์ จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) แก๊สมีเทน และควันไฟได้อย่างแม่นยำสูง โดยแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 และเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยข้อที่ 1 ประสิทธิภาพดังกล่าวเกิดจากการเลือกใช้เซ็นเซอร์ MQ-2 ซึ่งมีลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไวต่อกลุ่มแก๊สไวไฟ บูรณาการร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 ที่ประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกผ่านสมการคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงจาก Datasheet ได้อย่างมีเสถียรภาพ ผลลัพธ์นี้มีความสอดคล้องและสนับสนุนงานวิจัยของวุฒิกร อนันตสิริชัย (2562) ที่ได้พัฒนาแอปพลิเคชันแจ้งเตือนระดับความเข้มข้นของก๊าซในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับสายชล สุขโนนจารย์ (2563) ในด้านการพัฒนาชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศโดยใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อการเฝ้าระวังภัย

2) ด้านการตอบสนองของระบบแจ้งเตือนแบบมัลติแชนแนล (Multi-channel) ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า เมื่อค่าความเข้มข้นแก๊สถึงระดับเกณฑ์

อันตราย (≥500 ppm) ระบบสามารถขับสัญญาณไฟและส่งเสียงไซเรน (Buzzer) ในพื้นที่ปฏิบัติงานของสถานประกอบการได้ทันที พร้อมทั้งสามารถส่งสัญญาณ Push Notification แจ้งเตือนทางไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และ Telegramบนสมาร์ตโฟนข้ามโครงข่ายคลาวด์ได้พร้อมกัน โดยมีระยะเวลาหน่วงในการตอบสนอง (Response Time) เฉลี่ยไม่เกิน 2 วินาที และมีร้อยละความแม่นยำภาพรวมของระบบสูงถึงร้อยละ 99.60 ผลสัมฤทธิ์นี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 และ 3 และเป็นไปตามสมมติฐานข้อที่ 2 และ 3 ทุกประการ กลไกการแจ้งเตือนข้ามแพลตฟอร์มที่รวดเร็วนี้มีความสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของสมควร เทียมมล และคณะ (2566) เรื่องเครื่องตรวจจับและแจ้งเตือนแก๊สปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลผ่านแอปพลิเคชันมือถือที่ยืนยันว่าระบบแจ้งเตือนภัยอัจฉริยะสามารถช่วยให้เจ้าของสถานประกอบการรับทราบเหตุและแก้ไขปัญหาการรั่วไหลได้ทันท่วงทีก่อนที่จะเกิดเหตุอุบัติภัยร้ายแรง

3) ด้านผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งาน จากการวิเคราะห์ความเห็นของพนักงานจำนวน 10 คน ณ บริษัท อุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์อาหารพื้นเมือง จำกัด พบว่าดัชนีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับดี ($\bar{x}$ = 4.46, S.D. = 0.51) เมื่อพิจารณาจำแนกรายด้าน พบว่า ด้านการพัฒนาต่อยอดได้จริง มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$ = 4.55, S.D. = 0.53) รองลงมาคือ ด้านความปลอดภัยอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$ = 4.50, S.D. = 0.52) ส่วนด้านการสื่อสารและการแจ้งเตือน และด้านความสะดวกในการใช้งาน อยู่ในระดับดี ($\bar{x}$ = 4.40 และ $\bar{x}$ = 4.37 ตามลำดับ) ตัวเลขสถิติเหล่านี้เป็นหลักฐานยืนยันความพึงพอใจเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ชี้ให้เห็นว่าระบบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งานในพื้นที่อับอากาศที่มีความเสี่ยงสูง สามารถปกป้องชีวิตและทรัพย์สิน และพร้อมนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบความปลอดภัยอัจฉริยะ (Smart Safety) หรือเชิงพาณิชย์ต่อไปได้อย่างยั่งยืน

6.3 อภิปรายตามวัตถุประสงค์

จากการดำเนินโครงการวิจัย คณะผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์มาวิเคราะห์และอภิปรายผลจำแนกความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยทั้ง 3 ข้อ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) อภิปรายผลตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 (เพื่อศึกษาและพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สที่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สในรูปแบบเรียลไทม์) ผลการวิจัยพบว่า คณะผู้วิจัยสามารถพัฒนาชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สโดยใช้โมดูล MQ-2 ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 ได้สำเร็จ โดยอุปกรณ์สามารถตรวจวัดอนุภาคแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) แก๊สมีเทน และควันไฟในสภาวะปกติและสภาวะจำลองได้อย่างแม่นยำ มีค่าความถูกต้องในการตรวจจับคิดเป็นร้อยละ 100 ยืนยันว่าเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในการวัดค่าความเข้มข้นแก๊สในอากาศแบบเรียลไทม์ตรงตามวัตถุประสงค์ข้อแรกทุกประการ

2) อภิปรายผลตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 (เพื่อออกแบบระบบแจ้งเตือนด้วยเสียงเมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สเกินค่าที่กำหนดจะส่งสัญญาณเสียงไซเรนพร้อมกับสัญญาณไฟแสดงสถานะ) จากการทดสอบฟังก์ชันการควบคุมความปลอดภัยของฮาร์ดแวร์ พบว่าเมื่อเซ็นเซอร์ MQ-2 ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สได้สูงเกินกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนดไว้ (≥500ppm) ระบบส่วนประมวลผลสามารถสั่งการให้สัญญาณไฟไซเรนเตือนภัย และเสียงไซเรน (Buzzer) ส่งสัญญาณเสียงความถี่สูงเตือนภัยฉุกเฉินในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ทันทีโดยอัตโนมัติ โดยมีค่าความแม่นยำในการทำงานของระบบแจ้งเตือนในพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 100 ซึ่งช่วยบรรลุวัตถุประสงค์ในการแจ้งเตือนภัยเพื่อป้องกันอุบัติเหตุในพื้นที่อับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.4 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยและทดสอบระบบ คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการนำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานจริง และแนวทางในการพัฒนาต่อยอดนวัตกรรมในอนาคตดังต่อไปนี้

1) ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งาน

ควรติดตั้งอุปกรณ์ในบริเวณจุดอับอากาศหรือจุดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการรั่วไหลของแก๊ส เช่น บริเวณใกล้ถังแก๊ส หรือแนวท่อส่งแก๊สในห้องครัวและโรงผลิต

การกำหนดตำแหน่งความสูงในการติดตั้งเซ็นเซอร์ MQ-2 จะต้องพิจารณาตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกลุ่มเป้าหมายที่ต้องการตรวจจับอย่างเคร่งครัด กล่าวคือ หากเน้นการตรวจจับแก๊สหุงต้ม (LPG) ซึ่งหนักกว่าอากาศ ควรติดตั้งเซ็นเซอร์ให้อยู่สูงจากพื้นห้องไม่เกิน 30 เซนติเมตร แต่หากเน้นการตรวจจับแก๊สมีเทน (CH_4) หรือกลุ่มควันไฟซึ่งเบากว่าอากาศ ควรติดตั้งเซ็นเซอร์ในระดับสูงใกล้เพดาน (ห่างจากเพดานลงมาไม่เกิน 30 เซนติเมตร) เพื่อให้ระบบสามารถดักจับและแจ้งเตือนภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ควรทดสอบความไวของเซ็นเซอร์โดยการลองปล่อยแก๊สเบา ๆ จากไฟแช็กอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง เพื่อเช็คสภาพและสารเคลือบหน้าสัมผัสของตัวเซ็นเซอร์ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

2) ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต

ด้านระบบแจ้งเตือน ควรพัฒนาระบบการส่งข้อมูลแจ้งเตือนผ่านช่องทางอื่นเพิ่มเติมเพื่อความยืดหยุ่น เช่น ระบบ LINE Notify หรือการส่งอีเมลเตือนภัย (Email Alert)

ด้านประสิทธิภาพการตรวจจับ ควรเพิ่มเซ็นเซอร์ชนิดอื่นในตระกูล MQ Series เข้ามาเสริมการทำงานร่วมกัน เพื่อคัดแยกประเภทของแก๊สแต่ละชนิดออกจากกันได้อย่างเด็ดขาด และเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

ด้านระบบควบคุมและบรรเทาสาธารณภัย ควรเชื่อมต่อบอร์ด ESP32 เข้ากับอุปกรณ์สั่งการภายนอก (Actuator) เช่น ชุดสั่งการปิดวาล์วแก๊สอัตโนมัติ (Solenoid Valve) หรือระบบเปิดพัดลมระบายอากาศโดยอัตโนมัติทันที เมื่อค่าแก๊สเกินเกณฑ์ เพื่อระงับเหตุเบื้องต้นก่อนที่เจ้าหน้าที่จะมาถึง

ด้านการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง ควรพัฒนาให้ระบบสามารถบันทึกฐานข้อมูลลงในคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ระยะยาวเพื่อส่งออกข้อมูลย้อนหลัง และนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เข้ามาช่วยวิเคราะห์เชิงทำนาย (Predictive AI) เพื่อคาดการณ์โอกาสและแนวโน้มที่จะเกิดการรั่วไหลของแก๊สในสถานประกอบการล่วงหน้า

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเมตตากรุณา คำแนะนำ และความอนุเคราะห์จากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงครามทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และการสนับสนุนทางวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5 ที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการและส่งเสริมการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณสถานประกอบการที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการสร้างชิ้นงาน ตลอดจนเปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ติดตั้งและทดลองใช้งานระบบจริง ทำให้สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลและพัฒนาผลงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ซึ่งได้มีส่วนร่วมให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในทุกด้าน จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอน้อมมอบเป็นเครื่องแสดงความกตัญญูกตเวทีแก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ฉัตรพงศ์ ชูแสงนิล. (2562). การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยสมาร์ตโฟน. สืบค้นจาก https://pixabay.com/th

[2] วุฒิกร อนันตสิริชัย. (2562). แอปพลิเคชันแจ้งเตือนระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคราม.

[3] สมควร เทียมมล และคณะ. (2566). เครื่องตรวจจับและแจ้งเตือนแก๊สปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลผ่านแอปพลิเคชันไลน์.

[4] สายชล สุขโนนจารย์. (2563). การพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศสำหรับการประเมินและตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในมหาวิทยาลัยนเรศวรด้วยเทคนิค IoT และ GIS. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] สุพัตรา เอี่ยมศรี. (2564). ระบบบริหารปริมาณแก้วกรวยกระดาษในกระบอกด้วย IoT. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

[6] สภาองค์กรของผู้บริโภค. (2567). เหตุระเบิดเพลิงไหม้ สารเคมีรั่วไหลกว่า 7 ครั้ง ในปี 67. สืบค้นจาก https://www.tcc.or.th/chemical-spill-67

[7] อัจฉรีย์ พิมพิมูล. (2563). การพัฒนาแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน วิชาขั้นตอนวิธีและการเขียนโปรแกรม. มหาวิทยาลัยบูรพา.

[8] เรือตรี อรรถพล อมาตยกุล. (2564). ระบบแจ้งเตือนผู้บุกรุกด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหวอินฟาเรดแบบพาสซีฟบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง. วิทยาลัยนวัตกรรมดิจิทัลเทคโนโลยี.

ระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้นสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าบนแพลตฟอร์มประมวลผลฝังตัว

Sequential Multi-Factor Authentication System for Electric Motorcycles on an Embedded Computing Platform

ปรัชชญา แซ่เตีย*, อนันตชัย โยนะพันธ์, นพดล พานูเหลือม ทนงศักดิ์ มากทองและสุรินทร์ อ่อนน้อม

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

ผู้ติดต่อ: surin.ah@rmuti.ac.th, โทร.0866498850

บทคัดย่อ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของตลาดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในภูมิภาคอาเซียนเผยให้เห็นช่องโหว่เชิงโครงสร้างของระบบรักษาความปลอดภัยแบบเดิมที่อาศัยกุญแจกลไกและทรานสพอนเดอร์ RFID ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าไม่สามารถป้องกันการโจมตีแบบรีเลย์ได้ งานวิจัยนี้นำเสนอและตรวจสอบเชิงประจักษ์ระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้น (Sequential Multi-Factor Authentication) บนแพลตฟอร์มประมวลผลฝังตัว Raspberry Pi 4B สำหรับรถ Honda Wave 110i ที่ดัดแปลงเป็นยานยนต์ไฟฟ้า โดยบูรณาการระบบป้องกัน 3 ชั้นตามลำดับขั้น ได้แก่ (1) คำสั่งเสียงออฟไลน์ผ่านชิป VC-02 ควบคุมวงจรจ่ายไฟ (2) การจดจำใบหน้าด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ควบคุมวงจรคันเร่ง และ (3) การติดตามพิกัดด้วย GPS แบบเรียลไทม์ทำงานคู่ขนาน ทำให้เป็นระบบป้องกันที่มีความปลอดภัยสูง ผลการทดสอบการจดจำใบหน้า 1,000 ครั้งใน 10 ระดับความสว่าง (10–100,000 ลักซ์) ได้ค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-Score เท่ากับ 1.000 ทั้งหมด รวมถึงสามารถแยกแยะฝาแฝดร่วมไข่ (Monozygotic Twins) ได้อย่างสมบูรณ์ (FP=0 ทุกกรณี) ความหน่วงเวลาของระบบเสียงคงที่ 1 วินาที อัตราการจดจำ 100% และความแม่นยำของตำแหน่ง GPS อยู่ในช่วง 3–8 เมตร (เฉลี่ย 5.75 เมตร) ด้วยต้นทุนชิ้นส่วนรวม 5,718 บาท ผลการวิจัยยืนยันว่าฮาร์ดแวร์สำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ราคาประหยัดสามารถให้ระดับการพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยรในยานยนต์ที่ดีกว่าระบบ RFID Immobilizer รุ่นปัจจุบัน

คำสำคัญ: รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า, การจดจำใบหน้า, การสั่งงานด้วยเสียง, จีพีเอส, การพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัย

Abstract

The rapid expansion of the ASEAN electric motorcycle market has exposed structural vulnerabilities in traditional security systems relying on mechanical locks and RFID transponders, which have been proven susceptible to relay attacks. This study presents and empirically validates a Sequential Multi-Factor Authentication (S-MFA) system on a Raspberry Pi 4B embedded computing platform for a Honda Wave 110i converted electric motorcycle, integrating three sequential protection layers: (1) offline voice command via a VC-02 chip to control the power-supply circuit, (2) Convolutional Neural Network (CNN)-based face recognition to gate the throttle circuit, and (3) real-time GPS tracking operating in parallel. Across 1,000 face-recognition trials at ten illuminance levels (10–100,000 lux), Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score all reached 1.000, including perfect discrimination of monozygotic twins (FP=0 in all cases). Voice command latency remained constant at 1 second with 100% recognition across two acoustic environments and three sound-pressure levels (60–80 dB). GPS position accuracy ranged 3–8 m (mean 5.75 m). Total component cost was 5,718 THB. Results confirm that commodity embedded hardware can deliver vehicle-grade multi-factor authentication that substantially exceeds current RFID immobilizer protection.

Keywords: Electric Motorcycle, Face Recognition, Voice Command, GPS, Multi-Factor Authentication

1. บทนำ

ตลาดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในภูมิภาคอาเซียนเติบโตเฉลี่ยกว่าร้อยละ 32 ต่อปีจนถึง พ.ศ. 2574 [7] โดยปราศจากเสียงเครื่องยนต์สันดาปภายในที่เคยยับยั้งผู้โจรกรรมเชิงเสียง และมีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมูลค่าสูง ช่องโหว่เชิงโครงสร้างของกุญแจกลไกและทรานสพอนเดอร์ RFID ต่อการโจมตีแบบรีเลย์ได้รับการพิสูจน์แล้วในงานวิจัยบุกเบิกว่าไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการอัปเกรดการเข้ารหัสแบบค่อยเป็นค่อยไป [11] งานวิจัยก่อนหน้าด้านการจดจำใบหน้าด้วย CNN [2-4] และระบบติดตาม GPS/GSM [6] มุ่งพัฒนาแต่ละโมดัลแยกกัน แต่ยังไม่มีงานบูรณาการหลายปัจจัยแบบลำดับขั้นบนยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานจริง พร้อมทดสอบกรณีท้าทาย เช่น ฝาแฝดเหมือนและภาพถ่ายปลอม

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้นสำหรับรถ Honda Wave 110i ที่ดัดแปลงเป็นยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างของระบบเพื่อสร้างเป็นวัตถุประสงค์ในงานวิจัยประกอบด้วย

1.เสียงควบคุมวงจรจ่ายไฟ

2.ใบหน้าควบคุมวงจรคันเร่ง

3. GPS ทำงานแบบขนาน ทำให้ผู้บุกรุกต้องเอาชนะโมดัลชีวมิติที่เป็นอิสระสองชั้นพร้อมกัน ซึ่งเป็นการบูรณาการสามโมดัลแบบลำดับขั้น ที่ออกแบบสร้างและทดสอบบนยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงจริง พร้อมการทดสอบบุคคลฝาแฝดเหมือน การมีส่วนสนับสนุนหลักได้แก่

(1) ออกแบบและสร้างระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้น บนยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงจริง

(2) ประเมินประสิทธิภาพ CNN Face Recognition ใน 10 ระดับความสว่าง ครอบคลุมเกือบสี่ระดับขนาดโฟโตเมตริก รวมถึงการทดสอบฝาแฝดร่วมไข่และการโจมตีด้วยภาพถ่ายปลอม

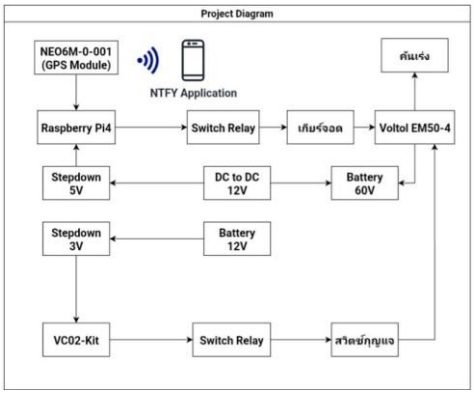
(3) วัดความหน่วงเวลา (Latency) และความถูกต้องของระบบสั่งงานด้วยเสียงออฟไลน์ (Offline ASR) ผ่านชิป VC-02 ข้ามสภาพแวดล้อมเสียงและระดับความดังเสียงที่แตกต่างกัน

(4)พิสูจน์ความเป็นไปได้เชิงต้นทุน (Cost Feasibility) โดยใช้ฮาร์ดแวร์สำเร็จรูป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 โครงสร้างระบบ

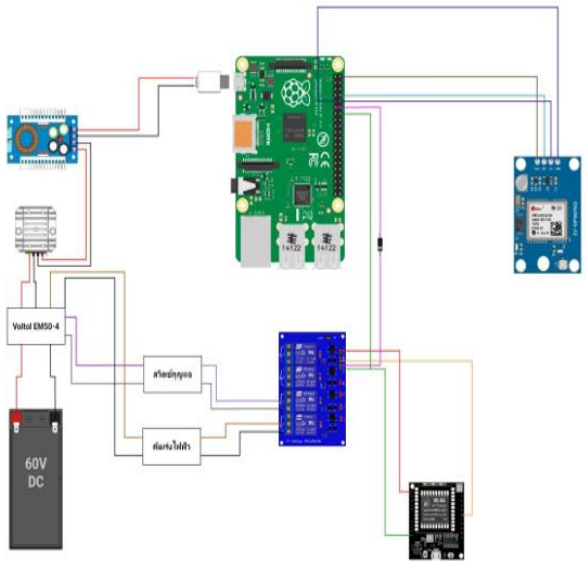
ระบบแบ่งเป็นสามโมดัลที่ทำงานตามลำดับขั้นดังรูปที่ 1 คำสั่งเสียงจากบอร์ดรับสัญญาณเสียง เพื่อควบคุม Switch On” จ่ายไฟให้ Raspberry Pi ผ่านรีเลย์ตัวที่ 1 จากนั้นระบบยืนยันใบหน้าเปิดรีเลย์ตัวที่ 2 เพื่อเปิดวงจรคันเร่งของตัวควบคุมมอเตอร์ด้วยกล่อง Votol EM-50 ขณะที่โมดูล GPS ทำงานแบบขนานส่งพิกัดต่อเนื่องผ่านบริการแพลตฟอร์ต NTFY เพื่อเชื่อมต่อกับพิกัดแผนที่ตามลำดับนี้จากการทำวิจัยเพื่อสร้างระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบขนานโดยมีองค์ประกอบระบบการทำงานที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้น

2.2 การออกแบบการทำงานของระบบวงจร

รายการชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้ในการสร้างระบบประกอบด้วย Raspberry Pi 4B เป็นหน่วยประมวลผลหลัก กล้อง Logitech C920 สำหรับรับภาพ รีเลย์แยกกราวด์ด้วยแสง 3 ช่องสัญญาณ ชุด VC-02 สำหรับรู้จำเสียง โมดูล U-Blox NEO-6M สำหรับรับสัญญาณ GNSS และตัวแปลงไฟแบบบั๊กจาก 60V เป็น 5V บรรจุในกล่อง IP66 ที่คอนโซลรถ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบการทำงาน

2.3 การออกแบบจดจำใบหน้าด้วยปัญญาประดิษฐ์และคำสั่งเสียง

การจดจำใบหน้าใช้ไลบรารี face recognition/ dlib คำนวณเวกเตอร์คุณลักษณะ 128 มิติที่ค่าขีดแบ่ง 0.4 ตัดสินผลจาก 3 เฟรมติดต่อกันที่ 5 fps ระบบเสียงใช้ชิป VC-02 รองรับคำสั่งโดยกล่าวว่า “Jarvis+Switch On/Off/Stop” แบบออฟไลน์ ทริกเกอร์ Active-LOW เพื่อความปลอดภัยเมื่อระบบล้มเหลว (Fail-Safe) และโมดูล GPS NEO-6M ส่งข้อมูล NMEA ที่ 1 Hz ผ่าน HTTP ไปยังบริการ NTFY พร้อมลิงก์ Google Maps

2.4 หลักการทำงานของระบบสแกนใบหน้า

ระบบสแกนใบหน้าพัฒนาบนบอร์ด Raspberry Pi 4 ที่เชื่อมต่อกับกล้อง Logitech C920 HD Pro Webcam ผ่านพอร์ต USB โดยตรวจสอบการเชื่อมต่อด้วยคำสั่ง lsusb และควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรม RealVNC จากนั้นระบบรับภาพวิดีโอจากกล้องเพื่อใช้ในการประมวลผลการจดจำใบหน้า

ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ได้ใช้ไลบรารี OpenCV บันทึกภาพจากวิดีโอและตรวจจับพร้อมตัดเฉพาะบริเวณใบหน้าด้วย OpenCV ร่วมกับ MediaPipe จากนั้นแปลงภาพใบหน้าเป็นเวกเตอร์คุณลักษณะ (Face Embeddings) โดยใช้ไลบรารี Face Recognition ซึ่งอาศัยโมเดล Convolutional Neural Network (CNN) และจัดเก็บข้อมูลในไฟล์ embeddings.pkl ด้วย Pickle เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการจดจำบุคคล

ในขั้นตอนการใช้งานจริง ระบบจะโหลดไฟล์ embeddings.pkl เข้าสู่หน่วยความจำ และใช้ไลบรารี OpenCV, NumPy, Face Recognition และ Pickle ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะของใบหน้าที่ตรวจจับได้กับฐานข้อมูล โดยกำหนดค่า tolerance = 0.4 เพื่อสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำและความไวในการตรวจจับ เมื่อพบข้อมูลที่ตรงกัน ระบบจะแสดงชื่อของบุคคลบนหน้าจอแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุตัวตนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2.4 ระบบสั่งงานด้วยเสียงออฟไลน์ (VC-02 ASR Chip)

การกำหนดค่าและฝึกชุดคำสั่ง: Firmware สร้างผ่านแพลตฟอร์ม voice.ai-thinker.com โดยกำหนด

ชุดคำสั่ง 4 คำสั่งแบบ Wake-Word + Command ดังนี้: (1) คำปลุกระบบ 'Jarvis' (Wake-Word) (2) 'Switch On' สั่งเปิดระบบ (3) 'Switch Off' สั่งปิดระบบ (4) 'Stop' ขัดจังหวะฉุกเฉินไม่ต้องผ่าน Wake-Word การฝึก (Training) ดำเนินการในโหมด Offline โดยฝังข้อมูลเสียงอ้างอิง (Voice Reference Template) ลงใน Flash Memory ของชิป VC-02 โดยตรง โดยระบบการทำงานไม่ต้องพึ่งพาคลาวด์หรือการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต การทริกเกอร์เอาต์พุตแบบ Active-LOW (Fail-Safe Open) เพื่อให้รีเลย์กลับสู่สถานะเปิดวงจรโดยอัตโนมัติเมื่อระบบล้มเหลว โมดูล GPS NEO-6M ส่งประโยค NMEA @1 Hz ผ่าน HTTP POST ไปยังบริการ NTFY พร้อมลิงก์ Google Maps

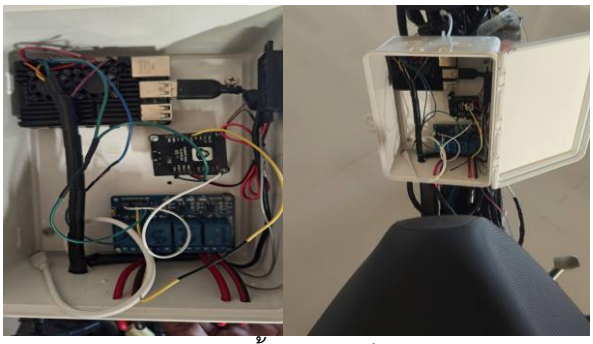
3.การติดตั้งอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ให้กับตัวรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

1) ติดตั้ง Raspberry Pi, VC02 Kit, Switch Relay ไว้ในกล่อง Control และนำกล่องไปติดตั้งบริเวณ Console ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 3

2) ติดตั้งกล้อง Logitech C920 Webcam ไว้บริเวรหัวรถ เป็นตำแหน่งที่เหมาะสำหรับการสแกนใบหน้า

3) ติดตั้ง Micro Phone Module ไว้ด้านล่างกล้อง Logitech C920 Webcam ตำแหน่งนี้เหมาะสำหรับการรับคำสั่งเสียงได้ดี

4) ติดตั้ง GPS Neo-6M-0-001 ไว้บริเวณท้ายรถเพื่อให้จับสัญญาณได้ดี ดังรูปที่ 4



(ก) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ ไว้ในกล่อง control

(ข) นำกล่อง Control ไปติดกับบริเวณ Console

รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ ไว้ในกล่อง control



(ก) ตำแหน่ง Logitech Webcamและไมโครโฟน Vc02 Kit

(ข) ตำแหน่ง GPS Module

รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์รถไฟฟ้า

4. การทดสอบประสิทธิภาพระบบ

ทดสอบกับผู้เข้าร่วม 10 คน (ลงทะเบียน 5 คน ไม่ลงทะเบียน 5 คน) คนละ 10 ครั้ง แต่ละคนทดลองใช้ความสว่างที่10ระดับความสว่าง(10–100,000ลักซ์) รวม 1,000 ครั้ง พร้อมทดสอบฝาแฝดเหมือน ด้วยการใช้ภาพถ่าย และคำสั่งเสียงใน 2 สภาพแวดล้อม 3 ระดับที่มีความดังเสียงรบกวน 60/70/80 dB จากตารางที่1 สรุปผลการทดสอบหลัก การจดจำใบหน้าได้ Accuracy = Precision = Recall = F1 = 1.000 (TP=50, TN=70, FP=0, FN=0) ในทุกระดับความ

สว่าง การแยกแยะฝาแฝดเหมือนได้ FP=0 ครบทุกกรณี ยืนยันว่าเวกเตอร์คุณลักษณะของ dlib จับลักษณะจุลภาคจากความแปรปรวนเชิงพัฒนาการได้แม้จีโนมเหมือนกันถึง 99% อย่างไรก็ตาม การทดสอบด้วยภาพหน้าจอสมาร์ทโฟนที่ 10,000 ลักซ์ เกิด False Acceptance 2 ครั้ง ชี้ให้เห็นความจำเป็นของระบบตรวจจับความมีชีวิตในงานต่อไป ความหน่วงเวลาของระบบเสียงคงที่ 1 วินาที อัตราการจดจำ 100% ในทุกสภาพแวดล้อม และความแม่นยำของ GPS อยู่ในช่วง 3–8 เมตร (เฉลี่ย 5.75 เมตร) เพียงพอสำหรับระบุตำแหน่งระดับช่องจอดรถ เทียบกับ GSM Triangulation มีความแม่นยำที่สูงกว่าในระยะทางที่เท่ากัน สามารถแสดงผลการทดลองตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังต่อไปนี้

4.1การจดจำใบหน้า

ตารางที่1ผลการทดสอบสแกนใบหน้าบุคคลจริง (TP=50, TN=70, FP=0, FN=0)

ผู้ทดสอบ	สถานะ	กลุ่มหน้า	ผล	Acc.
ศิรัสพล พ.	ลงทะเบียน	—	10/10 ✓	100%
ปรัชชญา แ.	ลงทะเบียน	—	10/10 ✓	100%
รัตน์ศิกา ป.	ลงทะเบียน	—	10/10 ✓	100%
คามิน ไ.	ลงทะเบียน	—	10/10 ✓	100%
ภานุพงศ์ พ.	ลงทะเบียน	—	10/10 ✓	100%
ทิชากร ท.	ไม่ลงทะเบียน	คล้าย	10/10 X	100%
กิตตินันท์ ส.	ไม่ลงทะเบียน	ไม่คล้าย	10/10 X	100%
พงศ์พัฒน์ พ.	ไม่ลงทะเบียน	ไม่คล้าย	10/10 X	100%
ชลิตา	ไม่ลงทะเบียน	คล้าย	10/10 X	100%
มัลลิกา	ไม่ลงทะเบียน	ไม่คล้าย	10/10 X	100%

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการยืนยันด้วยภาพถ่าย

วิธีโจมตี	ระดับแสง	ผล	Precision/Recall
บัตรประชาชน	ทุกระดับ	ปฏิเสธ 100%	1.000 / 1.000
หน้าจอสมาร์ทโฟน	10,000 lux	FA=2/100	1.000 / 0.04

4.2 ระบบสั่งงานด้วยเสียง

ตารางที่ 3 ความหน่วงเวลาและอัตราจดจำคำสั่งเสียง

คำสั่ง	สภาพแวดล้อม	60 dB	70 dB	80 dB	จดจำ
Wake-Word	พื้นที่โล่ง	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Switch On	พื้นที่โล่ง	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Switch Off	พื้นที่โล่ง	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Stop	พื้นที่โล่ง	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Wake-Word	พื้นที่ปิด	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Switch On	พื้นที่ปิด	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Switch Off	พื้นที่ปิด	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%
Stop	พื้นที่ปิด	1 วิ	1 วิ	1 วิ	100%

4.3 ความแม่นยำ GPS

ตารางที่ 4 ความแม่นยำตำแหน่ง GPS

ครั้ง	ประเภทเส้นทาง	จาก ⟶ ถึง	ผิดพลาด (ม.)
1	ทางตรงสั้น	ตึก 6 ⟶ ตึก 34	5
2	ทางแยก	ตึก 36 ⟶ ตึก 18	3
3	ระยะไกล	ตึก 36 ⟶ หอพัก	7
4	ทางตรงกลาง	ตึก 11 ⟶ ตึก 36	8
เฉลี่ย	—	—	**5.75**

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอและตรวจสอบเชิงประจักษ์ระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยแบบลำดับขั้น (S-MFA) สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ผลสำคัญ ได้แก่

(1) Accuracy=F1=1.000 จาก 1,000 การทดสอบครอบคลุม 10 ระดับความสว่าง (2) แยกแยะฝาแฝดร่วมไข่ได้ FP=0 ในทุกกรณี (3) ความหน่วงเวลาเสียง 1 วินาที อัตราจดจำ 100% ในทุกสภาพแวดล้อม และ (4) ความแม่นยำ GPS 3–8 เมตร ด้วยต้นทุนต่ำกว่า 6,000 บาท ผลรวมพิสูจน์ว่าฮาร์ดแวร์สำเร็จรูปราคาประหยัดสามารถสร้างระบบพิสูจน์ตัวตนหลายปัจจัยระดับยานยนต์ที่มีฟังก์ชันการทำงานครอบคลุมการรักษาความปลอดภัย เมื่อตลาดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าอาเซียนเติบโตต่อเนื่อง [7] ระบบนี้จึงสามารถพัฒนาและถูกนำไปใช้งานได้จริง ด้วยต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับระบบป้องกันอื่นๆ

6.เอกสารอ้างอิง

[1] LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015). “Deep learning.” Nature 521, 7553: 436–444.

[2] Taigman, Y., Yang, M., Ranzato, M., and Wolf, L. (2014). “DeepFace: Closing the gap to human-level performance in face verification.” IEEE CVPR: 1701–1708.

[3] Schroff, F., Kalenichenko, D., and Philbin, J. (2015). “FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering.” IEEE CVPR: 815–823.

[4] King, D.E. (2009). “Dlib-ml: A machine learning toolkit.” JMLR 10: 1755–1758.

[5] Viola, P., and Jones, M. (2001). “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features.” IEEE CVPR 1: 511.

[6] Musa, Y.Y., and Wang, J. (2012). “Vehicle tracking and anti-theft system using GPS-GSM.” International Journal of Engineering Research & Technology 1, 10.

[7] Mordor Intelligence. (2026). “ASEAN Electric Vehicle Market: Growth, Share, Size and Forecast 2031.” Mordor Intelligence Research.

[8] AI Thinker. (2023). “VC-02 Offline Voice Recognition Module Datasheet.” Shenzhen.

[9] U-Blox AG. (2011). “NEO-6 GPS Modules Data Sheet.” Switzerland.

[10] Atoum, Y., Liu, Y., Jourabloo, A., and Liu, X. (2017). “Face anti-spoofing using patch and depth-based CNNs.” IEEE IJCB: 319–328.

[11] Francillon, A., Danev, B., and Capkun, S. (2011). “Relay attacks on passive keyless entry and start systems in modern cars.” NDSS.

การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมหลายขนาด 5 ชั้น

Gain Enhancement of a Conical Horn Antenna Using a Five-Layer Multi-Size Circular Printed Circuit Board Structure

ศรันย์ คัมภีร์ภัทร[1,*], วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ[1], ธนาฒน์ สุกนวล[1], ไมตรี ธรรมมา[1], นิกร แก้วแพรก[3], ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา[2], อภิเดช บุญเจือ[2], สัญชัย รำเพยพัด[2] การัณย์ หอมชาติ[4] ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[5] จริญญา หาญกุล[2] และ ชญาณี ศิริบุรม[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[2] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[3] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[5] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี
321 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย
*ผู้ติดต่อ: E-mail saran.ka@rmuti.ac.th, 096-954-5154, 044-233-000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้อธิบายการนำเสนอการออกแบบและจัดวางตำแหน่งของโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีรูปวงกลมหลายขนาดที่เหมาะสมจำนวน 5 ชั้น ซึ่งนำไปวางด้านหน้าของสายอากาศปากแตรรูปกรวยสำหรับเป็นวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant circuit) ให้แก่สายอากาศจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสายอากาศมีการแมตช์ของสายอากาศที่ดีขึ้น และมีอัตราขยายที่สูงขึ้นถึง 24.8 dB ซึ่งได้เพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 7.6 dB ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม โดยสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ เรดาร์ระยะสั้นช่วงย่านความถี่ X-band และช่วงความถี่ I-band ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU กำหนดไว้

คำสำคัญ: อัตราขยายสูง, สายอากาศปากแตรรูปกรวย, แผ่นวงจรพิมพ์, ระบบเรดาร์ระยะสั้น

Abstract

This research presents the design and arrangement of a printed circuit board (PCB) structure consisting of five layers of circular elements with optimized dimensions. The structure is positioned in front of a conical horn antenna to function as a resonant circuit. Simulation results obtained from a commercial software package demonstrate that the proposed design improves the antenna impedance matching and significantly enhances the gain, achieving up to 24.8 dB. This represents an increase of 7.6 dB compared to a conventional conical horn antenna at the operating frequency of 10 GHz. The

proposed antenna can be applied in short-range radar systems operating in the X-band and I-band frequency ranges, in accordance with IEEE and ITU standards.

Keywords: High gain, conical horn antenna, printed circuit board (PCB), short-range radar system.

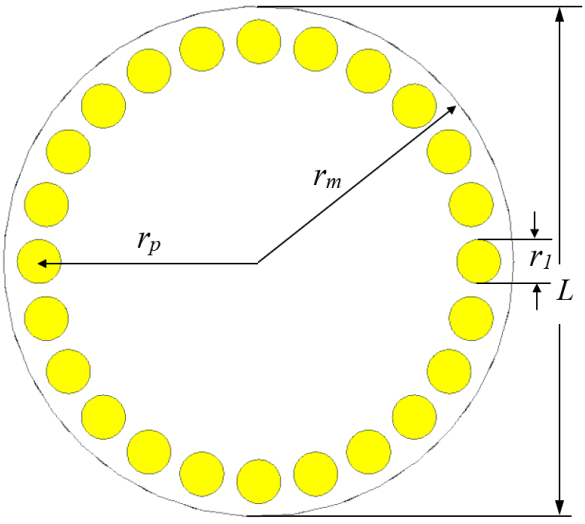
1. บทนำ

สายอากาศปากแตรรูปกรวย (conical horn antenna) เป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture antenna) ที่มีการปล่อยลำคลื่นด้านหน้าออกมา และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านออกมาในทางอะเพอร์เจอร์หรือช่องเปิดของตัวสายอากาศ ส่งผลให้สายอากาศปากแตรประเภทนี้มีอัตราขยายที่สูงและมีค่าเป็นสัดส่วนโดยประมาณกับความถี่ยกกำลังสอง มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ที่ต่ำ และจะมีความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่กว้าง สามารถออกแบบและสร้างได้โดยง่าย หากต้องการให้สายอากาศปากแตรมีประสิทธิภาพและสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่สูงขึ้น สามารถออกแบบได้ และข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ของสายอากาศปากแตรจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของตัวป้อน (Feeder) ทำให้ง่ายต่อการแมตช์ (Match) สายอากาศ [1]-[3] จากข้อดีดังกล่าวข้างต้นของสายอากาศดังกล่าวส่งผลให้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย พร้อมทั้งได้มีการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยได้ทำการศึกษาวิจัยของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม (Conventional Conical Horn Antenna) ซึ่งเป็นปากแตรรูปกรวยแบบพื้นฐาน ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz โดยการออกแบบและวิเคราะห์แผ่นวงจรพิมพ์ 5 ชั้น (five-layer circular Patch Structure) ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างแบบ 3 มิติ ที่มีความเหมาะสมกับแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม [4]-[7] นำไปวางด้านในของช่องด้านในของสายอากาศปากแตรรูปกรวยสำหรับเป็นวงจรเรโซแนนซ์ให้แก่สายอากาศ [8]-[10] เพื่อให้คลื่นที่ออกจากอะเพอร์เจอร์ของปากแตรเดินทางมาถึงโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปร่างวงกลม 5 ชั้นพร้อมๆ กัน เพื่อที่เฟสการเดินทางของคลื่นจะได้เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์สูงสุด [11]-[13] ทำให้สายอากาศมีค่าอัตราขยายที่สูงขึ้น โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขโครงสร้างของปากแตร และจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายสูงถึง 24.8 dB และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 7.6 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรแบบดั้งเดิม และนอกจากนี้ระบบสายอากาศที่ได้ออกแบบยังมีขนาดเล็กกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา ทำให้ง่ายในการติดตั้งต่อการใช้งานสำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบเรดาร์ระยะสั้นในช่วงความถี่ X-band (8 – 12 GHz) ที่ระยะความยาวคลื่น 2.5 – 3.75 เซนติเมตร และช่วงความถี่ I-band (8 – 10 GHz) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU ตามลำดับ

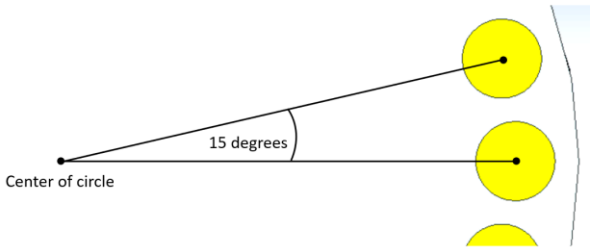
2. การออกแบบสายอากาศ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและการจำลองผลระบบสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อศึกษาตำแหน่งการวางที่เหมาะสมและรูปแบบของการแผ่กระจายกำลังงาน โดยแบบจำลองสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม และอภิวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติที่เป็นโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ระบบสายอากาศมีขนาดที่กะทัดรัด น้ำหนัก

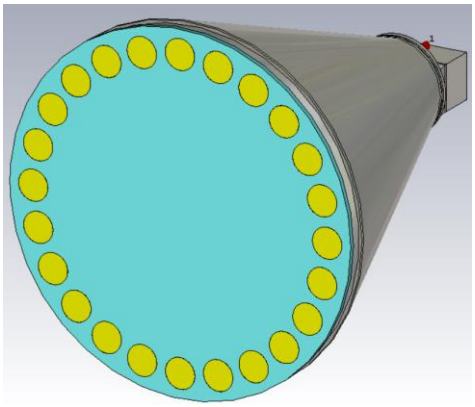
เบา แต่มีอัตราขยายที่สูง แสดงดังรูปที่ 1 เป็นโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรกที่นำไปวางด้านหน้าของรูปกรวยโดยมีระยะห่างจากขอบปากของสายอากาศปากแตรเท่ากับ 5 mm จากการจำลองผลผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้พารามิเตอร์ที่กำหนดเพื่อออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพให้เหมาะสมที่สุดจะได้พารามิเตอร์ของดังนี้ r_1 = 10 mm, r_m = 58 mm, r_p = 50 mm, d = 5 mm, L = 116 mm รูปที่ 2 แสดงผลการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} และรูปที่ 3 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรกล้อมรอบที่ขอบของปากแตรรูปกรวยโดยเป็นลักษณะการบีบลำคลื่นหลัก โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรกล้อมรอบจำนวน 24 ชุด ทำมุมกับ 15° องศากับแนวระนาบ เพื่อช่วยในการหักล้างโหลบด้านข้างให้ลดลงเพื่อไปเสริมโหลบหลัก



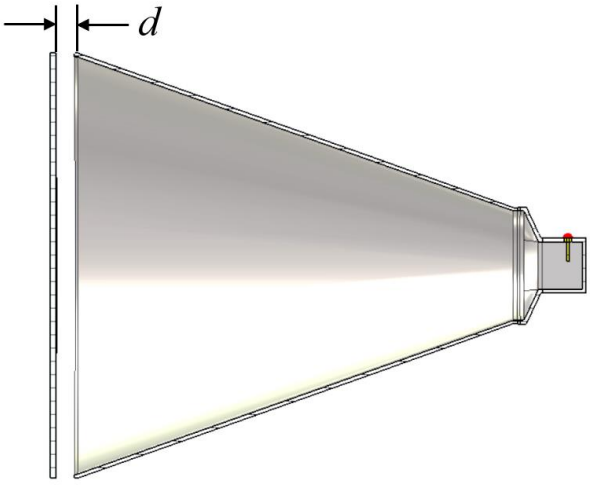
(ก) แผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมด้านหน้าชั้นแรก



(ข) ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรก

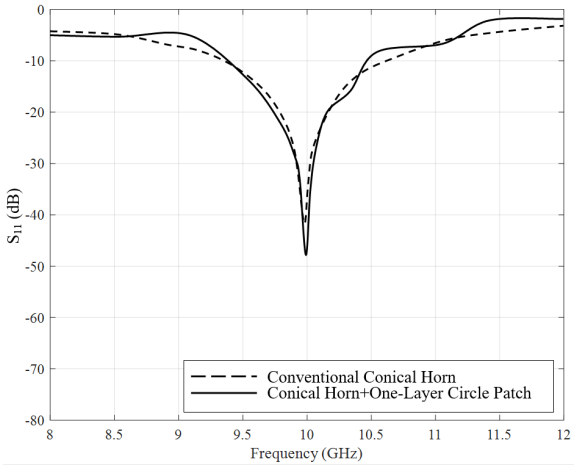


(ค) โครงสร้างโดยรวม

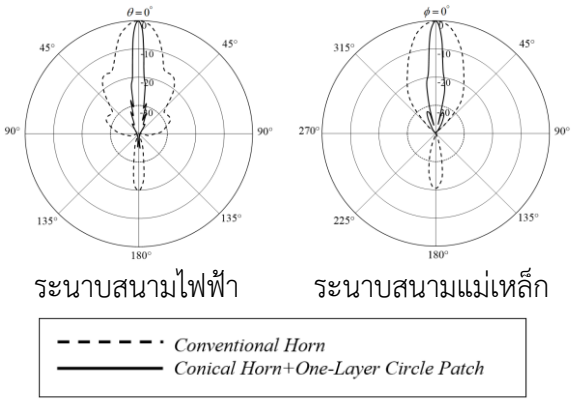


(ง) ระยะจากโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์กับปากแตรสายอากาศรูปกรวย

รูปที่ 1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรก

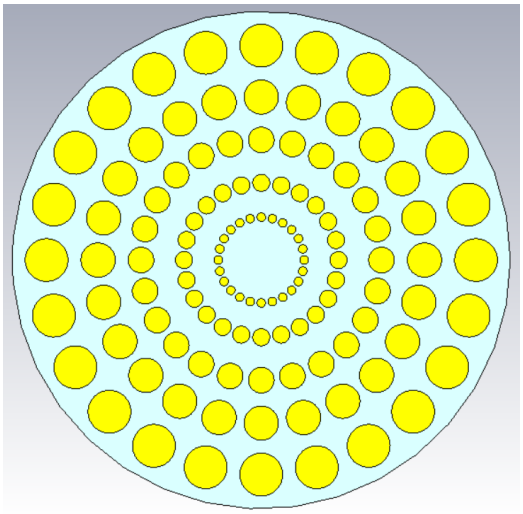


รูปที่ 2 ค่า S_{11}ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรก

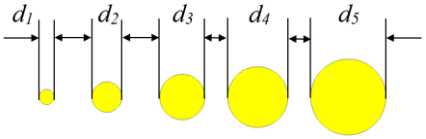


รูปที่ 3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรก

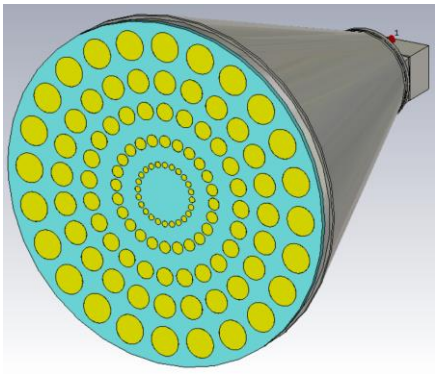
เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมที่สุดให้กับสายอากาศซึ่งจะช่วยส่งผลให้ปีบลำคลื่นรอบตัวของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมเข้ามาที่ลำคลื่นหลัก ทำให้ลำคลื่นพุ่งไปด้านหน้าได้เพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น จากการจำลองผลสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป พบได้ว่ามีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 17.2 dB เป็น 20.11 dB จากนั้นได้นำโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมจำนวนชั้นที่สอง สาม สี่ และห้ามาวางถัดเข้าหาจุดศูนย์กลางวงกลมจากชั้นที่หนึ่งให้เหมาะสมที่สุดจะได้พารามิเตอร์ของ ดังนี้ d_1 = 2 mm, d_2 = 4 mm, d_3 = 6 mm, d_4 = 8 mm, d_5 = 10 mm ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เป็นระยะที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ของสายอากาศได้สูงที่สุด ทำให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงถึง 24.8 dB ซึ่งมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 7.6 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม จะเห็นได้ว่าสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น เพียงแค่เพิ่มโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมจำนวน 5 ชั้นที่เหมาะสม โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศปากแตร



(ก) ด้านหน้า

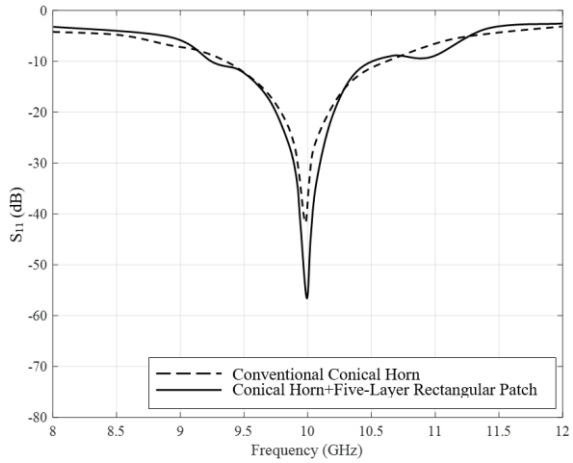


(ข) โครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น

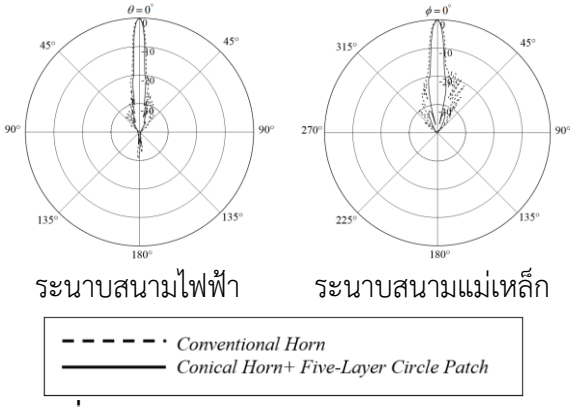


(ค) โครงสร้างโดยรวม

รูปที่ 4 สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น



รูปที่ 5 ค่า S_{11}ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น



รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น

ตารางที่ 1: ผลจากการจำลองผลระบบสายอากาศ

สายอากาศปากแตร	อัตราขยาย (dB)	SLL (dB) E-H-plane	HPBW EL:AZ
ปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม	17.2	-11.1 / -13.9	21.0 : 23.3
สายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นแรก	20.11	-15.4 / -17.1	16.2 : 17.3
สายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น	24.8	-19.1 / -19.8	8.9 : 9.2

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทำให้ได้สายอากาศรูปกรวยต้นแบบร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น รูปที่ 4 โดยโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นนั้นมีจำนวน 24 ชุด ล้อมรอบแผ่นวงจรพิมพ์เหมือนวงกลมชั้นแรก วงกลมทำมุมกับ 15° องศากับแนวระนาบ เช่นเดียวกันกับแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลมชั้นที่แรก ส่งผลให้ระบบสายอากาศมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 5 และ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบตามลำดับ และได้สรุปผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราขยายระดับโหลบข้าง และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ของสายอากาศปากแตรดังตารางที่ 1

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษา ออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม

ร่วมกับโครงสร้างแผ่นวงจรพิมพ์รูปวงกลม 5 ชั้น ซึ่งนำไปวางด้านหน้าของสายอากาศปากแตรรูปกรวย สำหรับเป็นวงจรเรโซแนนซ์ให้แก่สายอากาศจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสายอากาศมีการแมตช์ของสายอากาศที่ดีขึ้น และมีอัตราขยายที่สูงขึ้นเป็น 24.8 dB ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศโดยรวมของสายอากาศดีขึ้น โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ ส่งผลให้ได้ระบบสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา ง่ายในการติดตั้งและการใช้งาน ที่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ช่วงความถี่ X และ I band ตามมาตรฐาน IEEE และ ITU ตามลำดับ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และหัวหน้าสาขาอิเล็กทรอนิกส์ระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ได้อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ในการจำลองผล ตลอดจนต้องขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลในการทำงานวิจัย ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ ส่งผลให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Love A. W., (1976) Electromagnetic horn antennas, IEEE Press, New York, 1976.

[2] Constantine A. B., Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken: New Jersey, 2005.

[3] Yang, F. and Rahmat-Samii Y. (2009). “Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering.” Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

[4] Kampeephat S., Kamphikul P., and Wongsan R. (2017). “Gain Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna with Additional Two-Layer Wire Medium Structure.”, The 39th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Singapore, November 2017.

[5] Kampeephat S., Krachodnok P., and Wongsan R. (2014). “Efficiency Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna by Using EBG Technique.” World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 1009-1014.

[6] Sarikha W., Krachodnok P. and Wongsan R. (2014). “Exciting technique for MSA array by using single patch with surrounded metallic plate.” 11th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), May 2014.

[7] Kampeephat S., Todsungnoen S., Kamphikul P. and Sarikha W. (2021). “A

Study of Impedance Bandwidth Improvement of Printed Dipole Antenna for DTV." The 18th International Conference on Electrical Engineering /Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, pp. 341-344, May 2021.

[8] Pimpol S. and Wongsan R. (2014). "Band - Notched Printed Dipole Antenna with EBG Reflector." 11th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI-CON-2014), 17 July 2014.

[9] Kamphikul P. , Kampeephat S. , and Wongsan R. (2019). " Efficiency Improvement of Patch Antenna with Metamaterial Technique for Modern Wireless Communication Applications." in Proc. of the 2019 Progress in Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy, June 2019.

[10]Wongsan R., Duangtang P. and Mesawad P. (2015). "Dimension reduction of conical horn antennas by adding structure of metamaterial." IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), Bandung, pp. 214-217.

[11]Ramadhani A., Umaisaroh U., Firdausi A., Alaydrus M. (2021). "Design of Cross and Square Slot with Beamformingfor Microstrip Reflectarray Antenna at 28 GHz." 17th International Conference on Quality in Research (QIR), International Symposium on Electrical and Computer Engineering, pp. 182-186.

[12]Wongsan R. and Khamsalee P. (2019). "Hybrid Metamaterial Structure for Asymmetric Horn of Secondary Radar System." The 2019 International Electrical Engineering Congress (iEECON2019), Hua Hin, 6-8 March 2019.

[13]Lawanwisut, S., Thamma, M., Wiboonjaroen, W., Sooknuan, T., Ramphueiphad, S., Boonjue, A., & Kampeephat, S. (2025). "Gain improvement of a conventional conical using the perforated circular aluminum structure with a mounting PCB barrier for radar system." Results in Engineering, 28, 107104, 1-13.

ESTACON 2026 | 17th

ระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar

Real-Time Solar Panel Energy Monitoring System Controlled via Solar Application

บุญยรัตน์ โทธนะ[1]*, สรศักดิ์ เสน่ห์วงค์[2], ฟิรดาว เอี่ยมวัน[3], ณัฐพร รัตนาพิศุทธิกุล[4] และนัขนลิน อินทนุพัฒน์[5]

[1] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[2] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[3] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[4] นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม 89 หมู่ 12 ต.ลาดใหญ่ อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
[5]อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรการโรงแรม วิทยาลัยอาชีวศึกษาเพชรบุรี 300 ถ.ราชวิถี ต.คลองกระแชง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000
หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5
*ผู้ติดต่อ : modtongz@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0828598555

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบตรวจวัดพลังงานจากแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยมุ่งเน้นการแก้ข้อจำกัดของระบบตรวจวัดทั่วไปด้วยการบูรณาการสถาปัตยกรรมประมวลผลร่วมระหว่าง Arduino Nano และ ESP8266 NodeMCU เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าทางไฟฟ้าฝั่งกระแสตรง (DC) และเพิ่มขีดความสามารถในการควบคุมตัดต่อโหลดไฟฟ้าผ่านเครือข่ายไร้สาย ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า พร้อมส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปแสดงผลบน Web Dashboard ได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบในสภาพการใช้งานจริงครอบคลุมตลอดทั้งวัน แบ่งเป็นช่วงเช้า (08.30–09.30 น.) ผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 7.34 วัตต์ , ช่วงสาย (10.30–11.30 น.) มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 8.27 วัตต์ , ช่วงเที่ยง (12.30–13.30 น.) มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 7.49 วัตต์ และช่วงบ่าย (14.30–15.30 น.) กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงตามความเข้มแสงอยู่ที่ 5.70 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากระบบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของแรงดันและกระแสไม่เกิน ±5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมที่ยอมรับได้ ด้านเสถียรภาพระบบสามารถคงการเชื่อมต่อเครือข่ายได้ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง และสามารถบริหารจัดการจ่ายพลังงานสะสมจากแบตเตอรี่ให้แก่โหลดไฟฟ้าขนาดเล็ก อาทิ หลอดไฟ LED ขนาด 5 วัตต์ได้นาน 1.4 ชั่วโมง และพัดลมขนาดเล็ก 10 วัตต์ ได้นาน 1 ชั่วโมง โดยการตอบสนองต่อคำสั่งเปิด-ปิดรีเลย์ผ่านแอปพลิเคชันสามารถทำได้ทันทีโดยไม่มีอาการหน่วง ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คน อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 4.12, S.D. = 0.65) โดยด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุด (ค่าเฉลี่ย = 4.16) นวัตกรรมนี้จึงมีความพร้อมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบระบบบริหารจัดการพลังงานอัจฉริยะสำหรับครัวเรือนขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, แผงโซล่าเซลล์, ระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), ระบบบริหารจัดการพลังงานอัจฉริยะ

Abstract

This research aims to develop a prototype real-time solar panel energy monitoring system controlled via the Solar application. To address the limitations of conventional monitoring setups, this system features a novel dual-microcontroller cooperative architecture integrating an Arduino Nano and an ESP8266 NodeMCU. This design significantly improves measurement accuracy on the low-voltage direct current (DC) side and enables wireless load control capabilities. The developed prototype accurately measures voltage, current, and power, continuously transmitting the data via a Wi-Fi network to a web-based dashboard.

Experimental performance evaluation conducted under real operating conditions spanned throughout the day. The average power generation was 7.34 W during the morning (08:30–09:30 AM), reaching a peak average of 8.27 W in the late morning (10:30–11:30 AM), then maintaining 7.49 W at noon (12:30–01:30 PM), and finally decreasing to 5.70 W in the afternoon (02:30–03:30 PM) due to reduced solar intensity. Accuracy verification against a standard multimeter demonstrated an engineering error margin within ±5%. System stability testing proved that Wi-Fi connectivity and real-time data transmission remained uninterrupted for at least 6 hours. Furthermore, the prototype effectively managed stored battery power to operate small electrical loads: a 5 W LED bulb for 1.4 hours and a 10 W small fan for 1 hour. The load switching commands via the application responded instantaneously with negligible delay. User satisfaction evaluation among 15 participants yielded a high overall rating (Mean = 4.12, S.D. = 0.65), with ease of use receiving the highest score (Mean = 4.16). Consequently, this innovative prototype shows high potential as a model for practical smart energy management systems in small-scale households.

Keywords: Solar energy, Solar panel, Real-time monitoring system, Internet of Things (IoT), Smart energy management system

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

พลังงานฟอสซิลและแหล่งพลังงานดั้งเดิมยังคงเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ทั้งยังเป็นต้นเหตุสำคัญของการเกิดวิกฤตการณ์สิ่งแวดล้อม โดยส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงถึงกว่าร้อยละ 75 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก (UNEP, 2022) อันนำไปสู่ภาวะโลกร้อน มลพิษทางอากาศ และผลกระทบต่อสุขภาวะของประชากรอย่างรุนแรง ในขณะเดียวกัน ความต้องการใช้พลังงานกลับมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของระบบเศรษฐกิจและจำนวนประชากร (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2565) ส่งผลให้ทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางพลังงาน และเกิดความผันผวนของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในอนาคต จากข้อจำกัดดังกล่าว ประเทศต่าง ๆ จึงได้เร่งขับเคลื่อนนโยบายที่มุ่งเน้นการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ควบคู่กับการลดผลกระทบเชิงนิเวศอย่างยั่งยืน ทั้งนี้ เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนได้รับการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยรายงานจาก IRENA (2023) ระบุว่า ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบโซลาร์เซลล์ (Solar PV) ลดลงมากกว่าร้อยละ 85 ภายในระยะเวลาเพียง 10 ปี เนื่องจากประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของเทคโนโลยีและการจัดเก็บพลังงาน (IRENA, 2023; IEA, 2023) ความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์นี้จึงสร้างโอกาสในการแข่งขันและการบูรณาการร่วมกับระบบตรวจวัดและการควบคุมพลังงานอัจฉริยะ

สำหรับประเทศไทย ได้มีการกำหนดเป้าหมายเชิงยุทธศาสตร์เพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนให้เข้าสู่ร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายภายในปี พ.ศ. 2580 ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 (AEDP 2018–2037) โดยมุ่งเน้นการพัฒนาศักยภาพแหล่งพลังงานสะอาดในพื้นที่เพื่อกระจายการผลิตไฟฟ้า ลดการนำเข้าพลังงาน และตอบสนองต่อพันธกรณีความตกลงปารีส (Paris Agreement) นอกจากนี้ ภาครัฐยังให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการบริหารจัดการพลังงานแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Generation) ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม (สนพ., 2561) พลังงานแสงอาทิตย์จึงถือเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสุดและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศเขตร้อนของประเทศไทย สามารถติดตั้งได้อย่างยืดหยุ่นบนหลังคาอาคาร (Solar Rooftop) หรือพื้นที่จำกัด ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม แม้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์จะแพร่หลายและมีความจำเป็นต่อภาคครัวเรือน แต่ในแง่การพัฒนาเทคโนโลยีการบริหารจัดการพลังงานยังคงเผชิญข้อจำกัดสำคัญด้านระบบตรวจวัดและติดตามผลการผลิตไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ (Real-time Monitoring) เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์มีลักษณะแปรผันสูงตามสภาพแสงและอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา (ปพน งามประเสริฐ และคณะ, 2563) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ขนาดเล็กที่ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เดี่ยว (Single Microcontroller) สื่อสารผ่านคลาวด์ มักประสบปัญหาด้านความแม่นยำต่ำ สัญญาณอนาล็อกเกิดสัญญาณรบกวนได้ง่าย และระบบไม่มีเสถียรภาพเมื่อทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน (สุรัติ พัฒนา, 2564) อีกทั้งระบบติดตามพลังงานส่วนใหญ่ในปัจจุบันทำได้เพียงแสดงค่าแบบรับข้อมูลทางเดียว (Passive monitoring) โดยขาดฟังก์ชันในการควบคุมหรือตัดต่อโหลดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้องกันความเสียหายของแบตเตอรี่ในระบบจัดเก็บพลังงาน (วรภัทร แดงขวัญทอง และคณะ, 2568) การขาดความแม่นยำในการวัดค่าและความเสถียรของเทคโนโลยี IoT นี้ส่งผลให้ผู้ใช้งานไม่สามารถวางแผนการบริโภค

พลังงานได้อย่างถูกต้อง เกิดความล่าช้าในการบำรุงรักษา และทำให้ระบบทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ (Efficiency Loss) ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการคุ้มทุนในระยะยาวของระบบขนาดครัวเรือน

จากปัญหาการพัฒนาและช่องว่างทางเทคโนโลยีดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนา "ระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar" ขึ้น โดยนวัตกรรมนี้สร้างขึ้นบนแนวคิดการทำงานร่วมกันแบบสองไมโครคอนโทรลเลอร์ (Dual-Microcontroller Architecture) โดยใช้ Arduino Nano ทำหน้าที่คัดกรองและอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกจากเซนเซอร์ไฟฟ้ากระแสตรงความละเอียดสูง ร่วมกับบอร์ด ESP8266 NodeMCU ในการประมวลผลและส่งผ่านข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยัง Cloud แพลตฟอร์มอย่างแม่นยำ ทั้งยังทลายข้อจำกัดระบบเดิมด้วยการติดตั้งระบบ Active Load Management ผ่านโมดูลรีเลย์อัจฉริยะ ทำให้ผู้ใช้งานไม่เพียงแต่ติดตามค่าแรงดันกระแส และกำลังไฟฟ้าได้ทุกที่ทุกเวลาผ่าน Web Dashboard แต่ยังสามารถสั่งการควบคุมและตัดต่อโหลดไฟฟ้าขนาดเล็กได้ทันทีผ่านโมบายแอปพลิเคชันอย่างมีเสถียรภาพ นวัตกรรมนี้จึงถือเป็นแนวทางใหม่ในการเพิ่มความแม่นยำและเสถียรภาพในการบริหารจัดการพลังงานสะอาดในระดับครัวเรือนและวิสาหกิจขนาดเล็กอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อสร้างต้นแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงโซล่าเซลล์ พร้อมระบบแสดงผลข้อมูลแบบออนไลน์

2.2 เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง

2.3 เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลที่วัดได้กับระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะพลังงานได้แบบเรียลไทม์ผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่

2.4 เพื่อเพิ่มความสะดวกในการดูแลและบริหารจัดการการใช้พลังงานหมุนเวียนภายในพื้นที่ติดตั้ง

2.5 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบจริง และประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในระดับครัวเรือนหรือโครงการขนาดเล็ก

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

ศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงโซล่าเซลล์โดยใช้ ESP8266 NodeMCU และ Arduino Nano และ ACS712 และStep-down พร้อมพัฒนาโปรแกรม Arduino ide เพื่อประมวลผลและส่งข้อมูลไปยัง Solar IoT เพื่อแสดงผลผ่าน Web Dashboard และ Mobile App ข้อจำกัดการทดลองในระดับโหลดไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น หลอดไฟ LED หรือพัดลม AC ไม่รวมระบบควบคุมการตัดต่อโหลดไฟฟ้าอัตโนมัติหรือการเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

3.2 ด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ บุคคลหรือกลุ่มบุคคลที่มีความสนใจหรือต้องการติดตามและควบคุมการใช้พลังงานจากระบบแผงโซล่าเซลล์ รวมถึงผู้ที่สนใจเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในพื้นที่จังหวัดสมุทรสงคราม โดยเฉพาะผู้ที่มีแนวโน้มจะนำระบบพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้งานจริง เช่น ในครัวเรือน หรือในภาคการศึกษา เพื่อเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจ และการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเทคโนโลยี IoT

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้คัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากประชากรที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการทดสอบและประเมินผลระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 นักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสงคราม จำนวน 10 คน ซึ่งมีพื้นฐานความรู้ด้านระบบไฟฟ้า และมีความสนใจศึกษาหรือทดลอง

การใช้งานระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มผู้ที่ชื่นชอบการท่องเที่ยวแบบแคมปิ้ง การเดินทางไกล และการทำกิจกรรมกลางแจ้ง รวมถึงบุคคลทั่วไปที่มีความประสงค์จะติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กภายในที่พักอาศัย โดยเป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในจังหวัดสมุทรสงคราม จำนวน 5 คน ซึ่งมีความสนใจในเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์และต้องการนำมาประยุกต์ใช้ในครัวเรือน เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลัก และส่งเสริมการประหยัดพลังงานในระยะยาว

3.3 กรอบแนวคิด

ตัวแปรต้น (Independent Variables)	ตัวแปรตาม (Dependent Variables)
• การออกแบบวงจร, การเขียนโปรแกรมควบคุม, • เงื่อนไขการเชื่อมต่อ Wi-Fi, ลักษณะการติดตั้งแผงโซล่าเซลล์	ค่าที่วัดได้ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (A), กำลังไฟฟ้า (W) ที่แสดงผลได้จริงแบบเรียลไทม์

รูปที่ 1 กรอบแนวคิด

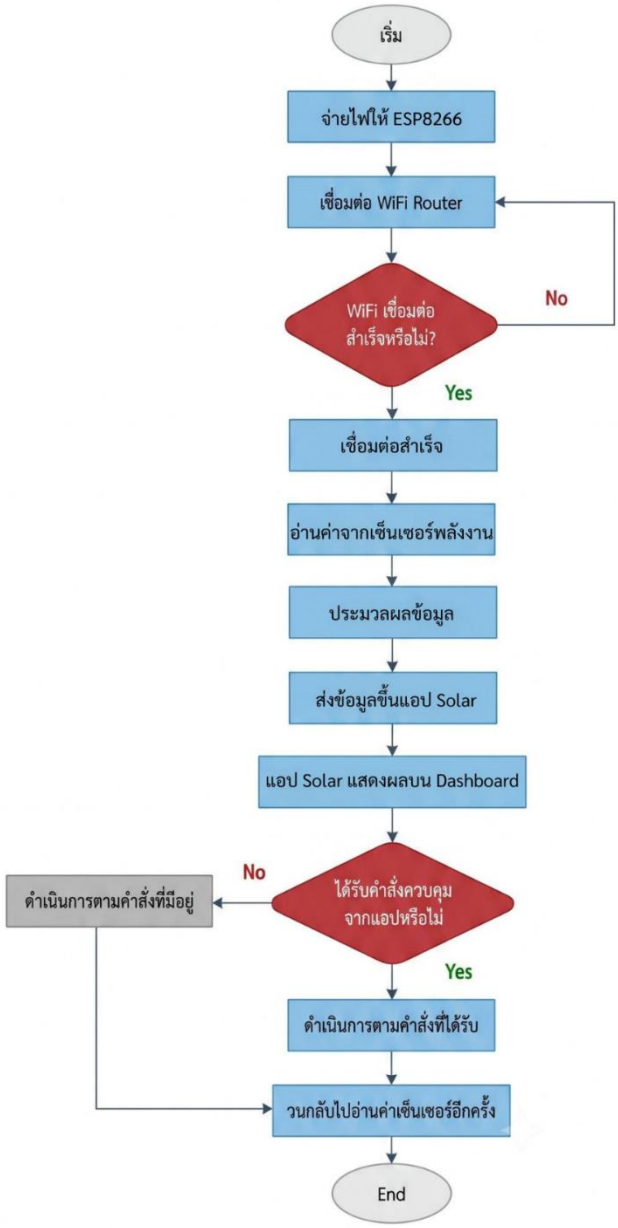
3.4 การสร้างเครื่องมือ

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการวัดพลังงานไฟฟ้า การทำงานของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ตลอดจนหลักการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และการเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Solar

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบผังวงจรไฟฟ้าโดยเชื่อมต่อแผงโซล่าเซลล์เข้ากับเซ็นเซอร์ ACS712 ซึ่งทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากนั้นเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เข้ากับบอร์ด ESP8266 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักของระบบ

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการประกอบวงจรจริงตามแผนผังที่ออกแบบไว้ และเขียนโปรแกรมควบคุมให้ ESP8266 ทำหน้าที่รับค่าจากเซ็นเซอร์ จากนั้นส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชัน Solar ผ่านการเชื่อมต่อ Wi-Fi

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบระบบที่สร้างขึ้นโดยเปรียบเทียบค่าที่แสดงผลในแอพพลิเคชันกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความถูกต้อง



รูปที่ 2 Flowchart การทำงานของระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar



รูปที่ 3 แสดงโครงร่างของตัวชิ้นงานระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar

3.5 การตรวจสอบเครื่องมือ

1) ตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่วัดได้ เปรียบเทียบค่าที่แสดงในแอปพลิเคชัน Solar กับค่าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์หรืออุปกรณ์วัดมาตรฐานอื่น ๆ เพื่อประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ ACS712 ที่ใช้ในระบบ

2) ทดสอบความเสถียรของระบบ การเชื่อมต่อ ทำการทดสอบระบบในระยะเวลาต่อเนื่องหลายชั่วโมงเพื่อดูว่าการเชื่อมต่อ Wi-Fi และการส่งข้อมูลผ่านแอปพลิเคชัน Solar มีความต่อเนื่องและไม่มีปัญหาการหลุดของสัญญาณ

3) ตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266, เซนเซอร์ และแอปพลิเคชัน Solar เพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลที่ส่งออกจากอุปกรณ์ตรงกับการแสดงผลจริง

ตารางที่ 1 การตรวจสอบเครื่องมือ

ลำดับ	รายการตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบ	ผลการตรวจสอบ	หมายเหตุ
1	ความถูกต้องของค่าที่วัดได้	เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแอปพลิเคชัน Solar กับค่าจากมัลติมิเตอร์	ผ่าน	ค่าเบี่ยงเบนไม่เกิน ±5% ถือว่าผ่าน
2	ความเสถียรของการเชื่อมต่อ Wi-Fi	ทดสอบระบบต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง ตรวจสอบการเชื่อมต่อ	ต่อเนื่อง	บันทึกเวลาที่เกิดปัญหาหากมี
3	ความสอดคล้องของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์	ทดสอบการส่งค่าจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ไปยังแอปพลิเคชัน Solar	ข้อมูลตรง	ตรวจสอบเวลาตอบสนองและความล่าช้า

3.6 การออกแบบโครงสร้างระบบ

ส่วนประกอบทางกายภาพ

1. แผงโซล่าเซลล์ 150W Voc 15.6V Vmp/Vmax 12.5V
2. Solar Charge Controller ขนาด 12V/24V
3. Inverter 12V 500W
4. เทอร์มินอล 600V 25V
5. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266
6. บอร์ด Arduino Nano
7. สเต็ปดาวน์
8. โมดูลเซนเซอร์กระแส ACS712
9) แบตเตอรี่ 12V 5 Ah

3.7 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar ได้แก่ ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบแผงโซล่าเซลล์ การวัดแรงดันไฟฟ้า/กระแสไฟฟ้า เทคโนโลยี IoT และการใช้งานแอปพลิเคชัน Solar รวมถึงศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ESP8266 และเซ็นเซอร์ ACS712

ออกแบบระบบและผังวงจร ทำการออกแบบผังวงจรไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อแผงโซลาร์เซลล์กับเซ็นเซอร์ ACS712 และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 พร้อมกำหนดรูปแบบการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ และแอปพลิเคชัน Solar

พัฒนาโปรแกรมควบคุม เขียนโปรแกรมภาษา C/C++ บน Arduino IDE เพื่อให้ ESP8266 รับข้อมูลแรงดัน และกระแสจากเซ็นเซอร์ ACS712 แล้วส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชัน Solar เพื่อแสดงผลแบบเรียลไทม์

ประกอบอุปกรณ์และติดตั้งระบบ ดำเนินการประกอบวงจรจริงบนบอร์ดทดลอง (Breadboard) หรือแผ่นวงจรพิมพ์(PCB) และทำการติดตั้งระบบให้พร้อมใช้งานจริงร่วมกับแผงโซล่าเซลล์

ทดสอบและปรับปรุงระบบ ทำการทดสอบการทำงานของระบบในสภาวะการใช้งานจริง ตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่แสดงผลบนแอปพลิเคชัน Solar และปรับแต่งโปรแกรมหรือวงจรให้มีความเสถียร และแม่นยำยิ่งขึ้น

ประเมินผลและสรุปผลการดำเนินงาน รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและการใช้งานจริง นำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ รวมทั้งสรุปผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต

2) แผนการดำเนินงาน (ปฏิทินปฏิบัติงาน)

ตารางที่ 2 ปฏิทินการปฏิบัติงาน (ระยะเวลา 12 สัปดาห์)

สัปดาห์	ระยะเวลาการดำเนินงาน											
	มิถุนายน				กรกฎาคม				สิงหาคม			
ระยะเวลาการดำเนินงาน	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4
การศึกษาเบื้องต้น และการขออนุมัติโครงงาน	←	→										
การวิเคราะห์ระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar			←	→								
การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar					←	→						
การพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar							←	→				
ทดสอบระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar									←	→		
สรุปผลและจัดทำเอกสาร										←	→	→

3.8 การวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล

1) การประมวลผลข้อมูล (Data Processing)

จากการทดลองตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงโซล่าเซลล์โดยใช้ระบบเซนเซอร์และส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Solar สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ ดังนี้

1) ความถูกต้องของข้อมูลแรงดันและกระแส ค่าที่ได้จากเซนเซอร์มีค่าแรงดันเฉลี่ยประมาณ 11.66V และกระแสเฉลี่ยประมาณ 6A ค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้โดยใช้สูตร P = V × I ให้ค่าเฉลี่ยประมาณ 69.6W เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (มัลติมิเตอร์และแอมป์มิเตอร์) พบว่าค่ามีความใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±0.2V และ ±0.1A แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการใช้งานในระบบ

2) ความต่อเนื่องและความเสถียรของระบบ ระบบสามารถอ่านค่าแรงดันและกระแสได้ต่อเนื่องทุกนาที และสามารถประมวลผลค่ากำลังไฟฟ้าได้แบบเรียลไทม์ ไม่มีการสูญเสียข้อมูลหรือค่าผิดปกติระหว่างการทดลอง แสดงค่าบนแอปพลิเคชัน Solar Dashboard ได้ถูกต้องและทันที

3) การคำนวณพลังงานสะสม (Wh และ kWh) จากการทดสอบระบบประมวลผล พบว่าการคำนวณพลังงานสะสมในแต่ละช่วงเวลาสอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างแม่นยำ โดยระบบจะรับค่ากำลังไฟฟ้า (Watt) ที่วัดได้จริงในทุกช่วงเวลาการสุ่มตรวจ (Δt) เท่ากับ 5 นาที (คิดเป็น $\frac{5}{60}$ = 0.0833 ชั่วโมง) เพื่อนำมาคำนวณพลังงานไฟฟ้าสะสมตามสมการ E = $\sum p$ X Δt

ตัวอย่างการคำนวณ ในสภาวะที่ระบบตรวจวัดกำลังไฟฟ้าได้เสถียรเฉลี่ยที่ 27.74 วัตต์ (W) ในช่วงเวลาการทดสอบต่อเนื่อง 5 นาที ตัวโปรแกรมจะคำนวณพลังงานได้ดังนี้

$$E = 27.74\ W \times \left(\frac{5}{60}\right) h = 2.3116\ Wh$$

เมื่อระบบทำการปัดเศษทศนิยมตามเงื่อนไขการแสดงผลบน Dashboard จะได้ค่าพลังงานสะสมรวมเท่ากับ 2.32 Wh หรือคิดเป็นการแปลงหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงเท่ากับ 0.00232 kWh ซึ่งการแปลงหน่วยและจัดรูปแบบการแสดงผลตัวเลขชุดนี้ผ่านโมดูลซอฟต์แวร์ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์แนวโน้มและเข้าใจข้อมูลพฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

4) ความสามารถในการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar ผู้ใช้สามารถสั่งการเปิด-ปิดโหลดผ่านรีเลย์ได้จากแอปพลิเคชัน Solar การตอบสนองต่อคำสั่งทำได้ “ทันที” และไม่มีอาการหน่วง (delay)

2) การประมวลผลข้อมูล (Data Processing)

เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตรวจสอบว่ากำลังที่ได้ใกล้เคียงกับค่ากำลังสูงสุด (Wp) ของแผงหรือไม่ แนวโน้มการผลิตพลังงาน (Trend Analysis) วิเคราะห์ตามช่วงเวลา เช่น ชั่วโมง, วัน, เดือน ตรวจสอบผลกระทบจากสภาพอากาศ (แดดแรง/เมฆมาก)

3) การแปลผลข้อมูล (Data Interpretation)

แสดงตัวเลขแบบเรียลไทม์ เช่น กำลังผลิตปัจจุบัน, พลังงานสะสม, แรงดัน, กระแส การแจ้งเตือน (Alert) เมื่อพลังงานตกต่ำกว่าที่กำหนด (เช่น มีเมฆบังแดด) แรงดันผิดปกติ (อาจมีปัญหาที่แผงหรือสายไฟ) กระแสสูงเกินไป (อาจมีโหลดเกินหรือการลัดวงจร)

4) การนำข้อมูลไปใช้ตัดสินใจ

วางแผนการใช้โหลดให้เหมาะสมกับการผลิตพลังงาน ตรวจจับและแก้ไขปัญหาได้ทันท่วงที ประเมินผลตอบแทนการลงทุน (ROI) ของระบบโซล่าเซลล์

5) การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยจัดทำแบบสอบถามแบบมาตราส่วน Likert 5 ระดับ (1 = น้อยที่สุด, 5 = มากที่สุด) โดยใช้สถิติเดียวกันในการเปรียบเทียบ และแปลผลตามเกณฑ์ 5 ระดับ

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดสอบระบบตรวจวัดพลังงาน

ผลการทดสอบช่วงเช้า (08:30–09:30 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงจากค่าต่ำสุดประมาณ 5.16 W (08:35 น.) ไปจนถึงค่าสูงสุด 9.00 W (09:10) และมีกำลังไฟเฉลี่ยประมาณ 7.34 W แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถผลิตพลังงานได้ดีในช่วงเช้าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงการทำงานของระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยเก็บผลการทดสอบทุก 5 นาที (ช่วงเช้า)

ช่วงเช้าตั้งแต่เวลา 8:30 – 9:30 น.			
เวลา(น.)	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า(W)
08:30	18.0	0.32	5.76
08:35	17.2	0.30	5.16
08:40	18.3	0.34	6.22
08:45	19.1	0.39	7.45
08:50	19.5	0.41	7.99
08:55	19.8	0.42	8.32
09:00	20.1	0.44	8.84
09:05	19.9	0.43	8.56
09:10	20.0	0.45	9.00
09:15	19.7	0.44	8.67
09:20	18.9	0.40	7.56
09:25	18.0	0.35	6.30
09:30	17.5	0.32	5.60
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ≈ 7.34 วัตต์ (W)			

ผลการทดสอบช่วงสาย (10:30–11:30 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงอาทิตย์จนถึงช่วง 10:45 น. ซึ่งเป็นช่วงที่แผงสามารถผลิตกำลังไฟสูงสุดของช่วงนี้ที่ 9.79 W หลังจากนั้นกำลังไฟเริ่มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิแผงสูงขึ้นและบางช่วงมีเมฆบัง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเล็กน้อย กำลังไฟต่ำสุดเกิดขึ้นในเวลา 11:15 น.โดยผลิตได้ 6.55 W กำลังไฟเฉลี่ยตลอดช่วงทดสอบคำนวณได้ประมาณ 8.27 W แสดงให้เห็นว่าช่วงสายเป็นช่วงที่ระบบผลิตพลังงานได้ค่อนข้างสูงและมีความเสถียร

ตารางที่ 4 แสดงการทำงานของระบบตรวจวัดพลังงานแผง โซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยเก็บผลการทดสอบทุก 5 นาที (ช่วงสาย)

ช่วงสายตั้งแต่เวลา 10:30 – 11:30 น.			
เวลา(น.)	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า(W)
10:30	20.2	0.45	9.09
10:35	20.3	0.46	9.34
10:40	20.5	0.47	9.64
10:45	20.4	0.48	9.79
10:50	20.0	0.46	9.20
10:55	19.8	0.44	8.71
11:00	19.6	0.42	8.23
11:05	19.3	0.40	7.72
11:10	18.8	0.38	7.14
11:15	18.2	0.36	6.55
11:20	18.6	0.37	6.88
11:25	18.9	0.39	7.37
11:30	19.2	0.41	7.87
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ≈ 8.27 วัตต์ (W)			

ผลการทดสอบช่วงเที่ยง (12:30–13:30 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6.60–8.30 W โดยมีค่าสูงสุด 8.30 W เกิดขึ้นในช่วง 12:45 และค่าต่ำสุด 6.60 W เกิดขึ้นในช่วง 13:20 ขณะที่กำลังไฟเฉลี่ยตลอดช่วงอยู่ที่ประมาณ 7.49 W แสดงให้เห็นว่าระบบยังสามารถผลิตพลังงานได้ต่อเนื่องแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 5 แสดงการทำงานของระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยเก็บผลการทดสอบทุก 5 นาที (ช่วงเที่ยง)

ช่วงเที่ยงตั้งแต่เวลา 12:30 – 13:30 น.			
เวลา(น.)	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า(W)
12:30	19.6	0.41	7.95
12:35	19.8	0.41	8.10
12:40	20.0	0.41	8.25
12:45	20.1	0.41	8.30
12:50	19.9	0.41	8.05
12:55	19.5	0.40	7.80
13:00	18.8	0.40	7.50
13:05	18.0	0.40	7.20
13:10	17.3	0.40	6.90
13:15	16.9	0.40	6.75
13:20	16.5	0.40	6.60
13:25	17.2	0.40	6.85
13:30	17.8	0.40	7.10
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ≈ 7.49 วัตต์ (W)			

ผลการทดสอบแผงโซล่าเซลล์ในช่วงบ่าย (14:30 – 15:30 น.) พบว่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.81 – 7.12 W โดยค่ากำลังไฟสูงสุดเกิดขึ้นช่วง 14:30 น. ผลิตได้ 7.12 W และค่าต่ำสุดเกิดช่วง 15:15 น. ผลิตได้ 4.81 W กำลังไฟเฉลี่ยตลอดช่วงนี้ประมาณ 5.70 W แสดงให้เห็นว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าลดลงตามความเข้มแสงในช่วงบ่าย

ตารางที่ 6 แสดงการทำงานของระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar โดยเก็บผลการทดสอบทุก 5 นาที (ช่วงบ่าย)

ช่วงบ่ายตั้งแต่เวลา 14:30 – 15:30 น.			
เวลา(น.)	แรงดัน(V)	กระแส(A)	กำลังไฟฟ้า(W)
14:30	17.8	0.40	7.12
14:35	17.5	0.39	6.83
14:40	17.2	0.38	6.54
14:45	17.0	0.37	6.29
14:50	16.8	0.36	6.05
14:55	16.5	0.35	5.78
15:00	16.2	0.34	5.51
15:05	16.0	0.33	5.28
15:10	15.8	0.32	5.06
15:15	15.5	0.31	4.81
15:20	15.7	0.32	5.02
15:25	16.0	0.33	5.28
15:30	16.3	0.34	5.54
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ≈ 5.70 วัตต์ (W)			

4.2 ผลการทดสอบขีดความสามารถในการจ่ายไฟให้แก่โหลดไฟฟ้า

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการบริหารจัดการพลังงานเพื่อจ่ายไฟให้แก่เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Load) ขนาดเล็กได้อย่างมีเสถียรภาพ ทั้งนี้ ระยะเวลาในการจ่ายไฟของระบบจะผันแปรโดยตรงตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าสะสมที่จัดเก็บอยู่ในแบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ขนาด 12V 5Ah (คิดเป็นพลังงานสะสมสูงสุด 12 V X 5 Ah = 60 Wh) ไม่ได้เป็นการดึงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์โดยตรงในขณะใช้งาน

จากการทดลองจ่ายไฟภายใต้เงื่อนไขแบตเตอรี่มีพลังงานสะสมพร้อมใช้งาน พบว่าระบบสามารถจ่ายไฟให้แก่โหลดไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

หลอดไฟ LED ขนาด 5 วัตต์ มีอัตราการบริโภคพลังงาน 5Wh ต่อชั่วโมง ระบบสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องได้ประมาณ 1.4 ชั่วโมง

พัดลมขนาดเล็ก ขนาด 10 วัตต์ มีอัตราการบริโภคพลังงาน 10 Wh ต่อชั่วโมง ระบบสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องได้ประมาณ 1 ชั่วโมง

การชาร์จโทรศัพท์มือถือ ขนาด 5 วัตต์ มีอัตราการบริโภคพลังงาน 5Wh ต่อชั่วโมง ระบบสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องได้ประมาณ 1.4 ชั่วโมง

การทดสอบนี้พิสูจน์ให้เห็นว่า โมดูลควบคุมและสั่งการตัดต่อโหลดผ่านรีเลย์บนแอปพลิเคชัน Solar สามารถบริหารจัดการพลังงานฝั่งขาออก (Output) ได้อย่างแม่นยำและสัมพันธ์กับระดับพลังงานคงเหลือในระบบกักเก็บพลังงานอย่างปลอดภัย

ตารางที่ 7 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คน

เครื่องใช้ไฟฟ้า	กำลังไฟ (W)	พลังงานที่ใช้ต่อ 1 ชม. (Wh)	ระยะเวลาที่ระบบสามารถจ่ายไฟได้
หลอดไฟ LED	5 W	5 Wh	≈ 12 ชั่วโมง
พัดลมขนาดเล็ก	10 W	10 Wh	≈ 6 ชั่วโมง
ชาร์จโทรศัพท์มือถือ	5 W	5 Wh	≈ 12 ชั่วโมง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการบริหารจัดการและจ่ายไฟให้แก่เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Load) ได้อย่างมีประสิทธิภาพตามทฤษฎีทางไฟฟ้า ทั้งนี้ระยะเวลาในการจ่ายไฟจะผันแปรโดยตรงตามขนาดความจุพลังงานสะสมของแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานขนาด 12V 5Ah ซึ่งมีพลังงานสะสมสูงสุดเท่ากับ 60 Wh (12 V X 5 Ah) จากการวิเคราะห์ผลการทำงานเชิงทฤษฎีและผลการทดลองจริงภายใต้สภาวะแบตเตอรี่มีความจุเต็มประจุ (100% State of Charge) สามารถสรุปขีดความสามารถในการจ่ายไฟให้แก่โหลดประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

หลอดไฟ LED ขนาด 5 วัตต์ มีอัตราการใช้พลังงาน 5Wh ระบบต้นแบบจะสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องทางทฤษฎีได้สูงสุดประมาณ 12 ชั่วโมง (60Wh / 5 W)

พัดลมขนาดเล็ก ขนาด 10 วัตต์ มีอัตราการใช้พลังงาน 10 Wh ระบบต้นแบบจะสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องทางทฤษฎีได้สูงสุดประมาณ 6 ชั่วโมง (60Wh /10 W)

การชาร์จโทรศัพท์มือถือ ขนาด 5 วัตต์ มีอัตราการใช้พลังงาน 5Wh ระบบต้นแบบจะสามารถจ่ายไฟต่อเนื่องทางทฤษฎีได้สูงสุดประมาณ 12 ชั่วโมง (60 Wh / 5W)

อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการใช้งานจริงเพื่อความปลอดภัยทางวิศวกรรมและเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ระบบควรจำกัดระดับการคายประจุลึก (Depth of Discharge: DOD) ไว้ที่ไม่เกินร้อยละ 60–80 ของความจุทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาการใช้งานจริงสั้นลงเล็กน้อยจากค่าทางทฤษฎีข้างต้นเพื่อความปลอดภัยของระบบกักเก็บพลังงาน

4.3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

กลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คนที่เข้าร่วมทดสอบระบบได้ตอบแบบสอบถามมาตราส่วน 5 ระดับ (Likert Scale) โดยแบ่งเป็นเพศชายจำนวน 9 คน และเป็นเพศหญิงจำนวน 6 คน ตั้งแต่อายุ 15-20 ปี จำนวน 8 คน อายุ 21-25 ปีจำนวน 4 คน อายุ26-30 ปีจำนวน 1 คน และอายุ 40 ปีขึ้นไป จำนวน 2 คน

ตารางที่ 8 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ระดับความพึงพอใจ
1.ด้านความสะดวกในการใช้งาน	4.16	0.65	มาก
2.ด้านประสิทธิภาพของระบบ	4.08	0.71	มาก
3.ด้านการประหยัดทรัพยากร (ด้านเวลา)	4.13	0.60	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.12**	**0.65**	**มาก**

จากตารางผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ใน

ระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 4.12) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุด (ค่าเฉลี่ย = 4.16) รองลงมาคือด้านการประหยัดทรัพยากร (ค่าเฉลี่ย = 4.13) และด้านประสิทธิภาพของระบบ (ค่าเฉลี่ย = 4.08) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบในทุกด้านอยู่ในระดับมาก



รูปที่ 4 เครื่องตรวจวัดพลังงานแผงโซล่าเซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียลไทม์ผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สามารถสรุปผลการดำเนินงานตามข้อเท็จจริงเชิงประจักษ์จากการทดลองได้ ดังนี้

1) ผลด้านประสิทธิภาพและความแม่นยำในการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นโดยใช้การประมวลผลร่วมระหว่าง Arduino Nano และ ESP8266 NodeMCU สามารถตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าฝั่งกระแสตรง (DC) ได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวัน โดยผลการทดสอบสภาวะการผลิตพลังงานแบ่งตามช่วงเวลา พบว่าช่วงเช้า (08.30–09.30 น.) ผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 7.34 วัตต์, ช่วงสาย (10.30–11.30 น.) มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 8.27 วัตต์, ช่วงเที่ยง (12.30–13.30 น.) มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 7.49 วัตต์ และช่วงบ่าย (14.30–15.30 น.) มีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 5.70 วัตต์ เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้ามาคำนวณสะสมร่วมกับฐานเวลาสุ่มตรวจทุก 5 นาที พบว่าระบบคำนวณพลังงานสะสมได้อย่างถูกต้อง (เช่น ในเวลา 5 นาที คำนวณพลังงานได้รวม 2.32 Wh) และเมื่อตรวจสอบความแม่นยำเปรียบเทียบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน พบว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เกิน ±5% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานวิศวกรรมที่กำหนดไว้

5.2 อภิปรายผล

จากการดำเนินโครงการและการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียลไทม์ควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Solar คณะผู้วิจัยสามารถนำผลมาอภิปรายในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) ด้านประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และเสถียรภาพของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ฝั่งกระแสตรง (DC Side)

จากการทดสอบพบว่าระบบต้นแบบสามารถตรวจวัดและประมวลผลค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้าฝั่งกระแสตรงได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานไม่เกิน ±5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม ผลลัพธ์ดังกล่าวเกิดจากการเลือกใช้สถาปัตยกรรมประมวลผลร่วมแบบสองไมโครคอนโทรลเลอร์ (Dual-Microcontroller Architecture) โดยมอบหมายให้บอร์ด Arduino Nano ทำหน้าที่คัดกรองสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและอ่านค่าอนาล็อกจากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ACS712 ทำให้ลดการสะสมความร้อนและการหน่วงเวลาของระบบประมวลผล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปพน งามประเสริฐ และคณะ (2563) ที่ชี้ให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าฝั่งกระแสตรงในสภาวะใช้งานจริงสามารถเกิดขึ้นได้

เล็กน้อยเมื่อเผชิญกับสภาพอุณหภูมิที่สูงและโหลดไฟฟ้าที่แปรผัน อย่างไรก็ดี ระบบต้นแบบนี้สามารถรักษาเสถียรภาพการทำงานและการคำนวณพลังงานสะสมเชิงปริมาณ (Wh) ได้อย่างแม่นยำผ่านฐานการสุ่มตรวจในทุก ๆ 5 นาที

2) ด้านการเชื่อมต่อสื่อสารไร้สายบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT)

ผลการทดลองยืนยันว่าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 NodeMCU สามารถคงสถานะการเชื่อมต่อและรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ได้อย่างเสถียรต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมงโดยไม่มีปัญหาการสูญเสียข้อมูล และสามารถแสดงผลบน Web Dashboard รวมถึงโมบายแอปพลิเคชันได้ทันทีแบบเรียลไทม์ ลักษณะการทำงานดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาซอฟต์แวร์สมาร์ตมิเตอร์ของสุรัติ พัฒนา (2564) ที่ระบุว่าการส่งข้อมูลการใช้พลังงานผ่านระบบดิจิทัลอย่างต่อเนื่องช่วยให้ผู้บริโภคเข้าถึงข้อมูลพฤติกรรมการผลิตพลังงานได้อย่างเป็นปัจจุบัน นอกจากนี้ การทำงานแบบสองทาง (Two-way Communication) ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสั่งการเปิด-ปิดโหลดไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโมดูลรีเลย์บนแอปพลิเคชัน Solar ได้โดยไม่มีอาการหน่วง ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อัตภาพ มณีเติม และคณะ (2566) ที่ยืนยันว่าเทคโนโลยี IoT เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการยกระดับระบบตรวจวัดและบริหารจัดการพลังงานระยะไกล

3) ด้านความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ในส่วนขีดความสามารถด้าน Output พบว่าระบบสามารถบริหารจัดการพลังงานสะสมจากแบตเตอรี่ขนาด 12V 5Ah (ความจุพลังงาน 60 Wh) เพื่อจ่ายไฟให้แก่โหลดไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กได้อย่างสัมพันธ์กัน โดยจ่ายไฟให้หลอดไฟ LED 5 วัตต์ ได้นาน 12 ชั่วโมง และพัดลมขนาดเล็ก 10 วัตต์ ได้นาน 6 ชั่วโมงตามทฤษฎีเมื่อประจุเต็มประจุ ซึ่งส่งผลให้ผลการประเมินความพึงพอใจโดยรวมของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คน อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 4.12, S.D. = 0.65) โดยมีคะแนนด้านความสะดวกในการใช้งานสูงที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.16) ซึ่งช่วยลดเวลาและความยุ่งยากในการที่ผู้ใช้งานจะต้องเดินทางไปตรวจสอบหน้างานด้วยตนเอง ประเด็นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ รพิพรรณี วรรณเพชร และคณะ (2567) ที่ระบุว่าความสะดวกสบายในระบบติดตามผลและกลไกการบริหารจัดการพลังงานที่เป็นระบบ เป็นปัจจัยเชิงบวกที่สำคัญที่สุดต่อการยอมรับและเลือกใช้เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนในระดับครัวเรือนและวิสาหกิจชุมชนอย่างยั่งยืน

5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนา

จากผลการดำเนินโครงการและข้อจำกัดที่พบในการทดสอบระบบตรวจวัดพลังงานแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียลไทม์ คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้

1) ด้านการพัฒนาและขยายขีดความสามารถของฮาร์ดแวร์ (Hardware Scaling & Accuracy) หากต้องการนำระบบต้นแบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (เช่น ระดับอาคารหรือวิสาหกิจขนาดกลาง) ควรเปลี่ยนไปใช้เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสหรือแกนร่วม (Current Transformer : CT Sensor) ที่รองรับระดับกระแสไฟฟ้าได้สูงถึงหลักหลายสิบหรือหลายร้อยแอมแปร์ ควบคู่กับการเลือกใช้เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่มีวงจรชดเชยสัญญาณรบกวนในตัว (Noise Compensation) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดค่าความคลาดเคลื่อนทางไฟฟ้าฝั่งอนาล็อกให้น้อยกว่า ±5%

2) ด้านการเพิ่มระบบบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์แนวโน้มเชิงลึก (Data Logging & Analytics): ควรพัฒนาโมดูลการจัดเก็บข้อมูลออนไลน์ลงสู่ระบบฐานข้อมูลระยะยาว (Historical Data Logging) บนคลาวด์เซิร์ฟเวอร์อย่างเป็นระบบ เพื่อนำข้อมูลกำลังไฟฟ้าผลิตสะสมรายวัน รายเดือน และรายปี มาประมวลผลการจัดทำรูปแบบสถิติเชิง

กราฟที่สมบูรณ์บน Web Dashboard ซึ่งจะช่วยสนับสนุนให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ และนำข้อมูลไปประกอบการตัดสินใจวางแผนบริหารจัดการโหลดไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3) ด้านการเพิ่มระบบควบคุมระยะไกลและการแจ้งเตือนอัจฉริยะ (Advanced Controls & Alerts) ควรยกระดับฟังก์ชันการทำงานของแอปพลิเคชัน Solar โดยการติดตั้งระบบแจ้งเตือนภัยแบบทันที (Push Notification) ไปยังอุปกรณ์เคลื่อนที่ของผู้ใช้เมื่อเกิดเหตุการณ์วิกฤต เช่น สภาวะแรงดันไฟฟ้าผิดปกติจากการลัดวงจร หรือสภาวะแผงโซลาร์เซลล์ไม่ผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงสูง ควบคู่กับการต่อยอดระบบควบคุม (Active Control) ให้สามารถสั่งตัดต่อโหลดและบริหารจัดการพลังงานคงเหลือในแบตเตอรี่โดยอัตโนมัติ (Automated Load Shedding) เพื่อป้องกันความเสียหายแก่ระบบกักเก็บพลังงาน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2566). แผนพลังงานชาติ (National Energy Plan). https://pvstatus.dede.go.th/th/section_3-1.php

[2] ปพน งามประเสริฐ, และคณะ. (2563). การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย. วารสารระดับชาติ, 14(2), บทความที่ 12.

[3] วรภัทร แดงขวัญทอง, และคณะ. (2568). การพัฒนาระบบมาตรอัจฉริยะสำหรับตรวจวัดการใช้งานพลังงานไฟฟ้าในอาคารด้วยเทคโนโลยีไอโอที. วารสารคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์, 3(2), 230–243.

[4] สุรัติ พัฒนา. (2564). การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจวัดกำลังไฟฟ้าแบบเรียลไทม์บนพื้นฐานแนวคิดสมาร์ทมิเตอร์ (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] DS พลังงานใหม่. (2565). ต้นทุนการผลิตพลังงานทดแทนในปี 2021. https://th.dsisolar.com/info/renewable-power-generation-costs-in-72975448.html

[6] อัตภาพ มณีเติม, และ ศิริพงษ์ แดงฉ่ำ. (2566). การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดแสง อุณหภูมิ และความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) สำหรับแปลงผักยกโต๊ะ. วารสารวิชาการ, 20(1), 1–18.

[7] รพิพรรณี วรรณเพชร, นัทธ์หทัย ชิ้นฟัก, และ ปรารถนา ลิ้มโยธิน. (2567). การตัดสินใจเลือกใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) ของสถานประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อมในจังหวัดสงขลา. Journal of Roi Kaensarn Academi, 9(7), 401–413.

[8] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 (PDP 2018). คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ.

[9] สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ. (2567). แอบส่อง!! ต้นทุนพลังงานสีเขียวที่ลดลงอย่างรวดเร็วใน 10 ปีที่ผ่านมา. https://www.ohesdc.org/post

[10] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2559). อวสานโลกสวย เชื้อเพลิงฟอสซิลตัวการสำคัญทำโลกร้อนแล้งหนัก. https://www.tgo.or.th/2023/index.php/th/post

[11] Appomax. (2566). Energy monitoring. https://www.appomax.co/blog/industrial-applications-13/energy-monitoring-31

การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับขดลวดทองแดงวงกลมหลายขนาด 13 ชั้น

Gain Enhancement of a Conical Horn Antenna Using Thirteen-Layer Circular Copper Coil Structures

ศรันย์ คัมภีร์ภัทร[1,*], วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ[1], ธนาฒน์ สุกนวล[1], ไมตรี ธรรมมา[1], นิกร แก้วแพรก[3], ธวัชชัย จารุวงศ์วิทยา[2], อภิเดช บุญเจือ[2], สัญชัย รำเพยพัด[2] การัณย์ หอมชาติ[4] ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์[5] จริญญา หาญกุล[2] และ ชญาณี ศิริบุรม[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[2] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[3] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย
[5] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี
321 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพทสตรี ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย
*ผู้ติดต่อ: E-mail saran.ka@rmuti.ac.th, 096-954-5154, 044-233-000 ต่อ 3124

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้อธิบายการนำเสนอการออกแบบและจัดวางตำแหน่งของโครงสร้างขดลวดทองแดงวงกลมหลายขนาดที่เหมาะสมจำนวน 13 ชั้น ซึ่งนำไปวางด้านในของสายอากาศปากแตรรูปกรวยสำหรับเป็นช่วยผลักดันลำคลื่นให้แก่สายอากาศเพื่อให้ลำคลื่นนั้นพุ่งออกไปด้านหน้ามากยิ่งขึ้น ช่วยลดลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) และลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสายอากาศมีการแมตช์ของสายอากาศที่ดีขึ้น และมีอัตราขยายที่สูงขึ้นถึง 26.9 dB ซึ่งได้เพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 9.7 dB ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม โดยสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ เรดาร์ระยะสั้นช่วงย่านความถี่ X-band และช่วงความถี่ I-band ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน ITU กำหนดไว้

คำสำคัญ: อัตราขยายสูง, สายอากาศปากแตรรูปกรวย, ขดลวดทองแดงวงกลม, ระบบเรดาร์ระยะสั้น

Abstract

This research presents the design and optimal arrangement of thirteen layers of multi-sized circular copper coil structures, which are installed inside a conical horn antenna. These structures function to enhance the forward propagation of electromagnetic waves, thereby increasing the directivity of the antenna. In addition, they effectively suppress side lobes and back lobes. Simulation results obtained from a commercial electromagnetic software demonstrate that the proposed antenna

achieves improved impedance matching and a significantly higher gain. The maximum gain reaches 26.9 dB, representing an improvement of 9.7 dB compared to a conventional conical horn antenna at the operating frequency of 10 GHz. The proposed design can be applied to short-range radar systems operating in the X-band and I-band frequency ranges, in accordance with IEEE and ITU standards.

Keywords: High Gain, Conical Horn Antenna, Circular Copper Coil, Short-Range Radar System.

1. บทนำ

สายอากาศปากแตรรูปกรวย (Conical Horn Antenna) จัดอยู่ในกลุ่มสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Antenna) ซึ่งมีลักษณะการแผ่กระจายคลื่นออกไปในทิศทางด้านหน้าของอะเพอร์เจอร์ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่านออกทางช่องเปิดของสายอากาศ ส่งผลทำให้สายอากาศประเภทนี้มีอัตราขยาย (Gain) สูง และโดยทั่วไปมีความสัมพันธ์แปรผันตามกำลังสองของความถี่ นอกจากนี้ยังมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ต่ำ และสามารถรองรับแถบความถี่กว้าง (Wide Bandwidth) อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน จึงสามารถออกแบบและสร้างได้โดยง่าย

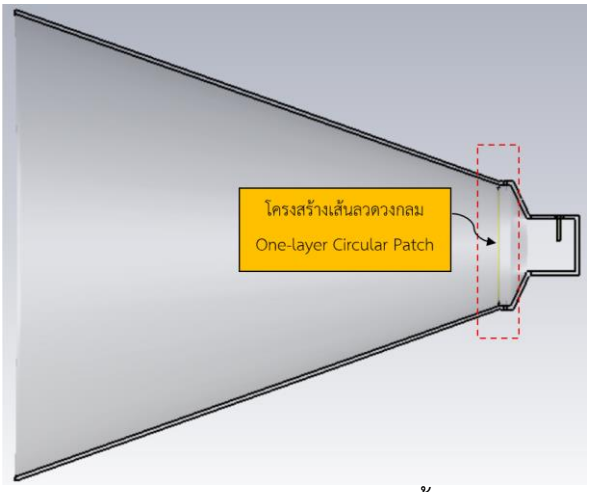
ทั้งนี้ สมรรถนะของสายอากาศปากแตรรูปกรวยในด้านความสามารถในการเจาะจงทิศทางของการแผ่กระจายกำลังงาน (Directivity) สามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นได้ผ่านการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม อีกทั้งค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศปากแตรยังขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของตัวป้อน (Feeder) ซึ่งทำให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]-[2] จากคุณลักษณะเด่นดังกล่าวทำให้สายอากาศปากแตรได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง บางงานวิจัยได้มีการนำเอาวัสดุมาวางด้านหน้าสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อเพิ่มอัตราขยายแต่ทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ยากต่อการใช้งาน [3]-[5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยเริ่มจากการศึกษาสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม (Conventional Conical Horn Antenna) ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz จากนั้นได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างเส้นลวดวงกลมหลายชั้นจำนวน 13 ชั้น (Thirteen-layer Circular Patch Structure) โดยจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับรูปแบบการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศต้นแบบ [6]–[11] โครงสร้างดังกล่าวถูกติดตั้งภายในปากแตรเพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสริมการรวมลำคลื่นให้มีการพุ่งไปในทิศทางด้านหน้ามากยิ่งขึ้น [12]–[15] จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถให้ค่าอัตราขยายสูงสุด 26.9 dB และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 9.7 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรแบบดั้งเดิม โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลักของปากแตร นอกจากนี้โครงสร้างที่ออกแบบยังมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และสะดวกต่อการติดตั้งใช้งาน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ระยะสั้นในย่านความถี่ X-band (8–12 GHz) ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 2.5–3.75 เซนติเมตร และย่านความถี่ I-band (8–10 GHz) โดยผลการออกแบบมีความสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE และ ITU ตามลำดับ

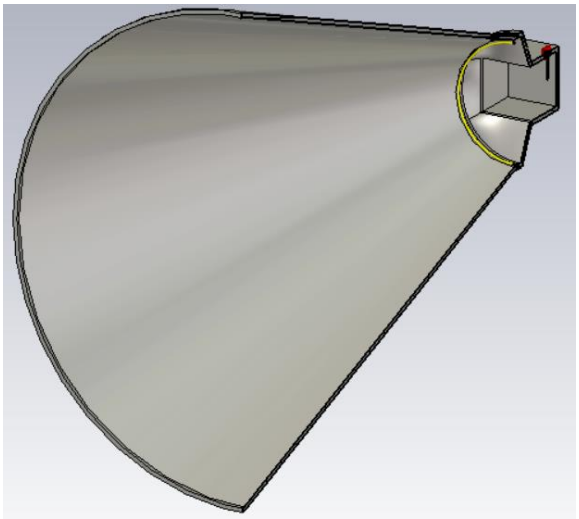
2. การออกแบบสายอากาศ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อศึกษาตำแหน่งการวางที่เหมาะสมและรูปแบบของการแผ่กระจายกำลังงาน โดยแบบจำลองสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม และโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรกมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

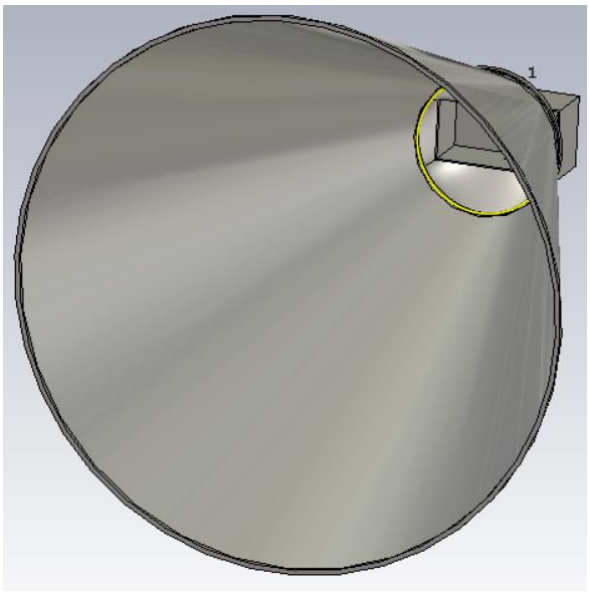
ของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้สายอากาศมีขนาดที่กะทัดรัด น้ำหนักเบา แต่มีอัตราขยายที่สูง แสดงดังรูปที่ 1 เป็นโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรกที่นำไปวางด้านในสายอากาศปากแตรรูปกรวย จากการจำลองผลผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้พารามิเตอร์ที่กำหนดเพื่อออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพให้เหมาะสมที่สุดจะมี r_1 = 14.44 mm รูปที่ 2 แสดงผลการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} และรูปที่ 3 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรกที่ติดกับชุดป้อนกำลัง โดยเป็นลักษณะการบีบลำคลื่นหลักโครงสร้างเส้นลวดวงกลมจะเพื่อช่วยในการหักล้างโหลบด้านข้างให้ลดลงเพื่อไปเสริมโหลบหลัก



(ก)โครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก

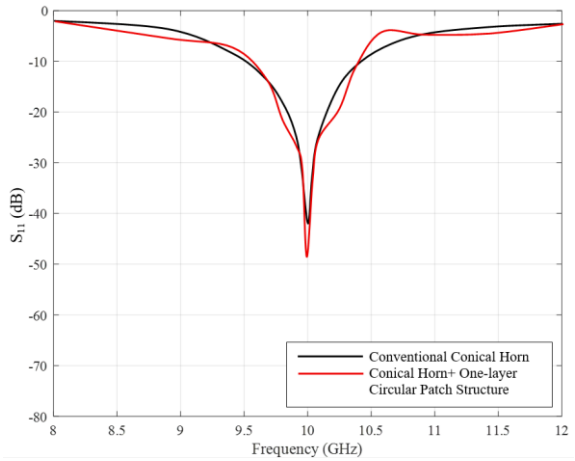


(ข)ภาพตัดขวางโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก

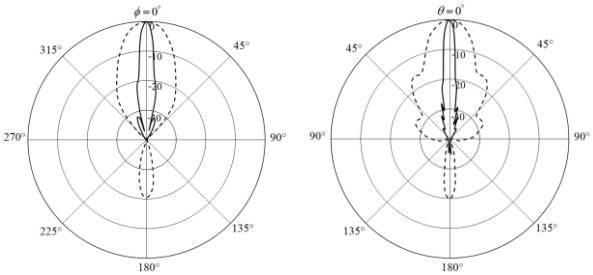


(ค)ภาพรวมโครงสร้างเส้นลวดวงกลมกับปากแตรสายอากาศรูปกรวย

รูปที่ 1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก



รูปที่ 2 ค่า S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก

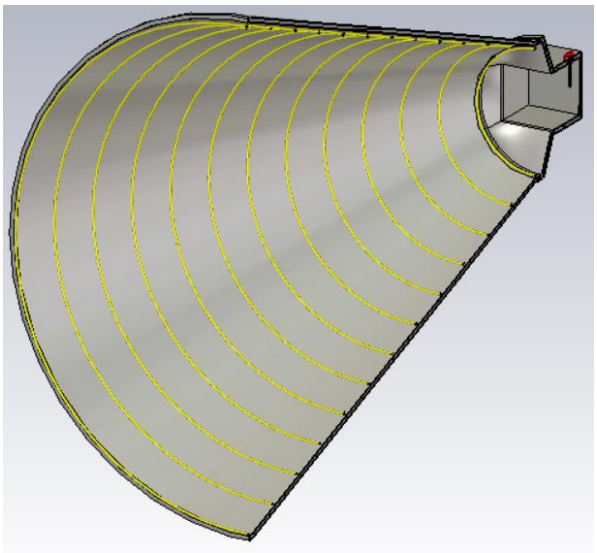


ระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก

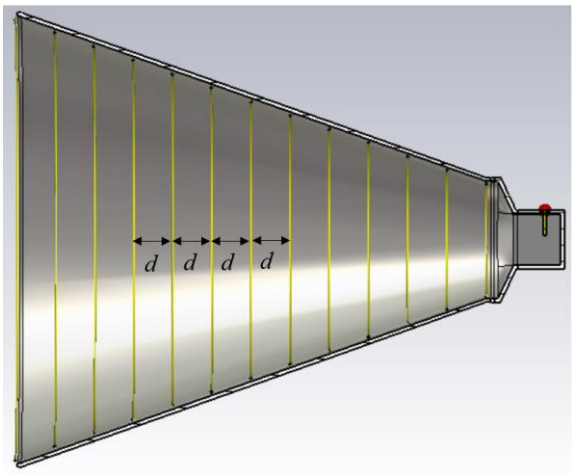


รูปที่ 3 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก

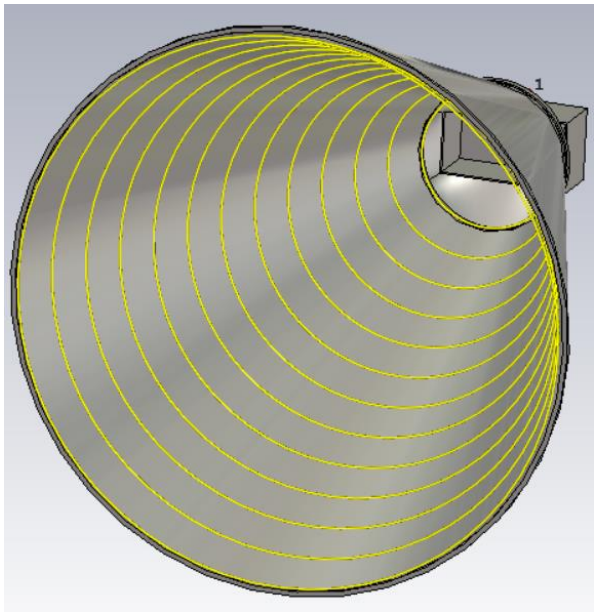
เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมที่สุดให้กับสายอากาศซึ่งจะช่วยส่งผลให้ปีบลำคลื่นรอบตัวของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมเข้ามาที่ลำคลื่นหลัก ทำให้ลำคลื่นพุ่งไปด้านหน้าได้เพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้น จากการจำลองผลสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป พบได้ว่ามีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจาก 17.2 dB เป็น 19.15 dB ซึ่งจากการจำลองพบว่าโครงสร้างเส้นลวดวงกลมนั้นสามารถเพิ่มเรื่องอัตราขยายได้ จากนั้นได้นำโครงสร้างเส้นลวดวงกลมมาวางถัดออกมาจากชั้นที่หนึ่งจำนวน 13 ชั้น ให้เหมาะสมที่สุดโดยในแต่ละชั้นจะมีพารามิเตอร์ดังนี้ r_1 = 14.44 mm, r_2 = 18 mm, r_3 = 21.5 mm, r_4 = 25 mm, r_5 = 28.5 mm r_6 = 32 mm, r_7 = 35.5 mm, r_8 = 39 mm, r_9 = 42.5 mm, r_{10} = 46 mm, r_{11} = 49.5 mm, r_{12} = 53 mm, r_{13} = 56.5 mm และมีระยะห่างระหว่างโครงสร้างเส้นลวดวงกลมมีค่าเท่ากับ d = 10 mm ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เป็นระยะที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ของสายอากาศได้สูงที่สุด ทำให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงถึง 26.9 dB ซึ่งมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 9.7 dB เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม จะเห็นได้ว่าสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น เพียงแค่เพิ่มโครงสร้างเส้นลวดวงกลมจำนวน 13 ชั้นที่เหมาะสม โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศปากแตรแต่อย่างใด



(ก) จำนวนโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น

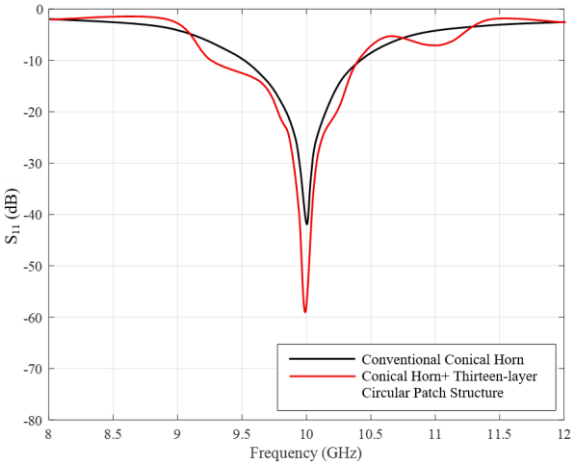


(ข) ด้านข้างของสายอากาศแสดงถึงโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น และตำแหน่งการวางที่เหมาะสม

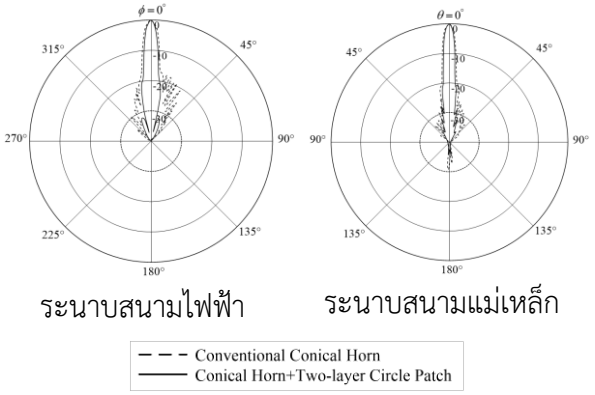


(ค) โครงสร้างโดยรวม

รูปที่ 4 สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น



รูปที่ 5 ค่า S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น



รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น

ตารางที่ 1: ผลจากการจำลองผลระบบสายอากาศ

สายอากาศปากแตร	อัตราขยาย (dB)	SLL (dB) E-H-plane	HPBW EL:AZ
ปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิม	17.2	-11.1 / -13.9	21.0 : 23.3
สายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลมชั้นแรก	19.15	-15.4 / -17.1	16.2 : 17.3

สายอากาศปากแตรรูปกรวยร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น	26.9	-19.1 / -19.8	8.9 : 9.2

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทำให้ได้สายอากาศรูปกรวยต้นแบบร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น รูปที่ 4 โดยโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น โดยแต่ละชั้นนั้นมีโครงสร้างเส้นลวดวงกลมวางไว้ ส่งผลให้ระบบสายอากาศมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 5 และ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบตามลำดับ และได้สรุปผลการจำลองเปรียบเทียบอัตราขยาย ระดับโหลบข้าง และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ของสายอากาศปากแตรดังตารางที่ 1

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษา ออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบดั้งเดิมร่วมกับโครงสร้างเส้นลวดวงกลม 13 ชั้น ซึ่งนำไปวางด้านในของสายอากาศปากแตรรูปกรวยสำหรับเป็นวงจรเรโซแนนซ์ให้แก่สายอากาศจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าสายอากาศมีการแมตช์ของสายอากาศที่ดีขึ้น และมีอัตราขยายที่สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศโดยรวมของสายอากาศดีขึ้น โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศส่งผลให้ได้ระบบสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา ง่ายในการติดตั้งและการใช้งาน ที่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเรดาร์ช่วงความถี่ X และ I band ตามมาตรฐาน IEEE และ ITU ตามลำดับ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และหัวหน้าสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ได้อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ในการจำลองผล ตลอดจนต้องขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลในการทำงานวิจัย ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ ส่งผลให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Love A. W., (1976) Electromagnetic horn antennas, IEEE Press, New York, 1976.

[2] Constantine A. B., Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken: New Jersey, 2005.

[3] Wongsan R. and Khamsalee P. (2019). “Hybrid Metamaterial Structure for Asymmetric Horn of Secondary Radar System.” in *2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Mar. 06–08, 2019.

[4] Duangtang P., Mesawad P., and Wongsan R. (2016). “Gain Improvement of Conical Horn Antennas by Adding Wire Medium Structure.” in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information*

Technology (ECTI-CON), Jun. 28–Jul. 01, 2016.

[5] Duangtang P. and Wongsan R. (2018). "Wire Medium Structure for Gain Enhancement of Conical Horn Antenna." in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Mar. 07–09, 2018.

[6] Yang F. and Rahmat-Samii Y. (2009). Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

[7] S. Kampeephat, P. Kamphikul, and R. Wongsan. (2017). "Gain Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna with Additional Two-Layer Wire Medium Structure." The 39th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Singapore, November 2017.

[8] Kampeephat S., Krachodnok P., and Wongsan R. (2014). "Efficiency Improvement for Conventional Rectangular Horn Antenna by Using EBG Technique," World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 1009-1014, 2014.

[9] Sarikha W., Krachodnok P. and Wongsan R. (2014). "Exciting technique for MSA array by using single patch with surrounded metallic plate." 11th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), May 2014.

[10] Kampeephat S., Todsungnoen S., Kamphikul P. and Sarikha W. (2021). "A Study of Impedance Bandwidth Improvement of Printed Dipole Antenna for DTV." The 18th International Conference on Electrical Engineering /Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, pp. 341-344, May 2021.

[11] Pimpol S. and Wongsan R. (2014). "Band - Notched Printed Dipole Antenna with EBG Reflector." 11th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI-CON-2014), 17 July 2014.

[12] Kamphikul P., Kampeephat S., and Wongsan R. (2019). "Efficiency Improvement of Patch Antenna with Metamaterial Technique for Modern Wireless Communication Applications", in Proc. of the 2019 Progress in

Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy, June 2019.

[13]Wongsan R., Duangtang P. and Mesawad P. (2015). “Dimension reduction of conical horn antennas by adding structure of metamaterial.” IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), Bandung, pp. 214-217, 2015.

[14]Ramadhani A., Umaisaroh U., Firdausi A., Alaydrus M. (2021). “Design of Cross and Square Slot with Beamformingfor Microstrip Reflectarray Antenna at 28 GHz.” 17th International Conference on Quality in Research (QIR), International Symposium on Electrical and Computer Engineering, , pp. 182-186, 2021.

[15]Wongsan R. and Khamsalee P. (2019). “Hybrid Metamaterial Structure for Asymmetric Horn of Secondary Radar System.” The 2019 International Electrical Engineering Congress (iEECON2019), 2019.

ESTACON 2026 | 17th

ระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

Development of an IoT-Based Ecosystem for Water Quality Monitoring in Industrial Factory

ปัญญา หันตุลา[1*], สาวิตรี ประภาการ[2] และ ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ[2]

[1] สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[2] สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตรอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: panya.ha@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT Eco System) สำหรับตรวจวัดและบันทึกค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทดแทนวิธีการตรวจวัดแบบเดิมที่อาศัยแรงงานคนเป็นหลักซึ่งมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ ความต่อเนื่อง การจัดเก็บข้อมูลและการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลัง ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ pH และ TDS สามารถวัดคุณภาพน้ำและส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยัง MQTT Broker ส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ (Server) ผ่าน PiTunnel โดยผ่านการจัดการข้อมูลด้วย Node-RED ก่อนบันทึกลงฐานข้อมูล InfluxDB และยังสามารถแสดงผลผ่านแดชบอร์ด Grafana แบบเรียลไทม์ได้ ระบบสามารถส่งข้อมูลได้ต่อเนื่องทุกๆ 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์ pH และ TDS จากการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ (Voltage) กับค่า pH และ TDS จากผลการทดสอบพบว่าเซนเซอร์ pH มีความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 98.64 และเซนเซอร์ TDS มีความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 97.48

คำสำคัญ: อินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง, คุณภาพน้ำ, pH, TDS, ESP32

Abstract

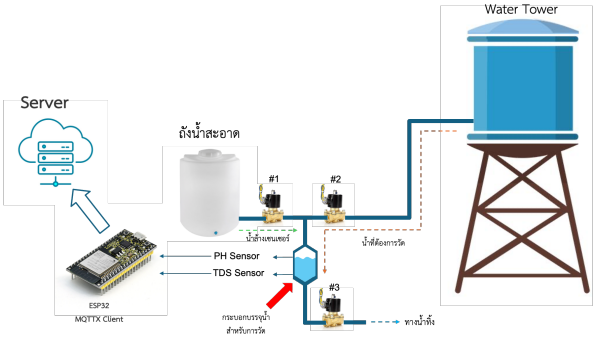
This research presents the design and development of an Internet of Things (IoT) ecosystem for measuring and recording the potential of hydrogen (pH) and Total Dissolved Solids (TDS) values of water used in industrial factory. This system is used to replace conventional measurement methods which are limited in terms of accuracy, continuity, data storage, and retrospective traceability. The developed system consists of an ESP32 microcontroller connected to pH and TDS sensors capable of measuring water quality and transmitting data via the MQTT protocol to an MQTT Broker gateway through PiTunnel, which then forwards the data to Node-RED before storing it in the InfluxDB database (Local Server). The system will displays results in real time via a Grafana dashboard which is capable of transmitting data continuously intervals every hour. In this study, the pH and TDS sensors were calibrated by deriving equations describing the relationship between the voltage readings obtained from the sensors and the corresponding pH and TDS values. The results show that the pH sensor achieved an average accuracy of 98.64%, while the TDS sensor achieved an average accuracy of 97.48%.

Keywords: Internet of Things, Water Quality Monitoring, pH, TDS, ESP32.

1. บทนำ

กลุ่มอุตสาหกรรมตามมาตรฐานและความปลอดภัยของอาหารมีข้อกำหนดให้ต้องมีการตรวจวัดค่า pH และ TDS ของน้ำ พร้อมบันทึกและสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ตามมาตรฐาน GMP (Good Manufacturing Practice) แต่เนื่องด้วยในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กหลายแห่งมีวิธีการวัดค่า pH และ TDS ของน้ำโดยให้พนักงานใช้เครื่องมือวัดแบบมือถือที่มีใช้งานทั่วไปพร้อมบันทึกข้อมูลลงในกระดาษแบบฟอร์มบันทึกผล ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าที่ไม่แม่นยำ การบันทึกข้อมูลผิดพลาด ข้อมูลสูญหายหรือไม่ชัดเจน รวมถึงความไม่ต่อเนื่องในการตรวจวัดและบันทึกข้อมูล อีกทั้งยังเพิ่มภาระงานของพนักงานและมักเกิดปัญหาการจัดเก็บเอกสารที่อาจสูญหายหรือเข้าถึงได้ยากเมื่อต้องตรวจสอบย้อนหลัง

งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบตรวจวัดค่า pH และ TDS ที่ทำงานบนเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ที่สามารถวัดค่าอัตโนมัติ บันทึกข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูลดิจิทัลแบบเรียลไทม์ และแสดงผลผ่าน Dashboard ด้วย Web Application เพื่อลดการเก็บข้อมูลโดยใช้แรงงานคน สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 ชั่วโมง รองรับการสืบค้นข้อมูลเมื่อต้องมีการตรวจประเมิน GMP ที่ต้องการเอกสารอ้างอิงที่ชัดเจนและตรวจสอบย้อนหลังได้ทันที โดยงานวิจัยนี้แบ่งกระบวนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดค่า pH และ TDS ของน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งสามารถวัดคุณภาพน้ำก่อนเข้าระบบกรองและหลังผ่านระบบกรองด้วยการใช้เซนเซอร์ชุดเดียวกัน ผ่านการควบคุมการไหลของน้ำตัวอย่างทั้ง 2 จุดด้วยโซลินอยด์วาล์วไฟฟ้า และ (2) การออกแบบระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อจัดเก็บและแสดงผลค่าพารามิเตอร์น้ำผ่าน Web Application



รูปที่ 1 แนวคิดการวิจัย

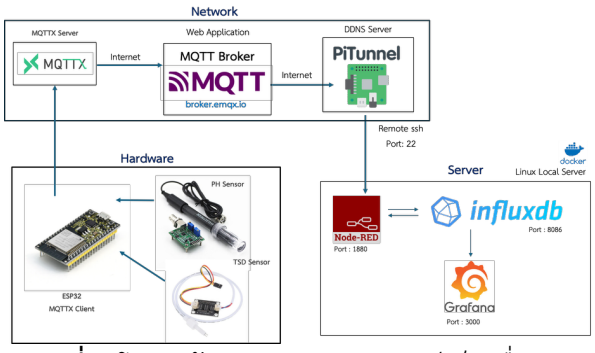
2. แนวคิดและการออกแบบ

การตรวจวัดน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมผ่านระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งระบบที่พัฒนาขึ้นใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ควบคุมเซนเซอร์ pH และ TDS อ่านค่าคุณภาพน้ำและส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย MQTT ไปยังเกตเวย์ จากนั้นเข้าสู่การประมวลผลด้วย Node-RED และบันทึกลงฐานข้อมูล InfluxDB ก่อนแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard เพื่อให้สามารถตรวจวัดและบันทึกข้อมูลคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 3 ส่วนการทำงาน ได้แก่ 1. ส่วนฮาร์ดแวร์ (Hardware Layer) 2. ส่วนเครือข่าย (Network Layer) และ 3. ส่วนการจัดเก็บข้อมูลและการแสดงผล (Database and Dashboard Layer)

2.1 ระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

เซนเซอร์วัดค่า pH และ TDS ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 วัดคุณภาพน้ำก่อนเข้า

ระบบกรองและออกจากระบบกรอง และส่งข้อมูลแบบ Time-series ไปยังฐานข้อมูล InfluxDB เพื่อจัดเก็บข้อมูลพร้อมบันทึกเวลา (Timestamp) และนำข้อมูลดังกล่าวมาแสดงผลบน Grafana Dashboard

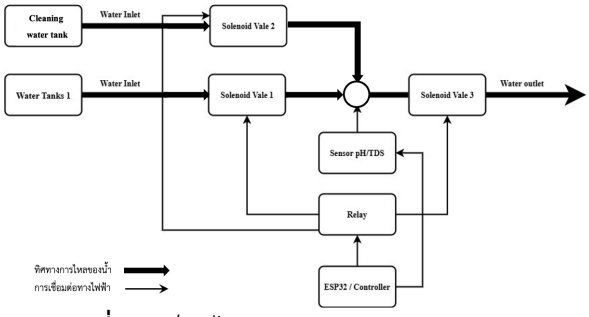


รูปที่ 2 โครงสร้างระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

การส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังเซิร์ฟเวอร์ (Server) ใช้โปรโตคอล MQTT ซึ่งเป็นระบบสื่อสารที่นิยมในงาน IoT โดยที่บอร์ด ESP32 จะส่งข้อมูลขึ้นไปยัง MQTT Broker ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางกระจายข้อมูลไปยังผู้ที่ต้องการใช้งาน ข้อมูลทั้งหมดถูกส่งผ่าน PiTunnel เกตเวย์ ซึ่งเป็น DDNS Server ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลหรือควบคุมระบบจากระยะไกลได้ เมื่อข้อมูลส่งมาถึงเซิร์ฟเวอร์ จะถูกจัดการด้วย Node-RED ผ่านพอร์ต (Port) 1880 ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของข้อมูล (data flow) และจัดรูปแบบให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน ก่อนบันทึกลงใน InfluxDB ซึ่งเป็นฐานข้อมูลแบบ Time-Series เหมาะกับการจัดเก็บข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากนั้นใช้ Grafana Platform ในการสร้างแดชบอร์ดและกราฟให้ผู้ใช้งานดูข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ โดยระบบทั้งหมดอยู่ในเครื่องแม่ข่ายขนาดเล็ก (mini PC) ที่มีระบบปฏิบัติการ Linux Local Server ผ่านการจัดการสภาพแวดล้อมด้วย Docker ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เอาไว้ใช้ในการจัดการระบบช่วยให้ Node-RED และ InfluxDB ทำงานในสภาพแวดล้อมที่แยกเป็นอิสระ มีขั้นตอนการติดตั้ง ดูแล และอัปเดตระบบได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถขยายระบบให้รองรับข้อมูลมากขึ้นได้ในอนาคต

2.2 ระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบเวลาจริงอัตโนมัติ

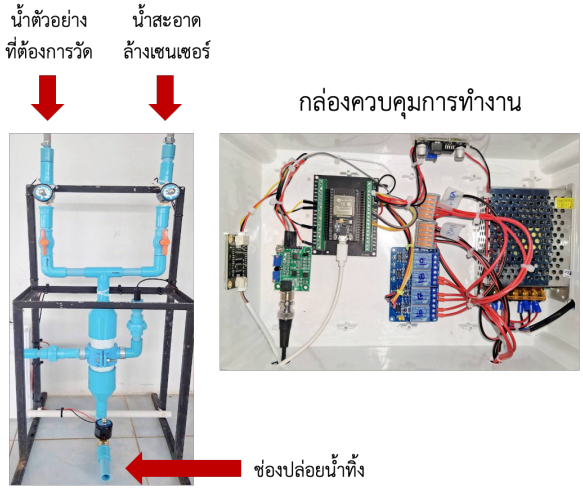
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมแบบเวลาจริงอย่างอัตโนมัติ โดยออกแบบให้มีระบบท่อน้ำเพื่อนำน้ำตัวอย่าง (Sampling) ที่ต้องการวัดเข้ามาในระบบ จากนั้นระบบจะทำการวัดและส่งค่าขึ้นฐานข้อมูลผ่านระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบเวลาจริง (Real-time)

ระบบท่อที่ออกแบบแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3 เป็นระบบท่อสองทาง ด้านหนึ่งเป็นระบบท่อสำหรับการรับน้ำตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัด ส่วนอีกทางหนึ่งเป็นระบบท่อสำหรับน้ำสะอาดในการล้างอุปกรณ์ภายในรวมถึงการล้างเซนเซอร์เพื่อรอการวัดน้ำในรอบต่อไป ระบบมีการเชื่อมต่อท่อรวมกันเพื่อให้

กระแสน้ำไหลมารวมกันตรงกลาง ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำด้วยวาล์วไฟฟ้าทำให้สามารถควบคุมการจ่ายน้ำและการระบายน้ำได้อย่างแม่นยำ หลังจากการตรวจวัดเสร็จสิ้น ระบบจะทำการระบายน้ำตัวอย่างทิ้ง จากนั้นท่อน้ำล้างจะทำงานเพื่อจ่ายน้ำล้างภายในชุดอุปกรณ์ เพื่อทำความสะอาดและป้องกันการตกค้างของสารละลายในรอบการวัดถัดไป



รูปที่ 4 ตัวอย่างวงจรชุดอุปกรณ์ควบคุมและวัดคุณภาพน้ำ

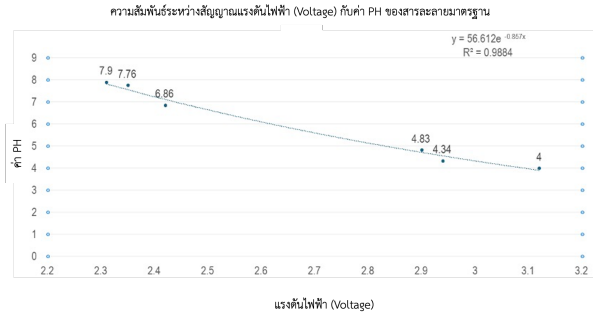
3. การสอบเทียบเซนเซอร์ (Calibration)

เพื่อให้ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปอ้างอิงในการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐาน GMP ได้ ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบ (Calibration) เซนเซอร์ pH และ TDS ที่ใช้ในระบบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีจำหน่ายใช้งานทั่วไปในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์กับค่า pH ของสารละลายมาตรฐานที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น กราฟความสัมพันธ์แบบ Exponential Curve ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ (Voltage) กับค่า pH ของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน (reference pH) เมื่อให้แกน X (แนวนอน) แทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ (Volt) และแกน Y (แนวตั้ง) แทนค่า pH ของสารมาตรฐาน

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ pH

จากการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์กับค่า pH ของสารละลายมาตรฐานจำนวน 6 ค่า ดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับค่า pH ของสารละลายมาตรฐาน

จากรูปที่ 5 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่า pH มาตรฐาน โดยเส้นกราฟฟิต (Fitted Curve) แสดงความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลได้อย่างสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่า pH มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากราฟสอบเทียบดังกล่าวสามารถนำไปใช้แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ให้เป็นค่า pH ได้ ซึ่งสามารถนำมาสร้างสมการคำนวณหาค่า pH ได้ดังนี้

$$pH = 56.612e^{-0.857\,V} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ pH คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต้องการทราบค่า และ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ PH โดยทดสอบวัดค่าน้ำตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำบาดาล น้ำยาปรับผ้านุ่ม และน้ำด่าง เปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน ผลการทดสอบวัดค่าเซนเซอร์ pH แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบวัดค่าเซนเซอร์ pH

ตัวอย่างน้ำ	pH Sensor	เครื่องมือวัดมาตรฐาน	ความถูกต้อง (%)
น้ำบาดาล	7.2	7	97.14%
น้ำยาปรับผ้านุ่ม	6.8	6.8	100.00%
น้ำด่าง	8.3	8.2	98.78%

4.2 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ TDS

การสอบเทียบเซนเซอร์ TDS ทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีการเดียวกันกับเซนเซอร์ pH คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์กับค่า TDS เปรียบเทียบกับค่า TDS ที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีจำหน่ายใช้งานทั่วไปในปัจจุบัน โดยผลทดสอบความถูกต้อง ผลการทดสอบวัดค่าเซนเซอร์ TDS แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบวัดค่าเซนเซอร์ TDS

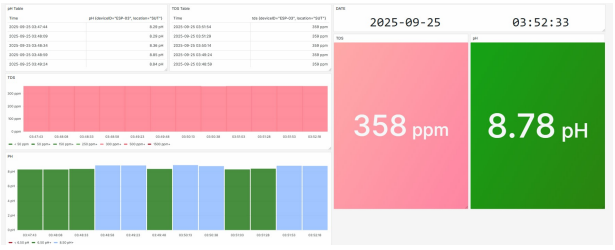
ตัวอย่างน้ำ	TDS Sensor (ppm)	เครื่องมือวัดมาตรฐาน (ppm)	ความถูกต้อง (%)
น้ำบาดาล	310	300	96.67%
น้ำยาปรับผ้านุ่ม	450	440	97.73%
น้ำด่าง	520	510	98.04%

จากผลการทดสอบพบว่าค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ TDS มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.33 เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงจากเครื่องมือมาตรฐานในทุกตัวอย่างน้ำ โดยมีความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 97.48 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดค่า TDS ได้มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในการวัดคุณภาพน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม

4.3 ผลการทดสอบระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบเวลาจริงอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบเวลาจริงอัตโนมัติ โดยมีการโปรแกรมให้ทำการวัดค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง ความถี่นี้เพียงพอสำหรับกระบวนการผลิตในโรงงาน เนื่องจากคุณภาพน้ำในระบบกรองของโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งในระบบนี้ยังเพิ่มจำนวนข้อมูลให้มากขึ้น จากเดิมที่พนักงานจะวัดค่าคุณภาพน้ำเพียง 1 ครั้งต่อวันเท่านั้น

จากผลการทดสอบพบว่าระบบทำงานตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ในโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง สามารถส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลของค่าคุณภาพน้ำที่อ่านได้ผ่าน Web Application ด้วย Grafana Dashboard ได้ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงภาพตัวอย่างของ Web Application ที่แสดงค่าพารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำที่วัดได้

5. สรุป

ในบทความนี้นำเสนองานวิจัยการพัฒนาระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT Ecosystem) สำหรับตรวจวัดและบันทึกค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนวิธีการตรวจวัดแบบเดิมที่อาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและบันทึกค่าคุณภาพน้ำได้แบบอัตโนมัติ พร้อมทั้งส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูล InfluxDB และแสดงผลผ่านแดชบอร์ด Grafana แบบเรียลไทม์ ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ pH และ TDS จากการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ (Voltage) กับค่า pH และ TDS พบว่าเซนเซอร์ pH มีความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 98.64 และเซนเซอร์ TDS มีความแม่นยำเฉลี่ยร้อยละ 97.48 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปใช้ในการวัดคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามระบบนิเวศอินเตอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถตอบสนองความต้องการในการวัดและบันทึกข้อมูลคุณภาพน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดภาระงานและความผิดพลาดจากแรงงานคน เพิ่มความน่าเชื่อถือ บันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง และสนับสนุนการตรวจสอบย้อนหลังตามมาตรฐาน GMP ได้อย่างเป็นรูปธรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่จากสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา จนทำให้งานวิจัยบรรลุผลและประสบความสำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Nishan, Rejoan Kobir, et al. "Development of an IoT-based multi-level system for real-time water quality monitoring in industrial wastewater." Discover Water 4.1 (2024): 43.

[2] AlMetwally, Saif Allah H., Mohamed K. Hassan, and Mohamed H. Mourad. "Real time internet of things (IoT) based water quality management system." Procedia CIRP 91 (2020): 478-485.

[3] Wong, Yong Jie, et al. "Toward industrial revolution 4.0: Development, validation, and application of 3D-printed IoT-based water quality monitoring system." Journal of Cleaner Production 324 (2021): 129230.

[4] Khati, Harshit Singh, et al. "IoT-based water quality monitoring system." 2025 IEEE International Conference on Computer, Electronics, Electrical Engineering & their Applications (IC2E3). IEEE, 2025.

[5] Forhad, H. M., et al. "IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs)." Heliyon 10.23 (2024).

[6] Fadel, Ahmed Abbas, and Mohamed Ibrahim Shujaa. "Water quality monitoring system based on IOT platform." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 928. No. 3. IOP Publishing, 2020.

[7] Ajith, Jerom B., R. Manimegalai, and V. Ilayaraja. "An IoT based smart water quality monitoring system using cloud." 2020 International conference on emerging trends in information technology and engineering (ic-ETITE). IEEE, 2020.

การออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซี เพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

Design and Development of a PLC-Controlled Beverage Packaging Waste Sorting Machine to Promote Pre-Disposal Waste Sorting Behavior at Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

ธีรพล ทรัพย์บุญ[1], ณัฐพล บัวคำศรี , ประณต เข็มมณี และ ช่อเพชร จำปี[2,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
96 ถ.ปรีดีพนมยงค์ ต.ประตูชัย อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
96 ถ.ปรีดีพนมยงค์ ต.ประตูชัย อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
*ผู้ติดต่อ: chophet@aru.ac.th, 062-2459993

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซีเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา โดยการทดลองใช้ พีแอลซี ในการควบคุมทั้งหมด มีการแยกประเภทขวดและกระป๋องด้วยเซนเซอร์ ใช้ โฟโต้เซ็นเซอร์ แบบอินฟราเรด ในการแยกขวดพลาสติกและใช้ พร็อกซิมิตี้เซนเซอร์ ในการแยกกระป๋องอลูมิเนียม ในส่วนการใช้ โหลดเซล ในการชั่งน้ำหนักจากขวดถ้าน้ำหนักน้อยกว่า 7 กรัมหรือมากกว่า 30 กรัม เครื่องจะทำการคืนขวด แต่ถ้าน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคืออยู่ในช่วงระหว่าง 7 – 30 กรัมเครื่องจะทำการรับทั้งหมด ขนาดขวดและกระป๋องที่ใช้ทดสอบมีตั้งแต่ 150 - 1500 มิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่า ความแม่นยำในการคัดแยกขวดพลาสติกใส อยู่ที่ร้อยละ 97.14 และความแม่นยำในการคัดแยกกระป๋องอะลูมิเนียม อยู่ที่ร้อยละ 94 ส่วนการแจ้งเตือนในระบบ และการสะสมแต้มเพื่อแลกของ สามารถทำงานได้อย่างปกติ เครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการเปลี่ยนพฤติกรรม บุคลากร และนักศึกษาให้มีความตระหนักรู้ในการแยกขยะการทิ้ง ตลอดจนเปลี่ยนทัศนะคติในการมองว่าการคัดแยกขยะเป็นเรื่องยุ่งยากต่อไป

คำสำคัญ: โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ พฤติกรรมการคัดแยกขยะ ขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม

Abstract

This article presents the design and development of a Programmable Logic Controller (PLC)-based beverage packaging waste sorting machine aimed at promoting waste segregation behavior at Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University. The proposed system employs a PLC as the central controller for coordinating the sorting process. An infrared photoelectric sensor is used to identify

transparent plastic bottles, whereas an inductive proximity sensor is employed to detect aluminum cans. In addition, a load cell is integrated to measure the weight of each container to ensure that only empty beverage containers are accepted. Containers with a measured weight of less than 7 g or greater than 30 g are automatically rejected and returned to the user, while those within the acceptable weight range of 7–30 g are accepted for sorting. The developed system was evaluated using beverage containers with capacities ranging from 150 mL to 1,500 mL.Experimental results demonstrate that the proposed machine achieved a sorting accuracy of 97.14% for transparent polyethylene terephthalate (PET) bottles and 94.00% for aluminum cans. In addition, the user notification and reward point accumulation functions operated reliably throughout the experimental evaluation. The proposed system provides an effective approach for automated beverage container sorting and has the potential to encourage proper waste segregation practices while improving environmental awareness among university students and personnel.

Keywords: Programmable Logic Control, Waste separation behavior, Beverage Packaging Waste

1. บทนำ

ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยในปี 2568 พบว่าปริมาณขยะมูลฝอยมีอยู่ 27.76 ล้านตัน เพิ่มขึ้นมากกว่าปีก่อน ร้อยละ 2 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อดูถึงระบบการจัดการขยะพบว่านำไปใช้ประโยชน์เพียงร้อยละ 38.3 [1] ปัญหาส่วนหนึ่งเกิดจากด้านพฤติกรรมผู้บริโภคที่ยังขาดความตระหนักในการแยกขยะตั้งแต่ต้นทาง การขาดระบบรองรับสำหรับการแยกประเภทขยะในระดับครัวเรือน รวมไปถึงสถานที่จัดการขยะยังมีไม่เพียงพอหรือยังไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ขยะจำนวนมากถูกปะปนและไม่สามารถนำเข้าสู่ระบบรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา มีหน่วยงานการพัฒนามหาวิทยาลัยสีเขียว ที่กำกับดูแลการจัดการขยะอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การมีถังขยะที่แยกประเภทของขยะที่ชัดเจน มีการรณรงค์การนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ แต่ก็ยังประสบปัญหาของด้านพฤติกรรม บุคลากร และนักศึกษายังขาดความตระหนักรู้ในการแยกขยะ ตลอดจนทัศนะคติที่ว่า การคัดแยกขยะเป็นเรื่องยุ่งยาก [2] ส่งผลให้ปริมาณขยะถูกทิ้งปะปนกันมากโดยเฉพาะขยะประเภทพลาสติกและบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม เช่น ขวดพลาสติกใส (PET) และกระป๋องโลหะ ซึ่งเป็นที่นิยมในการบริโภค

ดังนั้นในการแก้ปัญหา ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อปลูกฝังให้บุคลากรและนักศึกษาตระหนักถึงการคัดแยกขยะแต่ละประเภทก่อนทิ้ง โดยปัจจุบันมีนำตู้คัดแยกขยะอัตโนมัติมาช่วยส่งเสริมพฤติกรรมดังกล่าว อาทิเช่น การใช้ระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง(IOT) ร่วมกับบอร์ด ESP32 [3] การใช้กล้อง webcam ประมวลผลใช้บอร์ด Raspberry Pi [4] และการใช้ ระบบรู้จำเชิงลึกประมวลผลใช้บอร์ด Raspberry Pi [5] ซึ่งจากงานวิจัยข้างต้น พบว่า เกิดปัญหาความไวต่อสภาวะแสงและการสะท้อนทำให้คัดแยกวัตถุผิดพลาด ปัญหา

ข้อจำกัดในการจำแนกวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกัน ปัญหาการประมวลผลเมื่อมีวัตถุจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซี ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย

2. ขั้นตอนดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม ได้แก่ ขวดน้ำดื่มพลาสติก และเครื่องดื่มกระป๋องอะลูมิเนียม ที่มีจำหน่ายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด รูปทรง น้ำหนัก และข้อมูลด้านมูลค่าการรับซื้อของขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม แต่ละประเภท เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์และเงื่อนไขการทำงานของของเครื่อง ดังตารางที่1

ตารางที่1 ข้อมูลของน้ำหนักขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม

ประเภท	ขนาดความจุ (มิลลิลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
ขวด PET ใส	330-1,500	7-19
กระป๋องอะลูมิเนียม	150-330	6-18

จากตารางที่1 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม มีค่าใกล้เคียงกัน จึงต้องใช้อุปกรณ์คัดแยกประเภท ในส่วนการรับซื้อราคาขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม ในปัจจุบันมีราคากลางรับซื้อดังตารางที่2

ตารางที่2 ราคารับซื้อบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม

ประเภท	ราคารับซื้อ(บาท/กก.)
ขวด PET ใส	9
กระป๋องอะลูมิเนียม	65

ที่มา:ข้อมูลราคาจากวงษ์พาณิชย์ เซนเตอร์ จำกัด,30 มิถุนายน 2569

จากตารางที่2 ราคารับซื้อเครื่องดื่มกระป๋องอะลูมิเนียมมีมูลค่าสูงกว่าเนื่องจากการรีไซเคิลสามารถนำกลับมาใช้ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ขวดพลาสติก PET ใส มีกระบวนการที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน และการเสื่อมสภาพของวัสดุหลังการรีไซเคิล

2.1 การออกแบบเครื่อง และระบบคัดแยกขยะ

เครื่องคัดแยกเป็นรูปทรงตู้สี่เหลี่ยมมีความกว้าง 640 มิลลิเมตร ความยาว 740 มิลลิเมตร และความสูง 1,650 มิลลิเมตร โดยโครงสร้างใช้ Aluminum Frame ขนาด 30x30 มิลลิเมตร กับขนาด 20x20 มิลลิเมตร ส่วนผนังตู้จะใช้แผ่น Composite ประกอบเป็นผนังตู้ ดังรูปที่ 1 และเครื่องคัดแยกขยะจริง ดังรูปที่ 2

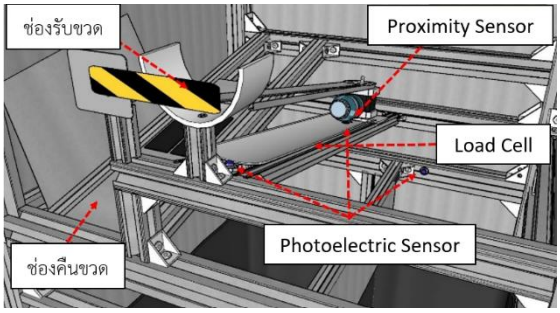


รูปที่ 1 แบบโครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะ



รูปที่ 2 เครื่องคัดแยกขยะจริง

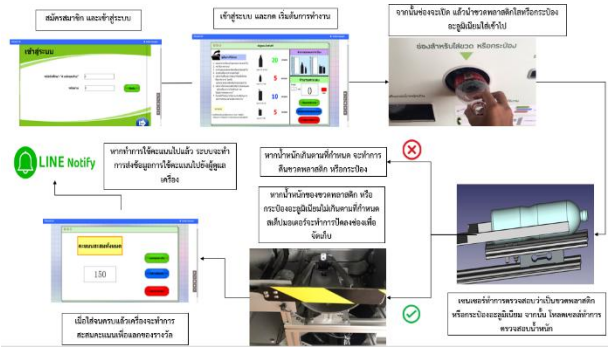
ส่วนภายในระบบคัดแยกขยะจะประกอบด้วย Photoelectric Sensor เป็นตัวตรวจสอบว่ามีวัตถุเข้ามาภายในช่องรับขวดหรือไม่ ถ้ามี Load Cell จะทำการชั่งน้ำหนัก ตามเงื่อนไขถ้าน้ำหนักมากกว่า 30 กรัม จะทำการปัดตกไปช่องคืนขวดในทันที แต่ถ้าน้อยกว่า จะทำการส่งต่อไปให้ Photo Sensor และ Proximity Sensor ตรวจจับว่าเป็นกระป๋องอลูมิเนียมหรือขวดพลาสติก และทำการคัดแยกต่อไป ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบคัดแยกขยะ

2.2 หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกขยะ

ผู้ใช้งานป้อนรหัสสมาชิก หากไม่มี สามารถสแกน QR Code ผู้ใช้นำขยะใส่ช่อง ระบบจะปิดที่กั้น จากนั้นเครื่องจะตรวจจับน้ำหนักกำหนดให้ไม่เกิน 30 กรัม ถ้าเกินกว่าค่าที่กำหนด ระบบส่งวัสดุกลับไปยังช่องคืนวัสดุ พร้อมทั้งแสดงข้อความแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งาน หากวัสดุผ่านแล้วระบบจะทำการคัดแยกประเภท โดยสั่งงานให้ Photo Sensor ตรวจสอบว่าเป็นขวดพลาสติก และ Proximity Sensor ตรวจจับว่าเป็นกระป๋องอลูมิเนียม จากนั้นระบบจะแสดงรายการจำนวนขยะที่คัดแยกบนหน้าจอ และแต้มที่ได้ จากนั้นขยะจะถูกเลียงไปยังช่องจัดเก็บ ถ้าช่องเก็บเต็ม ระบบจะหยุดการรับ และแจ้งเตือนผู้ดูแลระบบต่อไป ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หลักการทำงานเครื่องคัดแยกขยะ

3. ผลการทดลอง

การทดลองใช้ขวดพลาสติกใส PET ขนาดละ10 ขวด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคัดแยกขวดพลาสติกใสชนิด PET

ขนาดขวด	จำนวนขวด		ร้อยละ
	สำเร็จ	ไม่สำเร็จ	
330 ml.	9	1	90
350 ml.	9	1	90
500 ml.	10	0	100
550 ml.	10	0	100
600 ml.	10	0	100
1000 ml.	10	0	100
1500 ml.	10	0	100
รวม	68	2	97.14

จากตาราง 3 การทดลองการคัดแยกขวดพลาสติกใสชนิด PET แต่ละขนาด ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ขวดพลาสติกใสชนิด PET จำนวนทั้งหมด 70 ขวด พบว่าความแม่นยำในการคัดแยก มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 97.14 และมีจำนวนขวดที่คัดแยกสำเร็จจำนวน 68 ขวด และ จำนวนขวดที่คัดแยก ไม่สำเร็จจำนวน 2 ขวด ในส่วนของขวดที่คัดแยกไม่สำเร็จเกิดจากขวดแต่ละยี่ห้อมีเนื้อพลาสติก ไม่เท่ากันเพราะมีน้ำหนักอยู่ที่

4.8 กรัม จึงทำให้น้ำหนักไม่ถึงตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งขวดที่เครื่องจะรับต้องมีน้ำหนักอยู่ที่ 6 กรัมขึ้นไป เครื่องถึงสามารถทำการคัดแยกได้

การทดลองใช้กระป๋องอะลูมิเนียม ขนาดละ10 ขวด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคัดแยกกระป๋องอะลูมิเนียม

ขนาดกระป๋อง	จำนวนขวด		ร้อยละ
	สำเร็จ	ไม่สำเร็จ	
150 ml.	8	2	80
180 ml.	9	1	90
245 ml.	10	0	100
330 ml.	10	0	100
490 ml.	10	0	100
รวม	47	3	94

จากตาราง 4 การทดลองการคัดแยกกระป๋องอะลูมิเนียม แต่ละขนาด ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้กระป๋องเครื่องดื่มอะลูมิเนียม จำนวนทั้งหมด 50 กระป๋อง พบว่าความแม่นยำในการคัดแยก มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 94 และมีจำนวนกระป๋องที่คัดแยกสำเร็จจำนวน 47 กระป๋อง และจำนวนกระป๋องที่คัดแยกไม่สำเร็จจำนวน 3 กระป๋อง ในส่วนของกระป๋องที่คัดแยกไม่สำเร็จเกิดจากกระป๋องแต่ละยี่ห้อมีเนื้อของโลหะอะลูมิเนียมไม่เท่ากันเพราะมีน้ำหนักอยู่ที่ 5.8 กรัม จึงทำให้มีน้ำหนักไม่ถึงตามเกณฑ์ ที่กำหนด ซึ่งกระป๋องที่เครื่องจะรับต้องมีน้ำหนักอยู่ที่ 6 กรัมขึ้นไป เครื่องถึงสามารถทำการคัดแยกได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากการการออกแบบ และพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มควบคุมด้วยพีแอลซีเพื่อส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พบว่า เครื่องมีประสิทธิภาพในการคัดแยกขวดน้ำพลาสติกใส (PET) ถึงร้อยละ 97.14 และการคัดแยกกระป๋องอะลูมิเนียม ถึงร้อยละ94 ตลอดจนสามารถสร้างจิตสำนึกในการคัดแยกขยะก่อนทิ้ง โดยใช้สื่อเทคโนโลยีในการเก็บแต้มจากการนำขวดมารีไซเคิล

5.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน การพัฒนามหาวิทยาลัยสีเขียว ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมตสาหการ คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา สำหรับอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ. (2569). ระบบสารสนเทศด้านการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม. เข้าถึงได้จากhttps://thaimsw.pcd.go.th/report_country.php?year=2568

[2] กนกวรรณ อนุพันธ์ และคณะ. (2568). “ความรู้ทัศนคติและพฤติกรรมการคัดแยกขยะมูลฝอยของนักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ.” วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี 14,3 (กันยายน-ธันวาคม): 38-48.

[3] กฤษณะ จันทรวิจิตร และคณะ. (2568). “เครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ,” เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 จัดโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ณ เฮอริ

เทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง, 28-30 พฤษภาคม.

[4] ไกรสร เรือนแก้ว และคณะ. (2564). “การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับรับซื้อขวดน้ำดื่มใสอัตโนมัติด้วยการใช้เซ็นเซอร์วัดน้ำหนักร่วมกับการประมวลผลภาพและแจ้งผลผ่านไลน์โนติฟาย,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 6,2, (กรกฎาคม-ธันวาคม): 49-55.

[5] Nedjar, I., M’hamedi, M. and Bekkaoui, M. (2024). “Real-Time Solid Waste Sorting Machine Based on Deep Learning.” IJECES 15, 7 (July): 581-589.

การพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี IoT โดยใช้ ESP32 และเซนเซอร์ MQ แบบคู่ร่วมกับการแจ้งเตือนผ่าน LINE แบบเรียลไทม์

Development of an IoT-Based Smart Gas and Smoke Leakage Detection System Using ESP32 and Dual MQ Sensors with Real-Time LINE Notification.

อนุวัช แสนพงษ์[1], ไฉไล ชาแสน[1], อภิชน มุ่งชู[1], ณัฐิวุฒิ บัวสะบาน[1] และ เสาวนีย์ จันทร์สว่าง[1,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
*ผู้ติดต่อ: Sawanee.ja@ksu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0636258879

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะโดยใช้บอร์ด ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-5 สำหรับตรวจจับก๊าซ และเซนเซอร์ MQ-2 สำหรับตรวจจับควัน พร้อมระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE และ Buzzer แบบเรียลไทม์ ระบบสามารถแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซและควันบนจอ LCD และคงสถานะการแจ้งเตือนไว้จนกว่าผู้ใช้งานจะทำการรีเซต การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซจากเซนเซอร์ MQ-5 กับเครื่องมาตรฐาน Portable Gas Detector AGH8100 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของควันจากเซนเซอร์ MQ-2 กับเครื่อง Handheld Air Quality Monitor และการทดสอบประสิทธิภาพการแจ้งเตือนของระบบ โดยทำการทดลองที่ระยะ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ระยะละ 10 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ระบบสามารถตรวจจับก๊าซและควันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าที่ตรวจวัดได้มีความใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน เซนเซอร์ MQ-5 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.10 และ 0.02 ขณะที่เซนเซอร์ MQ-2 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.02 และ 0.37 ตามลำดับ นอกจากนี้ระบบสามารถแจ้งเตือนผ่าน LINE และ Buzzer ได้ครบทุกครั้ง คิดเป็นอัตราความสำเร็จร้อยละ 100 และมีระยะเวลาตอบสนองเฉลี่ย 2.81–2.98 วินาที อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเป็น 20 เซนติเมตร ประสิทธิภาพการตรวจจับและการแจ้งเตือนลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากความเข้มข้นของสารที่สัมผัสเซนเซอร์ลดลงตามระยะทาง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟภายในอาคารหรือพื้นที่ปิดขนาดเล็ก

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับก๊าซรั่ว, เซนเซอร์ MQ-5, เซนเซอร์ MQ-2, ESP32, Internet of Things, LINE Notification

Abstract

This research aimed to develop an intelligent gas leakage and fire smoke detection system using an ESP32 microcontroller integrated with an MQ-5 sensor for gas detection and an MQ-2 sensor for smoke detection. The system provided real-time notifications through the LINE application and a buzzer alarm, while gas and smoke concentration levels were displayed on an LCD screen. The alarm status remained active until manually reset by the user. The experiment consisted of three parts (1) comparison of gas concentration measured by the MQ-5 sensor with a Portable Gas Detector AGH8100 (2) comparison of smoke concentration measured by the MQ-2 sensor with a Handheld Air Quality Monitor and (3) evaluation of the notification performance of the developed system. Experiments were conducted at distances of 10, 15, and 20 cm, with ten repetitions for each distance. The results showed that at distances of 10 and 15 cm, the system effectively detected gas leakage and smoke, with measured values closely matching those of the reference instruments. The MQ-5 sensor showed percentage errors of approximately 0.10% and 0.02%, while the MQ-2 sensor showed percentage errors of approximately 0.02% and 0.37%, respectively. In addition, the notification system achieved a 100% success rate through both LINE and buzzer alerts, with an average response time of 2.81–2.98 seconds. However, when the distance increased to 20 cm, the detection and notification performance decreased significantly due to the lower concentration of gas and smoke reaching the sensor surface. The developed system is therefore suitable for gas leakage and fire smoke detection in indoor environments or small enclosed spaces.

***Keywords**:* Gas Leakage Detection System, MQ-5 Sensor, MQ-2 Sensor, ESP32, Internet of Things, LINE Notification.

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) และก๊าซเชื้อเพลิงในที่พักอาศัย ร้านอาหาร โรงงานขนาดเล็ก และสถานประกอบการต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะดวก ประหยัด และให้ประสิทธิภาพความร้อนสูง อย่างไรก็ตามหากเกิดการรั่วไหลโดยไม่ได้รับการตรวจพบอย่างทันท่วงที อาจก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง เช่น เพลิงไหม้ การระเบิด หรือการสะสมของก๊าซพิษภายในอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินโดยตรง [1, 2] ด้วยเหตุนี้การพัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนก๊าซรั่วและควันไฟแบบอัตโนมัติที่สามารถทำงานได้แบบเรียลไทม์ จึงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังเหตุอันตรายจากก๊าซรั่วหลายรูปแบบ Ahmed และ Primajaya [1] พัฒนาระบบโดยใช้ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-2 และแพลตฟอร์ม Blynk ซึ่งมีเวลาตอบสนองเฉลี่ย 1.4 วินาที และความแม่นยำร้อยละ 96.7 ขณะที่ Susilo และ Rakhmawati [3] ใช้ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-6 และแจ้งเตือนผ่าน Telegram โดยสามารถตรวจจับได้อย่างแม่นยำภายในห้องทดลองขนาดเล็ก นอกจากนี้ Niveditha และคณะ [2] ได้นำเสนอระบบที่สามารถแจ้งเตือนด้วยเสียงและควบคุมพัดลมระบายอากาศอัตโนมัติ ส่วน Hafizal และคณะ [4] ประยุกต์ใช้ NodeMCU ESP8266 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-2 เพื่อส่งการแจ้งเตือนผ่าน Telegram ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านฮาร์ดแวร์ Barral Vales และคณะ [5] รายงานว่า ESP32 มีศักยภาพสูงสำหรับงาน IoT เนื่องจากรองรับการสื่อสารไร้สายและการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ขณะที่ Narkhede และคณะ [8] ประยุกต์ใช้เทคนิค Multimodal Sensor Fusion ร่วมกับ Machine Learning เพื่อจำแนกชนิดก๊าซและสามารถให้ความแม่นยำได้สูงถึงร้อยละ 96 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซที่มีความชาญฉลาดและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ การแจ้งเตือนส่วนใหญ่ยังอาศัยแพลตฟอร์ม Blynk หรือ Telegram ซึ่งไม่ใช่แอปพลิเคชันที่ได้รับความนิยมสูงสุดในประเทศไทย [1], [3] อีกทั้งยังขาดการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับเครื่องมือมาตรฐาน การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับแหล่งกำเนิดต่อความแม่นยำ และการประยุกต์ใช้กลไก Alarm Latching เพื่อคงสถานะการแจ้งเตือนจนกว่าจะมีการรีเซต [1–4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะโดยใช้ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-5 สำหรับตรวจจับก๊าซ และ MQ-2 สำหรับตรวจจับควัน พร้อมระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE แบบเรียลไทม์ โดยประเมินสมรรถนะของระบบผ่านการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับเครื่องมือมาตรฐาน ได้แก่ Portable Gas Detector และ Handheld Air Quality Monitor รวมทั้งศึกษาผลของระยะตรวจจับที่ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ต่อความแม่นยำ ค่าความคลาดเคลื่อน และประสิทธิภาพของการแจ้งเตือน นอกจากนี้ยังรองรับการติดตามผลแบบ Real-Time Monitoring และกลไก Alarm Latching เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความเหมาะสมต่อการใช้งานในภาคครัวเรือนและสถานประกอบการขนาดย่อม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันแบบอัตโนมัติ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในอาคาร ที่พักอาศัย และสถานประกอบการ ระบบสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซและควันแบบเรียลไทม์ และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE เมื่อค่าที่ตรวจวัดเกินเกณฑ์ที่กำหนด การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ วัสดุและอุปกรณ์ การเตรียมพื้นที่การทดลอง และการเก็บข้อมูลการทดลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ESTACON 2026 | 17th

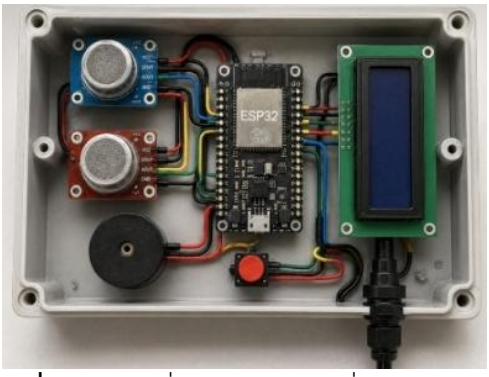
2.1 วัสดุและอุปกรณ์

การพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก เนื่องจากรองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi ในตัวและเหมาะสำหรับงาน Internet of Things (IoT) ที่ต้องการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ สำหรับการตรวจจับสารอันตราย ใช้เซนเซอร์ MQ-5 Gas Sensor สำหรับตรวจจับก๊าซในช่วง 200–10,000 ppm และเซนเซอร์ MQ-2 Gas Sensor สำหรับตรวจจับควันในช่วง 300–10,000 ppm โดยเซนเซอร์ทั้งสองมีความแม่นยำ ±10% ภายหลังการสอบเทียบ และเชื่อมต่อกับ ESP32 ผ่านขา Analog Input เพื่อรับค่าความเข้มข้นของก๊าซและควันเข้าสู่กระบวนการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 1



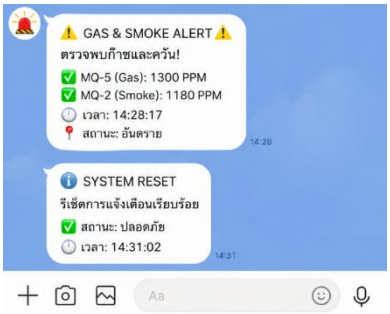
รูปที่ 1 เครื่องเตือนภัยก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะ

ระบบแสดงผลด้วยจอ LCD 16×2 พร้อมโมดูล I2C สำหรับแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซและควันแบบเรียลไทม์ พร้อมติดตั้ง Buzzer สำหรับแจ้งเตือนด้วยเสียง และ Push Button สำหรับรีเซตสถานะการแจ้งเตือนหลังจากผู้ใช้งานรับทราบเหตุการณ์แล้ว วงจรทั้งหมดใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 โวลต์ ประกอบบนแผง Breadboard และเชื่อมต่อด้วยสาย Jumper เพื่อความสะดวกในการพัฒนาและทดสอบต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรเครื่องเตือนภัยก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะ

จากการออกแบบวงจร เซนเซอร์ MQ-2 และ MQ-5 จะส่งข้อมูลค่าความเข้มข้นของควันและก๊าซไปยัง ESP32 เพื่อประมวลผลและแสดงผลบนจอ LCD หากค่าที่ตรวจวัดได้สูงกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะส่งสัญญาณแจ้งเตือนผ่าน Buzzer พร้อมส่งข้อความไปยังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน LINE ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยระบบจะคงสถานะการแจ้งเตือน (Alarm Latching) จนกว่าผู้ใช้งานจะกดปุ่ม Push Button เพื่อรีเซต ก่อนกลับเข้าสู่โหมดตรวจวัดตามปกติ



รูปที่ 3 ข้อความแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE

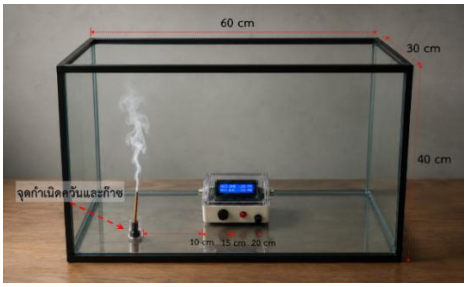
อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบประกอบด้วย ESP32 เซนเซอร์ MQ-5 เซนเซอร์ MQ-2 จอ LCD พร้อมโมดูล I2C และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานสำหรับการประกอบต้นแบบ โดยมีต้นทุนรวม 730 บาท ดังแสดงในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบมีต้นทุนต่ำและเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในภาคครัวเรือน ร้านอาหาร และสถานประกอบการขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 รายการอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการพัฒนาระบบ

ลำดับ	วัสดุ	จำนวน (ชิ้น)	ราคา (บาท)
1	กล่องบล๊อคไฟ	1	45
2	MQ-5 (Analog)	1	50
3	MQ-2 (Analog)	1	50
4	บอร์ด Esp32 ครบชุด	1	250
5	จอ LCD I2C	1	125
6	Buzzer	1	50
7	สายจั้มป์ขนาด (20 cm.)	3	80
8	Push Button (16 mm.)	1	50
9	Breadboard (400 รู)	1	30
รวม			730

2.2 การเตรียมพื้นที่การทดลอง

ก่อนเริ่มการทดลองผู้วิจัยเปิดใช้งานระบบเป็นเวลา 5–10 นาที เพื่อวอร์มอัปเซนเซอร์ให้มีความเสถียร พร้อมตรวจสอบการทำงานของจอแสดงผล การเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE ให้พร้อมใช้งาน การทดลองดำเนินการภายใน กล่องทดสอบแบบปิดขนาด 60 × 30 × 40 เซนติเมตร เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมและลดผลกระทบจากการไหลเวียนของอากาศภายนอก ซึ่งอาจส่งผลต่อการกระจายตัวของก๊าซและควัน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะพื้นที่ในการทดสอบ

ภายในกล่องกำหนดตำแหน่งแหล่งกำเนิดก๊าซและควันให้คงที่ (Fixed Source Position) ตลอดการทดสอบ เพื่อควบคุมตัวแปรด้านแหล่งกำเนิดสาร ขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ MQ-2 และ MQ-5 ถูกจัดวางให้มีระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 10, 15 และ 20 เซนติเมตร โดยใช้ไม้บรรทัดกำหนดตำแหน่งอย่างแม่นยำ เพื่อศึกษาผลของระยะตรวจจับต่อประสิทธิภาพของระบบ

การสร้างสภาวะทดสอบใช้ธูปก้านแบบดั้งเดิม เป็นแหล่งกำเนิดควันสำหรับประเมินเซนเซอร์ MQ-2 และใช้ก๊าซจาก ไฟแช็ก เป็นแหล่งกำเนิดก๊าซสำหรับประเมินเซนเซอร์ MQ-5 ในแต่ละครั้งจะปล่อยสารเข้าสู่กล่องและปล่อยให้สะสมเป็นเวลา 20 วินาที ภายใต้อุณหภูมิ 30 ± 2 °C ก่อนบันทึกค่าที่ตรวจวัดได้ เมื่อสิ้นสุดแต่ละรอบ จะเปิดกล่องเพื่อระบายอากาศและปรับสภาพภายในให้กลับสู่ค่าพื้นฐาน (Baseline) เพื่อลดผลกระทบจากสารตกค้าง พร้อมตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลองรอบถัดไป เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถทำซ้ำได้

2.3 การเก็บข้อมูลการทดลอง

การเก็บข้อมูลมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านการตรวจจับ ระยะเวลาตอบสนอง ความถูกต้องของการแสดงผลและการแจ้งเตือน ค่าความเข้มข้นที่เซนเซอร์ตรวจวัดได้ถูกแปลงจากหน่วย ppm เป็นร้อยละ (%) ด้วยวิธี Normalize เทียบกับค่าขีดจำกัดของระบบ โดยกำหนดให้ 1000 ppm เท่ากับ 100% ตามสมการ (1)

$$\%_{display} = \frac{ppm}{ppm_{threshold}} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่

$\%_{display}$ คือ ค่าร้อยละของระดับความเข้มข้นก๊าซหรือควันที่ระบบแสดงให้ผู้ใช้งานเห็น

ppm คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซหรือควันที่เซนเซอร์ตรวจวัดได้จริง

$ppm_{threshold}$ คือ ค่าระดับอันตรายของระบบ

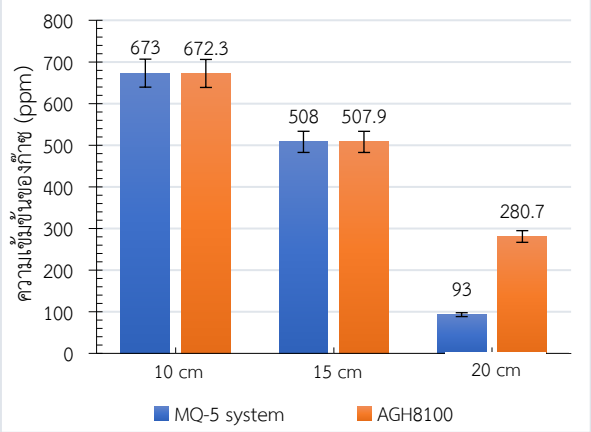
การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะ ส่วนแรกเป็นการประเมินค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ MQ-5 ภายในกล่องทดสอบที่ระยะ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร โดยดำเนินการซ้ำ 10 ครั้งต่อระยะ แล้วเปรียบเทียบผลกับเครื่องมาตรฐาน Portable Gas Detector AGH8100 ซึ่งมีช่วงการวัด 0–10,000 ppm ความละเอียด 1 ppm และความแม่นยำ ±5% เพื่อประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของการตรวจวัด ส่วนที่สองเป็นการประเมินค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของควันที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ MQ-2 ภายใต้ระยะและจำนวนการทดลองเดียวกัน โดยใช้เครื่อง Handheld Air Quality Monitor (ช่วงการวัด 0–5,000 ppm ความละเอียด 1 ppm และความแม่นยำ ±5%) เป็นเครื่องมืออ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบผลการตรวจวัด และส่วนสุดท้ายเป็นการนำข้อมูลจากเซนเซอร์ MQ-5 และ MQ-2 มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเชิงร้อยละ (%Error) ตามสมการ (2) และประเมินความแม่นยำของระบบในแต่ละระยะการตรวจวัด

$$\%\text{Error} = \frac{|\text{ค่าที่ตรวจวัดได้} - \text{ค่ามาตรฐาน}|}{\text{ค่ามาตรฐาน}} \times 100 \qquad (2)$$

ส่วนที่สามทดสอบประสิทธิภาพการแจ้งเตือนโดยประเมินอัตราความสำเร็จผ่านแอปพลิเคชัน LINE และ Buzzer รวมถึงวัดระยะเวลาตอบสนองหลังจากระบบตรวจพบก๊าซหรือควัน เพื่อประเมินความรวดเร็วและเสถียรภาพในการใช้งานจริง

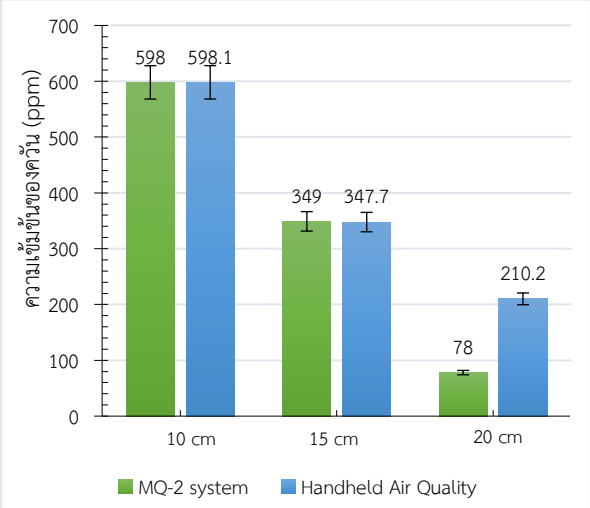
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการตรวจจับก๊าซด้วยเซนเซอร์ MQ-5 ที่ระยะ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร โดยทำการทดลองซ้ำระยะละ 10 ครั้ง และเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐาน Portable Gas Detector AGH8100 ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงในระยะใกล้และระยะปานกลาง โดยที่ระยะ 10 เซนติเมตร เซนเซอร์ให้ค่าเฉลี่ย 673.0 ppm ขณะที่เครื่องมาตรฐานวัดได้ 672.3 ppm ส่วนที่ระยะ 15 เซนติเมตร เซนเซอร์ให้ค่า 508.0 ppm และเครื่องมาตรฐานวัดได้ 507.9 ppm แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจวัดได้ใกล้เคียงกับเครื่องมืออ้างอิงและมีความเสถียรในการทำงาน เมื่อเพิ่มระยะเป็น 20 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 93.0 ppm ขณะที่เครื่องมาตรฐานยังวัดได้ 280.7 ppm แสดงว่าประสิทธิภาพการตรวจจับลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการแพร่กระจายและการเจือจางของก๊าซภายในพื้นที่ทดลอง ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลที่สัมผัสผิวเซนเซอร์ลดลงและทำให้ความไวในการตอบสนองลดลงตามระยะทาง การวิเคราะห์ด้วย One-way ANOVA จากข้อมูลการทดลองซ้ำระยะละ 10 ครั้ง พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซทั้งสามระยะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F(2,27) = 148.76$, $p < 0.001$) และผลการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD ยืนยันว่าค่าเฉลี่ยที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร แตกต่างจากระยะ 20 เซนติเมตรอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.001$) โดยสองระยะแรกมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ แสดงถึงความเสถียรของระบบ ขณะที่ระยะ 20 เซนติเมตร มีความแปรปรวนสูง เนื่องจากบางครั้งเซนเซอร์ไม่สามารถตรวจจับก๊าซได้



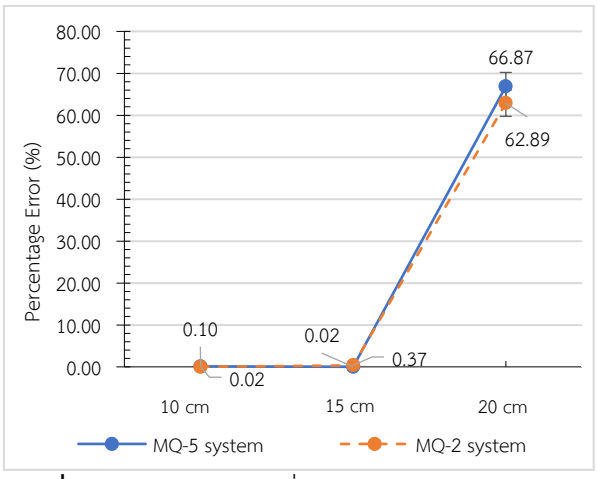
รูปที่ 5 ความเข้มข้นของก๊าซเฉลี่ยที่วัดด้วยเซนเซอร์ MQ-5 เทียบกับ AGH8100

ผลการตรวจจับควันด้วยเซนเซอร์ MQ-2 ที่ระยะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ที่ระยะ 10 เซนติเมตร เซนเซอร์ให้ค่าเฉลี่ย 598.0 ppm ขณะที่เครื่องมาตรฐานวัดได้ 598.1 ppm ส่วนที่ระยะ 15 เซนติเมตร เซนเซอร์ให้ค่า 349.0 ppm และเครื่องมาตรฐานวัดได้ 347.7 ppm แสดงว่าระบบยังคงตรวจจับควันได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพในระยะใกล้ถึงปานกลาง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเป็น 20 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 78.0 ppm ขณะที่เครื่องมาตรฐานยังวัดได้ 210.2 ppm สะท้อนว่าประสิทธิภาพการตรวจจับลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิดควัน ผลการวิเคราะห์ด้วย One-way ANOVA แสดงว่าระยะตรวจจับมีผลต่อค่าความเข้มข้นของควันอย่างมีนัยสำคัญ ($F(2,27) = 132.45$, $p < 0.001$) และการเปรียบเทียบด้วย Tukey's HSD พบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสามระยะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้นเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความเข้มข้นของควันเฉลี่ยที่วัดด้วยเซนเซอร์ MQ-2 เทียบกับ Handheld Air Quality

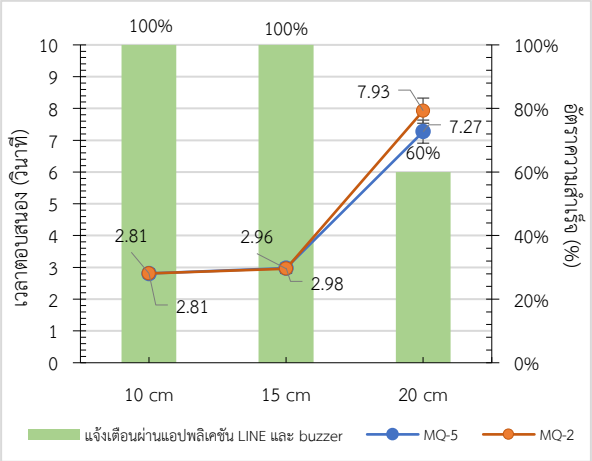
จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมืออ้างอิง พบว่าที่ระยะ 10 เซนติเมตร ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำมาก โดย MQ-5 และ MQ-2 มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง ร้อยละ 0.10 และ 0.02 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmed และ Primajaya [1] ที่รายงานว่าระบบ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ MQ-2 ให้ความแม่นยำสูง และผลการศึกษาของ Galceran และคณะ [11] ซึ่งพบว่าเซนเซอร์ MQ มีประสิทธิภาพดีในระยะใกล้ ส่วนที่ระยะ 15 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนยังอยู่ในระดับต่ำ (MQ-5 ร้อยละ 0.02 และ MQ-2 ร้อยละ 0.37) สอดคล้องกับ Okokpujie และคณะ [10] ที่รายงานว่าเซนเซอร์ MQ-5 ยังคงมีประสิทธิภาพดีในระยะปานกลาง แต่เมื่อเพิ่มระยะเป็น 20 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66.87 และ 62.89 ตามลำดับ แสดงถึงข้อจำกัดของเซนเซอร์เมื่ออยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดสาร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่าความไวของเซนเซอร์ลดลงตามระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะเทียบกับเครื่องมืออ้างอิง

ผลการประเมินระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE และ Buzzer ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ระบบแจ้งเตือนได้ครบทุกครั้ง คิดเป็นอัตราความสำเร็จ ร้อยละ 100 โดยมีเวลาตอบสนองเฉลี่ย 2.81 และ 2.98 วินาที ตามลำดับ แสดงถึงความรวดเร็วและเสถียรภาพของระบบ ขณะที่ระยะ 20 เซนติเมตร อัตราความสำเร็จลดลงเหลือ ร้อยละ 70 และเวลาตอบสนองเพิ่มเป็น 7.27 และ 7.93

วินาที ตามลำดับ เนื่องจากเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซหรือควันได้ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 8 ระยะเวลาตอบสนองเฉลี่ย และอัตราความสำเร็จในการแจ้งเตือนผ่าน LINE และ buzzer

การวิเคราะห์ด้วย One-way ANOVA พบว่าเวลาตอบสนองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยระยะ 10 และ 15 เซนติเมตรไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่แตกต่างจากระยะ 20 เซนติเมตรอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.001$)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟอัจฉริยะโดยใช้เซนเซอร์ MQ-5 สำหรับตรวจจับก๊าซและเซนเซอร์ MQ-2 สำหรับตรวจจับควัน ร่วมกับบอร์ด ESP32 และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE และ Buzzer พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการตรวจจับก๊าซและควันในระยะใกล้ถึงปานกลาง โดยเฉพาะที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ซึ่งค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้มีความใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน Portable Gas Detector AGH8100 และ Handheld Air Quality Monitor สะท้อนถึงความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบ ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนพบว่าเซนเซอร์ MQ-5 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.10 และ 0.02 ส่วนเซนเซอร์ MQ-2 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.02 และ 0.37 ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับต่ำและใกล้เคียงกับเครื่องมืออ้างอิง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเป็น 20 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66.87 สำหรับ MQ-5 และ 62.89 สำหรับ MQ-2 เนื่องจากการแพร่กระจายและการเจือจางของก๊าซและควัน ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารที่สัมผัสเซนเซอร์ลดลงและประสิทธิภาพการตรวจจับลดลงตามระยะทาง

ด้านการแจ้งเตือน ระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนผ่าน LINE และ Buzzer ได้ครบทุกครั้งที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราความสำเร็จ ร้อยละ 100 โดยมีเวลาตอบสนองเฉลี่ย 2.81 และ 2.98 วินาที ตามลำดับ ขณะที่ระยะ 20 เซนติเมตร อัตราความสำเร็จลดลงเหลือร้อยละ 70 และเวลาตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็น 7.27 และ 7.93 วินาที ตามลำดับ เนื่องจากเซนเซอร์ไม่สามารถตรวจจับก๊าซหรือควันได้อย่างต่อเนื่องในบางการทดลอง โดยสรุประบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ตรวจจับก๊าซรั่วและควันไฟภายในอาคารหรือพื้นที่ปิดขนาดเล็ก ซึ่งสามารถติดตั้งเซนเซอร์ใกล้บริเวณที่มีความเสี่ยงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังและแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ahmed, A., & Primajaya, A. (2026). Design and experimental evaluation of an ESP32-based IoT early warning system for LPG gas leakage. Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi, 6(1), 1–7. https://doi.org/10.59395/zfqh4n92

[2] Niveditha, N., Harshini, B., & Peria Mahalakshmi, M. (2025). Smart gas leakage detection using IoT. International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH), 3(3). https://doi.org/10.47392/IRJAEH 2025.0096

[3] Susilo, M. M., & Rakhmawati, L. (2025). Implementation internet of things (IoT) in fire and LPG leakage detection system based on ESP32 with multiuser notification. Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering (INAJEEE), 8(2), 59–68. https:// doi.org/10.26740/inajeee.v8n2

[4] Hafizal, M., Safwandi, Kurniawati, Muthalib, M. A., & Anshari, S. F. (2026). Sistem monitoring kebocoran gas LPG berbasis IoT dan alarm otomatis [IoT-based LPG gas leak monitoring system with automatic alarms]. Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi, 15(6), 2096–2105.

[5] Barral Vales, V., Campos Fernández, O., Domínguez-Bolaño, T., Escudero, C. J., & García-Naya, J. A. (2022). Fine time measurement for the internet of things: A practical approach using ESP32. IEEE Internet of Things Journal, 9(19), 18305–18318. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3158701

[6] Aton, M. G., Abdullah, N. F. I., & Muttoleb, N. A. (2022). Development of LPG gas leakage detection using ESP32. International Journal of Research and Innovation Management, 8(1), 125–132.

[7] Flores-Cortez, O., Cortez, R., & González, B. (2021). Design and implementation of an IoT based LPG and CO gases monitoring system. In D. C. Wyld et al. (Eds.), Proceedings of BIoT, DKMP, CCSEA, EMSA 2021 (pp. 31–39). CS & IT. https://doi.org/10.5121/csit.2021.110803

[8] Narkhede, P., Walambe, R., Mandaokar, S., Chandel, P., Kotecha, K., & Ghinea, G. (2021). Gas detection and identification using multimodal artificial intelligence based sensor fusion. Applied System Innovation, 4(1), Article 3. https://doi.org/10.3390/asi4010003

[9] Mashuri, M. A. I., Kholifah, B., & Hakim, F. A. E. (2025). Designing an internet of things-based fire and gas leak detection system. Journal of Applied Informatics Research, 1(1), 1–9.

[10] Okokpujie, I. P., Avwunu, O., Akande, S., Dada, O. J., Musa, A. I., & Agbemuko, D. I. (2024). Development and evaluation of a MQ-5 sensor-based condition monitoring system for in-situ pipeline leak detection. Instrumentation, Mesure, Métrologie, 23(1), 1–11. https://doi.org/10.18280/i2m.230101

[11] Galceran, S. J. D., Villarico, F. J. H., Omao, J. J. C., Estaniel, L. C. P., Saldo, I. J. P., Calo, J. R. D., & Dandoy, M. J. P. (2023). Development and comparison of Arduino based MQ-2 and MQ-6 LPG leak sensors. American Journal of Sensor Technology, 7(1), 1–9. https://doi.org/ 10.12691/ajst-7-1-1

การเปรียบเทียบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกระท่อม

Comparative Modeling of Drying Kinetics of Mitragyna speciosa

ศุภวิชญ์ เจริญเชาว์, นิติศักดิ์ หนูมาน้อย, รตินันท์ เหลือมพล และปฏิวัติ วรามิตร*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ต.ในเมือง อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ Email : Pathiwat.wa@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 095 247 8155

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงประจักษ์ แบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ในการพยากรณ์อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) ของใบกระท่อมภายใต้กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนและอินฟราเรด โดยประยุกต์ใช้วัสดุพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามาจากการทดลองอบแห้ง 18 สภาวะ ครอบคลุมอุณหภูมิการอบ 50, 60 และ 70 °C ค่าความพรุนของวัสดุพรุน 0.36, 0.41 และ 0.43 และวิธีการอบแห้ง 2 วิธี ได้แก่ ลมร้อนและอินฟราเรด สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง ANN ได้แบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกสอน (Training Set) ร้อยละ 70 และชุดทดสอบ (Testing Set) ร้อยละ 30 ด้วยวิธี systematic interval-based data partitioning เพื่อให้ข้อมูลครอบคลุมทุกช่วงเวลาของการอบแห้ง ประสิทธิภาพของแบบจำลองประเมินด้วยค่า R^2, RMSE และ χ^2 ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง ANN ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99818 ค่า RMSE เท่ากับ 0.01165 และมีค่า χ^2 อยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพยากรณ์จลนพลศาสตร์การอบแห้งของใบกระท่อมได้อย่างแม่นยำ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกแบบจำลองเพื่อพัฒนากระบวนการอบแห้งสมุนไพรให้มีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: การอบแห้งใบกระท่อม, อัตราส่วนความชื้น, แบบจำลองเชิงประจักษ์, แบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ, โครงข่ายประสาทเทียม.

Abstract

This study aimed to compare the performance of empirical models, Special empirical models, and Artificial Neural Networks (ANN) in predicting the moisture ratio (MR) of *Mitragyna speciosa* leaves during hot-air and infrared drying using porous materials to enhance heat transfer efficiency. Experimental data were obtained from 18 drying conditions, consisting of two drying methods (hot-air and infrared), three drying temperatures (50, 60, and 70 °C), and three porous material porosities (0.36, 0.41, and 0.43). For ANN development, the input variables included drying time, drying temperature, drying method, and porous material porosity, while the output variable was the moisture

ratio. The dataset was divided into 70% for training and 30% for testing using a systematic interval-based data partitioning method to ensure representative samples throughout the entire drying process. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and chi-square (χ^2). The results showed that the ANN model achieved the highest prediction accuracy, with an R^2 of 0.99818, an RMSE of 0.01165, and a low χ^2 value, indicating its superior capability in predicting the drying kinetics of *Mitragyna speciosa* leaves. The findings demonstrate that ANN is a reliable predictive tool and can be used to support model selection and improve the design and optimization of herbal drying processes.

Keywords: Mitragyna speciosa drying, Moisture ratio, Empirical models, Special empirical model, Artificial neural network.

1. บทนำ

ใบกระท่อม (*Mitragyna speciosa*) เป็นพืชสมุนไพรที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านการแพทย์ ผลิตภัณฑ์สุขภาพ และอุตสาหกรรมแปรรูปสมุนไพร ภายหลังการปลดล็อกทางกฎหมายในประเทศไทย ส่งผลให้มีการนำใบกระท่อมมาใช้เป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ [1,2] อย่างไรก็ตาม ใบกระท่อมสดมีความชื้นสูง ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอายุการเก็บรักษา ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการลดความชื้น รักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของใบกระท่อม [1,3] ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ วิธีการอบแห้ง และลักษณะทางกายภาพของวัสดุ [4] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาอุณหภูมิการอบที่ 50, 60 และ 70 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่นิยมใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์สมุนไพรและวัสดุทางการเกษตร โดยสามารถเร่งการระเหยความชื้นได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มากเกินไป [1,3] ขณะที่เลือกใช้วัสดุหินตู้ปลาเป็นวัสดุพรุนที่ค่าความพรุน 0.36, 0.41 และ 0.43 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างช่องว่างต่อการกระจายอากาศร้อนและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างกระบวนการอบแห้ง [5] การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งนิยมใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Models) เนื่องจากสามารถอธิบายพฤติกรรมการลดความชื้นได้ดีและมีรูปแบบสมการที่เรียบง่าย [3,6] อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวมักถูกพัฒนาภายใต้สภาวะการทดลองเฉพาะ จึงอาจมีข้อจำกัดเมื่อต้องนำไปประยุกต์ใช้กับหลายสภาวะการอบแห้งที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน จึงมีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ซึ่งสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7,8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงประจักษ์ แบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ และ ANN ในการพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้นของใบกระท่อม จากข้อมูลการอบแห้งแบบลมร้อน

และอินฟราเรด ภายใต้ 18 สภาวะการทดลอง โดยประเมินด้วยค่า R^2, RMSE และ χ^2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบอบแห้งสมุนไพรต่อไป

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลการอบแห้งด้วยวิธีการอบแบบลมร้อนและอินฟราเรดผลิตภัณฑ์ใบกระท่อมสายพันธุ์ก้านแดง ที่มีความชื้นเริ่มต้น 287.28% d.b. ปริมาณ 100 กรัม ที่อบภายใต้สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C และมีการใช้วัสดุหินตู้ปลาเป็นวัสดุพรุนที่ค่าความพรุน 0.36, 0.41 และ 0.43 บันทึกอุณหภูมิผลิตภัณฑ์และมวล คำนวณหาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 4 นาที อบแห้งจนกว่ามวลใบกระท่อมจะนิ่งหรือไม่เพิ่ม มาใช้เป็นฐานข้อมูลและใช้เปรียบเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลอง ซึ่งสามารถสรุปเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 18 สภาวะได้ตามตารางที่ 1

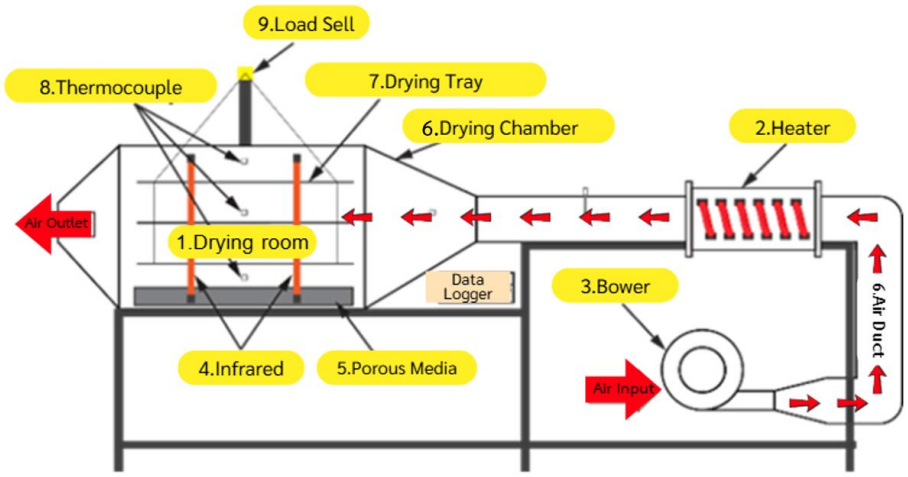
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองการอบแห้งใบกระท่อม

Method	Drying Temp		
	Porosity 0.36	Porosity 0.41	Porosity 0.43
Hot Air	50	50	50
Hot Air	60	60	60
Hot Air	70	70	70
Infrared	50	50	50
Infrared	60	60	60
Infrared	70	70	70

การหาอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 1

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ
M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น
M_e คือ ความชื้นสมดุล



รูปที่ 1 เครื่องอบลมร้อนร่วมอินฟราเรด

2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงประจักษ์

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงประจักษ์จำนวน 13 แบบจำลอง สำหรับการพยากรณ์พฤติกรรมการอบแห้งใบกระท่อม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองเชิงประจักษ์ [9]

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Newton	MR = exp(−kt)
2	Page	MR = exp(−kt^n)
3	Modified Page I	MR = exp(−$(kt)^n$)
4	Henderson and Pabis	MR = a exp(−kt)
5	Logarithmic	MR = a exp(−kt) + c
6	Two-term	MR = a exp(−k_0t) + b exp(−k_1t)
7	Two-term exponential	MR = a exp(−kt) + (1−a) exp(−kat)
8	Wang and Singh	MR = 1 + at + bt^2
9	Approximation of diffusion	MR = a exp(−kt) + (1−a) exp(−kbt)
10	Verma et al.	MR = a exp(−k t) + (1−a) exp(−gt)
11	Modified Henderson and Pabis	MR = a exp(−kt) + b exp(−gt) + c exp(−ht)
12	Midilli et al.	MR = a exp(−kt^n) + bt
13	Logistic	MR = a / (1+exp(kt))

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงประจักษ์ ได้แก่ a, b, c, g, h, k_0, k_1 หรือ n เป็นฟังก์ชันของตัวแปรการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิวิธีการอบแห้ง และค่าความพรุน เพื่อสะท้อนอิทธิพลของสภาวะการอบที่มีต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อันนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากยิ่งขึ้น โดยเขียนสมการฟังก์ชันความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ 2 [10]

$$K = x_0 + x_1 T + x_2 P + x_3 M + x_4 TP \qquad (2)$$

เมื่อ K คือ a, b, c, g, h, k_0, k_1 หรือ n
T คือ อุณหภูมิอบแห้ง
P คือ ค่าความพรุน
M คือ วิธีการอบแห้ง
x_i คือ ค่าคงที่ของสมการ

2.2 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ของใบกระท่อม โดยกำหนดตัวแปรนำเข้า (Input) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ เวลาในการอบแห้ง (min) อุณหภูมิการอบแห้ง (°C) ค่าความพรุนของวัสดุพรุน และวิธีการอบแห้ง (ลมร้อนหรืออินฟราเรด) ส่วนตัวแปรผลลัพธ์ (Output) คือ ค่าอัตราส่วนความชื้น เพื่อหาสถาปัตยกรรมของ ANN ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบแบบจำลองทั้งหมด 1,008 โครงสร้าง ซึ่งเกิดจากการผสมผสานของพารามิเตอร์

ESTACON 2026 | 17th

ได้แก่ (1) ฟังก์ชันกระตุ้น (Transfer Function) จำนวน 9 รูปแบบ ประกอบด้วย hidden layer (tansig, logsig และ purelin) และ output layer (tansig, logsig และ purelin) (2) ฟังก์ชันการฝึกสอน (Training Function) จำนวน 14 รูปแบบ ได้แก่ traingd, traingdm, traingda, traingdx, trainr, trainrp, traincgf, traincgp, traincgb, trainscg, trainbfg, trainoss, trainlm และ trainbr (3) ฟังก์ชันการเรียนรู้ (Learning Function) จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ learngdm และ learngd และ (4) จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 เซลล์ประสาท ข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด 18 สภาวะ ถูกแบ่งเป็นชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Training Set) ร้อยละ 70 และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing Set) ร้อยละ 30 โดยใช้วิธี systematic interval-based data partitioning เพื่อให้ข้อมูลทั้งสองชุดครอบคลุมทุกช่วงเวลาของกระบวนการอบแห้ง ลดความเอนเอียงจากการกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่ง และช่วยให้การประเมินความสามารถในการพยากรณ์ของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น แบบจำลอง ANN แต่ละโครงสร้างถูกประเมินประสิทธิภาพด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าไคสแควร์ (χ^2) [11,12] และสำหรับการศึกษาในชุดข้อมูลและเงื่อนไขการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าโครงสร้างที่ประกอบด้วย เซลล์ประสาทในชั้นซ่อน 20 นิวรอน ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ logsig สำหรับชั้นซ่อน และ purelin สำหรับชั้นเอาต์พุต ให้ผลการพยากรณ์ดีที่สุด เพราะโครงสร้างดังกล่าวให้ค่าความแม่นยำในการพยากรณ์สูง โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยที่ 0.99818, มีค่า RMSE เฉลี่ยที่ 0.01165 และ χ^2 เฉลี่ยที่ 0.00936

2.3 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองใช้ดัชนีทางสถิติ ได้แก่ [11,12]

- ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pred,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp}\right)^2} \quad (3)$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง
$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
$\overline{MR}_{exp}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง

- ไคสแควร์ (Chi-Square : χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pred,i}\right)^2}{N - n} \quad (4)$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง
$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์
n คือ จำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

- ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error : RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2\right]^{1/2} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง

$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่เหมาะสมกับการพยากรณ์พฤติกรรมอบแห้งใบกระท่อม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงประจักษ์

แบบจำลอง	Mean R^2	Mean RMSE	Mean χ^2
Newton	0.93936	0.07749	0.00665
Page	0.99130	0.02864	0.00093
Modified Page I	0.99130	0.02864	0.00093
Henderson and Pabis	0.95709	0.06517	0.00482
Logarithmic	0.98188	0.04274	0.00209
Two-term	0.96569	0.05598	0.00412
Two-term exponential	0.91775	0.05720	0.00914
Wang and Singh	0.98073	0.04292	0.00209
Approximation of diffusion	0.96504	0.05487	0.00416
Verma et al.	0.97062	0.05373	0.00340
Modified Henderson and Pabis	0.68205	0.13707	0.03689
Midilli et al.	**0.99395**	**0.02384**	**0.00068**
Logistic	0.97747	0.04694	0.00251

จากตารางที่ 3 พบว่า แบบจำลอง Midilli et al. ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในกลุ่มแบบจำลองเชิงประจักษ์ [3], [11], [12] โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99395 ขณะที่ค่า RMSE เท่ากับ 0.02384 และค่า χ^2 เท่ากับ 0.00068 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุด สะท้อนว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ต่ำ จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองเชิงประจักษ์ในการศึกษาครั้งนี้

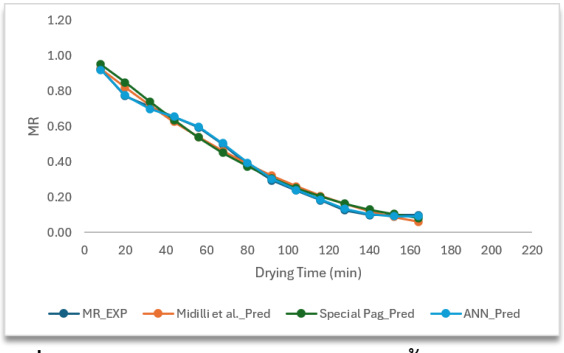
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ

แบบจำลอง	Mean R^2	Mean RMSE	Mean χ^2
Special Newton	0.93936	0.07749	0.00748
Special Page	**0.99130**	**0.02864**	**0.00121**
Special Modified Page I	**0.99130**	**0.02864**	**0.00121**

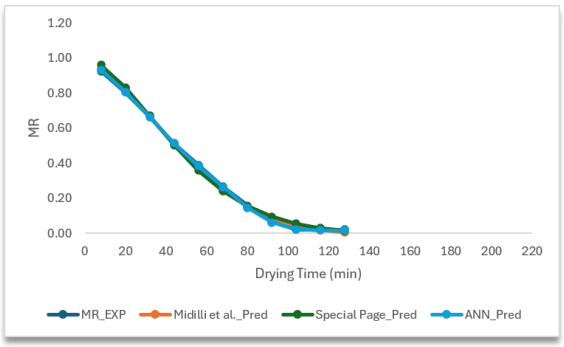
แบบจำลอง	Mean R^2	Mean RMSE	Mean χ^2
Special Henderson and Pabis	0.95709	0.06517	0.00626
Special Logarithmic	0.95709	0.06517	0.00776
Special Two-term	0.95709	0.06517	0.01038
Special Two-term exponential	0.96243	0.05690	0.00525
Special Wang and Singh	-3.95855	0.70592	0.70402
Special Approximation of diffusion	0.93936	0.07749	0.01100
Special Verma et al.	0.96371	0.05516	0.00613
Special Modified Henderson and Pabis	0.95709	0.06517	0.02838
Special Midilli et al.	-0.82504	0.43185	0.43655
Special Logistic	0.97747	0.04694	0.00327

จากตารางที่ 4 แบบจำลอง Special Page และ Special Modified Page I ให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์สูงที่สุดในกลุ่มแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ เนื่องจากมีโครงสร้างสมการไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถฟิตพารามิเตอร์ได้ดี โดยมีค่า R^2 = 0.99130, RMSE = 0.02864 และ χ^2 = 0.00121 เท่ากันทั้งสองแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับความคล้ายคลึงของโครงสร้างสมการ ขณะที่ Special Midilli et al. มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับ Midilli et al. ดั้งเดิม เนื่องจากการกำหนดพารามิเตอร์เป็นฟังก์ชันของตัวแปรการอบแห้งเพิ่มความซับซ้อนของแบบจำลอง ส่งผลให้ไม่สามารถสะท้อนความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น

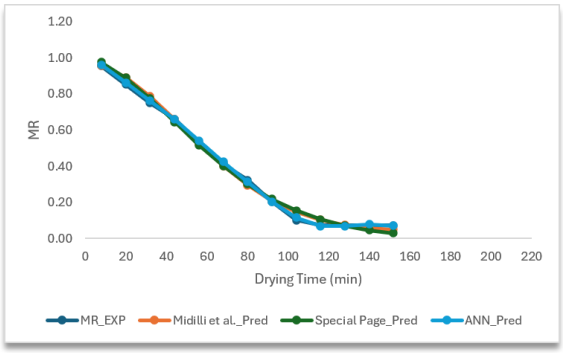
3.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์พฤติกรรมอบแห้งใบกระท่อม



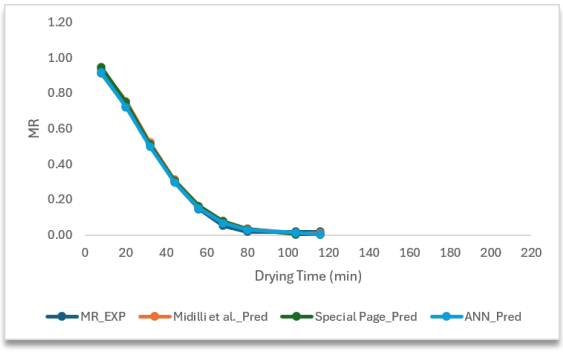
รูปที่ 2 การพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้นภายใต้การอบด้วยลมร้อนที่ 50°C (ค่าความพรุน = 0.36)



รูปที่ 3 การพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้นภายใต้การอบด้วยลมร้อนที่ 70°C (ค่าความพรุน = 0.43)



รูปที่ 4 การพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้นภายใต้การอบด้วยอินฟราเรดที่ 50°C (ค่าความพรุน = 0.36)



รูปที่ 5 การพยากรณ์ค่าอัตราส่วนความชื้นภายใต้การอบด้วยอินฟราเรดที่ 70°C (ค่าความพรุน = 0.43)

จากรูปที่ 2–5 พบว่า แบบจำลอง ANN ให้เส้นโค้งการพยากรณ์สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองเชิงประจักษ์และแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ANN สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอินพุตกับค่าอัตราส่วนความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าแบบจำลองที่อาศัยสมการเชิงประจักษ์ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิการอบส่งผลให้อัตราการลดความชื้นเพิ่มขึ้น และการอบด้วยอินฟราเรดให้การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพกว่าการอบด้วยลมร้อน

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

Model	Mean R^2	Mean RMSE	Mean χ^2
ANN	**0.99818**	**0.01165**	0.00936
Empirical	0.99395	0.02384	**0.00068**
Special Empirical	0.99130	0.02864	0.00121

จากตารางที่ 5 พบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ให้ประสิทธิภาพโดยรวมในการพยากรณ์อัตราส่วนความชื้นของใบกระท่อมดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical) และแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ (Special Empirical) โดยมีค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99818 สูงที่สุด, RMSE เท่ากับ 0.01165 ต่ำที่สุด และ χ^2 เท่ากับ 0.00936 ในส่วนของแบบจำลองเชิงประจักษ์ให้ค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99395, RMSE เท่ากับ 0.02384 และ χ^2 เท่ากับ 0.00068 ซึ่งเป็นค่า χ^2 ต่ำที่สุด เนื่องจากมีการประมาณค่าพารามิเตอร์แยกสำหรับแต่ละสภาวะการอบแห้ง ทำให้สามารถปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับข้อมูลเฉพาะสภาวะได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวม ANN ยังคงให้ค่า R^2 สูงกว่าและ RMSE ต่ำกว่า จึงมีความสามารถในการพยากรณ์ดีกว่า สำหรับแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ ให้ค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99130, RMSE เท่ากับ 0.02864 และ χ^2 เท่ากับ 0.00121 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ แม้ว่าจะมีการเพิ่มฟังก์ชันของตัวแปรการอบแห้งเข้าไปในสมการเดิมก็ตาม สะท้อนว่าการเพิ่มความซับซ้อนของแบบจำลองไม่ได้ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์

ภายใต้เงื่อนไขการศึกษานี้ ดังนั้น ANN จึงเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด สำหรับการพยากรณ์อัตราส่วนความชื้นของใบกระท่อมในการศึกษาครั้งนี้

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงประจักษ์ แบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) สำหรับการพยากรณ์อัตราส่วนความชื้นของใบกระท่อมภายใต้การอบแห้งด้วยลมร้อนและอินฟราเรด โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ ค่า R^2, RMSE และ χ^2 ผลการศึกษาพบว่า ในกลุ่มแบบจำลองเชิงประจักษ์ แบบจำลอง Midilli et al. ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99395, RMSE เท่ากับ 0.02384 และ χ^2 เท่ากับ 0.00068 ในส่วนของกลุ่มแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษ พบว่าแบบจำลอง Special Page และ Special Modified Page I ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99130, RMSE เท่ากับ 0.02864 และ χ^2 เท่ากับ 0.00121 เท่ากัน สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสามประเภท พบว่า ANN (โครงสร้าง 20 นิวรอนในชั้นซ่อน ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig–purelin) ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย R^2 เท่ากับ 0.99818, RMSE เท่ากับ 0.01165 และ χ^2 เท่ากับ 0.00936 แสดงถึงความสามารถในการพยากรณ์ที่แม่นยำและสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด ขณะที่แบบจำลองเชิงประจักษ์ให้ค่า χ^2 ต่ำที่สุด เนื่องจากมีการประมาณค่าพารามิเตอร์แยกสำหรับแต่ละสภาวะการอบแห้ง ส่วนแบบจำลองเชิงประจักษ์พิเศษให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ แม้ว่าจะมีการเพิ่มฟังก์ชันของตัวแปรการอบแห้งเข้าไปในสมการเดิมก็ตาม ดังนั้น ANN จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์อัตราส่วนความชื้นของใบกระท่อมภายใต้ชุดข้อมูลและเงื่อนไขการศึกษานี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล และคณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ประพนธ์ ทองพูล, สมใจ เพียรประสิทธิ์, ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน, ณทพร จินดาประเสริฐ, กวิน เลิศเลาห์กุล, และ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท. (2568). การศึกษาการอบแห้งใบกระท่อมด้วยวิธีฟูลอิดไดซ์เบด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรภ.พิบูลสงคราม*, *10*(3), 122–139.

[2] ธัชธาวินท์ สะรุโณ. (2565). กระท่อม. เข้าถึงเมื่อ 22 ธันวาคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://www.doa.go.th/oard8/?page_id=4440/

[3] Chungsiriporn, J., Pongyeela, P., Chairerk, N., Lewkittayakorn, J., & Duangsuwan, W. (2023). Drying Characteristics and Mitragynine Content of Kratom Leaves. Chiang Mai Journal of Science, 50(6), 1-13.

[4] Khomwachirakul, P., Apinyavisit, K., & Paengkanya, S. (2020). *Development of long pepper drying system using a combined rotary dryer and infrared radiation*. Faculty of

Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

[5] Inla, K., Krittacom, B., Waramit, P., & Luampon, R. (2022). Application of wire mesh stainless porous material for reduce energy consumption in the convective drying of Lingzhi mushroom. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, *32*(4), 830–842.

[6] Ambawat, S., Sharma, A., and Saini, R. K. (2022). Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics and Moisture Diffusivity Study of Pretreated *Moringa oleifera* Leaves Using Fluidized Bed Dryer. *Processes, 10(11), 2464*. https://doi.org/10.3390/pr10112464

[7] K. Ç. Selvi, A. Y. Alkhaled, and T. Yıldız. (2022). Application of artificial neural network for predicting drying kinetics during infrared drying process. *Processes*. 10: 2069.

[8] Sharabiani, V. R., Kaveh, M., Abdi, R., Szymanek, M., and Tanaś, W. (2021). Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Scientific Reports*. 11(1): 9155.

[9] A. Bousselma, D. Abdessemed, H. Tahraoui, and A. Amrane. (2021). Artificial intelligence and mathematical modelling of the drying kinetics of pre-treated whole apricots. *Kemija u industriji*. 70(11–12): 651–667.

[10] ปฏิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. (2553). “การเปรียบเทียบแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนระหว่างแบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 3(1): 60-68.

[11] Topal, M. E., Şahin, B., & Vela, S. (2024). Artificial Neural Network Modeling Techniques for Drying Kinetics of Citrus medica Fruit during the Freeze-Drying Process. *Processes, 12*(7), 1362.

[12] Tepe, T. K., & Tepe, F. B. (2024). Improvement of pear slices drying by pretreatments and microwave-assisted convective drying method: Drying characteristics, modeling of artificial neural network, principal component analysis of quality parameters. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149, 7313–7328.

การพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ขนส่งอัจฉริยะสำหรับการนำทางภายในอาคารโดยใช้ LiDAR ร่วมกับ ROS 2

Development of an Intelligent Transportation Robot Prototype for Indoor Navigation Using LiDAR Integrated with ROS 2

ศิวณุ เหล่าบุตรสา[1], ก้องภพ เจริญศักดิ์ขจร[1], รัชชานนท์ บุญทานันท์[1], ทิวัตถ์ แซ่เฮ้ง[1],
อนุวัฒน์ ภาชนะวรรณ์[2], กัมปนาท ไชยเพชร[1] และ สุรสิทธิ์ พ่อค้า[1],*

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ กาฬสินธุ์ 40000
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ กาฬสินธุ์ 40000
* siwanu.la@ksu.ac.th, 086-6142139

บทคัดย่อ

การขนส่งสิ่งของภายในอาคารของหน่วยงานต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน และโรงงานอุตสาหกรรม ยังคงอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและลดประสิทธิภาพการดำเนินงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ขนส่งอัตโนมัติ (Autonomous Delivery Robot) โดยใช้อุปกรณ์คือ Raspberry Pi 4 ร่วมกับระบบปฏิบัติการ ROS 2 และเซนเซอร์ LiDAR (RPLIDAR-C1) ระยะตรวจจับ 5 เมตร สำหรับการสร้างแผนที่ การนำทาง และการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง พร้อมทั้งติดตั้งระบบเสียงแจ้งเตือนสถานการณ์ทำงาน การประเมินประสิทธิภาพของระบบแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ระบบเสียงแจ้งเตือน และความแม่นยำในการเคลื่อนที่ไปยังสถานีเป้าหมายโดยทดสอบใน 3 สถานีรับ-ส่ง ทำซ้ำ 3 รอบต่อเงื่อนไข ผลการทดลองพบว่า ในสภาวะที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์มีความแม่นยำในการนำทางสูงถึงร้อยละ 96.67 และมีอัตราความแม่นยำลดลงเป็นร้อยละ 93.33 และ 90.00 เมื่อพบสิ่งกีดขวางจำนวน 1 และ 2 จุด ตามลำดับ สำหรับระบบเสียงแจ้งเตือนสถานะการทำงาน พบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 100 ในส่วนของการเคลื่อนที่เพื่อจัดส่งพัสดุไปยังสถานีที่กำหนด มีความแม่นยำอยู่ในช่วงร้อยละ 90.00–96.67 ทั้งนี้ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักมาจากความไม่เสถียรของสัญญาณ Wi-Fi จากผลการดำเนินงานโดยรวมสรุปได้ว่า ต้นแบบหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถปฏิบัติภารกิจได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ขนส่งอัจฉริยะ, LiDAR, ราสเบอรี่ไพ, ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ ROS2

Abstract

The transportation of materials within buildings such as hospitals, office buildings, and industrial factories still relies primarily on manual labor, resulting in delays and reduced operational efficiency. This research aimed to design and develop a prototype Autonomous Delivery Robot using a Raspberry Pi 4, the Robot Operating System 2 (ROS 2), and an RPLIDAR-C1 LiDAR sensor with a detection range of 5 meters for mapping, navigation, and obstacle avoidance. The robot was also equipped with a voice notification system to provide operational status updates. The system performance was evaluated in

three aspects: obstacle avoidance, voice notification, and navigation accuracy to designated destinations. Experiments were conducted across three delivery stations, with three trials performed under each testing condition. The results showed that the robot achieved a navigation accuracy of 96.67% in an obstacle-free environment, which decreased to 93.33% and 90.00% when encountering one and two obstacles, respectively. The voice notification system achieved 100% accuracy, while the delivery task to designated stations achieved an overall accuracy ranging from 90.00% to 96.67%. The primary source of errors was the instability of the Wi-Fi connection. Overall, the developed prototype successfully accomplished its intended delivery tasks and met the research objectives, demonstrating its potential to improve the efficiency of indoor material transportation.

Keywords: Autonomous Delivery Robot, LiDAR, Raspberry Pi, Robot Operating System (ROS 2)

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งสิ่งของในหน่วยงานและสถานประกอบการต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน ร้านอาหาร และโรงงานอุตสาหกรรม มีความต้องการระบบขนส่งสิ่งของภายในพื้นที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับการดำเนินงานที่ต้องอาศัยความรวดเร็ว ความถูกต้อง และความต่อเนื่องในการให้บริการ อย่างไรก็ตาม ระบบการขนส่งภายในอาคารส่วนใหญ่ยังคงอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ซึ่งก่อให้เกิดข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ การใช้ทรัพยากรบุคคลจำนวนมาก เส้นทางการจัดส่งที่ไม่สม่ำเสมอและแออัดทำให้เกิดความล่าช้าในการขนส่ง [1] ตลอดจนภาระงานที่เพิ่มขึ้นของบุคลากร ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานโดยรวมลดลง

จากปัญหาดังกล่าว เทคโนโลยีหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ (Autonomous Mobile Robot: AMR) ด้วยระบบเซ็นเซอร์อินฟาเรด ระบบอัตราโซนิค หรือกล้องตรวจจับวัตถุ ซึ่งเป็นการตรวจวัดระยะใกล้ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานขนส่งภายในอาคาร เนื่องจากสามารถช่วยลดการพึ่งพาแรงงานมนุษย์ แต่ยังไม่มีความแม่นยำมากพอ ในการเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพ จึงมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LiDAR (LiDAR: Light Detection and Ranging) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุ สร้างแผนที่ นำทางในสภาพแวดล้อมโดยรอบได้แบบเรียลไทม์ [2] ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น และหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การทำงานมีความปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

จากการวิจัยของ Yang et al. [3] ได้ศึกษาการติดตามและโต้ตอบกับมนุษย์โดยใช้ LiDAR สำหรับหุ่นยนต์ทำความสะอาดทางเท้าอัตโนมัติ พบว่า หุ่นยนต์สามารถประมวลผลตรวจสอบวัตถุและจดจำรวมกันได้ 0.106 วินาที เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและตอบสนองของงานได้หลากหลายสถานการณ์ และสามารถประมวลผลการจดจำท่าทางของมนุษย์ได้เร็วขึ้น C. Lin et al. [4] ได้นำ LiDAR มาระบุตำแหน่งและประเมินความเสี่ยงจากการเฉียดชนสำหรับส่งอาหารแบบเดลิเวอรี่ด้วยรถจักรยานยนต์

จากการทดสอบพบว่า มีความแม่นยำ 92.10% ในการทำนายเจตนา โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.53 เมตร และ 0.45 เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ Yu Z. [5] ได้ออกแบบและการสร้างหุ่นยนต์ล้อเลื่อนที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางและการนำทางสำหรับการส่งยารักษา โดยผสานรวมเทคโนโลยีเซ็นเซอร์หลายรูปแบบ รวมถึง LiDAR เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกและกล้องถ่ายภาพ การรวมเทคโนโลยีนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดสัดส่วนเวลาทำงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการรักษาพยาบาลของพยาบาล และการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งมอบได้ทันเวลาอีกด้วย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ขนส่งอัจฉริยะสำหรับการนำทางภายในอาคารโดยใช้ LiDAR ร่วมกับ ROS 2 โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางในการตรวจจับและหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง
2. เพื่อศึกษาความแม่นยำระบบแจ้งเตือนด้วยเสียง
3. เพื่อศึกษาความแม่นยำในการจัดส่งของตรงตามจุดรับส่ง

งานวิจัยนี้จะช่วยลดการพึ่งพาแรงงานมนุษย์ในการขนส่งสิ่งของภายในอาคาร เพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน และลดความเสี่ยงจากการทำงานในพื้นที่อันตราย ทั้งนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นจะอยู่ในรูปแบบต้นแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลองภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดและประยุกต์ใช้กับงานด้านโลจิสติกส์และระบบอัตโนมัติในอนาคตได้ต่อไป

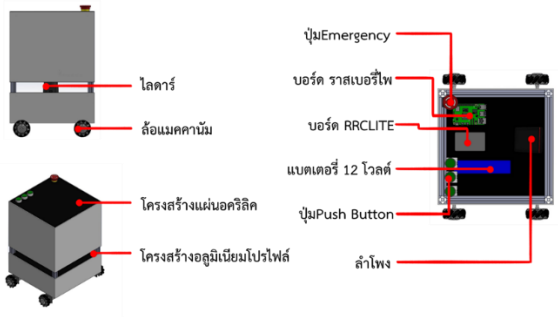
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 วัสดุ อุปกรณ์ในการวิจัย

2.1.1 บอร์ดราสเบอรี่ไพ 4
2.1.2 แบตเตอรี่
2.1.3 ลำโพง
2.1.4 โครงสร้างอลูมิเนียมโปรไฟล์
2.1.5 LiDAR
2.1.6 บอร์ด RRC Lite
2.1.7 ปุ่ม Push Button Switch
2.1.8 มอเตอร์ 12V

2.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ

การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ โครงสร้างมีหน้าที่รองรับน้ำหนักอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ทั้งหมดของหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะสามารถทำงานได้อย่างมั่นคงและปลอดภัย พร้อมทั้งรองรับการเคลื่อนไหวในระหว่างการทำงานของโรบอทส่งของอัจฉริยะดังแสดงในรูปที่ 1

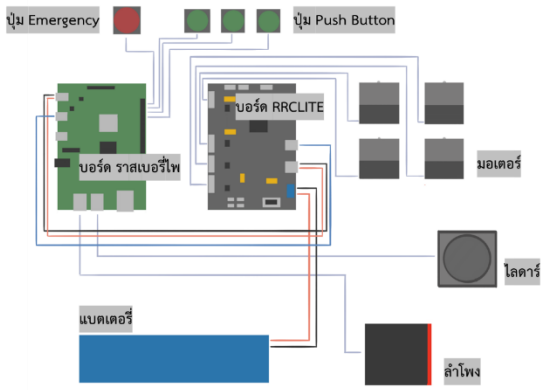


รูปที่ 1 ส่วนประกอบโรบอทส่งของอัจฉริยะ

2.3 แบบจำลองวงจรระบบการทำงานของหุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ

วงจรการพัฒนาหุ่นยนต์ ถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการขนส่งสิ่งของภายในพื้นที่ต่าง ๆ โดยมุ่งเน้นให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายที่กำหนดได้

มีระบบตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ระบบแจ้งเตือนด้วยเสียง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการขนส่งสิ่งของ ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวยังใช้เป็นแนวทางในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะในกระบวนการพัฒนา ดังแสดงในรูปที่ 2



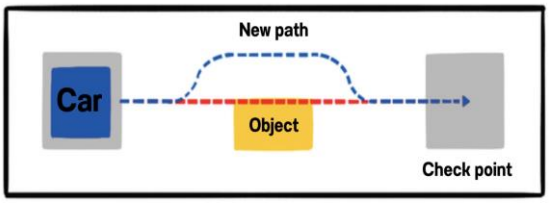
รูปที่ 2 วงจรควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

2.4 ระบบการทำงานของโรบอทส่งของอัฉริยะ

ระบบ LiDAR (LiDAR) เมื่อมีสิ่งกีดขวางในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่ไป หุ่นยนต์จะหยุดแล้วเลือกเส้นทางใหม่ในการเคลื่อนที่ LiDAR จะเป็นตัวกำหนดให้มอเตอร์ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4



รูปที่ 3 กรณีที่ 1 ไม่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 4 กรณีที่ 2 มีสิ่งกีดขวาง

2.5 วิธีการ

2.5.1 เตรียมพื้นที่สำหรับการทดสอบ โดยจัดวางกำแพงหรือสิ่งกีดขวางภายในพื้นที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด

2.5.2 นำรถไปวาง ณ จุดรับของที่กำหนดไว้

2.5.3 เริ่มการทำงานของระบบรถเพื่อให้รถทำการสแกนและสำรวจพื้นที่โดยรอบ

2.5.4 นำรถกลับมายังจุดเริ่มต้นอีกครั้ง พร้อมทำการกำหนดสถานีเพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการปฏิบัติงานถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 5

2.5.5 ทำการกดปุ่มที่ 1 , 2 และ 3 ให้หุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ ไปยังสถานีที่กำหนด (ปุ่มที่ 1 สำหรับส่งไปสถานีที่ 1, ปุ่ม 2 สำหรับส่งไปสถานีที่ 2 และปุ่ม 3 สำหรับส่งไปสถานีที่ 3)

2.5.6 ดำเนินการเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบระหว่างกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง ระหว่างทางไปกลับแต่ละสถานี จุดละ 1 ชิ้น และ จุดละ 2 ชิ้น



รูปที่ 5 จุดเริ่มต้นโรบอทส่งของอัฉริยะ

2.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

กระบวนการนี้ประกอบด้วยการประเมินข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากการทดลอง การวิเคราะห์ความแม่นยำของหุ่นยนต์ส่งของอัฉริยะ รวมถึงการหาข้อสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น โดยคำนวณหาค่าความแม่นยำ โดยการคำนวณค่าความถูกต้องและความแม่นยำโดยใช้สมการ ดังนี้

ความแม่นยำ(ร้อยละ)

= 100 – ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ) (1)

ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

$$= \frac{\text{ค่าที่ทดลองได้-ค่ามาตรฐาน}}{\text{ค่ามาตรฐาน}} \quad (2)$$

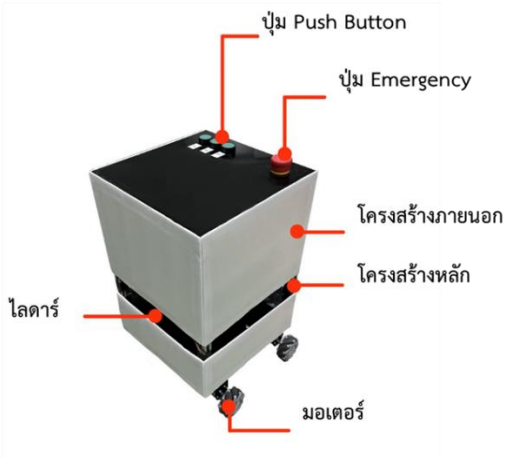
ค่าความคาดเคลื่อน(ร้อยละ)

= ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ × 100 (3)

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ

ลักษณะของเครื่องรถอัตโนมัติถูกออกแบบ ด้วยระบบควบคุมโดยใช้ Raspberry Pi, (ROS 2) ประมวลผลระดับบนเพื่อนำทางด้วย LiDAR สแกน 360 องศา และขับเคลื่อนด้วย 2 ล้อ เพื่อการเคลื่อนที่ โดยติดตั้งแบตเตอรี่ส่วนล่างเพื่อถ่วงดุลน้ำหนักและรักษาเสถียรภาพขณะปฏิบัติงาน ดังรูปที่ 6

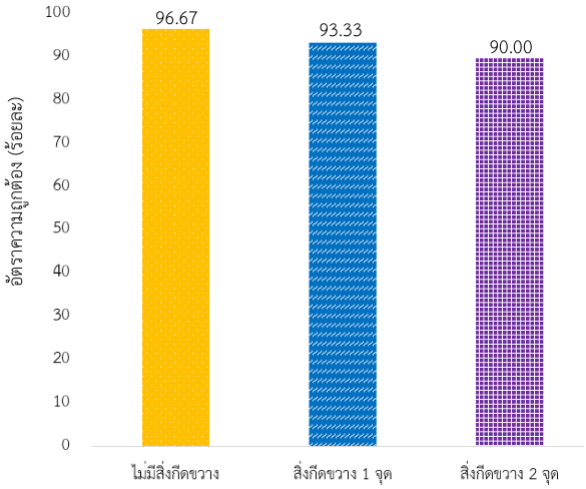


รูปที่ 6 หุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะ

3.2 ความแม่นยำในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

จากการทดลองความแม่นยำในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (ทดสอบซ้ำ 3 รอบต่อเงื่อนไข รอบละ 10 ครั้ง) พบว่าในการทดลองในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางในการทดสอบรอบที่ 1 หุ่นยนต์มีการหยุดนิ่งอยู่กับที่ ในการทดลองครั้งที่ 2 และรอบที่ 3

หุ่นยนต์สามารถเข้าจุดจอดได้ครบทุกครั้ง ค่าความแม่นยำร้อยละ 96.67 ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 จุด ในการทดสอบรอบที่ 2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวางจุดที่ 1 ทำให้มีค่าความแม่นยำร้อยละ 96.67 ในการระบุตำแหน่ง [3, 4] และในกรณีที่ 3 มีสิ่งกีดขวาง 2 จุด ในการทดสอบรอบที่ 2 หุ่นยนต์หยุดนิ่งอยู่กับที่ และในรอบที่ 3 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ชนสิ่งกีดขวางจุดที่ 1 ทำให้มีค่าความแม่นยำร้อยละ 90.00 รูปที่ 7

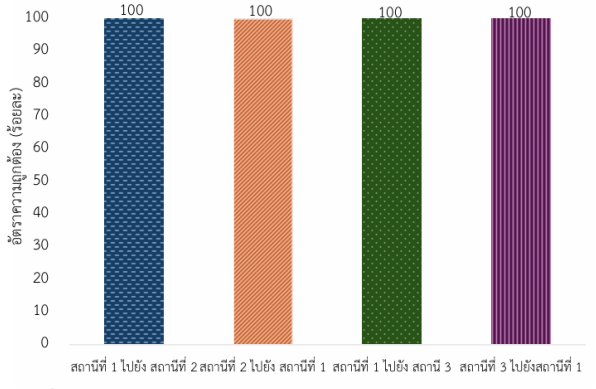


รูปที่ 7 ผลการทดลองความแม่นยำในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าอัตราความแม่นยำมีความลดลงเมื่อมีสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอุปสรรคมากขึ้น ทำให้ระบบประมวลผลหนักขึ้น เพื่อที่จะหาทางการเดินทางที่ปลอดภัย ซึ่งในบางกรณีถ้ามีพื้นที่แคบเกินไป หุ่นยนต์จะประมวลผลว่าไม่สามารถผ่านได้

3.3 ความแม่นยำระบบแจ้งเตือนด้วยเสียง

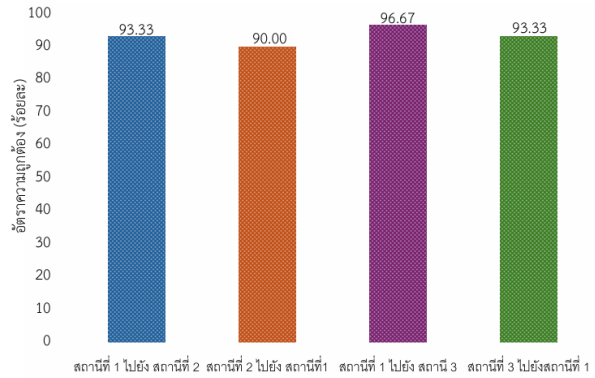
ระบบสามารถเล่นไฟล์เสียงได้ถูกต้องทั้งหมด ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ระบบจะสั่งการทำงานไฟล์เสียงที่ 1 และหุ่นยนต์หยุดที่สถานีระบบจะเล่นไฟล์เสียงที่ 2 ซึ่งมีความถูกต้องร้อยละ 100 ดังรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมการทำงานของไฟล์เสียงได้อย่างถูกต้องและมีความเสถียรตลอดการทดสอบ



รูปที่ 8 ความถูกต้องในการเล่นไฟล์เสียง

3.4 ความแม่นยำในการจัดส่งของตรงตามจุดรับส่ง

ความแม่นยำในการจัดส่งของตรงตามจุดรับส่ง พบว่า ในรอบที่ 1 และรอบที่ 2 จากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 2 หุ่นยนต์ส่งของอัจฉริยะได้หยุดนิ่งก่อนถึงสถานี และในรอบที่ 3 หุ่นยนต์ไปถึงสถานีโดยไม่มีข้อผิดพลาด ความถูกต้องร้อยละ 93.33 จากสถานีที่ 2 ไปยังสถานีที่ 1 ในทั้ง 3 รอบ หุ่นยนต์จะหยุดนิ่งก่อนถึงสถานี จึงมีความถูกต้องร้อยละ 90.00 จากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 3 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 3 หุ่นยนต์เข้าสถานีโดยไม่มีข้อผิดพลาด [5] ส่วนในรอบที่ 2 เกิดปัญหาหุ่นยนต์หยุดไม่อยู่ในกรอบสถานีที่กำหนด จึงมีความถูกต้องร้อยละ 96.67 ซึ่งมากที่สุดในการทดลองนี้ และจากสถานีที่ 3 ไปยังสถานีที่ 1 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 2 หุ่นยนต์ได้หยุดนิ่งก่อนถึงสถานีที่กำหนด ส่วนในรอบที่ 3 ไม่มีข้อผิดพลาดในการทดลอง มีความถูกต้องร้อยละ 93.33 ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความถูกต้องในการจัดส่งของตรงตามจุดรับส่ง

4. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดลองด้านการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง พบว่า ความแม่นยำของระบบมีความแปรผกผันกับจำนวนสิ่งกีดขวาง เมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางได้ร้อยละ 96.67 ลดลงเป็นร้อยละ 93.33 เมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 จุด และร้อยละ 90.00 เมื่อมี 2 จุด สาเหตุหลักมาจากภาระการประมวลผลข้อมูลจุดสแกนจำนวนมากจาก LiDAR บนบอร์ด Raspberry Pi 4 ทำให้การอัปเดตแผนที่สิ่งกีดขวางแบบเรียลไทม์ไม่ทันความเร็วของหุ่นยนต์ในบางสถานการณ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Yang et al. [3] ที่พบว่า LiDAR สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ แม้จะมีข้อจำกัดด้านการประมวลผลในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางหนาแน่น

สำหรับความแม่นยำในการจัดส่งพัสดุ พบว่าระบบทำงานได้ในช่วงร้อยละ 90.00-96.67 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักจากความไม่เสถียรของสัญญาณ Wi-Fi ซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการสื่อสารระหว่าง ROS 2 nodes ทำให้หุ่นยนต์หยุดชั่วคราวและต้องคำนวณเส้นทางใหม่ ผลนี้สอดคล้องกับงานของ Yu Z. [5] ที่ระบุว่าเสถียรภาพของระบบสื่อสารเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งมอบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติในสภาพแวดล้อมจริง

ระบบแจ้งเตือนด้วยเสียงมีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 93.33-100 เนื่องจากทำงานอิสระจากระบบนำทาง จึงไม่ได้รับผลกระทบจากความล่าช้าของ LiDAR processing ผลโดยรวมแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ LiDAR ร่วมกับ ROS 2 Nav2 stack มีศักยภาพสูง การรับรู้และการควบคุมในสภาพแวดล้อมขนาดใหญ่แบบไดนามิกได้ดี [6] ในการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ขนส่งอัตโนมัติภายในอาคาร อย่างไรก็ตามควรพัฒนาเสถียรภาพของระบบสื่อสารและเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลในอนาคต

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบโครงสร้างโรบอท ส่งของอัจฉริยะมีมิติขนาด 37 x 30 x 40 เซนติเมตร สามารถเข้าสถานีที่กำหนดได้ความแม่นยำร้อยละ 96.67 และลดลงเมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 จุด ซึ่งมีค่าความแม่นยำร้อยละ 93.33 และลดลงอีกในกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง 2 จุด มีค่าความแม่นยำร้อยละ 90.00

ความแม่นยำระบบแจ้งเตือนด้วยเสียง ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระบบสามารถเล่นไฟล์เสียงได้ถูกต้องทั้งหมด จะเห็นได้ว่าระบบสามารถแยกได้ว่าตอนนี้รถกำลังเคลื่อนที่หรือหยุดอยู่สถานีแล้ว

ความแม่นยำในการจัดส่งของตรงตามจุดรับส่ง ผลการทดสอบ หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ร้อยละ 90.00-96.67 ซึ่งข้อผิดพลาดที่เกิดเกิดจากปัญหาไวไฟไม่เสถียร ส่งผลให้ระบบประมวลผลข้อมูลล่าช้าทำให้หุ่นยนต์เกิดการหยุดชั่วคราวก่อนถึงจุดหมาย เพื่อทำการวิเคราะห์ตำแหน่งปัจจุบันของตนเองและคำนวณ

เส้นทางที่จะเคลื่อนที่ต่อไป จึงส่งผลต่อความต่อเนื่องในการทำงานของระบบในบางรอบการทดลอง

ข้อเสนอแนะ ระบบได้ติดตั้งเซนเซอร์เอนโคเดอร์กับมอเตอร์แล้วผ่านบอร์ด RRC Lite ทำให้ระบบสามารถรับทราบข้อมูลจำนวนรอบ ความเร็ว และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความแม่นยำในการนำทางอยู่ในระดับสูง อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อไป ควรปรับปรุงเสถียรภาพของสัญญาณไวไฟและเพิ่มความเร็วในการประมวลผล ราสเบอรี่ไพ 5 ทำให้ระบบทำงานได้ เร็วขึ้น เสถียรมากขึ้น และรองรับงานประมวลผลที่ซับซ้อนกว่าเดิม และเพิ่มความจุของแบตเตอรี่เพื่อการทำงานที่ต่อเนื่องในระยะเวลานาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าขอวิทยานิพนธ์ หนังสือ ตำรา บทความที่ใช้ในการสืบค้นในเอกสารอ้างอิงทุกท่าน และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้สถานที่และอำนวยความสะดวกรวมถึงให้การช่วยเหลือ จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] E Shaklab, A Karapetyan, A Sharma, M Mebrahtu, M Basri, M Nagy, S Malik, S Abbas, J Dias and M Khonji. “Toward Fully Autonomous Last-Mile Logistics: A Case Study with a Safety-Boosted Self-Driving Delivery Robot.” IEEE Access, 13(1), 2025: 182593–182607.

[2] Wang, W., Zhao, W., Wang, X., et al. (2019). “A low-cost simultaneous locali zation and mapping algorithm for last-mile indoor delivery.” In: 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Liverpool, UK, (July): 329–336.

[3] Yang, Z., A. Ng, Y. Jiao, M.A. Viraj J. Muthugala, M.R. Elara. (2026). “A LiDAR-based human tracking and interaction framework for an autonomous pavement cleaning robot.” Results in Engineering 29,1 (March): 1-11.

[4] Lin, Z., Zhang, S., Gong, B., and Liu, H. (2024). “Near-crash risk identification and evaluation for takeout delivery motorcycles using roadside LiDAR.” Accident Analysis and Prevention 199, 1 (May): 1-16.

[5] Yu, Z. (2025). “Design and Implementation of a Wheeled Robot with Obstacle Avoidance and Navigation Capabilities for Drug Delivery.” Proceedings of the 2025 International Conference on Electronics, Electrical and Grid Technology (ICEEGT 2025)

[6] Macenski, S., Martín, F., White, R., and Clavero, J. U. (2020). "The Marathon 2: A Navigation System." In Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, USA: 2718–2725.

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

Study on Physical Properties of Paddy Rice Grains for Designing a Paddy Cleaning Device in Small-scale Rice Mills

ชัยณรงค์ หล่มช่างคำ[1*], ขรินทร์ทิพย์ ศรีอุ่นลี[1], ภัศราวดี ดอนมงคล[1] และ ชาญชัย เหลาหา[2]

[1] สาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
[1]150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
[2]สาขาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
[2]150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: E-mail: chainarong.lo@rmuti.ac.th โทร 087-9451522

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ผลการทดสอบพบว่า เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 มีค่าความกว้างระหว่าง 1.98-2.79 มิลลิเมตร ความยาวมีค่าระหว่าง 9.25-11.51 มิลลิเมตร ความหนามีค่าระหว่าง 1.45-2.14 มิลลิเมตร ค่าความชื้นมีค่าระหว่าง 8.50-11.01 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 และ 0.60 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่ามุมเสียดทานระหว่างวัสดุและผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติการไหลได้ดีมากและดีจะอยู่ในช่วงมุม 24-31 องศา และ 30-48 องศา และเริ่มไหลได้ยากและยากมากในช่วงมุม 45-57 องศา ขึ้นไป และค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตของอยู่ระหว่าง 20.0-25.0 องศา

คำสำคัญ: เมล็ดข้าวเปลือก, คุณสมบัติทางกายภาพ, อุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าว

Abstract

This research aims to investigate the physical properties of paddy grains in order to design a paddy cleaning device for small-scale rice mills. The experimental results revealed that the RD6 and Jasmine 105 paddy varieties exhibited a width ranging from 1.98 to 2.79 mm, a length from 9.25 to 11.51 mm, and a thickness from 1.45 to 2.14 mm. The moisture content ranged between 8.50 -11.01%, with average bulk densities of 0.50 and 0.60 g/cm³, respectively. Regarding the friction angle between the material and the product, 'very good' and 'good' flowability occurred within the angle ranges of 24°–31° and 30°–48°, respectively. Flow became difficult to very difficult at angles of 45°–57° and above. Lastly, the static coefficient of friction angle was found to be between 20.0° and 25.0°.

Keywords: Paddy grains, Physical properties, Grain cleaning device.

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการส่งออก เนื้อที่เพาะปลูกข้าวรวมทั้งประเทศประมาณ 71 ล้านไร่ โดยแบ่งเป็นเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปีประมาณ 61 ล้านไร่ ผลผลิต 27 ล้านตัน/ปี มีผลผลิต 451 กิโลกรัม/ไร่ ส่วนพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง 10 ล้านไร่ ผลผลิต 6.5 ล้านตัน/ปี มีผลผลิต 653 กิโลกรัม/ไร่ ข้าวนาปรังส่วนมากจะนิยมปลูกมากที่สุดใน ภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ส่วนข้าวนาปรังนิยมปลูกมากที่สุดใน ภาคกลาง รองลงมา ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ การที่จะส่งออกข้าวส่วนใหญ่แล้วจะส่งออกข้าวสารซึ่งมีขบวนการผลิตอีกหลายขั้นตอน [1] ในการทำปลูกข้าวในปัจจุบันความต้องการในการเพิ่มผลผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้น มีการนำเอาเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาช่วยในการทำการเกษตรกรรมได้หลายอย่าง การนำเข้าเครื่องจักรมาช่วยในการทำนาข้าวและช่วยในการเก็บเกี่ยวข้าวปัจจุบันได้มีการนำรถเกี่ยวนวดข้าวมาช่วยในการเก็บเกี่ยวข้าว โดยสามารถเก็บเกี่ยวข้าวได้ประมาณ 30-50 ไร่/วัน อย่างไรก็ตามปัญหาจากการใช้รถเกี่ยวนวดข้าว คือ มีสิ่งเจือปนในเมล็ดข้าวเปลือกหลังการเก็บข้าว พบมากในการทำนาหว่านมากกว่าการทำนาดำ ซึ่งรถเกี่ยวนวดข้าวนั้น ดังนั้นวัชพืชที่ปะปนในแปลงข้าวจึงปะปนมากับเมล็ดข้าวเปลือกที่ทำการเก็บเกี่ยว เนื่องจากระบบการทำงานของรถเกี่ยว ใช้ลมทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกของรถเกี่ยวทำการเป่าเส้นฟางและวัชพืชชิ้นใหญ่ จะไม่สามารถที่จะเป่าเศษวัชพืชชิ้นเล็กๆออกไปได้ กรณีถ้าเพิ่มความแรงของลมอาจจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกถูกเป่าออกไปด้วยทำให้ยังคงมีเศษวัชพืชสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเมล็ดข้าวเปลือกปะปนอยู่ จึงต้องมีการคัดแยกสิ่งเจือปนก่อนที่จะนำข้าวไปสี ขั้นตอนคัดแยกโดยใช้เครื่องสีฝัดในสมัยก่อนมีหลายขั้นตอนก่อให้เกิดความล่าช้าทำให้เสียเวลาในการคัดแยก ฟางข้าว เศษวัสดุจากพืช [2]

ขั้นตอนคัดแยกที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ในการคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากเมล็ดข้าวเปลือกการทำการสีข้าว เช่น (ทิพลดา และคณะ) [2] ได้สร้างเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือก เครื่องนี้ใช้ระบบตะแกรงแบบโยกร่อน 2 ตะแกรง 3 ชั้น (รพีพรรณ) [3] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ข้าวในครัวเรือนและเพื่อศึกษาความเร็วลมที่เหมาะสมในการเป่าสิ่งเจือปนออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าว และ (วราภรณ์) [4] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยปัจจัยที่ทำการทดสอบ คือ ความกว้างของช่อปลายข้าว และความเร็วของลม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบว่ามีการนำเอาเครื่องทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกมาประยุกต์ใช้กับเครื่องสีขนาดเล็กรวมเข้าไว้ภายในเครื่องเดียวให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นการลดขั้นตอนสำหรับการปฏิบัติงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็กรวมเข้าไว้ภายในเครื่องเดียวเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพเพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปต่อยอดเพื่อเป็นการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรสำหรับทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกและเป็นประโยชน์ในด้านของอุตสาหกรรมข้าวต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

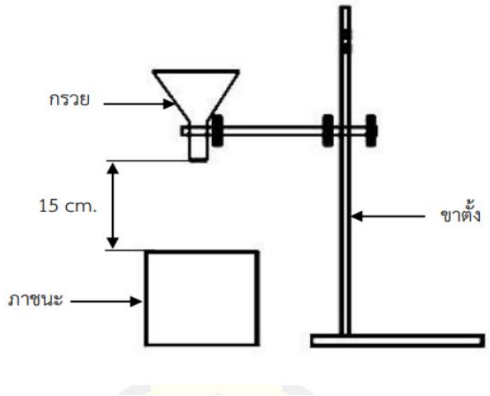
ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกในครั้งนี้ โดยใช้เมล็ดข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ คือ เมล็ดข้าวเปลือก กข 6 และ เมล็ดข้าวหอมมะลิ 105 ที่ปลูกในเขตอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น มาทำการทดสอบครั้งนี้ การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งประกอบไปด้วย 1. วัดขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความหนา และค่าความชื้น โดยสุ่มเมล็ด จำนวนตัวอย่างละ 100 เมล็ด บันทึกข้อมูล โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ โดยความละเอียด ±0.01 มิลลิเมตรเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบ ตัวชี้วัด คือ ค่าสูงสุด ตามวิธีการทดสอบของ [5] (ดังรูปที่ 1) ส่วนการวัดความชื้นโดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบ จำนวนตัวอย่างละ 3 ซ้ำๆ ละ 100 กรัม ด้วยเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก KETT PM-450 เป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบ โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ [6]



การวัดความกว้าง การวัดความยาว

รูปที่ 1 วิธีการวัดขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก

2. ความหนาแน่นรวม ของเมล็ดข้าวเปลือก ตัวอย่างละ 10 ซ้ำ โดยใช้ภาชนะบรรจุขนาด 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้ไม้ผิวเรียบที่มีความยาวเกินขอบของภาชนะบรรจุสำหรับใช้ปาดเมล็ดข้าวเปลือก และใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก Digital เป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบ บันทึกข้อมูลแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณและประมวลผล ตามลำดับ ดังสมการที่ 1 ตามวิธีการทดสอบของ [5]



รูปที่ 2 อุปกรณ์ในการหาความหนาแน่น

$$D = \left(\frac{M}{V} \right) \qquad (1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวเปลือก (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M คือ น้ำหนักของหัวมันสำปะหลัง (กรัม)

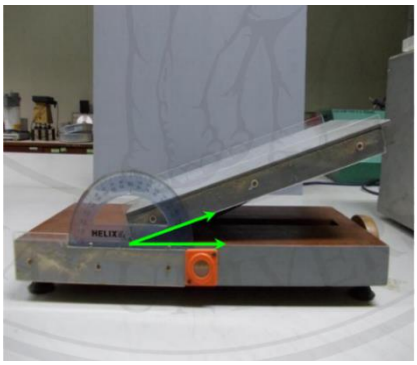
V คือ ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3. มุมคงสภาพกองวัสดุ โดยเริ่มจากการวางภาชนะทรงกระบอกตั้งฉากบนแผ่นพื้นเรียบจากนั้นค่อยๆ เทข้าวเปลือกใส่ลงในทรงกระบอกจนเต็มยกภาชนะ ค่อยๆ ปล่อยข้าวเปลือกลงในแนวดิ่งอย่างช้าๆ เพื่อให้ข้าวเปลือกไหลออกและเลื่อนไถลตัวลงบนแผ่นพื้นจนกลายเป็นรูปกรวย จำนวน 40 ซ้ำ (ดังรูปที่3) บันทึกข้อมูลแล้วนำค่าที่ได้ไปประมวลผลตามลำดับ ตัวชี้วัดค่าของมุมความลาดของกองวัสดุที่คงสภาพสมดุลย์ ตามวิธีการทดสอบของ [5]



รูปที่ 3 อุปกรณ์การหามุมการคงสภาพกองวัสดุ

4. สัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตของเมล็ดข้าวเปลือกตัวอย่างละ 10 ซ้ำ โดยใช้แผ่นไม้อัด แผ่นเหล็ก แผ่นสแตนเลส และแผ่นยาง เป็นอุปกรณ์ทดสอบวัดมุมการไหล โดยใช้วิธีการทดสอบของ [7] (ดังรูปที่ 4) บันทึกข้อมูลแล้วนำค่าที่ไปประมวลผลตามลำดับ ตัวชี้วัดค่าที่เอาชนะสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตมากที่สุด



รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิต

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 ซึ่งประกอบไปด้วยการวัดขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความหนา และค่าความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จากการศึกษา พบว่าทั้ง 2 สายพันธุ์มีค่าความกว้างระหว่าง 1.98-2.79 มิลลิเมตร ความยาวมีค่าระหว่าง 9.25-11.51 มิลลิเมตร ความหนามีค่าระหว่าง 1.45-2.14 มิลลิเมตร ค่าความชื้นมีค่าระหว่าง 8.50-11.01 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าหนาแน่น โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 และ 0.60 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือก เช่น ในส่วนของตะแกรงร่อน เป็นต้น

ตารางที่ 1 ขนาดของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข6 และค่าความชื้น โดยเฉลี่ย

คุณสมบัติ	ความกว้าง (มม.)	ความยาว (มม.)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (%)
ค่าสูงสุด	2.79	11.01	2.14	11.01
ค่าต่ำสุด	2.22	9.25	1.90	9.50
ค่าเฉลี่ย	2.57	9.95	2.02	9.80
SD(±)	0.15	0.37	0.09	0.22

*ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2 ขนาดของเมล็ดข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 และค่าความชื้น โดยเฉลี่ย

คุณสมบัติ	ความกว้าง (มม.)	ความยาว (มม.)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (%)
ค่าสูงสุด	2.71	11.51	1.61	9.00
ค่าต่ำสุด	1.98	9.33	1.45	8.50
ค่าเฉลี่ย	2.35	10.61	1.53	8.78
SD(±)	0.15	0.39	0.07	0.14

*ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการทดสอบค่ามุมความลาดกองวัสดุที่คงสภาพสมดลย์ระหว่างวัสดุและผลิตภัณฑ์ของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 พบว่าทั้ง 2 สายพันธุ์ คุณสมบัติการไหลได้ดีมากถึงไหลได้พอดีจะอยู่ในช่วงมุม 24-31 องศา และ 30-48 องศา และเริ่ม

ไหลได้ยากและยากมากในช่วงมุม 45-57 องศาขึ้นไป ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือก ในส่วนของฮอปเปอร์ถังเก็บวัสดุหรือไซโลเป็นต้น

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการไหลวัสดุและผลิตภัณฑ์ของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6

มุมกองวัสดุ (องศา)	คุณสมบัติในการไหล
25 - 31	ไหลได้ดีมาก
> 31 - 39	ไหลได้ดี
> 39 - 48	ไหลพอดี
> 48 - 57	ไหลได้ยาก
> 57	ไหลได้ยากมาก

ตารางที่ 4 คุณสมบัติการไหลวัสดุและผลิตภัณฑ์ของเมล็ดข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105

มุมกองวัสดุ (องศา)	คุณสมบัติในการไหล
24 - 30	ไหลได้ดีมาก
> 30 - 38	ไหลได้ดี
> 38 - 45	ไหลพอดี
> 45 - 55	ไหลได้ยาก
> 55	ไหลได้ยากมาก

ผลจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 ดังแสดงในตารางที่ 5 เมื่อวางบนพื้นผิวแผ่นยางจะสูงกว่าแผ่นวัสดุอื่น โดยมุมความเสียดทานอยู่ระหว่าง 35.0-38.0 รองลงมาเป็น ไม้อัดตามเสี้ยน แผ่นเหล็ก และแผ่นสแตนเลส โดยมุมความเสียดทานอยู่ระหว่าง 28.0-30.0 และ 20.0-25.0 ส่วนแผ่นสแตนเลสอยู่ระหว่าง 10.0-15.0 องศา ตามลำดับ เพื่อให้วัสดุที่นำไปใช้ในการออกแบบช่องทางออกของเมล็ดข้าวเปลือกให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เพื่อใช้งานจริง ควรเลือกใช้แผ่นเหล็กที่มุมเสียดทานสถิตอยู่ระหว่าง 20.0-25.0 องศา เพราะใช้งานได้นาน ไม่ผุกร่อนง่ายและมีความแข็งแรง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 บนพื้นผิวของวัสดุต่างๆ โดยเฉลี่ย

สัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิต				
ผลิตภัณฑ์	แผ่นไม้อัดตามเสี้ยน	แผ่นสแตนเลส	แผ่นเหล็ก	แผ่นยาง
พันธุ์ กข 6	30.0	15.0	25.0	38.0
หอมมะลิพันธุ์ 105	28.0	10.0	20.0	35.0

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 และข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 สำหรับเป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์ทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก พบว่า พบว่าทั้ง 2 สายพันธุ์มีค่าความกว้างระหว่าง 1.98-2.79 มิลลิเมตร ความยาวมีค่าระหว่าง 9.25-11.51 มิลลิเมตร ความหนามีค่าระหว่าง 1.45-2.14 มิลลิเมตร ค่าความชื้นมีค่าระหว่าง 8.50-11.01 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่น โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 และ 0.60 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่ามุมเสียดทานระหว่างวัสดุและผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติการไหลได้ดีมากถึงไหลได้พอดีจะอยู่ในช่วงมุม 24-31 องศา และ 30-48 องศา และเริ่มไหลได้ยากและยากมากในช่วงมุม 45-57 องศาขึ้นไป ขึ้นไป และค่าสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานสถิตของแผ่นเหล็กอยู่ระหว่าง 20.0-25.0 องศา

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับการสนับสนุนทุน สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2569). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2569. เข้าถึงได้จาก http://www.oae.go.th

[2] ทิพลดา ภู่มาลา ทรงเศก บัวปรอท ธงชัย ฉายอรุณ สยามรัฐ เพิกอาภรณ์ และเฉลียว เกตุแก้ว. (2567). “เครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนในเมล็ดพันธุ์ข้าว.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 9,2 : 164-172.

[3] รพีพรรณ เหล็กหมื่นไวย. (2562). “การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ข้าวในครัวเรือน.” วารสารบริหารธุรกิจอุตสาหกรรม. 1,2 : 36-46.

[4] วราภรณ์ ชนะพรมมา. (2565). “การศึกษาปัจจัยของเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง.” วารสารเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์. 5,1 : 40-47.

[5] บัณฑิต จริโมภาส. (2549). สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร. ภาควิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม 160 น.

[6] AOAC. Official Methods of Analysis. 16 th ed. Association of official analytical Chemists. (1984). INC, USA., P. 231- 243.

[7] Mohsenin N.N. (1986). Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers.

การออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติ

Design and Construction of an Automatic Temperature and Humidity Control System

พิชิตชัย วิเชียรเพลิด[1], นันทธพัษ นาคทัด[1], อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล[2], ประสิทธิ์ โสภา[2], ชัยณรงค์ หล่มช่างคำ[2], ประยูร จอมหล้าพีรติกุล[2*]

[1] นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[2] อาจารย์สาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

*ผู้ติดต่อ: E-mail prayoon.jo@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0895547049

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติสำหรับใช้ในการเก็บรักษาวัตถุดิบทางการเกษตรและอาหาร โดยระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 35 ถึง 70 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 85 ผ่านการทำงานร่วมกันของเซนเซอร์ตรวจวัด ชุดควบคุมอัตโนมัติ ฮีตเตอร์ พัดลมระบายอากาศ และระบบเพิ่ม–ลดความชื้น การวิจัยประกอบด้วยการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ การทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของระบบ และการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องในการยืดอายุการเก็บรักษาขนมวาฟเฟิลอบกรอบ โดยกำหนดอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 20, 30 และ 40 เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการเก็บรักษาโดยใช้สารดูดความชื้นจากซิลิกาเจลและการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมปกติ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (L*a*b*) ปริมาณความชื้น ค่า Water Activity (aw) และค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ตามค่าที่กำหนด โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 30 สามารถรักษาคุณภาพของขนมวาฟเฟิลอบกรอบได้ดีที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ค่า Water Activity (aw) ค่าสี (L*a* b*) และค่าความกรอบน้อยกว่าวิธีการเก็บรักษาแบบอื่น ส่งผลให้สามารถลดการเสื่อมสภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ เครื่องต้นแบบยังเป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนต่ำ สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานจริงได้ทั้งในระดับครัวเรือน เกษตรกรรายย่อย และผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME)

คำสำคัญ: เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติ, ขนมวาฟเฟิลอบกรอบ, การเก็บรักษา

Abstract

This research aimed to design and construct an automatic temperature and humidity control system for the storage of agricultural and food products. The system was designed to control temperature within the range of 35–70 °C and relative humidity within the range of 20–85% RH through the integration of temperature and humidity sensors, an automatic control unit, a heater, a ventilation fan, and a humidification–dehumidification system.

The research consisted of the design and construction of a prototype, evaluation of its temperature and humidity control performance, and investigation of its effectiveness in preserving crispy waffles. The storage experiments were conducted at a constant temperature of 35 °C under relative humidity levels of 20%, 30%, and 40% for 24, 48, and 72 hours. The storage performance of the prototype was compared with storage using silica gel desiccant and storage under ambient environmental conditions. Product quality was evaluated based on changes in color values (L*ab**), moisture content, water activity (aw), and crispness.

The results showed that the prototype was capable of maintaining the desired temperature and relative humidity conditions. Storage at 35 °C and 30% relative humidity provided the best preservation performance, resulting in smaller changes in moisture content, water activity (aw), color values (L*ab**), and crispness than the other storage methods. These conditions effectively reduced product deterioration and improved product quality during storage. In addition, the prototype is a low-cost system with the potential for practical applications in households, small-scale farmers, and small and medium-sized enterprises (SME).

Keywords: Automatic temperature and humidity control system; Crispy waffles; Food storage

1. บทนำ

การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นมีบทบาทสำคัญต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารและวัตถุดิบทางการเกษตร เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพ อายุการเก็บรักษา และการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ [1, 2] โดยมีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาอาหาร [3, 4] จากการศึกษาของนักวิจัยด้านการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงส่งผลต่อการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ประเภทขนมอบกรอบ ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียความกรอบและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้อย่างรวดเร็ว [5, 6] โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทเวเฟอร์และแครกเกอร์ที่มีความไวต่อความชื้นในอากาศสูง [7] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น ชุดควบคุมแบบดิจิทัล รุ่น MH0302 ของ Sinotimer ฮีตเตอร์ พัดลมระบายอากาศ และระบบควบคุมความชื้น เพื่อควบคุมสภาวะภายในตู้เก็บรักษา ซึ่งสามารถรักษาค่าความชื้นและอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] งานวิจัยด้านการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารยังพบว่า การควบคุมอุณหภูมิในช่วง 35–45 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในระดับที่เหมาะสม สามารถช่วยลดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ ลดการเกิดเชื้อรา และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ ทั้งยังช่วยรักษาคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้คงคุณภาพได้ดียิ่งขึ้น [1, 9, 10] ดังนั้น การพัฒนาเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารและการเก็บรักษาวัตถุดิบโดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ลดความเสียหายและเพิ่มคุณภาพของสินค้าได้ในระยะยาว [11]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1.เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติ

2.เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตพันธ์ที่เก็บรักษาควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยเครื่องต้นแบบกับวิธีการเก็บรักษาแบบโหลดูดความชื้นจากซิลิกาเจลและแบบการเก็บรักษาภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ

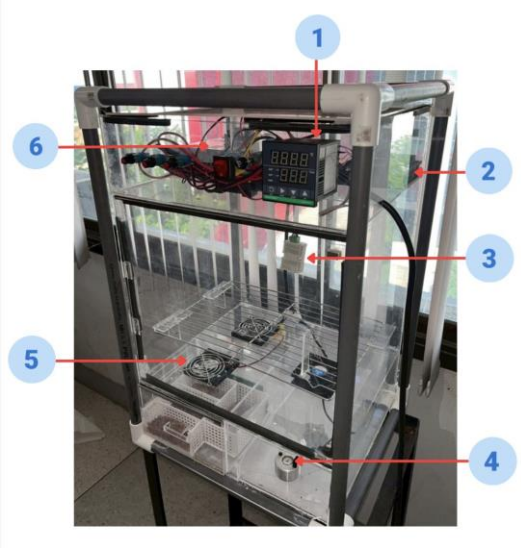
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วิธีการทดลองและวัสดุอุปกรณ์

เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในตู้ปิด สำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาขนมวาฟเฟิลอบกรอบ ภายในระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิทัล รุ่น MH0302 ของ Sinotimer ฮีตเตอร์ พัดลมระบายอากาศ และระบบควบคุมความชื้น เพื่อรักษาสภาวะภายในตู้ให้อยู่ในค่าที่กำหนดตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rahman (2007) [1] และ Kilcast และ Subramaniam (2000) [2] ที่รายงานว่าการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเสื่อมสภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารได้ ตู้ควบคุมที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และสูง 65 เซนติเมตร ภายในตู้ติดตั้งตะแกรงสำหรับวางถาดตัวอย่างขนมวาฟเฟิลอบกรอบ

รวมทั้งระบบหมุนเวียนอากาศเพื่อช่วยกระจายอุณหภูมิและความชื้นให้สม่ำเสมอทั่วทั้งตู้และจัดวางอุปกรณ์ตามหมายเลขดังรูปที่ 1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

1. ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิทัล รุ่น MH0302 ของ Sinotimer
2. พัดลมระบายอากาศ
3. เซนเซอร์วัดอุณหภูมและความชื้น
4. เครื่องทำความชื้น
5. ซิลิกาเจล ลดความชื้น
6. ฮีตเตอร์ เพิ่มอุณหภูมิ



รูปที่ 1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

ในการทดลอง กำหนดอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส และกำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นภายในตู้ จากนั้นนำตัวอย่างขนมวาฟเฟิลอบกรอบเข้าเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์คุณภาพด้านค่าสี (L*a*b*) ปริมาณความชื้น ค่า water activity (aw) และค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการศึกษาของ Labuza และ Altunakar (2007) [13] รวมถึงการศึกษาของดนัย (2561) [14] ที่ใช้การควบคุมความชื้นและ water activity ในการประเมินคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร

3.2 วิธีการเตรียม

ทดสอบขนมวาฟเฟิลต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบ พบว่า ขนมวาฟเฟิลอบกรอบมีมวลเฉลี่ยเท่ากับ 11.10 กรัม โดยมีค่าสีเฉลี่ย L* เท่ากับ 83.67 แสดงถึงลักษณะสีที่ค่อนข้างสว่าง ค่า a* เฉลี่ยเท่ากับ -0.23 ซึ่งมีแนวโน้มออกสีเขียวเล็กน้อย และค่า b* เฉลี่ยเท่ากับ 37.10 แสดงถึงสีเหลืองค่อนข้างชัดเจน ลักษณะโดยรวมจึงเป็นสีเหลืองอ่อนคล้ายสีของวาฟเฟิลอบกรอบทั่วไป ในด้านคุณสมบัติการเก็บรักษา พบว่าค่า Water Activity (aw) เฉลี่ยอยู่ที่ 0.53 และค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.54% ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยังคงความกรอบได้ดี นอกจากนี้ ค่าแรงกดเฉลี่ยเท่ากับ 1.85 นิวตัน แสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความกรอบและแตกหักได้ง่าย ดังตารางที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติกายภาพขนมวาฟเฟิลต้นแบบ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติกายภาพขนมวาฟเฟิลต้นแบบ

ตัวต้นแบบ							
ลำดับ	มวล (กรัม)	สี			aw	ความชื้น (%W.b.)	แรงกด (นิวตัน)
		L*	a*	b*			
1	11.01	84.02	-0.1	37.1	0.54	3.73	1.96
2	11.17	83.10	-0.4	36.9	0.52	3.60	1.73
3	11.13	83.90	-0.2	37.3	0.52	3.29	1.85
เฉลี่ย	11.10	83.67	-0.23	37.10	0.53	3.54	1.85

3.3 การทดลองหาค่าสี

ทำการวัดค่าสีของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Colorimeter PONPE 241CR / PONPE รายงานผลในระบบ CIE ได้แก่ L* (ความสว่าง), a* (สีแดง–เขียว) และ b* (สีเหลือง–น้ำเงิน) โดยทำการวัดอย่างน้อย 3 ตำแหน่งต่อหนึ่งตัวอย่าง และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 2 เครื่อง Colorimeter PONPE 241CR / PONPE

3.4 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ water activity

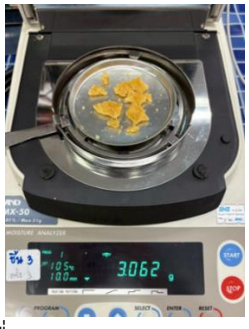
วัดค่า water activity (aw) ของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Water Activity WA-160A ที่อุณหภูมิควบคุม รายงานผลเป็นค่า aw ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3 เครื่อง Water Activity WA-160A

3.5 การทดลองหาปริมาณความชื้น (Moisture content)

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความชื้น (Moisture Analyzer รุ่น AND MX-50) โดยอาศัยหลักการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหาร [12] เนื่องจากสามารถระเหยน้ำออกจากตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดผลกระทบต่อองค์ประกอบสำคัญของผลิตภัณฑ์ สำหรับการศึกษาครั้งนี้กำหนดระยะเวลาในการวิเคราะห์ 10 นาที เพื่อให้การระเหยน้ำเป็นไปอย่างเพียงพอและได้ค่าปริมาณความชื้นที่คงที่ตามเงื่อนไขการทดสอบของเครื่อง ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 4 เครื่องMoisture Analyzer รุ่น AND MX-50

3.6 การวัดแรงกด

วางขนมวาฟเฟิลอบกรอบบนฐานทดสอบของเครื่อง Texture Analyzer และใช้หัวกดกดลงบนตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งเกิดการแตกหัก เครื่องจะบันทึกค่าแรงที่ใช้ในการกดและแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง (Force–Distance Curve) ค่าที่ใช้ในการประเมินความกรอบของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่าแรงสูงสุดก่อนแตกหัก (Maximum Force) และค่าแรงแตกหัก (Fracture

Force) โดยผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแรงแตกหักสูงแสดงถึงความแข็งและความกรอบที่มากกว่า [6, 15, 16]



รูปที่ 5 การวัดค่าแรงกด

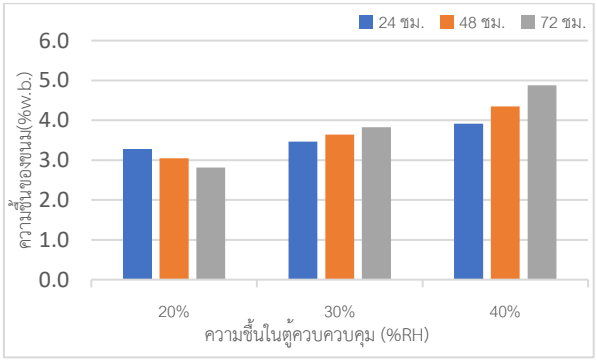
4. ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ค่าสี

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์วาฟเฟิลอบกรอบระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบจากซองมากที่สุด โดยมีค่า L* a* และ b* เท่ากับ 83.42, 0.02 และ 37.82 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับต้นแบบที่มีค่าเท่ากับ 83.67, -0.23 และ 37.10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเก็บรักษาดังกล่าวสามารถคงลักษณะความสว่างและสีเหลืองทองของผลิตภัณฑ์ได้ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการเก็บรักษาอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pathare et al. (2013) [17] ที่รายงานว่า ค่าสีในระบบ CIE L*a*b* สามารถใช้ประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารระหว่างการเก็บรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอุณหภูมิรวมถึงความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์อาหารโดยตรง

4.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้น

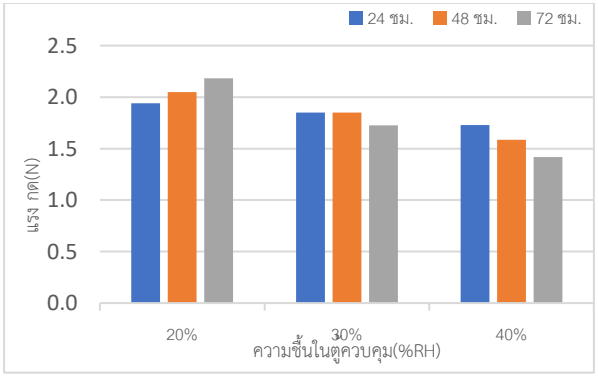
จากการทดลองค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์วาฟเฟิลอบกรอบกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบจากซอง ซึ่งมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.54% พบว่า ตัวอย่างที่มีค่าความชื้นใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นร้อยละ 30 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.64% ซึ่งมีความแตกต่างจากต้นแบบเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเก็บรักษาดังกล่าวสามารถรักษาระดับความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ดี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยังคงลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณภาพโดยรวมใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการเก็บรักษาอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Labuza และ Altunakar (2007) [13] ที่รายงานว่า ปริมาณความชื้นและค่า water activity มีผลโดยตรงต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความชื้นต่ำและมีความคงตัวของค่า aw จะสามารถรักษาความกรอบและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า ดังรูปที่ 6 กราฟค่าความชื้นขนมในตู้ควบคุม



รูปที่ 6 กราฟค่าความชื้นขนมในตู้ควบคุม

4.3 การทดลองหาค่าแรงกด

พบว่าค่าแรงกดของผลิตภัณฑ์วาฟเฟิลอบกรอบกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบจากซอง ซึ่งมีค่าแรงกดเฉลี่ยเท่ากับ 1.85 นิวตัน พบว่า ตัวอย่างที่มีค่าแรงกดใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด คือ ตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีค่าแรงกดเฉลี่ยเท่ากับ 1.85 นิวตัน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะการเก็บรักษาดังกล่าวสามารถรักษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและความกรอบของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบมากที่สุด ดังรูปที่ 7 กราฟค่าแรงกดที่เก็บรักษาไว้ในตู้ควบคุม



รูปที่ 7 กราฟค่าแรงกดที่เก็บรักษาไว้ในตู้ควบคุม

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับยืดอายุการเก็บรักษาวาฟเฟิลอบกรอบโดยใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติร่วมกับการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในตู้ ผลการทดลองพบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความชื้น 30%RHสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุด โดยมีค่าสี (L*a*b*) ปริมาณความชื้น ค่า Water Activity (aw) และค่าแรงกดใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาโดยใช้สารดูดความชื้นจากซิลิกาเจลและการเก็บรักษาภายใต้สภาพแวดล้อมปกติพบว่าการใช้ซิลิกาเจลสามารถช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของความชื้นและค่า Water Activity (aw)ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีเท่ากับการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเนื่องจากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้อย่างคงที่ ขณะที่การเก็บรักษาภายใต้สภาพแวดล้อมปกติทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพมากที่สุด ดังนั้นเครื่องต้นแบบจึงสามารถช่วยลดการเสื่อมคุณภาพ รักษาความกรอบของผลิตภัณฑ์ และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารในระดับครัวเรือน เกษตรกรรายย่อย และผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME)

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และความเห็นในรายงานผลโครงการเป็นของผู้รับการสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป ขอขอบพระคุณ ดร.ประยูร จอมหล้าพีรติกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขและปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Rahman, M. S. (Ed.). (2007). “Handbook of Food Preservation.” 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press.

[2] Kilcast, D. and Subramaniam, P. (Eds.). (2000). “The Stability and Shelf-Life of Food.” Cambridge: Woodhead Publishing.

[3] Mahmood, M. H., Sultan, M., and Miyazaki, T. (2019). “Significance of Temperature and Humidity Control for Agricultural Products Storage: Overview of Conventional and Advanced Options.” *International Journal of Food Engineering*, **15**(10): 20190063. doi:10.1515/ijfe-2019-0063.

[4] Adeyinka, O. A., Momoh-Jimoh, S. E., Khan, M. R., and Aibinu, A. M. (2011). “A Review: Intelligent Controllers for Tropical Food Storage System.” *Proceedings of the 2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM)*, pp. 1–7. doi:10.1109/ICOM.2011.5937150.

[5] Roos, Y. H., Roininen, K., Jouppila, K., and Tuorila, H. (1998). “Glass transition and water plasticization effects on crispness of a snack food extrudate.” International Journal of Food Properties, 1(2): 161–180.

[6] Roudaut, G., Dacremont, C., Vallès Pamiès, B., Colas, B., and Le Meste, M. (2002). “Crispness: a critical review on sensory and technological aspects.” Trends in Food Science & Technology, 13(6–7): 217–227.

[7] Katz, E. E. and Labuza, T. P. (1981). “Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products.” Journal of Food Science, 46(2): 403–409.

[8] Aziz, R. and Karsid. (2015). “Uji Performansi Kontrol Suhu dan Kelembaban Menggunakan Variasi Kontrol Digital dan Kontrol Scheduling untuk Pengawetan Buah dan Sayuran.” Jurnal Nasional Teknik Elektro, 4(2): 215–219.

[9] Pitt, J. I. and Hocking, A. D. (2009). “Fungi and Food Spoilage.” 3rd Edition. New York: Springer Science & Business Media.

[10] Robertson, G. L. (2012). “Food Packaging: Principles and Practice.” 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press.

[11] Tileukeev, Z., Nesipbek, A., and Imashbai, A. (2023). “Evaluating and optimizing energy-efficient microclimate control systems in vegetable storage facilities.” International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 18(3): 677–684.

[12] Singh, R. P. and Heldman, D. R. (2014). “Introduction to Food Engineering.” 5th Edition. San Diego: Academic Press.

[13] Labuza, T. P. and Altunakar, B. (2007). “Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms.” In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, Jr., S. J. Schmidt, and T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. Ames: IFT Press/Blackwell Publishing, pp. 109–154.

[14] ดนัย บุณยเกียรติ. (2561). “การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.” เชียงใหม่: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[15] Bourne, M. C. (2002). “Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement.” 2nd Edition. San Diego: Academic Press.

[16] Paula, A. M. and Conti-Silva, A. C. (2014). “Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses of extruded snacks.” Journal of Food Engineering, 121: 9–14.

[17] Pathare, P. B., Opara, U. L., and Al-Said, F. A. J. (2013). “Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review.” Food and Bioprocess Technology, 6(1): 36–60.

การลดความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งลมร้อนด้วยการควบคุมความเร็วลมแบบแปรผัน

Energy Consumption Reduction in Hot-Air Drying Using Variable Air Velocity Control

อริสรา อิสระ[1], อภินันต์ นามเขต[1], ทรงสุภา พุ่มชุมพล[1], ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์[1], วิระพันธ์ สีหานาม[1], ปฐมพงศ์ เกษตรสิงห์[1], จักราวุธ หอมมาลา[1], กานต์ กอมณี[2] และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1,*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม 48000
*ผู้ติดต่อ: umphisak@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร แต่ใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะพลังงานความร้อนและพลังงานพัดลม งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อควบคุมและติดตามระบบแบบเรียลไทม์ ใช้กระชายขาวเป็นผลิตภัณฑ์ทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C เปรียบเทียบระหว่างความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s และการปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 และ 1.0 m/s เมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ผลการศึกษาพบว่า การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 เป็น 1.5 m/s ลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 20.48–20.88 % ขณะที่การปรับลดเป็น 1.0 m/s ลดค่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 40.34–41.56% เมื่อเทียบกับการใช้ความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปรับความเร็วลมให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถลดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระชายขาว, การอบแห้งลมร้อน, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การควบคุมความเร็วลม, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Abstract

Drying is an important process in the agricultural and food industries. However, it requires high energy input, especially thermal energy and fan power. This study investigated the energy improvement of hot-air drying. Internet of Things (IoT) technology was applied for real-time system control and monitoring. Fingerroot was used as the test material. The drying temperatures were 50, 60, and 70°C. A constant air velocity of 2.0 m/s was compared with stepwise air velocity reduction from 2.0 m/s to 1.5 and 1.0 m/s during the falling rate period. The results showed that reducing the air velocity from 2.0 to 1.5 m/s decreased the specific energy consumption by 20.48–20.88%. Further reducing the air velocity to 1.0 m/s decreased the specific energy consumption by 40.34–41.56%, compared with the constant air velocity of 2.0 m/s. These results indicate that adjusting the air velocity according to the moisture transfer behavior of the material can effectively reduce energy consumption.

Keywords: White fingerroot, Hot-air drying, Internet of Things, Air velocity control, Specific energy consumption

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เนื่องจากเป็นการลดปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดน้ำหนักและปริมาตรในการขนส่งตลอดจนเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร [1,2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะการอบแห้งด้วยลมร้อนยังคงเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง [3] เนื่องจากต้องอาศัยพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ และพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนพัดลมเพื่อพาความร้อนและไอน้ำออกจากห้องอบแห้ง ถึงแม้ระบบอบแห้งลมร้อนจะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายจากข้อดีด้านโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนไม่สูง และสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์เกษตรได้หลากหลายชนิด [1,3] อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดสำคัญของระบบคือการใช้ลมร้อนที่ส่วนใหญ่กำหนดให้ความเร็วลมคงที่ตลอดกระบวนการ ซึ่งยังไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการคายความชื้นของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรส่วนใหญ่ไม่ได้ระเหยความชื้นด้วยอัตราคงที่ตลอดกระบวนการ แต่มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ [4,5] โดยช่วงต้นของการอบแห้ง น้ำบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์สามารถระเหยออกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและถูกพัดพาออกด้วยลมร้อน ความเร็วลมจึงมีบทบาทสำคัญต่อการถ่ายเทมวลบริเวณผิวหน้า อย่างไรก็ตาม เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินการเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ผิวหน้าลดลง และการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ออกสู่ผิวหน้าเป็นกลไกหลักที่ควบคุมการระเหยน้ำ [5,6] ในช่วงนี้การเพิ่มความเร็วลมให้สูงหรือคงที่มีผลต่อการระเหยน้ำน้อยมาก ในทางตรงข้ามทำให้พัดลมใช้พลังงานไฟฟ้าเกินความจำเป็น ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบสูงขึ้น

จากการทบทวนแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า งานวิจัยด้านการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งจำนวนมากมุ่งเน้นการควบคุมอุณหภูมิ [7,8] การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [3,5] การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ [3,9] หรือการประยุกต์ใช้ระบบ IoT เพื่อการติดตามค่าต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบเรียลไทม์ [10,11] อย่างไรก็ตาม ช่องว่างสำคัญของงานวิจัยที่ยังต้องได้รับการพัฒนาเพิ่มเติม คือ การบูรณาการระบบติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้ากับการควบคุมความเร็วลมให้สัมพันธ์กับพฤติกรรมการระเหยความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการพิจารณาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการลดความเร็วลมเมื่อผลิตภัณฑ์เริ่มเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง งานวิจัยที่ผ่านมา [12-14] ยังคงใช้วิธีควบคุมความเร็วลมแบบคงที่ โดยยังขาดการเชื่อมโยงกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา ส่งผลให้ไม่สามารถใช้ศักยภาพของระบบ IoT เพื่อการจัดการพลังงานในกระบวนการอบแห้งได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

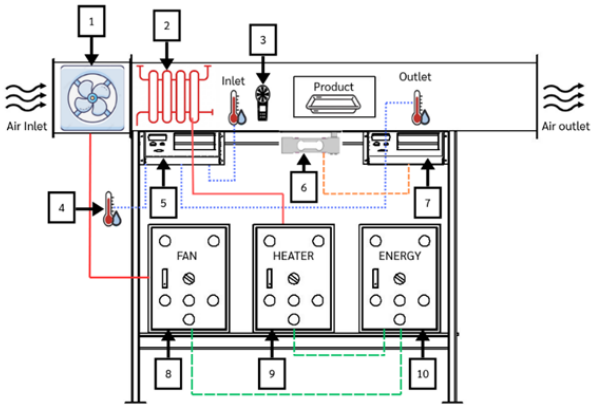
งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการควบคุมความเร็วลมสำหรับเครื่องอบแห้งลมร้อนด้วยเทคโนโลยี IoT โดยมุ่งเน้นการติดตามสภาวะการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แบบเรียลไทม์ ผลลัพธ์จากงานวิจัยคาดว่าจะนำไปสู่แนวทางการพัฒนาระบบอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะการจัดการความเร็วลมให้เหมาะสมกับสภาวะการระเหยความชื้นของผลิตภัณฑ์

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

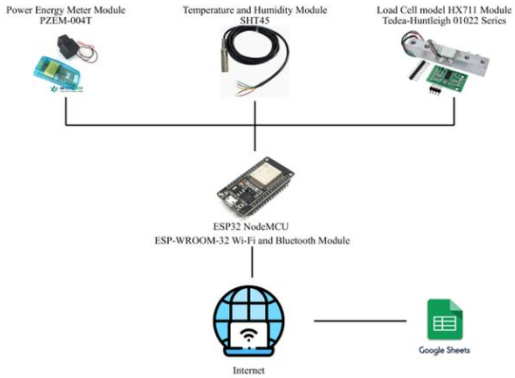
ชุดทดลองเครื่องอบแห้งลมร้อนพร้อมระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังรูปที่ 1 โดยประกอบด้วยพัดลมขนาด 65 W ควบคุมความเร็วรอบผ่านอินเวอร์เตอร์ ชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3,000 W ห้องอบแห้งขนาด 25 x

25 x 25 cm (กว้างxยาวxสูง) ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ทำงานร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (± 1.0°C) บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผ่านโหลดเซลล์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์วัดค่าด้วยเซนเซอร์รุ่น SHT45 (±0.1°C และ ±1% RH) การใช้พลังงานไฟฟ้าวัดด้วยเครื่องรุ่น PZEM-004T เชื่อมต่อ IoT ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งถูกโปรแกรมให้บันทึกค่าตัวแปรทั้งหมดลงฐานข้อมูลคลาวด์ ผ่านสัญญาณ Wi-Fi ทุก ๆ 1 นาที ซึ่งรูปที่ 2 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ IoT



1. พัดลม 2. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3. เครื่องวัดความเร็วลม 4. เทอร์โมคัปเปิ้ล 5. ชุดวัดอุณหภูมิแบบ IoT 6. โหลดเซลล์ 7. ชุดชั่งน้ำหนักแบบ IoT 8. ชุดควบคุมพัดลม 9. ชุดควบคุมพีไอดี 10. ชุดบันทึกพลังงาน

รูปที่ 1 แผนผังชุดทดลอง



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

2.2 วิธีการทดลอง

กระชายขาวที่ใช้ในการทดลองถูกหั่นเป็นชิ้น ยาว 5 cm กว้าง 1.5 cm และหนา 2.5 mm ซึ่งค่าความชื้นของตัวอย่างวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists 2019 [15] โดยพบว่ากระชายขาวที่ใช้ทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 354 ± 10 % d.b. การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิห้องอบแห้ง 50, 60 และ 70°C โดยเงื่อนไขการทดลองแบบความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s เงื่อนไขการทดลองแบบปรับลดความเร็วลม 2.0 m/s ปรับลดเป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ทุกการทดลองดำเนินการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างเท่ากับ 10 %d.b. จึงหยุดการทดลอง โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไขได้ดำเนินการ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

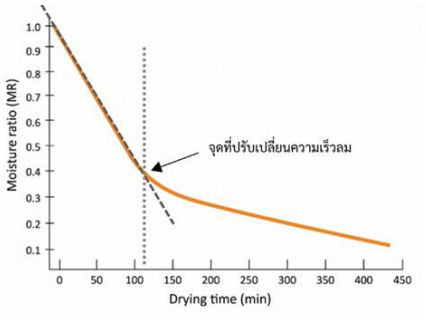
สำหรับการปรับลดความเร็วลมจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชันของกราฟ โดยรูปที่ 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (1)

$$slope = \frac{MR_t - MR_{t+1}}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ MR_t คือ สัดส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา, -

MR_{t+1} คือ สัดส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ช่วงเวลาถัดไป, -

Δt คือ การเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา, min



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงความชันที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) ทำหน้าที่เป็นดัชนีบ่งชี้จากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระบริเวณพื้นผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์เริ่มหมดไป ในขณะที่ความชื้นส่วนใหญ่ยังคงสะสมอยู่ภายในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้กลไกการจำกัดอัตราการคายน้ำเปลี่ยนผ่านเข้าสู่การแพร่ความชื้นจากภายใน อัตราความเร็วลมที่พัดผ่านผิวหน้าผลิตภัณฑ์จึงมีผลกระทบต่อการเร่งอัตราการอบแห้งน้อยมาก ในช่วงนี้จึงเหมาะกับการปรับลดความเร็วลมซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงาน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 สัดส่วนความชื้น

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) เป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือในผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใด ๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยเปรียบเทียบความชื้น ณ เวลานั้นกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (2) [14]

$$MR \approx \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ สัดส่วนความชื้น, -

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, %d.b.

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.

2.3.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือดัชนีชี้วัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (3) [16]

$$DR = \frac{m_t - m_{t+1}}{t} \quad (3)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, g/min

m_t คือ มวลที่เวลาใด ๆ, g

m_{t+1} คือ มวลที่ช่วงเวลาถัดไป, g

t คือ เวลาอบแห้ง (min)

2.3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นดัชนีสำคัญที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยนิยามเป็นปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยมวลของน้ำที่ถูกระเหยออก ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) [3]

$$SEC = \frac{E_{heater} + E_{fan}}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, kWh/kg

E_{heater} คือ พลังงานฮีตเตอร์, kWh

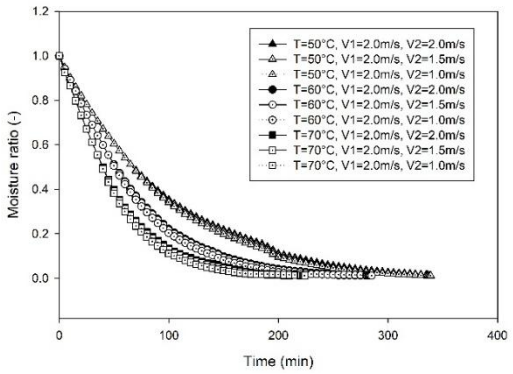
E_{fan} คือ พลังงานพัดลม, kWh

m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์, kg

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่มีต่อสัดส่วนความชื้น

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์และเวลา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า MR ของทุกกรณีมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยในช่วงแรกค่า MR ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำอิสระบริเวณผิวผลิตภัณฑ์สามารถระเหยออกได้ง่าย จากนั้นอัตราการลดลงของ MR จะช้าลงเมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งถูกควบคุมด้วยการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์เป็นหลัก [17]



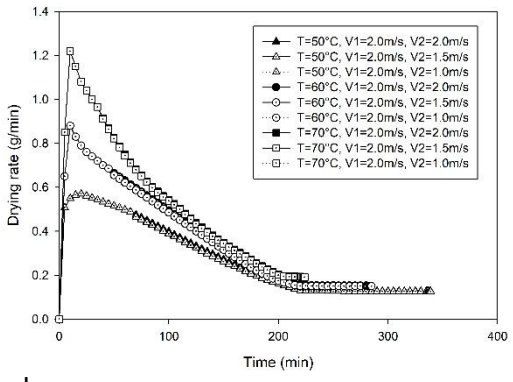
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์และเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งช่วยให้ค่า MR ลดลงได้รวดเร็วขึ้นอย่างชัดเจน จากการทดลองจะพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s ใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 336 นาที และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C และ 70°C สามารถใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 280 นาที และ 220 นาที ตามลำดับ หรือสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้ 16.67% และ 34.52% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการปรับความเร็วลมที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 337 และ 339 นาที ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 0.30% และ 0.89% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่มีค่า 336 นาที ในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 60°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 283 และ 285 นาที ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 1.07% และ 1.79% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่มีค่า 280 นาที และสุดท้ายที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 222 และ 224 นาที ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 0.91% และ 1.82% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่ที่มีค่า 220 นาที ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [17] สำหรับผลของการปรับลดความเร็วลมเมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง พบว่า การใช้ความเร็วลมคงที่และการปรับลดความเร็วลมเมื่อกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นน้อยมาก

3.2 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่มีต่ออัตราการอบแห้ง

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์และเวลา ผลจากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งของทุกสภาวะมีค่าสูงในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยในช่วงแรกน้ำอิสระบริเวณผิวผลิตภัณฑ์สามารถระเหยออกได้ง่าย ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งสูง ขณะที่ในช่วงหลังของกระบวนการ ความชื้นที่เหลืออยู่จะเคลื่อนที่จากภายในผลิตภัณฑ์ออกสู่บริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงและเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์มากกว่าการถ่ายเทมวลที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [18] การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่สภาวะความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 °C ให้ค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.127 g/min และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C และ 70°C พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.153 g/min และ 0.194 g/min ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 20.47% และ 52.76% ตามลำดับ ข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผลภายในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในสู่ผิวภายนอกรวดเร็วขึ้น [19] ในกรณีปรับเปลี่ยนความเร็วลม ผลจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C เมื่อมีการปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s

พบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงเดิม 0.127 g/min และจาก 2.0 m/s เป็น 1.0 m/s พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยลดลง 0.79 % และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และ 70°C ก็พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน ผลจากการทดลองพบว่าการใช้ความเร็วลมสูงในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งและปรับลดลงเมื่อผลิตภัณฑ์เริ่มเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ยังคงรักษาสมรรถนะการอบแห้งไว้ได้ใกล้เคียงกับการใช้ลมคงที่ตลอดการอบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเมื่อความชื้นบริเวณผิวนอกผลิตภัณฑ์ลดลงแล้ว กลไกหลักของการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์เป็นสำคัญ [18]



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์และเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

3.3 ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 1 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ข้อมูลจากตารางพบว่า การปรับลดความเร็วลมในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถลดค่า SEC ได้อย่างชัดเจนในทุกระดับอุณหภูมิที่ศึกษา โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ค่า SEC เท่ากับ 247.494 และ 185.667 kWh/kg ตามลำดับ หรือลดลง 20.48% และ 40.34% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่มีค่า 311.218 kWh/kg ในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 60°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ค่า SEC เท่ากับ 315.644 และ 232.904 kWh/kg ตามลำดับ หรือลดลง 20.72% และ 41.50% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่มีค่า 398.150 kWh/kg และในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 70°C การปรับลดความเร็วลมจาก 2.0 m/s เป็น 1.5 m/s และ 1.0 m/s ให้ค่า SEC เท่ากับ 328.267 และ 242.482 kWh/kg ตามลำดับ ลดลง 20.88% และ 41.56% เมื่อเทียบกับสภาวะลมคงที่ที่มีค่า 414.918 kWh/kg

ตารางที่ 1 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	ความเร็วลมช่วงที่ 1 (m/s)	ความเร็วลมช่วงที่ 2 (m/s)	เวลาอบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้ง (g/min)	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)
50	2.0	2.0	336	0.127	311.22
50	2.0	1.5	337	0.127	247.49
50	2.0	1.0	339	0.126	185.67
60	2.0	2.0	280	0.153	398.15
60	2.0	1.5	283	0.151	315.64
60	2.0	1.0	285	0.150	232.90
70	2.0	2.0	220	0.194	414.92
70	2.0	1.5	222	0.192	328.27
70	2.0	1.0	224	0.191	242.48

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าการใช้ความเร็วลมสูงตลอดกระบวนการอบแห้งไม่ได้ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ในช่วงท้ายอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อผลิตภัณฑ์เข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง กลไกการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์เป็นหลัก [18] ดังนั้นการปรับลดความเร็วลมในช่วงดังกล่าวจึงสามารถลดการใช้พลังงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุปผล

ผลการศึกษากรณีควบคุมอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมให้คงที่ 2.0 m/s ตลอดการอบแห้งพบว่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยพบว่าที่อุณหภูมิ

อบแห้ง 70°C ให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60°C เท่ากับ 52.76 และ 26.80 % ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60°C เท่ากับ 33.32 และ 4.21 % ตามลำดับ นอกจากนั้นจากการศึกษายังพบว่า การปรับลดความเร็วลมเมื่อการอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้งและอัตราการอบแห้งน้อยมาก ในขณะที่สามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้อย่างมาก โดยเงื่อนไขที่สามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้สูงสุดคือกรณีอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s ซึ่งมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 414.918 kWh/kg เมื่อปรับลดความเร็วลมในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเป็น 1.5 และ 1.0 m/s ตามลำดับ พบว่าสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ 20.88 และ 41.56 % ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การปรับลดความเร็วลมในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีผลกระทบต่อสมรรถนะการอบแห้งค่อนข้างน้อย ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบอบแห้งที่ประหยัดพลังงานสำหรับผลิตผลทางการเกษตรต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Mousakhani-Ganjeh, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap-Singh, A., and Khaneghah, A. M. (2021). “Electro-based technologies in food drying: A comprehensive review.” LWT 145: 111315. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111315.

[2] Alp, D., and Bulantekin, Ö. (2021). “The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: A review.” European Food Research and Technology 247: 1333-1343. DOI: 10.1007/s00217-021-03731-z.

[3] AlZohbi, G., Asfand, F., Shaik, F., and Khan, M. I. (2026). “Energy-efficient food drying for sustainable preservation: A review of technologies and performance.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 216: 116918. DOI: 10.1016/j.rser.2026.116918.

[4] Cosme-De Vera, F. H., Soriano, A. N., Dugos, N. P., and Rubi, R. V. C. (2021). “A Comprehensive Review on the Drying Kinetics of Common Tubers.” Applied Science and Engineering Progress 14(2): 146-155. DOI: 10.14416/j.asep.2021.03.003.

[5] Chinnasamy, A., et al. (2025). “Characterizing agricultural product drying in solar systems using thin-layer drying models: Comprehensive review.” Discover Food. DOI: 10.1007/s44187-025-00362-1.

[6] Zhang, W., Cen, H., Guo, W., and She, P. (2025). “A Review of Alfalfa Drying Technology and Equipment Throughout the Whole Process.” Applied Sciences 15(22): 12268. DOI: 10.3390/app152212268.

[7] Bucay-Valdiviezo, J., Veronica-Ocana Parra, S., Saa, F., and Varela Aldas, J. (2023). “Temperature control system with hysteresis for drying oven using IoT.” Proceedings of the 2023 5th International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). DOI: 10.1109/ICECCT56650.2023.10179641.

[8] Ashtiani, S. H. M., and Martynenko, A. (2024). “Toward intelligent food drying: Integrating artificial intelligence into drying systems.” Drying Technology 42(8): 1240-1269. DOI: 10.1080/07373937.2024.2356177.
[9] Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., and Hosseinpour, S. (2020). “A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies.” Trends in Food Science & Technology 100: 67-76. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.014.
[10] Khan, M. I., et al. (2023). “Development of drying system by using internet of things for food quality monitoring and controlling.” Results in Engineering: Nexus 8: 100219. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100219.
[11] Ishimwe, V., Masabo, E., Habiyaremye, J., Rene, M., and Bizuru, E. (2023). “IoT-Based Real-Time Crop Drying and Storage Monitoring System.” International Journal of Distributed Sensor Networks 2023: 1-11. DOI: 10.1155/2023/4803000.
[12] Pai, K. R., Sindhuja, V., Ramachandran, P. A., and Thorat, B. N. (2021). “Mass Transfer ‘Regime’ Approach to Drying.” Industrial & Engineering Chemistry Research 60(26): 9613-9623. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01680.
[13] Chen, J., Wang, L., Wang, H., and Zhang, G. (2021). “Drying kinetic model and hygrothermal characteristics of fish extruded feed during hot air drying.” Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 37(14): 317-322. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.14.037.
[14] Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Che Man, H., Jahari, M., and Onwude, D. I. (2023). “Recent Advances in the Drying Process of Grains.” Food Engineering Reviews 15(3): 548-576. DOI: 10.1007/s12393-023-09333-7.
[15] Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. (2019). Official Methods of Analysis of AOAC International. Washington, DC: AOAC International.
[16] Tiliwa, E. S., Boateng, I. D., Zhou, C., and Xu, B. (2023). “Role of Drying Technologies on the Drying Kinetics, Physical Quality, Aroma, and Enzymatic Activity of Pineapple Slices.” Sustainability 15(22): 15906. DOI: 10.3390/su152215906.
[17] Shi, S., Feng, J., An, G., Kong, B., Wang, H., Pan, N., and Xia, X. (2021). “Dynamics of heat transfer and moisture in beef jerky during hot air drying.” Meat Science 182: 108638. DOI: 10.1016/j.meatsci.2021.108638.
[18] Li, Y., Zhang, Y., Wang, X., and Chen, H. (2023). “Drying Kinetics of a Single Biomass Particle Using Fick’s Second Law of Diffusion.” Processes 11(4): 984. DOI: 10.3390/pr11040984.
[19] Kumar, A., Kandasamy, P., Chakraborty, I., and Hangsing, L. (2022). “Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer.” Biosystems Engineering 219: 85-102. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.04.026.

การออกแบบและสร้างเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ

Design and Construction of a Semi-automatic Hydroponic Vegetable Care System

ชาญวิทย์ ชัยอมฤต[1,*], ศิวะ มีเศษ[1], อดิศร ปินะถา[1] และ กัญจนา ชัยอมฤต[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
เลขที่ 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
เลขที่ 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
*E-mail: chanwit.ca@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 0-4333-6370-1

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องของพื้นที่ที่ใช้สำหรับเพาะปลูกและการดูแลผัก สำหรับบุคคลที่มีพื้นที่ใช้สอยจำกัดและไม่มีเวลาดูแลผัก การลดพื้นที่ใช้สอยสำหรับปลูกได้ทำการออกแบบให้เป็นการปลูกผักแบบแนวตั้งในลักษณะกล่องสี่เหลี่ยมซ้อนกันเพื่อให้ง่ายต่อการเพิ่มจำนวนแปลงปลูกและได้นำเอาระบบไฮโดรโปนิกส์มาใช้เพื่อให้ง่ายต่อการดูแลผัก ในการดูแลผักได้นำเอาระบบกึ่งอัตโนมัติมาใช้ในการให้แสงสว่างของผัก รวมไปถึงการปรับค่าความเข้มแสงได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ ที่ระดับ 0 ถึง 2,500 ลักซ์ เพื่อช่วยในเรื่องของการรับแสงที่ไม่เท่ากันของผักแต่ละชนิดและช่วงการเติบโตของผักในแต่ละช่วงที่ต้องการแสงไม่เท่ากัน อีกทั้งยังติดตั้งระบบจ่ายสารอาหารให้แก่ผักแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยที่ผู้ใช้สามารถกำหนดปริมาณของสารอาหารได้ตามต้องการ เพื่อให้ผักเจริญเติบโตได้สม่ำเสมอและได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ จากการทดสอบผลความเข้มแสง 3 ระดับ ได้แก่ 1,000 1,500 และ 2,000 ลักซ์ การเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คในวันที่ 21 พบว่า การเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คจะเติบโตดีที่สุดค่าระดับความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ และการทดสอบผลของสารอาหารที่ใช้ทั้ง 3 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 ใช้สารอาหารชนิด A ชนิดเดียว สูตรที่ 2 ใช้สารอาหารชนิด B ชนิดเดียว สูตรที่ 3 ใช้สารอาหารชนิด A และ B ผสมกัน พบว่า ในวันที่ 21 ผักที่ปลูกด้วยสารอาหารสูตร 3 (สารอาหาร A และ B ผสมกัน) มีการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คดีที่สุด

คำสำคัญ: ไฮโดรโปนิกส์, ความเข้มแสงสว่าง, สารอาหาร, ผักสลัดกรีนโอ๊ค

Abstract

This research aims to address issues related to cultivation space and vegetable care for individuals with limited living space and insufficient time to tend to plants. To reduce cultivation space requirements, the system was designed as a vertical farming structure consisting of stacked rectangular boxes, making it easy to expand the number of planting units. A hydroponic system was incorporated to simplify plant maintenance. For plant care, a semi-automatic system was implemented to provide lighting, including the ability for users to adjust light intensity according to their needs within a range of 0 to 2,500 lux. This helps accommodate differences in light requirements among various vegetable species and at different growth stages. In addition, a semi-automatic nutrient delivery system was installed, allowing users to determine the desired amount of nutrients. This ensures consistent plant growth and high-quality yields. Testing was conducted at three light intensity levels: 1,000, 1,500, and 2,000 lux. On day 21, the growth of Green Oak lettuce was found to be best under a light intensity of 2,000 lux. Nutrient testing was also performed using three formulations: Formula 1 used only nutrient

solution A, Formula 2 used only nutrient solution B, and Formula 3 used a mixture of nutrient solutions A and B. The results showed that on day 21, Green Oak lettuce grown with Formula 3 (a combination of nutrients A and B) exhibited the best growth performance.

Keywords: Hydroponic, light intensity, nutrients, green oak lettuce

1. บทนำ

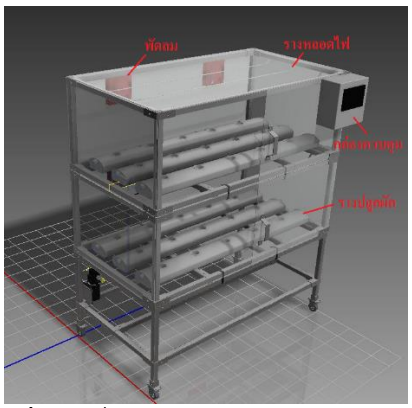
ปัจจุบันการปลูกผักกินเองมีความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อลดค่าครองชีพและเป็นการดูแลสุขภาพด้วยการรับประทานผักปลอดสารพิษ โดยมีวิธีการปลูกที่หลากหลาย แต่การปลูกผักโดยทั่วไปอาจใช้พื้นที่มากตั้งนั้นการปลูกผักในแนวตั้งแบบไฮโดรโปนิกส์ในครัวเรือนก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง[1] งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติที่ประหยัดพื้นที่และศึกษาถึงผลของความเข้มแสงและสูตรของสารอาหารในการปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค

2. วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ การออกแบบโครงสร้าง และการควบคุมระบบกึ่งอัตโนมัติ

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

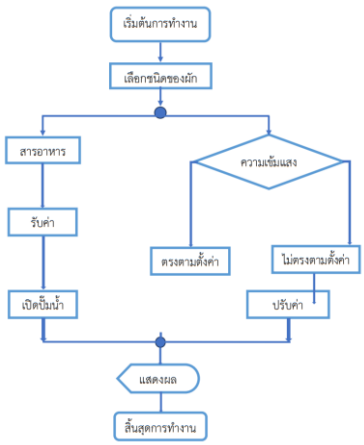
เครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติมีขนาด 50×100×120 เซนติเมตร ประกอบด้วยชั้นปลูกผัก 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นติดตั้งรางปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ 3 ราง แต่ละรางประกอบด้วย 5 หลุมปลูก นอกจากนี้เครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติยังมีการติดตั้งระบบรดน้ำ และพัดลมระบายอากาศ 2 ตัวในแต่ละชั้น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์

2.2 การควบคุมระบบกึ่งอัตโนมัติ

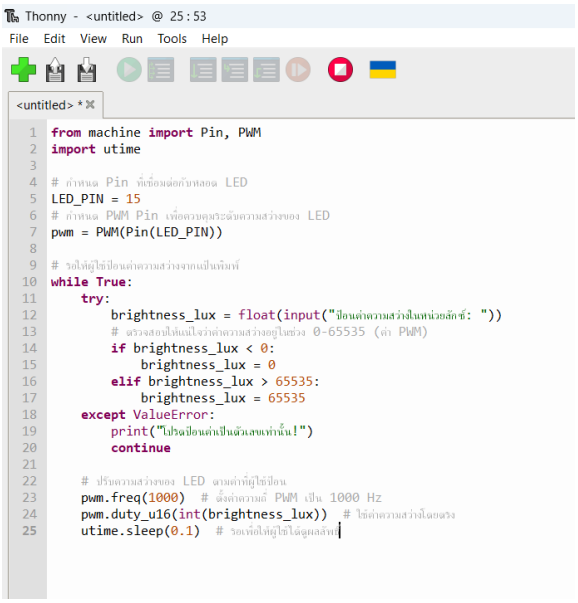
การโปรแกรมการทำงานระบบกึ่งอัตโนมัติทำการเขียนโค้ดการทำงานด้วยโปรแกรม Thonny ลงในบอร์ด raspberrypi pico[2] การทำงานระบบกึ่งอัตโนมัติจะมีอยู่ 2 ส่วน คือการควบคุมความเข้มแสง[3] และการควบคุมการจ่ายปริมาณสารอาหาร[4,5] แผนภาพการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของระบบกึ่งอัตโนมัติ

2.2.1 การควบคุมความเข้มแสง

การควบคุมความเข้มแสงจะใช้หลักการ Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งในการควบคุมความสูงต่ำของสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณอื่นๆ โดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะสูงหรือต่ำ เพื่อสร้างสัญญาณที่มีความถี่คงที่แต่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะสูงและต่ำ (Duty Cycle) ที่เปลี่ยนแปลงได้ โดย PWM ถูกใช้ในการควบคุมความสว่างของ LED

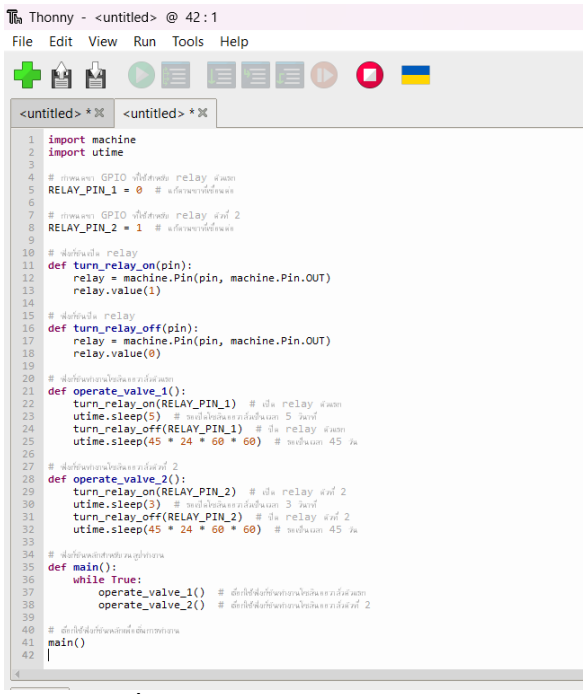


รูปที่ 3 โค้ดการควบคุมความเข้มแสง

จากรูปที่ 3 ทำการเขียนโค้ดการความคุมความเข้มแสงของ LED เพื่อนำไปใช้ในเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ จากโค้ดจะสามารถปรับค่าความเข้มแสงได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ

2.2.2 การควบคุมการจ่ายปริมาณสารอาหาร

หากต้องการที่จะความคุมสารอาหารจำเป็นต้องรู้อัตราการไหลของปั๊มน้ำก่อนจึงจะสามารถเขียนโค้ดเพื่อควบคุมการทำงานของโซลินอยวาล์วตามเวลาได้ จากการทดสอบปั๊มน้ำที่ระยะเวลา 35 วินาที สามารถจ่ายปริมาณสารอาหาร 1500 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงทำการเขียนโค้ดเพื่อควบคุมการทำงานโซลินอยวาล์ว ให้สามารถปรับเวลาการจ่ายสารอาหารได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โค้ดการควบคุมโซลินอยวาล์ว

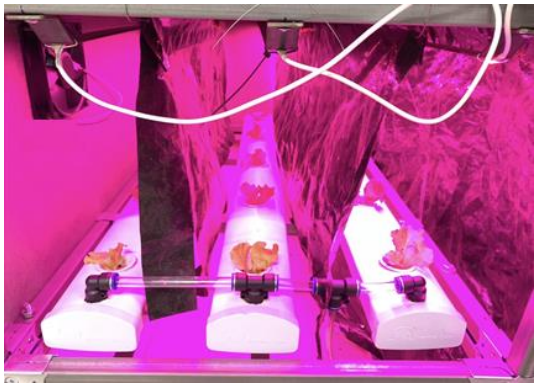
3. การทดสอบเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ

การทดสอบเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ ได้แบ่งเป็น 2 การทดสอบคือ การทดสอบผลของความเข้มแสงและการทดสอบผลของสารอาหาร

3.1 การทดสอบผลของความเข้มแสง

ทำการทดลองและเปรียบเทียบผลของความเข้มแสงด้วยการให้ค่าความเข้มแสงในระดับลักซ์ที่ต่างกัน ได้แก่ 1,000 ลักซ์ 1,500 ลักซ์ และ 2,000 ลักซ์ โดยการเปิดแสงให้แก่ผัก 6 ชั่วโมงต่อ 1 วัน เพื่อหาความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คมากที่สุด และทำการบันทึกผลการทดลอง ในทุกๆ 3 วัน ดังรูปที่ 5 จากรูปจะแสดงการทดสอบผลของความเข้มแสง โดยจะแบ่งเป็น 3 ช่อง แต่ละช่องจะมีรางปลูกและหลอดไฟ ระดับความเข้มแสงของ

หลอดไฟจะต่างกันตามที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งในแต่ละช่องได้ทำการกั้นปิดไว้เพื่อไม่ให้แสงของแต่ละช่องส่องมาถึงกัน เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากที่สุด



รูปที่ 5 การทดสอบผลของความเข้มแสง

3.2 การทดสอบผลของสารอาหาร

สารอาหาร A และ B เป็นปุ๋ยเคมีในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์มีแร่ธาตุผสมกับน้ำ ทำให้มีคุณสมบัติคล้ายดิน ดังนั้นสารอาหาร A และ B จึงไม่มีสารเคมีที่เป็นพิษและไม่เป็นอันตรายใด ๆ ต่อสิ่งมีชีวิต เรียกได้ว่าเป็นผักปลอดสารพิษ โดยสารอาหาร A ประกอบไปด้วย น้ำ เหล็กดีพี เหล็กดีเลต แคลเซียมไนเตรทและสารอาหาร B ประกอบไปด้วย น้ำ โพแทสเซียมไนเตรท โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟส แมกนีเซียมซัลเฟต นิค-สเปรย์ (ธาตุอาหารเสริม) แมงกานีส โซเดียมโมลิบเดต นิเกิลซัลเฟต

กำหนดให้ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงคือสารอาหาร ส่วนน้ำและแสงจะกำหนดให้เป็นตัวแปรคงที่เหมือนกันทั้ง 3 ราง ทำการทดสอบเปรียบเทียบการใช้สารอาหาร A และ สารอาหาร B โดยจะแยกเป็นสารอาหาร 3 สูตร ดังนี้ สูตรที่ 1 ใช้สารอาหารชนิด A ชนิดเดียว สูตรที่ 2 ใช้สารอาหารชนิด B ชนิดเดียว สูตรที่ 3 ใช้สารอาหารชนิด A และ B ผสมกัน เพื่อหาความแตกต่างและความเหมาะสมที่จะได้ผักสลัดกรีนโอ๊คที่มีคุณภาพมากที่สุด และทำการบันทึกผลการทดลอง ในทุกๆ 3 วัน ค่าที่ทำการบันทึกคือความกว้างของพุ่ม ความสูงของลำต้น ความยาวของราก และสีของใบ การทดสอบผลของสารอาหารจะแบ่งรางปลูก 3 ราง โดยที่รางที่ 1 จะใส่เป็นสารอาหาร A ผสมกับน้ำ และ รางที่ 2 จะใส่เป็นสารอาหาร B ผสมกับน้ำ รางสุดท้ายรางที่ 3 จะใส่เป็นสารอาหาร A ผสมกับ B ในอัตราส่วนเท่ากัน ผสมกับน้ำ

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานในการทดสอบเครื่องดูแลผักระบบไฮโดรโปนิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ แบ่งเป็น 2 ผลการทดสอบคือ ผลการทดสอบของความเข้มแสง และผลการทดสอบของสารอาหาร

4.1 ผลการทดสอบของความเข้มแสง

ผลการทดสอบของความเข้มแสงจากการทดสอบด้วยการให้ค่าความเข้มแสงในระดับลักซ์ที่ต่างกัน ได้แก่ ระดับความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ ระดับความเข้มแสง 1,500 ลักซ์ และระดับความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ ได้ผลออกมาดังแสดงในตารางที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อนำมาเขียนกราฟการเปรียบเทียบความสูงของพุ่ม ความกว้างของใบ และความยาวของรากกรีนโอ๊ค จะได้ดังแสดงในรูปที่ 6 7 และ 8

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความเข้มแสงที่ 1,000 ลักซ์

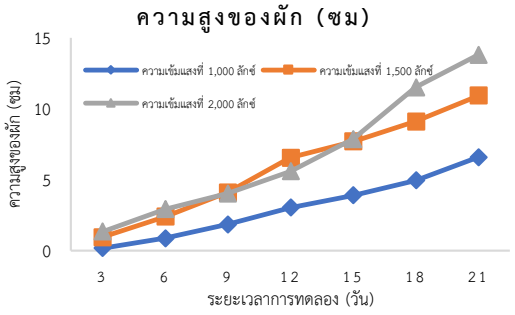
	ความเข้มแสงที่ 1,000 ลักซ์																							
	ความสูงของผัก (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)											
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย												
3	0.5	0.3	0.2	0	0	0.2	0	0	0.1	0.2	0	0.06	0.7	0.4	0.5	0.4	0.2	0.44						
6	1.4	1.1	0.9	0.4	0.6	0.88	0	0.1	0.4	0.2	0.2	0.18	1.2	0.9	1.3	1	1.5	1.18						
9	2.1	1.9	2.1	1.7	1.5	1.86	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3	0.36	2	2.3	2	2.2	2.4	2.18						
12	3.3	3.1	3	3	2.8	3.04	0.5	0.7	0.8	0.5	0.6	0.62	3.2	3	3.4	3.2	3.6	3.28						
15	4.2	3.9	4	3.7	3.7	3.9	0.7	1.2	0.9	0.9	0.8	0.9	4.5	3.8	3.9	4.2	4.4	4.16						
18	5	4.8	5.1	5	4.9	4.96	1	1.5	1.2	1.3	1.3	1.26	5	4.5	4.8	5.1	4.9	4.86						
21	7.3	6.4	6.8	6.3	6.2	6.6	1.8	2.3	2.2	2.6	2	2.18	5.6	5.3	5.3	5.8	5.4	5.48						

ตาราง 2 ผลการทดสอบความเข้มแสงที่ 1,500 ลักซ์

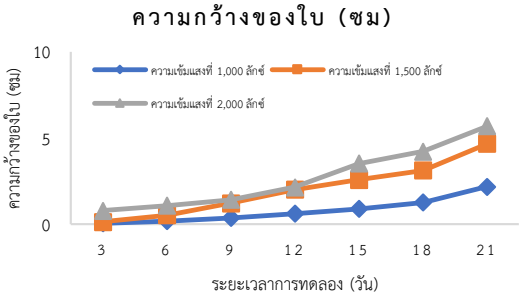
	ความเข้มแสงที่ 1,500 ลักซ์																							
	ความสูงของผัก (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)											
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย												
3	1.1	0.9	1.2	0.7	0.9	0.96	0.2	0	0.3	0.2	0	0.14	0.6	0.3	0.6	0.4	0.2	0.42						
6	2.5	2.1	2.6	2.1	2.7	2.4	0.6	0.5	0.5	0.7	0.3	0.52	1.4	0.8	1.2	1	0.8	1.04						
9	4.3	4	4.3	4.2	3.8	4.12	1.3	1.1	1.4	1.3	1	1.22	2.3	1.9	2.4	2.2	1.8	2.12						
12	6.5	6.1	7	6.9	6.3	6.56	2	2.3	2	1.9	1.8	2	3.7	3.4	3.5	3.1	2.9	3.32						
15	7.4	8	7.3	8	7.8	7.7	2.6	2.9	2.7	2.4	2.3	2.58	4.4	4.1	4.2	4.2	4	4.18						
18	9	9.2	9.3	9.1	8.9	9.1	3	3.4	3.1	3.1	3	3.12	5.5	5.2	5.4	5	4.9	5.2						
21	10.8	10.6	11.3	10.7	11.2	10.92	4.8	5	4.7	4.3	4.5	4.66	6.2	6.7	6.3	5.9	6.2	6.26						

ตาราง 3 ผลการทดสอบความเข้มแสงที่ 2,000 ลักซ์

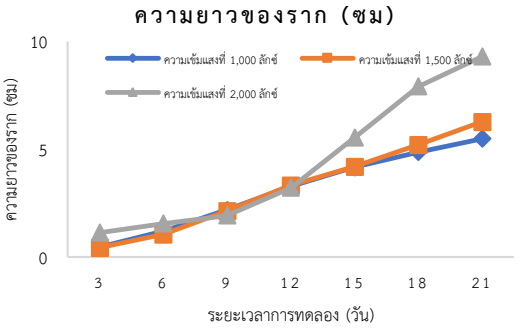
	ความเข้มแสงที่ 2,000 ลักซ์																							
	ความสูงของผัก (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)											
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย												
3	1.3	1.5	1.1	1.3	1.6	1.36	0.4	0.7	0.8	1	1	0.78	0.9	1.3	1.2	1	1.2	1.12						
6	2.8	2.6	3.1	2.9	3.3	2.94	0.9	1.1	1.3	1	1.1	1.08	1.3	1.9	1.5	1.3	1.7	1.54						
9	4.2	3.9	4	3.6	4.5	4.04	1.3	1.2	1.5	1.9	1.2	1.42	1.7	1.9	2.2	2	1.8	1.92						
12	6.1	5.8	4.9	5.5	5.7	5.6	2.1	1.9	2.4	2.1	2.2	2.14	3.3	3.6	2.9	3.2	3	3.2						
15	7.6	8.1	7.3	7.9	8.4	7.86	3.6	2.9	3.4	3.8	3.9	3.52	5.2	4.9	5.7	5.6	6.3	5.54						
18	11	11	11.5	11.9	12.1	11.5	4.5	4.2	4.15	3.95	4.3	4.22	8	7.6	8.3	7.8	7.9	7.92						
21	13.6	12.9	14.3	13.8	14.4	13.8	6.3	5.4	5.6	5.7	5.4	5.68	9.2	8.6	10.1	9.4	9.2	9.3						



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความสูงของพุ่มกรีนโอ๊ค



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความกว้างของพุ่มกรีนโอ๊ค



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความยาวของรากกรีนโอ๊ค

4.2 ผลการทดสอบของสารอาหาร

ผลการทดสอบของสารอาหารแสดงดังตารางที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ รูปที่ 9 10 และ 11 แสดงการเปรียบเทียบความสูงของพุ่ม ความกว้างของใบ และความยาวของรากกรีนโอ๊คตามลำดับ

ตารางที่ Error! No text of specified style in document.**4** ผลการทดสอบใช้สารอาหารสูตรที่ 1 (A)

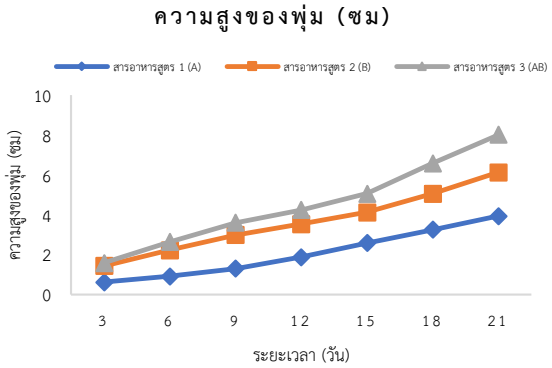
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	สารอาหารสูตร 1 (A)																	
	ความสูงของพืช (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
3	0.7	0.6	0.9	0.4	0.5	0.62	0.3	0.1	0.1	0	0.1	0.12	0	0.2	0	0.3	0.1	0.12
6	0.9	0.7	1	1.1	0.9	0.92	0.4	0.3	0.6	0.4	0.5	0.44	0.4	0.2	0.3	0.5	0.3	0.34
9	1.3	1.5	1.5	1.2	1	1.3	0.7	0.8	0.7	0.6	0.8	0.72	0.6	0.4	0.6	0.7	0.6	0.58
12	2.2	1.9	1.8	1.8	1.7	1.88	0.8	1	0.8	0.9	0.9	0.88	0.9	0.6	1	0.8	0.7	0.8
15	2.8	2.5	2.6	2.6	2.4	2.58	1	1.2	0.9	1.1	1	1.04	1	0.9	1.2	1.1	0.8	1
18	3.5	3.2	3.2	3	3.4	3.26	1.6	1.8	1.3	1.6	1.4	1.54	1.3	1.5	1.8	1.4	1.3	1.46
21	4.3	3.8	3.9	3.6	4.1	3.94	2.1	2.4	2.1	2.3	1.9	2.16	2.2	2.3	2.7	2.3	2.1	2.32

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบใช้สารอาหารสูตรที่ 2 (B)

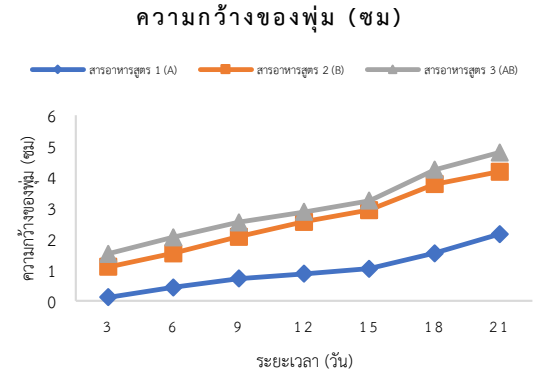
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	สารอาหารสูตร 2 (B)																	
	ความสูงของพืช (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
3	1.4	1.3	1.7	1.3	1.5	1.44	1.2	1	1.4	0.9	1	1.1	1.2	0.8	1	0.9	0.7	0.92
6	2.4	2.1	2.5	1.9	2.2	2.22	1.8	1.5	1.7	1.3	1.4	1.54	1.6	1.3	1.5	1.5	1.2	1.42
9	3.1	2.9	3.2	2.8	2.9	2.98	2.3	2	2.2	1.9	2	2.08	2.1	1.9	1.8	2	1.8	1.92
12	3.8	3.5	3.6	3.2	3.6	3.54	2.8	2.5	2.5	2.6	2.4	2.56	2.7	2.5	2.3	2.7	2.6	2.56
15	4.4	4.2	4	3.9	4.1	4.12	3	2.8	3	2.9	3	2.94	3.1	2.9	2.8	3	3	2.96
18	5.2	4.9	5.3	5	4.9	5.06	3.7	3.4	4.1	3.8	3.9	3.78	3.9	3.6	3.8	4.2	3.9	3.88
21	6.2	5.9	6.3	5.9	6.3	6.12	4.1	4	4.3	4.2	4.3	4.18	4.4	4.1	4.6	4.4	4.3	4.36

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบใช้สารอาหารสูตรที่ 3 (AB)

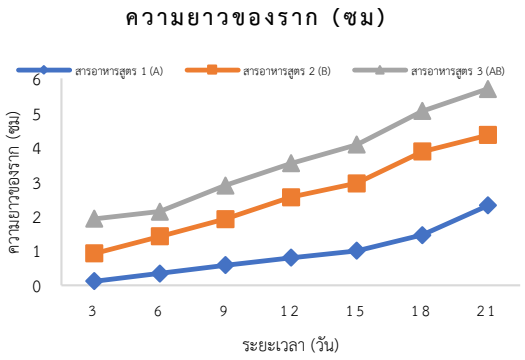
ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	สารอาหารสูตร 3 (AB)																	
	ความสูงของพืช (ซม)						ความกว้างของใบ (ซม)						ความยาวของราก (ซม)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
3	1.5	1.2	1.9	1.5	1.8	1.58	1.4	1.7	1.5	1.8	1.2	1.52	1.8	1.4	1.2	1.7	1.4	1.928
6	2.3	2.8	2.4	2.7	3	2.64	1.9	2.3	2	2.1	2	2.06	2.4	2.2	1.9	2	2.2	2.14
9	4.2	3.5	3.1	3.4	3.8	3.6	2.5	2.8	2.4	2.4	2.6	2.54	3.2	3.2	2.8	2.4	2.9	2.9
12	4.6	4.3	4	3.9	4.4	4.24	2.8	3	2.9	2.7	3	2.88	3.5	3.9	3.6	3.2	3.5	3.54
15	5	5.2	4.9	5.1	5.1	5.06	3	3.5	3.2	3.3	3.2	3.24	4	4.2	4.1	4	4.1	4.08
18	6.4	6.7	6.2	6.8	6.8	6.58	3.9	4.3	4.6	4.2	4.2	4.24	4.8	5.1	4.9	5.3	5.2	5.06
21	7.9	8.3	7.7	8.2	7.9	8	4.4	4.7	4.9	4.9	5.1	4.8	5.7	5.4	5.8	5.9	5.7	5.7



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสูงของพุ่มกรีนโอ๊ค



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบความกว้างของพุ่มกรีนโอ๊ค



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบความยาวของรากกรีนโอ๊ค

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความเข้มแสงทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ ความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ 1,500 ลักซ์ และ 2,000 ลักซ์ ด้วยการพิจารณาค่าจาก 3 ตัวแปร คือ ความสูงของพุ่ม ความกว้างของพุ่ม และความยาวของราก จะเห็นได้ว่าที่ช่วงการเติบโต 15-18 วันความสูงของพุ่มในค่าความเข้มแสงระดับ 1,500 ลักซ์จะมีความสูงมากที่สุด แต่ในช่วง 18-21 วัน ความสูงของพุ่มในค่าความเข้มแสงระดับ 2,000 ลักซ์ มีความสูงมากที่สุด ส่วนตัวแปรอื่นๆเช่น ความกว้างของพุ่ม ความยาวของราก ที่ค่าระดับความเข้มแสง 2,000 ลักซ์มีความสูงของพุ่มมากกว่า ระดับ 1,500 และ 1,000 ลักซ์

จากการทดสอบสารอาหารทั้ง 3 สูตร สูตร 1(A) สูตร 2(B) และสูตร 3(AB) พบว่า สูตรที่ 3(AB) จะมีค่าความสูงของพุ่ม ความกว้างของพุ่มและความยาวของรากสูงที่สุดตลอดช่วงการเจริญเติบโต

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Chandani Raksha Saha, Parbat Shahb and Dilip Mehta. (2025). Vertical Farming: A Sustainable and Technological Revolution in Modern Agriculture. Tropical Agroecosystems, 6(2), 59-62. http://doi.org/10.26480/taec.02.2025.59.62.

[2] ชัยวัฒน์ ทวีผล. (2560). ระบบฟาร์มอัตโนมัติแบบแนวตั้งโดยใช้ราสเบอรี่พาย เข้าถึงเมื่อ 1 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://th.cytron.io/tutorial/smart-vertical-farm-1

[3] สุทธิดา มณีเมือง. (2566). การใช้หลอดแอลอีดีเป็นแหล่งให้แสงสำหรับชุดปลูกไฮโดรโปนิกส์. เข้าถึงเมื่อ 16 สิงหาคม. เข้าถึงได้จากhttp://www.h2ohydrogarden.com

[4] วิไชย แกงโคกกวด. (2566). การเลือกปุ๋ย AB สำหรับการปลูกพืชไร้ดิน. เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน. เข้าถึงได้จาก https://www.kasetorganic.com

[5] ธัญลักษณ์ ศรีมาลี. (2565). ปลูกผักสลัดให้งามไว ปลอดภัยด้วยชีวอินทรีย์. เข้าถึงเมื่อ 10 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก https://www.baanlaesuan.com

การสูญเสียพลังงานจากการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กันของเครื่องจักรและวัตถุดิบในกระบวนการสีข้าวเปลือก: กรณีศึกษา

Energy loss due to mismatched operation of machinery and raw materials in the rice milling process: A case study.

สาธิต ทูลไธสง* อภิเดช บุญเจือ, สัญชัย รำเพยพัด, ภาณุศักดิ์ มูลศรี, วันชัย อินทปัต และ วริศราภรณ์ จรโคกกรวด

สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: toolthaisong@gmail.com, 089-4884144

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความสูญเสียพลังงานของเครื่องจักรที่เกิดจากการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กันกับปริมาณของวัตถุดิบในกระบวนการสีข้าวเปลือกของโรงสีในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 3 แห่ง โดยที่แห่งที่ 1 ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA แห่งที่ 2 และ 3 มีขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า 1000 kVA การดำเนินการจะมีการเข้าสำรวจและตรวจวัดเครื่องจักรที่มีลักษณะของการเดินเครื่องตัวเปล่าเพื่อรอวัตถุดิบ โดยได้มีการดำเนินการเข้าสำรวจแห่งละ 3 ครั้ง ผลจากการสำรวจและตรวจวัดพบว่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเกิดขึ้นกับเครื่องจักรที่มีการเดินตัวเปล่าในขั้นตอนของการขัดข้าวและกะเทาะข้าวเปลือก ซึ่งคิดเป็นการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละแห่งคือ 5.73%, 8.17% และ 7.43% สำหรับโรงสีแห่งที่ 1 แห่ง 2 และแห่งที่ 3 ตามลำดับ

คำสำคัญ: โรงสีข้าว การสูญเสียพลังงาน การอนุรักษ์พลังงาน

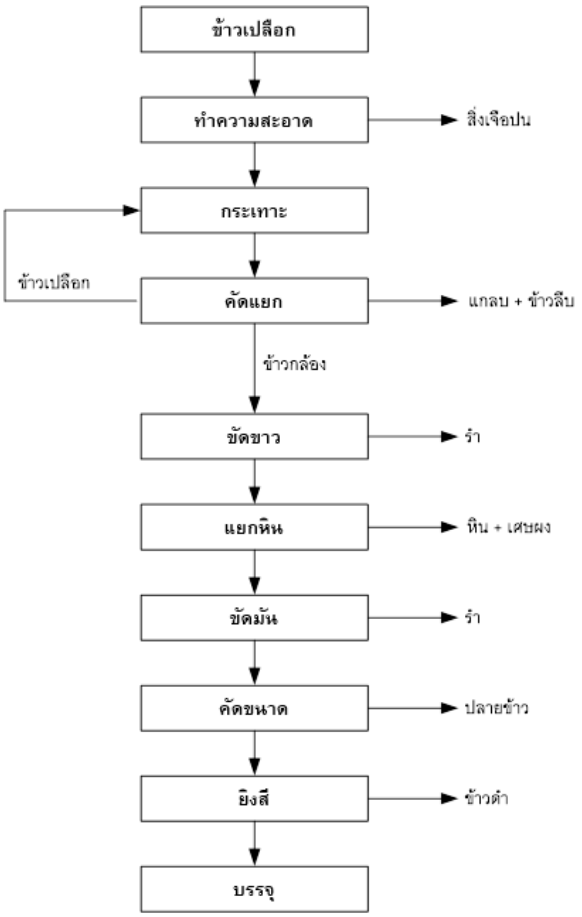
Abstract

This research evaluates the energy losses of machinery resulting from operation that is not correlated with the amount of raw materials used in the rice milling process of three rice mills in the northeastern region of Thailand. Mill 1 has a 500 kVA transformer, while Mills 2 and 3 have 1000 kVA transformers. The study involved surveying and measuring machinery operating idle while waiting for raw materials. Three surveys were conducted at each mill. The results showed that energy losses in the production process occurred in the idle machinery during the rice polishing and hulling stages. The energy losses, relative to electricity consumption, were 5.73%, 8.17%, and 7.43% for Mills 1, 2, and 3, respectively.

Keywords: Rice mill, Energy loss, Energy conservation.

1. บทนำ

กระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวสารนั้นประกอบด้วยหลายขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ในแต่ละขั้นตอนใช้เครื่องจักรที่แตกต่างกันไป เช่น เครื่องกะเทาะ เครื่องขัดขาว และตะแกรงแยกข้าวเป็นต้น ถ้าหากปริมาณของวัตถุดิบที่เข้าและออกในแต่ละขั้นตอนไม่มีความสัมพันธ์กันและขาดการจัดการเครื่องจักรที่ดีก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้ เพราะเครื่องจักรอาจเดินตัวเปล่าหรือเดินโหลดต่ำๆ รอวัตถุดิบที่จะเข้ามา การเดินตัวเปล่าของเครื่องจักรนอกจากจะสูญเสียพลังงานไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นแล้วยังทำให้เครื่องจักรสึกหรอเร็วยิ่งขึ้นจากเดิม



รูปที่ 1 กระบวนการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร

ที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาการใช้พลังงานของโรงสีข้าวไว้พอสมควรดังนี้ วรรณี และคณะ [1] ได้ศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการสีข้าวของโรงสีสามประเภท ประกอบด้วยโรงสีข้าวขาวที่ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว โรงสีข้าวขาวที่ใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานจากเครื่องจักรไอน้ำ และโรงสีข้าวนึ่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนจากไอน้ำ สุคนธ์ทิพย์ และคณะ [2] ได้ศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานของโรงสีข้าวโดยการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด พบว่าสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ 1,242,963 บาท/ปี นพรัตน์ และ นิพนธ์ [3] ได้ศึกษาการลดค่าพลังงานไฟฟ้าของกลุ่มโรงสี โรงแรม และโรงน้ำแข็ง โดยใช้แนวทางการจัดการประเภทการใช้ไฟฟ้า ซึ่งได้พบว่าการเปลี่ยนอัตราไฟฟ้าแบบปกติเป็นแบบ TOU จะช่วยให้สามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้สูงสุด 25 สตางค์ต่อหน่วย นิรันด์ และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลของรูปแบบการป้อนข้าวต่อสมรรถนะเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกของโรงสี ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการป้อนข้าวมีผลต่อสมรรถนะเครื่องกะเทาะ นอกจากนั้นยังพบว่า เครื่องกะเทาะที่ติดตั้งเครื่องจัดเรียงข้าวเปลือกจะเพิ่มอัตราการกะเทาะลดอัตราการหักและลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อนุวัฒน์ และคณะ [5] ทำการสำรวจการใช้พลังงานของโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวนรวม 10 แห่ง พบว่ามีความต้องการพลังไฟฟ้า 362 kW ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า 1,183,271 kWh/ปี ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 19.5 kWh/ตัน คิดเป็นต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 82.19 บาท/ตัน ธีรพจน์ [6] ทำการทดสอบประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดมอเตอร์ขับ 1.5 hp พบว่าสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 6344.91 บาท/ปี มีระยะเวลาการคืนทุน 3.73 ปี และเครื่องให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 63.5% ศิวดล และคณะ [7] ได้ปรับความเร็วรอบของขัดขาวรอบที่ 1 เพื่อให้ได้ปริมาณข้าวต้นมากขึ้น ผลจากการทดสอบพบว่าการปรับลดความเร็วรอบจาก 430 rpm เป็น 300 rpm สามารถลดการสูญเสียข้าวต้นจาก 22% เป็น 13.3% ข้าวเปลือกซึ่งพบว่า อณจ และ สุภัสสรา [8] ได้ศึกษา

การลดข้าวคงค้างในกระบวนการอบข้าวและการสีข้าว จากการใช้แบบจำลองพบว่าการเพิ่มเครื่องจักรจำนวน 11 เครื่อง ช่วยลดการคงค้างของข้าวในกระบวนการลดความชื้นได้ 84.08% และลดข้าวคงค้างในการสีข้าวได้ 70.18% ทำให้โรงสีมีกำไรเฉลี่ย 574, 714 บาทต่อเดือน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะศึกษาถึงการสูญเสียพลังงานในกระบวนการสีข้าวที่เกิดจากการทำงานที่ไม่เหมาะสมของเครื่องจักรซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานอีกทั้งยังช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักรได้อีกด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการสีข้าวของโรงสีใช้เครื่องจักรจำนวนมาก ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรจึงได้จากการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าชั่วขณะและระยะเวลาการทำงานของเครื่องจักรนั้นมาทำการคำนวณตามสมการที่ 1

$$E = \mathrm{P}\times\mathrm{t} \qquad (1)$$

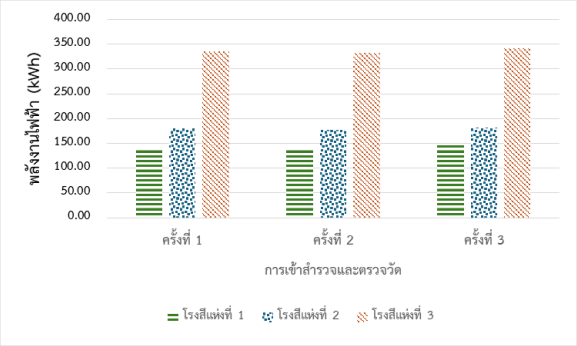
เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้า, kWh
P คือ กำลังไฟฟ้า, kW
t คือ ระยะเวลาทำงาน, ชั่วโมง

3. วิธีการดำเนินการ

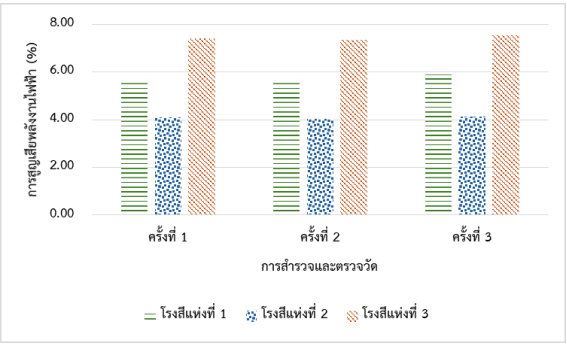
งานวิจัยนี้ดำเนินการสำรวจและตรวจวัดการใช้พลังงานของโรงสีข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งหม้อไฟฟ้าขนาด 500 kVA ถึง 1000 kVA จำนวน 3 แห่ง ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นขนาดโรงสีที่มีเครื่องจักรในกระบวนการสีข้าวจำนวนหลายเครื่องและคาดว่าจะมีการทำงานที่ไม่สอดคล้องสัมพันธ์กันของเครื่องจักรกับวัตถุดิบ โดยจะทำการตรวจวัดเฉพาะเครื่องจักรที่มีการเดินตัวเปล่าเพื่อรอวัตถุดิบซึ่งจะดำเนินการตรวจวัดจำนวน 3 ครั้ง โดยที่ไม่มีการแจ้งให้พนักงานของโรงสีทราบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้งานในช่วงที่ทำการวิจัย

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการสำรวจและตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักร พบการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการเดินเครื่องจักรตัวเปล่าเพื่อรอวัตถุดิบของแต่ละแห่งจำนวนสามครั้งพบว่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าสำหรับการเข้าตรวจวัดแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสามโรงคือ 5.77% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสามโรง ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 รายละเอียดข้อมูลการตรวจวัดของแต่ละโรงเป็นดังนี้



รูปที่ 2 ปริมาณการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3 การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม

โรงสีแห่งที่ 1

กำลังการผลิต 38,600.00 ตัน/ปี ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า 751,448.00 kWh/ปี จากการสำรวจพบการ

เดินเครื่องกะเทาะข้าวเปลือกและเครื่องขัดขาวแบบตัวเปล่าดังแสดงในรูปที่ 4 แบ่งเป็นเครื่องกะเทาะขนาด 5 kW จำนวน 2 เครื่อง เดินตัวเปล่ารอข้าวเปลือกจากตะแกรงทำความสะอาด และเครื่องขัดขาวขนาด 22 kW จำนวน 2 เครื่อง เดินตัวเปล่ารอข้าวกล้องจากตะแกรงโยก สูญเสียพลังงานไฟฟ้า 43,080 kWh/ปี คิดเป็น 5.73% ของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม



รูปที่ 4 เครื่องกะเทาะข้าวของโรงสีแห่งที่ 1

โรงสีแห่งที่ 2



รูปที่ 5 เครื่องขัดมันของโรงสีแห่งที่ 2

กำลังการผลิต 80,490.00 ตัน/ปี ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า 1000 kVA ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า 1,318,560.00 kWh/ปี จากการสำรวจพบว่ามีการเดินตัวเปล่าของเครื่องขัดมันขนาด 22 kW จำนวน 1 เครื่อง รอข้าวจากเครื่องขัดขาว และเครื่องขัดขาวขนาด 37 kW จำนวน 2 เครื่อง รอข้าวกล้องจากตะแกรงโยก สูญเสียพลังงานไฟฟ้า 107,780.00 kWh/ปี คิดเป็น 8.17% ของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม

โรงสีแห่งที่ 3

ปริมาณการผลิต 79,128.00 ตัน/ปี ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า 1000 kVA ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า 1,356,012.00 kWh/ปี จากการสำรวจพบว่ามีการเดินตัวเปล่าของเครื่องขัดขาวขนาด 55 kW จำนวน 1 เครื่อง รอข้าวกล้องจากตะแกรงโยก และเครื่องขัดมันขนาด 45 kW จำนวน 2 เครื่อง รอข้าวขาวจากเครื่องขัดข้าว พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสีย100,730.00 kWh/ปี คิดเป็น 7.43% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม



รูปที่ 6 เครื่องขัดขาวของโรงสีแห่งที่ 3

5. สรุปผลการทดลอง

การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทำงานที่ไม่สอดคล้องกันของปริมาณวัตถุดิบที่เข้าและออกเครื่องจักรในกระบวนการผลิตสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่เกิดที่ขั้นตอนการขัดข้าวและขัดมันเนื่องจากเกิดการรอวัตถุดิบจากขั้นตอนก่อนหน้า

2) การรอวัตถุดิบเป็นสาเหตุให้เครื่องจักรเดินตัวเปล่าคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียเฉลี่ย 5.77% เมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมของโรงสี

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณโรงสีข้าวในจังหวัดนครราชสีมา จังหวัดสุรินทร์ และจังหวัดมุกดาหารที่

ESTACON 2026 | 17th

ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการเข้าสำรวจและตรวจวัดพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] วรรณี เอกศิลป์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และอภิชิต เทอดโยธิน. (2538). “การวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงสีข้าวสำหรับระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในประเทศไทย.” ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย.). 29, 1 (มกราคม-มิถุนายน): 87-99.

[2] สุคนธ์ทิพย์ สินวิวัฒนกุล. (2551) .”การศึกษาแนวทางในการประหยัดพลังงานในในโรงสีข้าวโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด” วิทยานิพนธ์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

[3] นพรัตน์ เกตุขาว และวิชญ์พล ฟักแก้ว. (2562).”การจัดการใช้ไฟฟ้าในกลุ่มตัวอย่างศึกษาสำหรับโรงสีข้าว โรงแรม และโรงน้ำแข็ง”. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 29, 4 (ตุลาคม-ธันวาคม): 542-551.

[4] นิรันด์ เชื้อเคน, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ อำไพ ศักดิ์ ทีบุญมา.(2561).”ผลของรูปแบบการป้อนข้าวต่อสมรรถนะเครื่องกะเทาะข้าว”. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 ณ จังหวัดมุกดาหาร,3-6 กรกฎาคม.

[5] อนุวัฒน ภาชนะวรรณ, สมชาย ชวนอุดม, ขวัญตรี แสงประชาธนารักษ และ เสรี วงสพิเชษฐ. (2560),”การใชพลังงานไฟฟาของโรงสีขาวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ”. วารสารวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 12, 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม): 1-7.

[6] ธีรพจน์ แนบเนียน. (2566). “การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับโรงสีข้าวชุมชน อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์.” วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ 19, 1 (มกราคม-มิถุนายน): 37-50.

[7] ศิวดล กัญญาคำ, นลินี หิมพงษ์, ปริญญา ทองคำ, วรายุทธ พลาศรี และนพดล ใหม่คามิ. (2568). “การเพิ่มอัตราผลิตภาพในกระบวนการสีข้าวด้วยแนวคิดการจัดการแบบลีน.” ว.มรม. 19, 3 (กันยายน-ธันวาคม): 595-604.

[8] อณจ ชัยมณี และ สุภัสสรา แก่วเจริญสีทอง. (2564). “การจำลองสถานการณ์เพื่อลดข้าวคงค้างระหว่างกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือก.” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร ม.อบ. 14, 4 (ตุลาคม-ธันวาคม): 24-37.

การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK

Development and Efficiency Evaluation of a Diesel Fuel Pump Removal Tool Kit for Isuzu D-Max Engines (4JJ and 4JK)

ฉัตรชัย ม่วงประเสริฐ[1,*], อุดม หิรัญพันธุ์[2] ประหยัด จงดี[3] มนชัย ศรีสุข[4] และ สมัคร สหะพัณ[5]

[1] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ 302 ตำบลประจวบ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77000

[2] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยการอาชีพวังไกลกังวล 3/64 ตำบลหัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

[3] อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี 115 ตำบลท่าราบ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

[4] นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ 302 ตำบลประจวบ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77000

[5] นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ 302 ตำบลประจวบ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77000

คณะเทคโนโลยีบัณฑิต สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5

*ผู้ติดต่อ: m.chatchai2017@gmail.com, 086-986-4204

บทคัดย่อ

การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง ประเมินคุณภาพ และหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ การดำเนินงานใช้หลักการออกแบบเครื่องมือเฉพาะทางและกลศาสตร์ของวัสดุ โดยคำนวณโครงสร้างหน้าแปลนหลักรูปทรงกลมหนา 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร จากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Tensile Steel) เพื่อให้ทนต่อแรงเค้นและแรงบิดเชิงกลขณะปฏิบัติงาน ทำงานร่วมกับระบบสกรูเกลียวดันแกนปั๊มชั้นแรกขนาดเบอร์ 17 และนัทตัวนอกขนาดเบอร์ 22 ระยะเกลียว 2.0 มิลลิเมตร เพื่อกระจายแรงกดและลดความเสียหายต่อเสื้อปั๊ม ขั้นตอนการประเมินคุณภาพใช้ผู้เชี่ยวชาญจากสถานประกอบการ 5 แห่ง และทดสอบประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมภาคสนามแบบเปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างการใช้งานและไม่ใช้งานอุปกรณ์จำนวน 5 ครั้ง ผลการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่าด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ โดยภาพรวมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ ดี ($\overline{X}$=4.41, S.D.=0.32) ผลการประเมินคุณภาพด้านการใช้งานโดยภาพรวมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{X}$=4.62, S.D.=0.36) ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพด้านการใช้งานในเครื่องยนต์ พบว่าการใช้งานอุปกรณ์ในเครื่องยนต์ 4JJ ไม่พบปัญหาและการใช้งานเครื่องยนต์ 4JK ติดขัดในการถอดเล็กน้อย เฉลี่ยในการถอดโดยรวม 23 นาทีและด้านการเปรียบเทียบเวลาระหว่างใช้อุปกรณ์และไม่ใช้อุปกรณ์ พบว่าค่าเฉลี่ยโดยรวม ใช้อุปกรณ์ 23 นาที ไม่ใช้อุปกรณ์ 3 ชั่วโมง 3 นาที สามารถลดภาระงานและลดเวลาการทำงานลงได้ถึงร้อยละ 87.00 อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ชุดอุปกรณ์, ปั๊มน้ำมันดีเซล, รถยนต์อีซูซุดีแมคซ์, รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK

Abstract

This study aimed to develop and evaluate the efficiency of a diesel fuel pump removal tool kit for Isuzu D-Max vehicles equipped with 4JJ and 4JK engine models. The objectives were to design, construct, evaluate the quality, and determine the operational efficiency of the proposed tool kit. The development process was based on the principles of specialized tool design and the mechanics of materials. The main flange was designed as a circular plate with a thickness of 1 cm and a diameter of 13 cm, fabricated from high tensile steel to withstand mechanical stress and torque during operation. The tool was integrated with a threaded screw system consisting of a No. 17 forcing screw and a No. 22 outer nut with a thread pitch of 2.0 mm to evenly distribute the applied force and minimize damage to the fuel pump housing. The quality evaluation was conducted by experts from five automotive enterprises, while the engineering performance was tested through comparative field experiments between operations using and not using the tool kit, with five repeated trials. The results indicated that the overall quality of the tool design and construction was rated at a high level ($\overline{x}$= 4.41, S.D. = 0.32). The overall quality of usability was rated at a very high level ($\overline{x}$= 4.62, S.D. = 0.36). The engineering performance tests showed that the tool operated successfully with the 4JJ engine without any operational problems. For the 4JK engine, only minor difficulty was encountered during the removal process. The average removal time using the developed tool was 23 minutes. In comparison, the average removal time without the tool was 3 hours and 3 minutes, whereas the average time using the tool remained 23 minutes. The developed tool significantly reduced both workload and operation time, achieving a time reduction of 87.00% compared with the conventional removal method.

Keywords: Complete set of equipment, Diesel fuel pump, Isuzu D-Max, Engine codes 4JJ and 4JK.

1. บทนำ

ปั๊มแรงดันสูง (High-Pressure Pump) เป็นหัวใจสำคัญของระบบฉีดเชื้อเพลิงดีเซล ทำหน้าที่อัดน้ำมันให้มีแรงดันสูงยิ่งยวดส่งต่อไปยังหัวฉีดเพื่อสร้างละอองน้ำมันที่ละเอียด ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ได้อย่างสมบูรณ์ [1] โดยในอดีตระบบจ่ายเชื้อเพลิงดีเซลจะอาศัยปั๊มเชิงกล เช่น ปั๊มสายเดี่ยวและปั๊มโรตารี ซึ่งมีข้อจำกัดด้านการควบคุมแรงดันและความแม่นยำในการฉีดจ่าย จึงไม่สามารถตอบสนองต่อสภาวะการทำงานที่แปรผันของเครื่องยนต์ในปัจจุบันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดขึ้น นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีระบบฉีดจ่ายเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล (Common Rail System) ที่แยกการควบคุมแรงดัน ปริมาณ และจังหวะการฉีดน้ำมันเป็นอิสระจากความเร็วรอบเครื่องยนต์ ช่วยเพิ่มสมรรถนะและลดมลพิษได้อย่างมีนัยสำคัญ [2] อย่างไรก็ตาม การทำงานภายใต้สภาวะแรงดันและอุณหภูมิที่สูงอย่างต่อเนื่อง ย่อมส่งผลให้ชิ้นส่วนภายในปั๊มเกิดการสึกหรอและเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน สถานประกอบการและอู่ซ่อมบำรุงยานยนต์จึงจำเป็นต้องมีการถอดบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนทดแทนชิ้นส่วนอยู่เสมอ

จากการศึกษากระบวนการซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ดีเซลยอดนิยมอย่าง อีซูซุ ดีแมคซ์ (Isuzu D-Max) รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK พบปัญหาสำคัญในขั้นตอนการถอดปั๊มน้ำมันดีเซลเนื่องจากพื้นที่ปฏิบัติงานมีจำกัดและช่างต้องใช้เวลามาก อีกทั้งการยึดเกาะระหว่างแกนปั๊มและเฟืองขับเกิดจากความเค้นกดสัมผัส (Contact Stress) และความฝืดรูปกรวยที่ต้องการแรงดึงสลักในแนวแกนที่สม่ำเสมอ การใช้วิธีการตอกหรือแงะแบบดั้งเดิมทำให้เกิดภาระแรงกระแทกเยื้องศูนย์ (Eccentric Shock Load) ซึ่งส่งผลสืบเนื่องให้เสื้อปั๊มหรือฝาครอบเฟืองเกิดความเค้นดัดเกินพิกัดและชำรุดเสียหายได้ [3] ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของวัสดุและการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อคำนวณและจัดสร้างชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลในแนวแกน (Axial Mechanical Puller) โดยอาศัยหลักการส่งกำลังผ่านเกลียวดันเพื่อแปลงแรงบิดหมุนให้เป็นแรงในแนวแกนที่สมดุล ทำให้ปฏิบัติงานได้ง่าย ปลอดภัยด้วยช่างเพียงคนเดียว ลดเวลาทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในงานบริการยานยนต์อย่างเป็นระบบสากล

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK บนพื้นฐานหลักกลศาสตร์โครงสร้างและทฤษฎีระบบเกลียวส่งกำลัง (Power Screw)

2.2 เพื่อประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและการใช้งานของชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ โดยผู้เชี่ยวชาญจากสถานประกอบการ เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์เชิงมิติและความปลอดภัยต่อความเค้นสัมผัสบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์

2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเวลาชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 3.1 ชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK ที่พัฒนาขึ้น มีโครงสร้างที่สามารถต้านทานภาระแรงบิด

เค้นดัดและสามารถถ่ายเทภาระแรงขับในแนวแกน (Axial Load Distribution) ได้อย่างสมดุล ทำให้สามารถถอดชิ้นส่วนปั๊มน้ำมันดีเซลออกจากเครื่องยนต์ได้จริงโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายเชิงโครงสร้างแก่ชิ้นส่วนเครื่องยนต์

3.2 ผลการประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและด้านการใช้งานของชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ โดยผู้เชี่ยวชาญจากสถานประกอบการ มีค่าเฉลี่ยคะแนนความพึงพอใจโดยภาพรวมอยู่ในเกณฑ์ดีขึ้นไป

3.3 การปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น สามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำงานลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับการปฏิบัติงานด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (ไม่ใช้ชุดอุปกรณ์)

4. ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ขอบเขตการดำเนินการทดลอง

4.1.1 ด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์เฉพาะทางเพื่อใช้สำหรับถอดปั๊มน้ำมันดีเซลออกจากเครื่องยนต์ โดยตัวชิ้นงานหลักกำหนดตามเกณฑ์พิกัดความเค้นใช้งาน (Allowable Working Stress) มีลักษณะทรงกลมหน้าตัดความหนา 1 เซนติเมตร ความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร เจาะรูกลึงสมมาตรยึดร่วมกับ Bolt ขนาดเบอร์ 10 จำนวน 2 ตัว เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้าแปลนรับและกระจายแรงแบบสม่ำเสมอ ประกอบร่วมกับชุดสกรูตัวดันชั้นแรกขนาดเบอร์ 17 และนัทตัวนอกขนาดเบอร์ 22 (ระยะเกลียวนอก 2.0 มิลลิเมตร) ทำหน้าที่เป็นระบบเกลียวส่งกำลัง ที่มีคุณสมบัติผ่อนแรงและต้านทานภาระแรงขับแนวแกนสูงสุด ซึ่งได้รับการวิเคราะห์กลศาสตร์และเลือกใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Tensile Steel) เพื่อให้โครงสร้างทนต่อแรงเค้นเฉือน (Shear Stress) แรงเสียดทาน และป้องกันการล้มของเกลียวขณะปฏิบัติงานได้อย่างสมบูรณ์

4.1.2 ด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ได้แก่ ช่างผู้ชำนาญการและผู้เชี่ยวชาญด้านการซ่อมบำรุงรักษายานยนต์จากสถานประกอบการและอู่ซ่อมบำรุงรถยนต์ จำนวน 5 แห่ง เพื่อทำหน้าที่ประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและด้านการใช้งานของชุดอุปกรณ์

4.1.3 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ จำกัดเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรลยอดนิยมของรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ (Isuzu D-Max) ได้แก่ 1.เครื่องยนต์รหัส 4JJ (ขนาด 3.0 ลิตร ช่วงปี 2004-2006, 2007-2011 และ All NEW ตั้งแต่ปี 2013) และเครื่องยนต์รหัส 4JJ (ขนาด 2.5 ลิตร G.1 ปี 2005 – 2011 และ G.2 ปี 2011 - 2015)

4.2 ตัวแปรที่ศึกษา

4.2.1 ตัวแปรต้น การปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลโดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการปฏิบัติงานด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (ไม่ใช้อุปกรณ์)

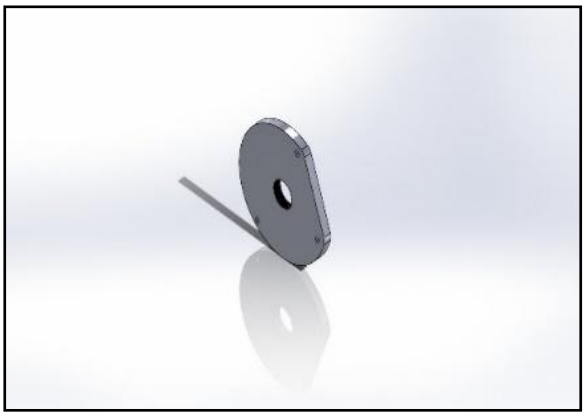
4.2.2 ตัวแปรตาม

1) คุณภาพของชุดอุปกรณ์ (ด้านการออกแบบและด้านการใช้งาน)

2) ประสิทธิภาพเชิงเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลจากการทดสอบจริง

4.3 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ฯ

4.3.1 ศึกษาข้อมูลและศึกษาตำแหน่งพิกัดทางเรขาคณิต แรงต้านทานแนวแกน และความเค้นกดสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างแกนปั๊ม หน้าแปลน และฝาครอบเฟืองปั๊ม เพื่อนำมิติพิกัดความเผื่อ (Tolerance) มาใช้คำนวณหาค่าความแข็งแรงทางกลศาสตร์และเขียนแบบจำลอง



รูปที่ 1 ศึกษาตำแหน่งพิกัดทางเรขาคณิต

4.3.2 การคำนวณและตรวจสอบพิกัดแรงดันแผ่นสวม กำหนดขนาดความหนาตัวชิ้นงานหลักทรงกลมหน้าตัดไว้ที่ 1 เซนติเมตร และความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดมิติที่ผ่านการคำนวณว่าทนต่อแรงเค้นดัด (Bending Stress) สูงสุดขณะขันดันแกนปั๊ม พร้อมระบุพิกัดเจาะรูยึด Bolt ขนาดเบอร์ 10 จำนวน 2 ตัว เพื่อกระจายภาระแรงกดแบบสม่ำเสมอ (Uniform Load Distribution) ให้สอดรับกับสรีระทางวิศวกรรมของเครื่องยนต์



รูปที่ 2 คำนวณและตรวจสอบพิกัด

4.3.1 ศึกษาข้อมูลและศึกษาตำแหน่งพิกัดทางเรขาคณิต แรงต้านทานแนวแกน และความเค้นกดสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างแกนปั๊ม หน้าแปลน และฝาครอบเฟืองปั๊ม เพื่อนำมิติพิกัดความเผื่อ (Tolerance) มาใช้คำนวณหาค่าความแข็งแรงทางกลศาสตร์และเขียนแบบจำลอง

4.3.3 การวิเคราะห์ระบบเกลียวส่งกำลังและการเลือกวัสดุ เลือกใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเพิ่มขีดจำกัดความเค้นดึงพิกัด (Yield Strength) จากนั้นนำมากลึงเจาะรูตามแบบทางวิศวกรรม เพื่อจัดสร้างระบบเกลียวส่งกำลังสำหรับแปลงแรงบิดหมุน (Torque) ให้เป็นแรงดึงสลักในแนวแกน (Axial Thrust) โดยคำนวณการรับภาระโหลดร่วมระหว่างสกรูแกนดันตัวในขนาดเบอร์ 17 และนัทตัวนอกขนาดเบอร์ 22 (ระยะพิตช์เกลียวนอก 2.0 มิลลิเมตร) ซึ่งได้รับการคำนวณความแข็งแรงทางกลศาสตร์เพื่อป้องกันความเสียหายจากการวิบัติจากแรงเฉือน (Shear Failure) และการรูดล้มของเกลียวขณะได้รับภาระสูงสุด



รูปที่ 3 การเลือกวัสดุและกลึงชิ้นงานอุปกรณ์

4.3.4 ประกอบและการทดสอบเบื้องต้น นำชิ้นส่วนทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นชุดอุปกรณ์และทำการทดลองนำไปสวมประกอบกับเครื่องยนต์ทดสอบเพื่อตรวจสอบความมั่นคง แข็งแรง และระยะฟรีของเกลียว



รูปที่ 4 ประกอบและการทดสอบเบื้องต้น

4.3.5 จัดทำสีและสร้างกล่องใส่เพื่อนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินและนำไปทดสอบภาคสนามจริง



รูปที่ 5 อุปกรณ์พร้อมทดสอบการใช้งานจริง

4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

4.4.1 แบบประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯเป็นแบบสอบถามชนิดมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) แบ่งการประเมินออกเป็น 2 ด้าน คือ ด้านการออกแบบ และด้านการใช้งานนวัตกรรม (จำนวน 5 ข้อประเมิน) โดยนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญ

4.4.2 แบบบันทึกผลประสิทธิภาพเชิงเวลา เป็นตารางสำหรับบันทึกเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลของรถยนต์ โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้งานชุดอุปกรณ์เฉพาะทาง และวิธีแบบดั้งเดิม (ไม่ใช้งานอุปกรณ์)

4.5 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.5.1 การเก็บข้อมูลการประเมินคุณภาพ โดยจัดเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและช่างซ่อมรถยนต์ในสถานประกอบการ(ศูนย์บริการ)และอู่ซ่อมรถยนต์ จำนวน 5 แห่ง โดยนำแบบประเมินคุณภาพที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\overline{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์การแปลผล

4.5.2 การทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะทางวิศวกรรม การทดลองปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลจริงกับเครื่องยนต์ทดสอบรหัส 4JJ และ 4JK ภายใต้สภาวะควบคุมแบบละ 5 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความสถิตและความแปรปรวนเชิงกลศาสตร์ของระบบเกลียวดัน (Mechanical Reliability) ตลอดจนการตรวจสอบผลกระทบและริ้วรอยความเค้นเฉือนบนพื้นผิวชิ้นส่วนเครื่องยนต์ขณะทำงาน พร้อมนำผลบันทึกเวลามาคำนวณหาค่าเฉลี่ยทางสถิติและประเมินประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ด้านการลดภาระงานและเวลาทำงาน (Time and Labor Reduction Efficiency) ด้วยสมการทางสถิติ

5. ผลการวิจัย

การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ (Isuzu D-Max) รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ พบว่าชุดอุปกรณ์ฯ ที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้างสมบูรณ์ ประกอบด้วยตัวชิ้นงานหลักรูปทรงกลมหน้าตัด ผลิตจากเหล็กกล้าหนา 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางความกว้าง 13 เซนติเมตร เจาะรู

กลึงยึดร่วมกับโบล์ว ขนาดเบอร์ 10 จำนวน 2 ตัว มีระบบเกลียวดันแกนปั๊มชั้นแรกขนาดเบอร์ 17 และติดตั้งนัทตัวนอกขนาดเบอร์ 22 (ระยะเกลียวนอก 2.0 mm) โครงสร้างมีความแข็งแรง สามารถสวมประกอบเข้ากับหน้าแปลนแป้นปั๊มและแกนสลักได้อย่างแน่นหนา ช่วยให้ช่างสามารถปฏิบัติงานถอดประกอบปั๊มออกจากเครื่องยนต์ได้คนเดียวได้และปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดการความเสียหายหรือบิดเบี้ยวกับเสื้อปั๊มและฝาครอบเฟืองเครื่องยนต์



รูปที่ 6 ชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ (Isuzu D-Max)

5.2 ผลการประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลรถยนต์อีซูซุ D-max รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK โดยผู้เชี่ยวชาญและช่างซ่อมบำรุงรถยนต์ มีดังนี้

5.2.1 ผลการหาคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ด้านการออกแบบและสร้าง

ตารางที่ 1 ผลการประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์

รายการประเมิน	ระดับการประเมิน		ความหมาย
	$\overline{x}$	S.D.	
1. ประเภทของการเลือกใช้วัสดุในการนำมาสร้าง	4.93	0.25	ดีมาก
2. วัสดุที่นำมาสร้างหาได้ง่าย	3.40	0.30	พอใช้
3. ความเหมาะสมในการออกแบบต่อการใช้งาน	3.90	0.36	ดี
4. มีน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งาน	4.73	0.40	ดีมาก
5. มีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน	4.87	0.34	ดีมาก
6. ราคาวัสดุในการนำมาสร้างมีราคาถูก	4.30	0.29	ดี
7. ความแข็งแรงและทนทานของวัสดุที่นำมาใช้งาน	4.50	0.27	ดี
8. การเคลือบพื้นผิวเพื่อกันสนิม	4.80	0.40	ดีมาก
9. ความเรียบง่ายและสวยงาม	4.30	0.29	ดี
โดยรวม	**4.41**	**0.32**	**ดี**

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ฯ ด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ฯ ด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ พบว่ามีผลการประเมินโดยภาพรวมอยู่ที่เกณฑ์ ดี ($\overline{x}$= 4.41, **S.D.**= 0.32) โดยหัวข้อ ประเภทของการเลือกใช้วัสดุในการนำมาสร้าง มีผลการประเมินสูงที่สุด อยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{x}$= 4.93, **S.D.**= 0.25) รองลงมาคือหัวข้อ ความเหมาะสมในการออกแบบต่อการใช้งาน มีผลการประเมินอยู่ในเกณฑ์ ดี ($\overline{x}$= 4.90, **S.D.**= 0.30) และน้อยที่สุดคือหัวข้อ วัสดุที่นำมาสร้างหาได้ง่าย ผลการประเมินอยู่ในเกณฑ์เกณฑ์พอใช้ ($\overline{x}$ = 3.40, **S.D.**= 0.30)

5.2.2 ผลการหาคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ด้านการนำไปใช้งานจริง

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ด้านการนำไปใช้งานจริง

รายการประเมิน	ระดับการประเมิน		ความหมาย
	$\overline{x}$	S.D.	
1. มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน	4.60	0.49	ดีมาก
2. ใช้งานได้ง่ายและพกพาสะดวก	4.27	0.33	ดี
3. ลดระยะเวลาทำงานลงของการถอดปั๊ม	4.80	0.40	ดีมาก
4. ลดจำนวนช่างปฏิบัติงาน	4.90	0.28	ดีมาก
5. สามารถใช้งานได้หลายครั้งและทนต่อการสึกหรอ	4.20	0.32	ดี
6. รองรับการถอดปั๊มในเครื่อง 4JJ และ 4JK	4.72	0.33	ดีมาก
7. ไม่มีผลกระทบทำให้ปั๊มเสียในขณะถอด	4.73	0.44	ดีมาก
8. สามารถถอดแยกชิ้นและทำความสะอาดได้ง่าย	4.72	0.33	ดีมาก
โดยรวม	**4.62**	**0.36**	**ดีมาก**

จากตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ด้านการนำไปใช้งานจริง พบว่ามีผลการประเมิน โดยภาพรวมอยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{x}$= 4.62, **S.D.**= 0.36) โดยหัวข้อ ลดจำนวนช่างปฏิบัติงาน มีผลการประเมินสูงที่สุด อยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{x}$= 4.90, **S.D.**= 0.28) รองลงมาคือหัวข้อ ลดระยะเวลาทำงานลงของการถอดปั๊ม มีผลการประเมินอยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{x}$= 4.80, **S.D.**= 0.40) และน้อยที่สุดคือหัวข้อ คือ สามารถใช้งานได้หลายครั้งและทนต่อการสึกหรา มีผลการประเมินอยู่ในเกณฑ์เกณฑ์ ดี ($\overline{x}$ = 3.20, **S.D.**= 0.32)

5.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเวลาในการปฏิบัติงานจริง กับเครื่องยนต์รหัส 4JJ และ 4JK แบบละ 5 ครั้ง ผลการทดสอบเป็นดังนี้

5.3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ การใช้งานอุปกรณ์กับเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ การใช้งานอุปกรณ์กับเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK

ที่	รหัสเครื่อง	ใช้ระยะเวลา (นาที)	ปัญหาที่พบ	รายละเอียดผลการปฏิบัติงาน
1	4JJ	20	ไม่มีปัญหา	การถอดดำเนินการได้ปกติ
2	4JJ	20	ไม่มีปัญหา	การถอดดำเนินการได้ปกติ
3	4JJ	21	ไม่มีปัญหา	การถอดดำเนินการได้ปกติ
ค่าเฉลี่ย		**20.33**	**เครื่องยนต์ 4JJ ไม่พบปัญหาและการใช้งาน**	
4	4JK	27	อุปกรณ์ติดขัดเล็กน้อย	ใช้เวลามากกว่าปกติเนื่องจากการติดขัด
5	4JK	27	อุปกรณ์ติดขัดเล็กน้อย	ใช้เวลามากกว่าปกติเนื่องจากการติดขัด
ค่าเฉลี่ย		**27.00**	**เครื่องยนต์ 4JK ติดขัดในการถอดเล็กน้อย**	

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ การใช้งานอุปกรณ์กับเครื่องยนต์รหัส 4JJ พบว่าใช้ระยะเวลาถอดปั๊มฯเฉลี่ย 20.33 นาที โดยไม่พบปัญหาและการใช้งาน ส่วนเครื่องยนต์รหัส 4JK พบว่าใช้ระยะเวลาถอดปั๊มฯ เฉลี่ย 27 นาที โดยพบปัญหาติดขัดเล็กน้อย

5.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ เปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯกับไม่ใช้งาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ เปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯกับไม่ใช้งาน

ครั้งที่	รหัสเครื่อง	ใช้อุปกรณ์ (นาที)	ไม่ใช้อุปกรณ์ (ชั่วโมง : นาที)	เวลาที่ลดลง (ชั่วโมง : นาที)	คิดเป็นร้อยละ
1	4JJ	20	3 : 20	3 : 0	90
2	4JJ	20	3 : 15	2 : 55	89.74
3	4JJ	21	3 : 10	2 : 38	89.47
4	4JK	27	2 : 42	2 : 11	83.33
5	4JK	27	2 : 50	2 : 16	84.14
ค่าเฉลี่ย 23 นาที			**3 ชั่วโมง 3 นาที**	**2 ชั่วโมง 36 นาที**	**87%**

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ เปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯกับไม่ใช้งาน จากการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง เครื่องยนต์รหัส 4JJ และ 4JK พบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯที่พัฒนาขึ้น ใช้ระยะเวลาถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯเฉลี่ย 23.00 นาที เมื่อทดสอบแบบไม่ใช้งานอุปกรณ์ฯ มีระยะเวลาเฉลี่ย 3 ชั่วโมง 3 นาที โดยสามารถลดระยะเวลาในการทำงานลงได้เฉลี่ย 2 ชั่วโมง 36 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพเชิงเวลาในการปฏิบัติงานถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ร้อยละ 87

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย การดำเนินโครงการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์อีซูซุ ดีแมคซ์ รหัสเครื่องยนต์ 4JJ และ 4JK สามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

6.1.1 ผลการพัฒนาชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ พบว่าได้เครื่องมือเครื่องช่วยมีโครงสร้างสมบูรณ์ ทำจากเหล็กกล้าหนา 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร ยึดด้วยโบล์วขนาดเบอร์ 10 จำนวน 2 ตัว ทำงานร่วมกับระบบสกรูเกลียวดันแกนปั๊มตัวในเบอร์ 17 และนัทตัวนอกเบอร์ 22 (ระยะเกลียว 2.0 mm) ซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน สามารถใช้งานได้จริง ลดเวลาการทำงาน ช่วยให้ช่างสามารถปฏิบัติงานถอดประกอบปั๊มออกจากเครื่องยนต์ได้คนเดียวได้และปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดการความเสียหายหรือบิดเบี้ยวกับชิ้นส่วนเครื่องยนต์

6.1.2 ผลการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญและช่างซ่อมบำรุงรถยนต์ สถานประกอบการจำนวน 5 แห่ง พบว่าด้านการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ พบว่ามีผลการประเมิน โดยภาพรวมอยู่ที่เกณฑ์ ดี ($\overline{x}$= 4.41, **S.D.**= 0.32) และด้านการนำไปใช้งานจริง พบว่ามีผลการประเมิน โดยภาพรวมอยู่ในเกณฑ์ ดีมาก ($\overline{x}$= 4.62, **S.D.**= 0.36)

6.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ ในส่วนของการใช้งานกับเครื่องยนต์รหัส 4JJ พบว่าใช้ระยะเวลาถอดปั๊มฯเฉลี่ย 20.33 นาที โดยไม่พบปัญหาและการใช้งาน ส่วนเครื่องยนต์รหัส 4JK พบว่าใช้ระยะเวลาถอดปั๊มฯ เฉลี่ย 27 นาที โดยพบปัญหาติดขัดเล็กน้อย ในการเปรียบเทียบระยะเวลาระหว่างใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯกับไม่ใช้งาน พบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯที่พัฒนาขึ้น สามารถลดระยะเวลาในการทำงานลงได้เฉลี่ย 2 ชั่วโมง 36 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพเชิงเวลาในการปฏิบัติงานร้อยละ 87

6.2 อภิปรายผลการวิจัย

6.2.1 ด้านการออกแบบและพัฒนาชุดอุปกรณ์ถอดปั๊มน้ำมันดีเซลฯ นำไปใช้งานแบบระบบสกรูเกลียวดันได้อย่างแม่นยำ ทำให้ช่างเพียงคนเดียวสามารถสวมประกอบและถอดปั๊มได้อย่างปลอดภัย โดยมีข้อค้นพบทางวิศวกรรมเครื่องกลที่สำคัญคือ การแปรผันของระยะพิตช์เกลียวดันที่ 2.0 มิลลิเมตร ร่วมกับขนาดหน้าแปลน 13 เซนติเมตร สามารถทำหน้าที่เปลี่ยนรูปทิศทางของแรงบิดหมุน ให้เป็นแรงดึงสลักในแนวแกน ได้อย่างสมดุลเชิงสถิต (Static Equilibrium) ส่งผลให้ค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและไม่เกินพิกัดความปลอดภัยของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบเครื่องมือเฉพาะทางของ สุทธิภัทร ทองอู่ฉาง **[4]** ที่มุ่งเน้นการสร้างกลไกที่สอดรับกับสรีระทางวิศวกรรมของตัวเครื่องยนต์เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน

6.2.2 ด้านคุณภาพผลการประเมินคุณภาพในภาพรวมโดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในเกณฑ์ ดีมาก โดยเฉพาะด้านการนำไปใช้งานจริง ได้รับการยอมรับจากผู้ปฏิบัติงานจริงในสถานประกอบการ ทั้งในด้านความสะดวกและลดเวลาการทดงานลงได้อย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ ขนบ เพชรช้อน **[5]** ที่จัดทำอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องช่วยในการทำงานด้านงานบริการรถยนต์

6.2.3 ด้านประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์ฯ สามารถลดเวลาในการถอดปั๊มน้ำมันดีเซลลงได้อย่างมาก ซึ่งเร็วกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด องค์ความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ระบุว่า พฤติกรรมการติดขัดเล็กน้อยเชิงเวลาที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์รหัส 4JK (เฉลี่ย 27 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับรหัส 4JJ (เฉลี่ย 20.33 นาที) เกิดจากความเค้นเฉือนสถิต (Static Shear Stress) ของแรงยึดเกาะคราบยางเหนียวบริเวณผิวสัมผัสรูปกรวย ที่มีความแปรผันตามอายุการใช้งานและระยะฟิตพอดีทางมิติ ซึ่งแรงบิดขับจากการขันเกลียวส่งกำลังสามารถเอาชนะแรงต้านดังกล่าวได้อย่างเป็นระบบและไม่ทำลายความบริสุทธิ์ของผิวหน้าสัมผัสทางกล ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชินภัทร แก้วโกมินทวงษ์ **[6]** และ จินตนา อำนาจกิติกร **[7]** ที่ระบุว่าการใช้อุปกรณ์เฉพาะทางที่สร้างขึ้นช่วยลดขั้นตอนที่ซับซ้อน สามารถประหยัดเวลาและลดการใช้แรงงานช่างลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุง

7.1.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อน้ำหนักควรประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในการจำลองสภาวะภาระโหลด เพื่อคำนวณและลดทอนความหนาของแผ่นแปลนในบริเวณที่รับความเค้นต่ำ หรือพิจารณาเลือกใช้โลหะน้ำหนักเบาสมรรถนะสูง เช่น อลูมิเนียมเกรดวิศวกรรม 7075-T6 เพื่อเพิ่มอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักให้เหมาะสมต่อการพกพา

7.1.2 การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบเกลียว ควรศึกษาทดลองเคลือบสารหล่อลื่นฟิล์มแข็งถาวร เช่น เทฟลอน หรือโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ที่ระบบเกลียวส่งกำลัง เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของเกลียวขัน ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกล ในการส่งผ่านกำลังและขจัดปัญหาการขบติดขัดเล็กน้อยในโครงสร้างทางกลของเครื่องยนต์รหัส 4JK ได้อย่างขาดตัว

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา

7.2.1 การขยายขีดความสามารถของอุปกรณ์เพื่อให้สามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรลยี่ห้อและรหัสอื่นๆ ในท้องตลาดได้หลากหลายขึ้น

7.2.2 การพัฒนาขยายผลสู่เชิงพาณิชย์ด้วยการนำไปทดลองผลิตในระบบอุตสาหกรรมสำหรับส่งมอบหรือจำหน่ายในราคาพิเศษให้แก่สถานประกอบการและอู่ซ่อมบำรุงขนาดเล็กต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและการสนับสนุน คณะเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 5 พร้อมทั้งได้รับคำปรึกษาแนะนำแนวคิดเชิงวิศวกรรม และตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการอย่างดียิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาตลอดจนได้รับความร่วมมือจากผู้เชี่ยวชาญและช่างชำนาญการจากสถานประกอบการทั้ง 5 แห่ง ร่วมประเมินคุณภาพและอำนวยความสะดวกในการทดสอบประสิทธิภาพภาคสนาม คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

9. การเขียนเอกสารอ้างอิง

[1] คงเดช พะสีนาม. (2561). “การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล.” วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง, 6(2), 45-58. เข้าถึงเมื่อ 22 เมษายน 2568. เข้าถึงได้จาก http://www.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/126414

[2] พิชิต นวลจันทร์. (2563). พื้นฐานระบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน. นครปฐม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร. เข้าถึงเมื่อ 22 เมษายน 2568. เข้าถึงได้จาก http://thesis.swu.ac.th/swuebook/h351799.pdf

[3] สมชาย พรหมมา. (2565). ระบบฉีดเชื้อเพลิงดีเซลคอมมอนเรล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เทคนิคไทย. เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2568. เข้าถึงได้จาก https://research.otepc.go.th/files/_xrsojz6e.pdf

[4] สุทธิภัทร ทองอู่ฉาง. (2567). “การสร้างและหาประสิทธิภาพเครื่องถอดล้อรถบรรทุก.” วารสารวิจัยและพัฒนาระบบอาชีวศึกษา, 17(1), 112-125. เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://so06.tci-thaijo.org/index.php/veirj/article/view/248321

[5] ขนบเพชร ซ้อน. (2566). “อุปกรณ์อัดจาระบีล้อรถยนต์.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 9(3), 88-97. เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://so08.tci-thaijo.org/index.php/KRIS/article/view/3624

[6] ชินภัทร แก้วโกมินทวงษ์. (2567). “การพัฒนาชุดการสอน วิชาขับรถยนต์.” วารสารวิจัยและพัฒนาระบบอาชีวศึกษา, 17(1), 98-111. เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://so06.tci-thaijo.org/index.php/veirj/article/view/248320

[7] จินตนา อำนาจกิติกร. (2564). “เครื่องเขย่าขวดยาฉีด.” วารสารเทคโนโลยีการแพทย์, 14(2), 23-35. เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://li01.tci-thaijo.org/index.php/ltech/article/view/29488

การศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งของสีและพฤติกรรมการกระจายความร้อนในตู้อบถังโลหะระบบหมุนเวียนอากาศ

A Comparative Study on Paint Drying Time and Heat Distribution Behavior in a Metal Drum Oven with Air Circulation System

จาตุรงค์ พึ่งจักคลี่[1], ธนาการ ประภาสัจจะเวทย์[2], มานพ เสาะแสวง[3], อนุรักษ์ ไทยสนธิ[4] และอุดม เผ่าพงษ์จันทร์[5]

[1]ตำแหน่ง พนักงานราชการครู สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : chaturong1977@gmail.com

[2]ตำแหน่ง ครู คศ.2 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : thanakrantkpss@stc.ac.th

[3]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : Nopmcsp2547@gmail.com

[4]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : anurak669@gmail.com

[5]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : machine.lpk1981@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพตู้อบสีจากถังโลหะขนาด 200 ลิตร โดยเน้นการกระจายความร้อนและลดระยะเวลาการแห้งตัวของสี วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ระยะ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของเครื่องต้นแบบเดิม การปรับปรุงระบบถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) ด้วยพัดลมหมุนเวียนอากาศ การติดตั้งฉนวนฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง การบูรณาการระบบความปลอดภัยทางไฟฟ้า และการตรวจสอบสมรรถนะเชิงวิศวกรรม, การทดสอบประสิทธิภาพใช้การทดลองเชิงเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะมาตรฐานจำนวน 30 ชิ้น แบ่งเป็นกลุ่มควบคุม 15 ชิ้น และกลุ่มทดลอง 15 ชิ้น โดยทำการทดลองซ้ำกลุ่มละ 3 รอบ เพื่อความแม่นยำของข้อมูล ผลการทดลองพบว่าตู้อบสามารถรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยได้ที่ 60 องศาเซลเซียส และลดระยะเวลาการแห้งตัวของสีจากค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) 30.00 ± 3.42 นาที เหลือเพียง 5.00 ± 0.52 นาที (ประสิทธิภาพเชิงเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละ 83.33) โดยการทดสอบทางสถิติ t-test (Dependent Sample) พบค่า p-value < 0.05 ซึ่งแสดงถึงการลดลงของระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งแสดงถึงการลดลงของระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ระบบหมุนเวียนอากาศยังช่วยให้สีแห้งสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและยกระดับความปลอดภัยในระดับอุตสาหกรรมชุมชน

คำสำคัญ: ตู้อบสี, ถังโลหะ 200 ลิตร, ระบบหมุนเวียนอากาศ, ระยะเวลาการแห้งของสี

Abstract

This research aims to enhance the performance of a 200-liter metal drum paint-curing oven, focusing on heat distribution and reducing drying time. The methodology followed a five-phase engineering process: diagnosis, thermal system improvement using forced convection, insulation upgrade, electrical safety integration, and performance verification. The experimental design involved a comparative study using 30 standard metal workpieces, divided into a control group (n=15) and an experimental group (n=15), with three trial rounds conducted for each group to ensure data reliability.

The results indicated that the oven maintained a stable average temperature of 60°C and significantly reduced the mean ($\overline{X}$) paint drying time from 30.00 ± 3.42 minutes to 5.00 ± 0.52 minutes, representing an 83.33% increase in time efficiency. Statistical analysis using a t-test confirmed that the time reduction was significant with a p-value < 0.05. The air circulation system ensured uniform heat distribution and consistent coating quality, proving suitable for small-scale industrial applications

Keywords: Paint Drying Oven, 200-Liter Metal Drum, Air Circulation System, Paint Drying Time

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมซ่อมบำรุงโลหะ การพ่นสีเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพงาน แต่ปัญหาใหญ่ของโรงงานขนาดเล็กคือระยะเวลาการแห้งตัวของสี (Curing Time) ที่นานถึง 10–30 นาที ซึ่งทำให้ชิ้นงานสะสมในสายการผลิต [4] และเสี่ยงต่อการปนเปื้อนฝุ่นละออง

จากการศึกษาตู้อบสีต้นแบบจากถังโลหะ 200 ลิตร พบข้อจำกัดด้านวิศวกรรม 3 ประการ ได้แก่ 1) ระบบฉนวนไม่สามารถกักเก็บความร้อนได้ดี 2) การขาดระบบหมุนเวียนอากาศทำให้เกิดความร้อนสะสมเฉพาะจุด (Hot Spot) และสีแห้งไม่สม่ำเสมอ และ 3) ระบบควบคุมไฟฟ้าขาดมาตรฐานความปลอดภัย คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาตู้อบสีโดยติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศ (Air Circulation System) ร่วมกับฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง และปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยเบรกเกอร์และท่อร้อยสายมาตรฐาน

การพัฒนาดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางการทำวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม โดยในระดับสากลมีการศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) ผ่านการจัดวางตำแหน่งพัดลมและทิศทางการไหลของอากาศ (Airflow Path) เพื่อลดจุดอับความร้อน, ขณะที่งานวิจัยในประเทศส่วนใหญ่เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) โดยการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาสร้างนวัตกรรมต้นทุนต่ำที่ใช้งานได้จริง ซึ่งตู้อบสีระบบหมุนเวียนอากาศนี้ได้บูรณาการแนวคิดทั้งสองส่วนเพื่อยกระดับมาตรฐานการผลิตให้มีความเป็นสากลภายใต้งบประมาณที่จำกัด

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อลดระยะเวลาการแห้งของสีให้เหลือเพียง 5 นาที [6] พร้อมทั้งวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายความร้อนเพื่อให้มั่นใจว่านวัตกรรมนี้มีประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรม มีความปลอดภัย และสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้แก่ผู้ประกอบการรายย่อยได้อย่างยั่งยืน

โดยงานวิจัยนี้กำหนดเป้าหมายในการออกแบบเพื่อลดระยะเวลาการแห้งของสีลงร้อยละ 50 ถึง 80 เมื่อเทียบกับการผึ่งลมธรรมชาติ และมุ่งเน้นการรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ควบคุมภายใน [5], [6]

เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต งานวิจัยนี้จึงกำหนดขอบเขตการศึกษาโดยมุ่งเน้นการทดสอบกับ สีพ่นอุตสาหกรรม (Industrial Lacquer) บน ชิ้นงานเหล็กแผ่นเรียบมาตรฐานขนาด 10x10 เซนติเมตร ภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ณ โรงฝึกงาน เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบพฤติกรรม

การถ่ายเทความร้อนและระยะเวลาการแห้งตัวระหว่างสภาวะการผึ่งลมธรรมชาติและการใช้ตู้อบระบบหมุนเวียนอากาศ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างตู้อบสีอเนกประสงค์จากถังโลหะขนาด 200 ลิตร

2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งตัวของสี (Curing Time)

2.3 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบ

2.4 เพื่อยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าของตู้อบสี

3. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม (Theory & Literature Review)

3.1 การทบทวนวรรณกรรม

การพัฒนาระบบอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) โดยในระดับสากล Cengel และ Ghajar (2022) ได้วางรากฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ซึ่งระบุว่าทิศทางการไหลของอากาศ (Airflow Path) มีผลอย่างมากต่อการลดจุดอับความร้อน (Hot Spot) สอดคล้องกับแนวคิดของ Incropera และคณะ (2023) ที่เน้นการพาความร้อนแบบบังคับเพื่อเร่งอัตราการระเหยของตัวทำละลาย สำหรับในประเทศไทย การพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) ตามแนวทางของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (2567) เน้นการใช้วัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาสร้างนวัตกรรมต้นทุนต่ำที่ใช้งานได้จริง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้บูรณาการหลักการไหลของอากาศตามทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลของ White (2021) เข้ากับความต้องการของผู้ประกอบการรายย่อยเพื่อยกระดับมาตรฐานการผลิต

3.2 พลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ

ประสิทธิภาพของตู้อบสีนี้ขึ้นอยู่กับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองกลไกหลักทางวิศวกรรม ดังนี้

1) สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องอบที่เกิดจากพัดลมหมุนเวียน

$$p/(\rho g)+v2/2g+z=Constant$$

เมื่อการติดตั้งพัดลมช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอากาศ ทำให้ความเร็วลม (v) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดความดัน (p) ในบางจุดและสร้างการหมุนเวียนอากาศแบบวนซ้ำภายในถังอบ

2) สมการการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection): อธิบายอัตราการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่ผิวชิ้นงาน

$$Q=hA(T_s-T_\infty)$$

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงวิศวกรรม หัวใจสำคัญของความสำเร็จในงานวิจัยนี้คือการที่ ความเร็วลม (v) จากสมการเบอร์นูลลีเป็นตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) โดยตรง ตามหลักการวิศวกรรม อัตราการพาความร้อนจะแปรผันตามความเร็วของลมที่ไหลผ่านผิวชิ้นงาน ($h \propto v^n$) การเพิ่มความเร็วลมด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับจะช่วยลดความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัส (Thermal Boundary Layer) ส่งผลให้ตัวทำละลายในเนื้อสีระเหยออกไปได้รวดเร็วและสม่ำเสมอขึ้น ความสัมพันธ์นี้ทำให้นวัตกรรมสามารถลดระยะเวลา

การแห้งตัวลงได้ถึงร้อยละ 83.33 เมื่อเทียบกับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ด้านการออกแบบและพัฒนาโครงสร้าง

พัฒนาตู้อบสีจากถังโลหะ 200 ลิตร โดยบุฉนวนด้วยฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง ติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศ (Forced Convection) เพื่อการกระจายความร้อน และปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยท่อทนความร้อนพร้อมกล่องเบรกเกอร์เพื่อความปลอดภัยสูงสุด

4.2 ขอบเขตด้านตัวแปรและสภาวะการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ ดังนี้

1)ชนิดของวัสดุและสี ใช้ สีพ่นอุตสาหกรรม (Industrial Lacquer) พ่นลงบน ชิ้นงานเหล็กแผ่นเรียบมาตรฐานขนาด 10x10 เซนติเมตร โดยควบคุมความหนาของชั้นสีให้มีความสม่ำเสมอเท่ากันทุกชิ้นงานเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

2)สภาวะแวดล้อมและการควบคุม ดำเนินการทดสอบภายใน โรงประลองวิศวกรรม (Engineering Workshop) โดยกำหนดให้ตู้อบรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส (≈140°F) ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมีของเนื้อสีและปลอดภัยต่ออุปกรณ์ควบคุมภายในตู้อบ

3)ตัวแปรที่ศึกษา เปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งตัว (Curing Time) และพฤติกรรมการกระจายความร้อนระหว่างกลุ่มควบคุม (ผึ่งลมธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง 30–35°C) และกลุ่มทดลอง (อบด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับที่ 60°C)

4.3 ด้านการทดสอบและเปรียบเทียบ เปรียบเทียบ

ระยะเวลาแห้งตัวระหว่างการผึ่งลมธรรมชาติ (10–30 นาที) กับการอบด้วยเครื่องต้นแบบที่ควบคุมอุณหภูมิ 60°C

4.4 ด้านระยะเวลาและข้อจำกัด

ดำเนินโครงการภายในปี พ.ศ. 2569 โดยมุ่งเน้นพัฒนาตู้อบสีต้นทุนต่ำสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก จึงไม่ครอบคลุมระบบควบคุมอัตโนมัติ (PLC) หรือเทคโนโลยีเซนเซอร์ซับซ้อนที่เกินความจำเป็นสำหรับระดับชุมชน

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1)วิเคราะห์ปัญหา ทดสอบเครื่องต้นแบบเดิมพบปัญหาไฟฟ้าขาดระบบป้องกันความร้อน ทำให้เกิดการหลอมละลาย และมีปัญหาการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอจากระบบฉนวนที่ไม่มีประสิทธิภาพ

2)การออกแบบและคัดเลือกวัสดุ ใช้ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง ติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศ (Forced Air Circulation) เพื่อแก้ปัญหาความร้อนสะสม และปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยเบรกเกอร์และท่อร้อยสายไฟทนความร้อน

3)การปรับปรุงและประกอบ ประกอบเครื่องตามแบบที่กำหนด โดยเน้นการติดตั้งฉนวน ระบบกระจายความร้อน และระบบควบคุมไฟฟ้าที่ปลอดภัย

4)ทดสอบประสิทธิภาพ วัดอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60°C และเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งของสีระหว่างการผึ่งลมธรรมชาติ (10–30 นาที) กับการอบด้วยเครื่องต้นแบบ (5 นาที)

5)วิเคราะห์ข้อมูล ประเมินประสิทธิภาพการลดระยะเวลาการทำงานและทดสอบความเสถียรของระบบไฟฟ้าภายใต้ความร้อนต่อเนื่อง

5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อให้ผลการทดลองมีความเที่ยงตรงและสามารถตรวจสอบซ้ำได้ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐานดังนี้

1)เครื่องต้นแบบ ตู้อบโครงสร้างถังโลหะ 200 ลิตร ที่ผ่านการติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศ (Forced Convection Fan) และบุฉนวนฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง

2)เครื่องมือวัดอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Thermometer) ที่มีค่าความละเอียด (Resolution) 0.1 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ควบคุมเสถียรภาพความร้อนภายในตู้อบให้คงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส

3)เครื่องมือวัดเวลา นาฬิกาจับเวลาดิจิทัล (Digital Stopwatch) ที่มีความละเอียดระดับวินาที สำหรับบันทึกระยะเวลาการแห้งตัวของสี

4)วัสดุทดสอบ ชิ้นงานเหล็กแผ่นเรียบมาตรฐานขนาด 10x10 เซนติเมตร และสีพ่นอุตสาหกรรม (Industrial Lacquer) เพื่อควบคุมตัวแปรด้านวัสดุให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

5.3 กลุ่มตัวอย่างและการทดลองซ้ำ

การทดลองนี้ใช้การออกแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Design) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1)จำนวนกลุ่มตัวอย่าง ใช้ชิ้นงานโลหะมาตรฐานรวมทั้งสิ้น 30 ชิ้น โดยใช้วิธีการสุ่มแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม 15 ชิ้น (ใช้วิธีการผึ่งลมธรรมชาติ) และ กลุ่มทดลอง 15 ชิ้น (ใช้วิธีการอบด้วยระบบหมุนเวียนอากาศ)

2)สภาวะการทดลอง ดำเนินการ ณ โรงประลองวิศวกรรม โดยกลุ่มทดลองจะถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ตลอดกระบวนการ

3) การทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อยืนยันความแม่นยำของข้อมูลและลดความคลาดเคลื่อน คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการ ทดลองซ้ำจำนวน 3 รอบ (Trials) ในแต่ละกลุ่มการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ดังนี้

1) สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) ใช้ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่ออธิบายลักษณะการกระจายของระยะเวลาการแห้งตัวและเสถียรภาพอุณหภูมิ พร้อมคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (Percentage Improvement)

2) สถิติอ้างอิง (Inferential Statistics)ใช้การทดสอบค่าที t-test (Dependent Sample) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะเวลาการแห้งตัวระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เพื่อยืนยันว่านวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาการทำงานได้อย่างมีนัยสำคัญจริง



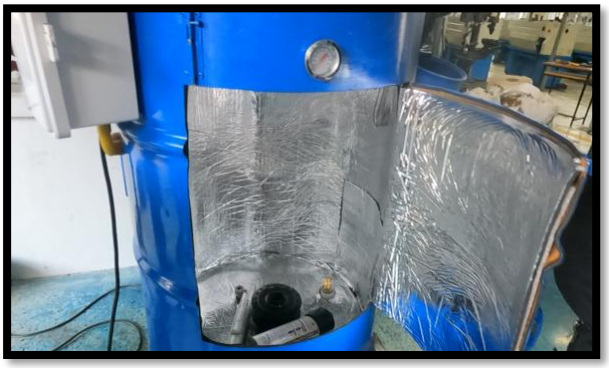
ภาพที่ 1 แสดงข้อมูลระยะเวลาการแห้งของชิ้นงาน

5.5 การออกแบบและพัฒนาเครื่อง

ในการพัฒนาตู้อบสีอเนกประสงค์ คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat

Transfer) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) เพื่อยกระดับประสิทธิภาพจากเครื่องต้นแบบเดิม โดยมีรายละเอียดการออกแบบเชิงเทคนิคดังนี้

1)โครงสร้างและระบบฉนวนความร้อน (Structural and Insulation Design) โครงสร้างหลักผลิตจากถังโลหะขนาด 200 ลิตร ซึ่งมีความทนทานต่อความร้อนและมีความจุเหมาะสมกับชิ้นงานอเนกประสงค์ คณะผู้วิจัยได้เปลี่ยนวัสดุฉนวนภายในจากฟอยล์ธรรมดาเป็น ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง (High-Performance Reflective Foil) เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีความร้อน (Reflectivity) และลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังถัง



ภาพที่ 2 ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง

2)ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (Forced Convection System) เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งพัดลมกระจายความร้อนเพื่อสร้างทิศทางการไหลเวียนของลมร้อนแบบวนซ้ำภายในห้องอบ โดยใช้หลักการความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการไหล ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการพื้นฐานของไหลดังนี้

$$p/(\rho g) + v^2/2g + z = \text{Constant} \quad (1)$$

เมื่อ

p คือ ความดันภายในห้องอบ

v คือ ความเร็วลมจากพัดลม

และ z คือ ระดับความสูงของตำแหน่งวัด

การติดตั้งพัดลมนี้ช่วยกำจัดปัญหา ความร้อนสะสมเฉพาะจุด (Hot Spot) ซึ่งเดิมเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ภายในเกิดการหลอมละลาย

3)ระบบควบคุมและความปลอดภัย (Control and Safety System) ยกระดับความปลอดภัยทางไฟฟ้าโดยติดตั้งชุด Circuit Breaker Box แยกส่วนเพื่อตัดกระแสไฟเมื่อผิดปกติ พร้อมร้อยสายไฟทั้งหมดผ่านท่อทนความร้อน (Conduits) เพื่อป้องกันความร้อนจากถังอบสัมผัสตัวนำไฟฟ้าโดยตรง

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดคุณลักษณะเชิงเทคนิคของตู้อบสีที่พัฒนาขึ้น (Technical Specifications)

รายการอุปกรณ์ / ตัวแปร	**รายละเอียดคุณลักษณะ**	**หมายเหตุ**
โครงสร้างห้องอบ	ถังโลหะขนาด 200 ลิตร	วัสดุเหลือใช้เพื่อลดต้นทุน
ระบบฉนวน	ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง	ปรับปรุงจากฟอยล์ธรรมดา
อุณหภูมิใช้งานเป้าหมาย	60 องศาเซลเซียส (≈140°F)	วัดจากสภาวะจริง
ระยะเวลาการอบสี	5 นาที	ลดจากเดิม 10 - 30 นาที
ระบบป้องกันไฟฟ้า	Breaker & Heat-Resistant Conduit	เพื่อความปลอดภัยสูงสุด

4)ขั้นตอนการพัฒนา (Development Flowchart) กระบวนการดำเนินงานเชิงวิศวกรรมแบ่งออกเป็น 5 ระยะ ดังนี้

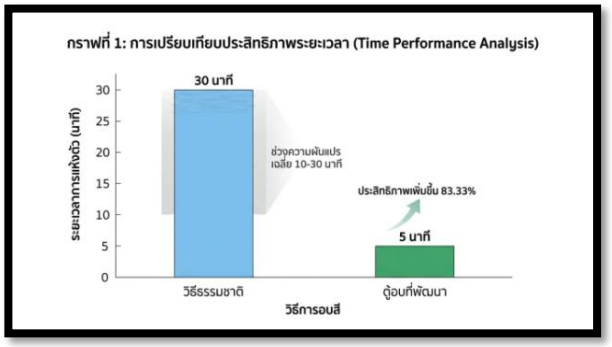
Phase 1 Diagnosis วิเคราะห์ความเสียหายจากการหลอมละลายของเครื่องต้นแบบ

Phase 2 Thermal Improvement ติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศและปรับปรุงฟอยล์สะท้อนความร้อน

Phase 3 Safety Integration ติดตั้งกล่องเบรกเกอร์และท่อร้อยสายไฟทนความร้อน

Phase 4 Calibration ทดสอบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส

Phase 5 Performance Verification ทดสอบอบสีจริงเพื่อทำเวลาให้ได้ภายใน 5 นาที



ภาพที่ 3 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระยะเวลา

5.6 การออกแบบกลไกและเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี

ในกระบวนการพัฒนาตู้อบสีจากถังโลหะขนาด 200 ลิตร คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการทางวิศวกรรมเพื่อเปลี่ยนจาก อุปกรณ์ประดิษฐ์ทั่วไป ให้เป็น นวัตกรรมเชิงพาณิชย์ต้นทุนต่ำ ดังนี้

1) การออกแบบกลไกการจัดการความร้อน (Thermal Mechanism Design) กลไกหลักของเครื่องอาศัยหลักการ การถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) โดยมีการปรับปรุงจากระบบเดิมตามข้อมูลที่พบในสภาวะจริงดังนี้

1.ระบบกระจายอากาศ (Air Distribution) ติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในเพื่อควบคุมทิศทางลมร้อน การเพิ่มพัดลมนี้ช่วยแก้ปัญหาความร้อนสะสมเฉพาะจุด (Hot Spot) ซึ่งเดิมส่งผลให้อุปกรณ์บางส่วนเกิดการหลอมละลาย

2.ระบบฉนวนและสะท้อนความร้อน เปลี่ยนวัสดุจากฟอยล์ธรรมดาเป็น ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีความร้อนกลับเข้าสู่ชิ้นงาน

3.สมการควบคุมการไหล ในการออกแบบความเร็วรอบของพัดลมและการเคลื่อนที่ของอากาศสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) เพื่อประเมินความดันและความเร็วลมภายในถังสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ดังแสดงในสมการที่ (1) เพื่อประเมินความดันและความเร็วลมภายในถัง

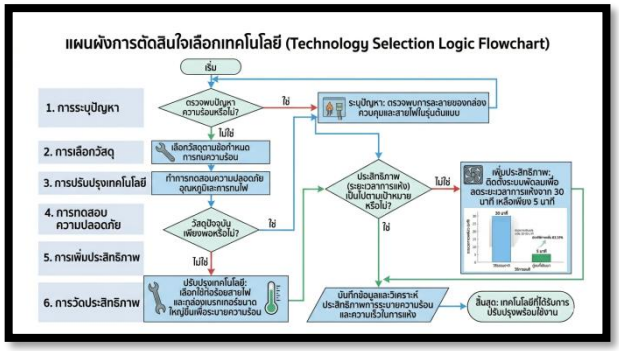
2) เกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี (Technology Selection Criteria) คณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีโดยอ้างอิงความเหมาะสมกับบริบทผู้ใช้งานรายย่อย ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีและวัสดุสำหรับตู้อบสีที่พัฒนาขึ้น

เกณฑ์การพิจารณา	รายละเอียดทางเทคนิคที่เลือกใช้	เหตุผลเชิงวิศวกรรม / ความคุ้มค่า

โครงสร้างหลัก	ถังโลหะขนาด 200 ลิตร	วัสดุหาได้ง่ายในท้องถิ่น ความจุเหมาะสม
ระบบพลังงาน	ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์	สอดคล้องกับการใช้งานในครัวเรือนและโรงงานขนาดเล็ก
ระบบควบคุมความปลอดภัย	กล่องเบรกเกอร์ (Breaker Box) และท่อร้อยสายไฟ	ป้องกันการลัดวงจรและการหลอมละลายจากความร้อน
อุณหภูมิใช้งาน	ควบคุมที่ระดับ 60 องศาเซลเซียส	ระดับความร้อนที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมีของสี
ต้นทุนการผลิต	เป้าหมายไม่เกิน 10,000 บาท	เพื่อให้เกษตรกรหรือช่างรายย่อยเข้าถึงได้

3) แผนผังการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยี (Selection Logic Flowchart)



ภาพที่ 4 แผนผังการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยี

4) ความสอดคล้องเชิงประสิทธิภาพ (Performance Consistency) การเลือกเทคโนโลยีที่เน้น ความเรียบง่ายแต่ปลอดภัย ส่งผลให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (KPI) คืออุณหภูมิคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถวัดได้ผ่านเกจวัดอุณหภูมิแบบเข็ม (หน้าปัดแสดงผลทั้งองศาเซลเซียสและฟาเรนไฮต์)

6. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

6.1 ผลการวิจัย

จากการทดสอบสมรรถนะตู้อบสีระบบหมุนเวียนอากาศเทียบกับวิธีดั้งเดิม โดยใช้กลุ่มตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐานกลุ่มละ 15 ชิ้น รวม 3 ชุดการทดลอง ผลการศึกษาแบ่งเป็น 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

1)ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาการแห้งตัวและเสถียรภาพความร้อน ตู้อบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิคงที่ได้ที่ 60 องศาเซลเซียส (≈140°F) โดยมีรายละเอียดการเปรียบเทียบเชิงสถิติดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งตัวและพฤติกรรมทางความร้อน (n=30)

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ	วิธีผึ่งลมธรรมชาติ (n=15)	ตู้อบระบบหมุนเวียน (n=15)	ผลการเปลี่ยนแปลง	p-value
ระยะเวลาการแห้งเฉลี่ย (นาที)	30.00 ± 3.42	5.00 ± 0.52	ลดลง 83.33%	< 0.05
อุณหภูมิขณะปฏิบัติงาน (°C)	30 - 35	60	เพิ่มขึ้น 85.71%	-
ความสม่ำเสมอของผิวสี	ไม่สม่ำเสมอ	สม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน	พัฒนาขึ้นชัดเจน	-

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่านวัตกรรมตู้อบสีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเวลาได้ถึงร้อยละ 83.33 พร้อมทั้งรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของผิวงานได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

2) ผลการประเมินความพึงพอใจ (Likert Scale) คณะผู้วิจัยได้รวบรวมผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน และผู้ประกอบการ 15 ท่าน ตามหัวข้อที่ระบุในแผนงาน สรุปผลได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริง (n=20)

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบน (S.D.)	ระดับความพึงพอใจ
1. ประสิทธิภาพการลดระยะเวลาการทำงาน	4.80	**0.41**	มากที่สุด
2. ความสม่ำเสมอของคุณภาพผิวสี	4.65	**0.49**	มากที่สุด
3. เสถียรภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า	4.90	**0.31**	มากที่สุด
4. ความคุ้มค่าและความง่ายในการใช้งาน	4.75	**0.44**	มากที่สุด
ภาพรวมผลการประเมิน	**4.78**	**0.41**	**มากที่สุด**

หมายเหตุ: ผลการประเมินโดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญช่างเทคนิค 5 ท่าน และกลุ่มผู้ประกอบการ/ช่างซ่อมบำรุง 15 ท่าน โดยใช้เกณฑ์มาตรวัดของ Likert Scale 5 ระดับ

3) **ผลด้านความปลอดภัยและโครงสร้าง** การติดตั้งกล่องเบรกเกอร์และท่อร้อยสายไฟทนความร้อนช่วยให้เครื่องทำงานต่อเนื่องได้โดยไม่มีอุปกรณ์หลอมละลาย และระบบฉนวนฟอยล์คุณภาพสูงช่วยกักเก็บความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ

6.2 อภิปรายผล

จากผลการวิจัยข้างต้น สามารถอภิปรายประเด็นสำคัญเชิงวิศวกรรมได้ดังนี้

1) ความสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์และความร้อน: การที่ระยะเวลาการแห้งตัวลดลงเหลือเพียง 5 นาที ($p < 0.05$) เป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของการบูรณาการระหว่าง สมการเบอร์นูลลี และ การพาความร้อนแบบบังคับ โดยความเร็วลมที่เกิดจากพัดลมหมุนเวียนอากาศไปเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ที่ผิวชิ้นงานโดยตรง ส่งผลให้เกิดการระเหยของตัวทำละลายที่รวดเร็วและสม่ำเสมอกว่าวิธีธรรมชาติ

2) การจัดการความร้อนและความปลอดภัย การรักษาเสถียรภาพที่ 60 °C โดยไม่มีปัญหาจุดความร้อนสะสม (Hot Spot) เหมือนเครื่องต้นแบบเดิม พิสูจน์ให้เห็นว่าการออกแบบทิศทางการไหลของอากาศร่วมกับการใช้ฟอยล์สะท้อนความร้อนคุณภาพสูง เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสำหรับนวัตกรรมต้นทุนต่ำที่ต้องการมาตรฐานระดับอุตสาหกรรม

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1สรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนาตู้อบสีอเนกประสงค์จากถังโลหะขนาด 200 ลิตร ระบบหมุนเวียนอากาศ คณะผู้วิจัยสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1)**ประสิทธิภาพเชิงเวลา** ผลการทดลองเชิงประจักษ์ยืนยันว่าตู้อบสามารถลดระยะเวลาการแห้งตัวของสีจากค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) 30 นาที เหลือเพียง 5 นาที ต่อรอบการทำงาน คิดเป็นประสิทธิภาพเชิงเวลาที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 83.33 โดยผลการทดสอบทางสถิติ t-test (Dependent Sample) พบค่า p-value < 0.05 ซึ่งแสดงถึงการลดลงของเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2) ความสัมพันธ์ทางวิศวกรรม: ความสำเร็จนี้เกิดจากการเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญระหว่างความเร็วลม (v) ตาม สมการเบอร์นูลลี ที่สร้างโดยพัดลมหมุนเวียนอากาศ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ตาม สมการการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) ส่งผลให้เกิดการระเหยของตัวทำละลายที่รวดเร็วและสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

3) เสถียรภาพและความปลอดภัย: ตู้อบสามารถรักษาอุณหภูมิคงที่เฉลี่ยได้ที่ 60 องศาเซลเซียส โดยไม่มีปัญหาจุดความร้อนสะสม (Hot Spot) และมีความปลอดภัยทางไฟฟ้าสูงจากการติดตั้งกล่องเบรกเกอร์และท่อร้อยสายไฟทนความร้อน ซึ่งได้รับระดับความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริงในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยรวม 4.78)



ภาพที่ 5 แสดงกล่องเบรกเกอร์ และการร้อยสายไฟ

7.2ข้อเสนอแนะ

1)ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้งาน (Practical Recommendations)

1.การยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยของชุดควบคุม จากการทดสอบพบว่าสภาวะความร้อนภายในอาจส่งผลต่อการหลอมละลายของอุปกรณ์ควบคุมหากไม่มีการจัดการที่ดี จึงควรเลือกใช้กล่องควบคุมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อช่วยในการระบายความร้อน หรือใช้วัสดุที่เป็นโลหะทนความร้อนทดแทนวัสดุพลาสติกในจุดที่สัมผัสความร้อนโดยตรง

2.การติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ แม้ว่าในปัจจุบันจะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ระดับ 60 องศาเซลเซียส ผ่านการสังเกตจากเกจวัดแบบเข็ม แต่เพื่อความแม่นยำในการอบสีแต่ละประเภทที่มีจุดวาบไฟ (Flash Point) ต่างกัน ควรมีการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital Thermostat หรือ PID Controller) เพื่อตัดการทำงานของแหล่งกำเนิดความร้อนเมื่ออุณหภูมิเกินกำหนด

3.การบำรุงรักษาระบบหมุนเวียนอากาศ ควรมีการตรวจสอบการทำงานของพัดลมและสภาพของฉนวนฟอยล์สะท้อนความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากความร้อนสะสมอาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์พัดลมและกาวที่ใช้ยึดติดแผ่นฟอยล์

2) ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต (Research Recommendations)

1.การทดสอบกับสารเคลือบผิวที่หลากหลาย ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระยะเวลาการอบและคุณภาพการยึดเกาะของสีประเภทอื่น ๆ เช่น สีพาวเดอร์โค้ท (Powder Coating) หรือสีน้ำมัน เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของตู้อบให้มีความหลากหลายมากขึ้นกว่าปัจจุบันที่ทำได้ในเวลา 5 นาที

2.การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Analysis) ควรมีการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้า (kWh) ในแต่ละรอบการทำงาน เพื่อนำมาคำนวณจุดคุ้มทุน (Break-even Point) และเปรียบเทียบความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในระยะยาวสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย

3.การพัฒนาวัสดุโครงสร้างและระบบฉนวน ควรมีการทดลองใช้วัสดุฉนวนประเภทอื่น เช่น ใยแก้ว (Glass Wool) หรือแผ่นฉนวนสำเร็จรูป เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการกักเก็บความร้อนกับระบบฟอยล์คุณภาพสูงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งอาจช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

4.การจัดอบรมและถ่ายทอดเทคโนโลยี ควรมีการส่งเสริมและจัดอบรมให้ความรู้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกี่ยวกับการสร้างและบำรุงรักษาตู้อบต้นทุนต่ำ เพื่อให้เกิดการนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมไปใช้อย่างกว้างขวางและปลอดภัย

8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการแห้งของสีและพฤติกรรมการกระจายความร้อน ในตู้อบถังโลหะระบบหมุนเวียนอากาศ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อคณาจารย์แผนกช่างกลโรงงาน สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาเชิงเทคนิคและสนับสนุนการผลิตเครื่องต้นแบบอย่างใกล้ชิด ตลอดจนขอขอบคุณคณะผู้บริหารวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรีที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย จนบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

9. เอกสารอ้างอิง

[1] **Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2022).** *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

[2] **Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2023).** *Fundamentals of heat and mass transfer* (9th ed.). Wiley.

[3] White, F. M. (2021). *Fluid Mechanics* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

[4] **กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2567).** *คู่มือการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในสถานประกอบการขนาดเล็ก*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

[5] ธวัชชัย มั่นคง. (2568). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในกระบวนการอบแห้งอุตสาหกรรม. *วารสารวิศวกรรมเทคโนโลยี*, 12(1), 12-25.

[6] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2567). *มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับสถานที่ที่มีความร้อนสูง*. กรุงเทพฯ: วสท.

การพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึง เพื่อลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ

Development of a Power-Assisted Device for Lathe Chuck Replacement to Reduce Musculoskeletal Disorder Risks

มานพ เสาะแสวง[1], ธนาการ ประภาสัจจะเวทย์[2], จาตุรงค์ พึ่งจักคลี่[3], ศรายุธ คำไทย[4] และนพดล มาลา[5]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : Nopmcsp2547@gmail.com

[2]ตำแหน่ง ครู คศ.2 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : thanakrantkpss@stc.ac.th

[3]ตำแหน่ง พนักงานราชการครู สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : chaturong1977@gmail.com

[4]ตำแหน่ง ครูผู้ช่วย สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : Sarayutkhamthai99@gmail.com

[5]ตำแหน่ง ครูผู้ช่วย สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : noppadon.ml2536@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงขนาดไม่เกิน 200 มม. (น้ำหนัก 25–35 กิโลกรัม) เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ (MSDs) ในผู้ปฏิบัติงาน จากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบพบปัญหาความไม่เสถียรเนื่องจากวัสดุโครงสร้างบางเกินไปและยังต้องใช้แรงยกประคองในช่วงติดตั้ง คณะผู้วิจัยจึงปรับปรุงโครงสร้างโดยใช้เหล็กหนา 2.3–3.2 มม. เสริมความแข็งแรงแนวเชื่อม และติดตั้งกลไก "Internal Support" เพื่อให้รอกรับน้ำหนักได้ 100% ผลการทดสอบ โดยสามารถลดระยะการแกว่ง (Oscillation) จาก 15 มม. เหลือเพียงน้อยกว่า 2 มม. และลดภาระน้ำหนักที่ร่างกายต้องแบกรับจาก 35 กก. เหลือ 0 กก. (Zero-effort) ในทุกขั้นตอนการปฏิบัติงาน กับกลุ่มตัวอย่าง 15 ราย พบว่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ที่ 4.76 จาก 5.00 อุปกรณ์มีความมั่นคงสูงและลดความเหนื่อยล้าได้ตามมาตรฐานสรีรศาสตร์ในโรงประลองวิศวกรรม

คำสำคัญ: อุปกรณ์ผ่อนแรง, หัวจับเครื่องกลึง, สรีรศาสตร์, การบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ, การออกแบบเชิงวิศวกรรม

Abstract

This research aims to develop a power-assisted device for replacing lathe chucks up to 200 mm (weight 25–35 kg) to mitigate the risk of Musculoskeletal Disorders (MSDs) among operators. Initial prototype testing revealed structural instability due to inadequate material thickness and design gaps that necessitated manual support during installation. Consequently, the researchers reinforced the structure using 2.3–3.2 mm thick steel, improved welding integrity, and integrated an 'Internal Support' mechanism to enable 100% load-bearing capability. Experimental results demonstrated a reduction in oscillation from 15 mm to less than 2 mm and a decrease in physical load from 35 kg to 0 kg (Zero-effort) throughout all operational steps. Evaluations from a sample group of 15 participants yielded an average satisfaction score of 4.76 out of 5.00, confirming that the device provides high stability and effectively reduces fatigue in accordance with ergonomic standards in engineering workshops

Keywords: Power-assisted device, Lathe chuck, Ergonomics, Musculoskeletal Disorders (MSDs), Engineering design

1.บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิต เครื่องกลึงเป็นเครื่องจักรพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญ แต่การเปลี่ยนชุดหัวจับขนาด 200 มม. (น้ำหนัก 25–35 กก.) ถือเป็นภารกิจที่มีความเสี่ยงสูงต่อสวัสดิภาพผู้ปฏิบัติงาน [1] การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ด้วยแรงกายเพียงอย่างเดียวส่งผลโดยตรงต่อการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ (MSDs) โดยเฉพาะบริเวณหลังและเอว



ภาพที่ 1 การยกเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมากด้วยแรงกายเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษาอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ระบบบรอกผ่อนแรงในห้องปฏิบัติการ พบข้อบกพร่องสำคัญด้านเสถียรภาพโครงสร้างจากการเลือกใช้เหล็กกล่องที่บางเกินไป ทำให้เกิดอาการแกว่งขณะรับภาระ รวมถึงปัญหาคุณภาพแนวเชื่อมที่ไม่ได้มาตรฐานและขาดการเก็บรายละเอียดผิวงาน [3] นอกจากนี้ ระบบล้อเลื่อนยังมีความฝืด ส่งผลต่อการเคลื่อนย้าย และมีช่องว่างด้านการออกแบบ (Design Gap) ที่ทำให้ผู้ปฏิบัติงานยังต้องใช้แรงประคองหัวจับในขั้นตอนสุดท้าย ส่งผลให้ระดับความเหนื่อยล้าไม่ได้รับการแก้ไขอย่างยั่งยืน [4]

จากการวิเคราะห์ช่องว่างด้านการออกแบบ (Design Gap) ในกระบวนการทำงานแบบเดิม พบว่าแม้จะมีการใช้ระบบบรอกช่วยยกในแนวดิ่ง แต่ในขั้นตอนวิกฤตคือการนำหัวจับเข้าสู่เพลาเครื่องกลึง ผู้ปฏิบัติงานยังคงต้องใช้แรงกายในการยกประคองและปรับตำแหน่งทั้งหมด ส่งผลให้ระดับความเหนื่อยล้าสะสมไม่แตกต่างจากการยกด้วยมือแบบดั้งเดิม คณะผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการพัฒนา กลไกแขนเสียบประคองภายใน (Internal Support Hub) เพื่อให้ระบบบรอกสามารถรับภาระน้ำหนักได้ 100% ในทุกขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับรุ่นปี 2026 โดยมุ่งปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างเหล็ก เพิ่มคุณภาพงานเชื่อมตามมาตรฐานวิศวกรรม และพัฒนาระบบบรอกให้มีความมั่นคงสูง เพื่อลดภาระงานของมนุษย์ตามหลักสรีรศาสตร์ ให้กระบวนการเปลี่ยนหัวจับมีความปลอดภัยและ "ทำแล้วไม่เหนื่อยเลย" อย่างแท้จริง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาโครงสร้างอุปกรณ์ช่วยยกหัวจับเครื่องกลึงขนาดไม่เกิน 200 มิลลิเมตร ให้มีความมั่นคงแข็งแรงตามมาตรฐานวิศวกรรม

2.2 เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบบรอกยก (Hoist System) ในการผ่อนแรงยกแนวดิ่ง

2.3 เพื่อปรับปรุงคุณภาพการผลิตและงานประกอบเชิงอุตสาหกรรม (Manufacturing Quality)

2.4 เพื่อลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บและลดระดับความเหนื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 สมมติฐานด้านความมั่นคงทางโครงสร้าง

3.2 สมมติฐานด้านการลดภาระงานทางสรีรศาสตร์

3.3 สมมติฐานด้านประสิทธิภาพการทำงานและความลื่นไหล

3.4 สมมติฐานด้านมาตรฐานและความปลอดภัยเชิงอุตสาหกรรม

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1ขอบเขตด้านการออกแบบและพัฒนาเชิงวิศวกรรม

1) การพัฒนาระบบผ่อนแรง มุ่งเน้นการปรับปรุงชุดอุปกรณ์ช่วยยกที่ใช้ ระบบรอก (Hoist) เป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนแนวดิ่ง (ขึ้น-ลง) เพื่อรับภาระน้ำหนักโหลดแทนผู้ปฏิบัติงาน[2]

2) การปรับปรุงโครงสร้าง ดำเนินการเปลี่ยนวัสดุโครงสร้างหลักจากเหล็กกล่องที่มีความหนาไม่เพียงพอ (Thin-walled steel) มาเป็นเหล็กโครงสร้างที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อลดอาการ แกว่ง และการแอ่นตัวขณะรับภาระ

3) คุณภาพงานผลิต ครอบคลุมการปรับปรุงคุณภาพแนวเชื่อมให้มีความแข็งแรงตามมาตรฐานงานเชื่อม (Welding Integrity) และการเก็บรายละเอียดผิวงาน (Finishing) [3]เช่น การลบคมและการพ่นสีอุตสาหกรรม เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานและความเรียบร้อยเชิงพาณิชย์

4) ระบบเคลื่อนที่ ปรับปรุงชุดล้อเลื่อนและฐานอุปกรณ์ให้มีความลื่นไหล (Mobility) สามารถเคลื่อนย้ายเข้าสู่พื้นที่จำกัดบริเวณเครื่องกลึงได้อย่างสะดวกและปลอดภัย

4.2 ขอบเขตด้านเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

1) ขนาดหัวจับ อุปกรณ์ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 200 มิลลิเมตร (ประมาณ 8 นิ้ว) [Source Title]

2) พิกัดน้ำหนัก (Payload) รองรับน้ำหนักของหัวจับและอุปกรณ์ประกอบในช่วงประมาณ 25 ถึง 35 กิโลกรัม ซึ่งเป็นพิกัดที่ส่งผลต่ออาการบาดเจ็บสะสมบริเวณหลังและเอวหากต้องยกด้วยแรงกายเพียงอย่างเดียว

3) ระยะการทำงาน อุปกรณ์ต้องมีความสูงเพียงพอสำหรับการยกหัวจับจากจุดวางอุปกรณ์จนถึงระดับความสูงของศูนย์กลางเพลาเครื่องกลึง (Spindle Center Height) ในห้องปฏิบัติการ

4.3 ขอบเขตด้านพื้นที่และประชากรเป้าหมาย

1) สถานที่ศึกษาห้องปฏิบัติการเครื่องมือกลหรือโรงประลองวิศวกรรมที่มีการใช้งานเครื่องกลึงขนาดมาตรฐาน

2) กลุ่มเป้าหมายนักศึกษาวิชาเทคโนโลยีการผลิต หรือช่างเทคนิคที่มีภารกิจในการเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึง และเป็นกลุ่มเสี่ยงต่อการเกิดอาการปวดเมื่อยจากการยกของหนัก

4.4 ขอบเขตด้านการประเมินผล

1) ประสิทธิภาพเชิงสรีรศาสตร์ ประเมินจากระดับความรู้สึกเหนื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน โดยมีเป้าหมายคือ "ทำแล้วไม่เหนื่อยเลย" หรือภาระงานลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

2) เสถียรภาพทางเทคนิค ประเมินความมั่นคงของโครงสร้างในขณะรับภาระโหลดจริง โดยต้องไม่มีอาการแกว่งหรือเสียรูปของวัสดุที่เกินกว่าค่ามาตรฐานวิศวกรรมกำหนด

4.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

งานวิจัยนี้ครอบคลุมการพัฒนากลไกแขนเสียบประคองภายใน (Internal Support Hub) เพื่อขจัดปัญหาการที่ผู้ปฏิบัติงานต้องยกประคองหัวจับด้วยแรงกายในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อให้บรรลุเป้าหมายสภาวะไร้แรงต้าน (Zero-effort) อย่างสมบูรณ์

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กระบวนการดำเนินงานถูกแบ่งออกเป็น 5 ระยะ เพื่อให้ครอบคลุมการพัฒนาตามมาตรฐานวิศวกรรม

1) การสำรวจและวิเคราะห์ปัญหา (Problem Analysis) ศึกษากระบวนการยกเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงขนาด 200 มม. ซึ่งมีน้ำหนัก 25-35 กิโลกรัม และวิเคราะห์สาเหตุการเกิดอาการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ (MSDs) [5] บริเวณหลังและเอวของผู้ปฏิบัติงาน



ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการยกเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงขนาด 200 มม. น้ำหนัก 25-35 กิโลกรัม

2) การออกแบบและคำนวณโครงสร้าง (Engineering Design) ออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ใหม่โดยเน้นความแข็งแรงเชิงอุตสาหกรรม (Structural Stability) เลือกใช้เหล็กโครงสร้างที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อลดการแอ่นตัวและอาการแกว่งขณะรับภาระ (Load) พร้อมออกแบบระบบรอก (Hoist System) ให้ครอบคลุมระยะความสูงของศูนย์กลางเพลาเครื่องกลึง

3) การจัดสร้างและประกอบ (Fabrication) ดำเนินการสร้างอุปกรณ์ตามแบบ โดยให้ความสำคัญกับคุณภาพของแนวเชื่อม (Welding Integrity) และการเลือกใช้วัสดุที่มีสมรรถนะสูงกว่ารุ่นเดิม รวมถึงการติดตั้งระบบล้อเลื่อนที่เพิ่มความลื่นไหล (Mobility) ในพื้นที่จำกัด

4) การทดสอบประสิทธิภาพ (Performance Testing) ทดสอบการยกโหลดจริงในพิกัด 35 กิโลกรัม เพื่อประเมินเสถียรภาพทางเทคนิคและระยะการทำงาน

5) การประเมินผลเชิงสรีรศาสตร์ (Ergonomic Evaluation) ประเมินระดับความเหนื่อยล้าและภาระงานของผู้ปฏิบัติงานเทียบกับวิธีการยกแบบเดิม เพื่อยืนยันสมมติฐานการลดภาระงานให้เหลือน้อยที่สุด

5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1) วัสดุโครงสร้างหลัก เลือกใช้เหล็กกล่อง (Square Tube) เกรดโครงสร้างที่มีความหนาในช่วง 2.3 – 3.2 มิลลิเมตร เพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพทางโครงสร้าง (Structural Stability) และลดอาการแกว่ง (Unstable) ขณะรับภาระน้ำหนักหัวจับ 25-35 กิโลกรัม

2) ระบบเคลื่อนที่ ชุดล้อเลื่อนเกรดอุตสาหกรรมแบบมีตลับลูกปืน (Heavy-duty Casters) เพื่อเพิ่มความลื่นไหล (Mobility) และความคล่องตัวในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์เข้าสู่พื้นที่จำกัดรอบเครื่องกลึง

3) วัสดุตกแต่งผิว สีพ่นอุตสาหกรรม (Industrial Lacquer/Enamel Paint) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและยกระดับภาพลักษณ์ของชิ้นงานให้เป็นไปตามมาตรฐานพาณิชย์

5.3 กลุ่มตัวอย่างและสถานที่ศึกษา

การวิจัยและทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจริง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ตรงตามสภาพการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

1) สถานที่ศึกษา ห้องปฏิบัติการเครื่องมือกล แผนกวิชาช่างกลโรงงาน/สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต

วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี ซึ่งเป็นโรงประลองวิศวกรรมที่มีการใช้งานเครื่องกลึงขนาดมาตรฐาน

2) กลุ่มเป้าหมาย (Sample Group) การทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาและช่างเทคนิคในสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต จำนวน 15 ราย ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีภารกิจในการเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงเป็นประจำและมีความเสี่ยงต่ออาการบาดเจ็บสะสม เกณฑ์การประเมินใช้มาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale) 5 ระดับ และการวัดตัวชี้วัดเชิงเทคนิคเปรียบเทียบก่อนและหลังการพัฒนา

3)เกณฑ์การคัดเลือก เป็นผู้ปฏิบัติงานที่เป็นกลุ่มเสี่ยงต่อการเกิดอาการปวดเมื่อยจากการยกของหนัก (High-risk group for MSDs) และมีความเต็มใจในการเข้าร่วมทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์ผ่อนแรง

การทดสอบสมรรถนะกำหนดให้ผู้ทดสอบทั้ง 15 ราย (ประกอบด้วยนักศึกษาชายช่วงอายุ 19-22 ปี และช่างเทคนิคที่มีประสบการณ์ 5 ปีขึ้นไป) ดำเนินการยกเปลี่ยนหัวจับคนละ 3 รอบการทำงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยความเหนื่อยล้าที่แม่นยำ

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษานี้ คณะผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดสอบสมรรถนะและการประเมินจากผู้ใช้งานจริงจำนวน 15 ราย โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนหลัก

1)การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis)ใช้สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดภาระงาน โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของระดับความพึงพอใจและระดับความเหนื่อยล้าสูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. ค่าเฉลี่ย (Mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$$

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง (n=15)

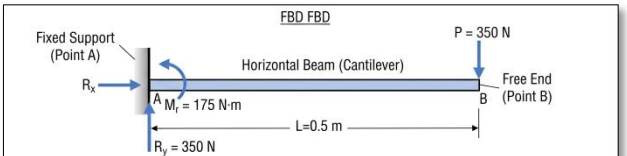
รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ความมั่นคงของโครงสร้างขณะรับภาระ	4.80	0.41	มากที่สุด
2. ความลื่นไหลของระบบรอกและล้อเลื่อน	4.73	0.46	มากที่สุด
3. การผ่อนแรง (ลดภาระงานลงเหลือเกือบ 0%)	4.87	0.35	มากที่สุด
4. ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	4.64	0.50	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	**4.76**	**0.43**	**มากที่สุด**

2)การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบและเสถียรภาพ (Comparative and Stability Analysis) คณะผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพใน 2 มิติหลัก เพื่อยืนยันความคุ้มค่าและความปลอดภัย ดังนี้

1.การเปรียบเทียบด้านสมรรถนะการทำงาน วิเคราะห์เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้และระดับความเหนื่อยล้า ระหว่าง การยกด้วยแรงกายแบบเดิม กับการใช้อุปกรณ์ผ่อนแรง เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นและการลดภาระงานอย่างเป็นรูปธรรม

2.การวิเคราะห์ความมั่นคงเพื่อความปลอดภัย: วิเคราะห์ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง (Center of

Gravity: CG) ของอุปกรณ์ในสภาวะรับภาระสูงสุด 35 กก. เพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ (Tipping) โดยกำหนดเกณฑ์มาตรฐานให้ค่าโมเมนต์ต้านการพลิก (*Mr*) ต้องมากกว่าโมเมนต์การพลิก (*Mt*) อย่างน้อย 1.5 เท่า (Stability Ratio = 1.5) เพื่อความมั่นคงสูงสุดขณะเคลื่อนย้ายในโรงงาน



ตารางสรุปข้อมูลทางเทคนิค (อ้างอิงหัวข้อ 5.5)

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่าที่คำนวณได้ (Calculated Value)
1. แรงกระทำ (Point Load, P)	350 N
2. ระยะแขนยื่น (Reach, L)	0.5 m
3. โมเมนต์ดัดสูงสุด (Maximum Bending Moment, M_{max})	175 N·m
4. ความเค้นดัดสูงสุด (Maximum Bending Stress, σ_{max})	≈17.84 MPa (สำหรับเหล็กหนา 3.2 mm)
5. การแอ่นตัวที่ปลาย (Deflection, δ)	≈0.3 mm
6. ค่าความปลอดภัย (Safety Factor, η)	≈14.0

ภาพที่ 3 แสดงวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis)

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis) พบว่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity) ของอุปกรณ์ขณะรับภาระสูงสุด 35 กก. ยังคงอยู่ภายในฐานล้อ (Support Base) โดยมีค่า **Stability Ratio เท่ากับ 1.5** ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการป้องกันการพลิกคว่ำ (Tipping)

5.5 การออกแบบและพัฒนาเครื่อง

1) การวิเคราะห์ภาระงาน (Load Analysis) ในการออกแบบ คณะผู้วิจัยกำหนดพิกัดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Design Load) ของหัวจับเครื่องกลึงที่ *P*=35 kg หรือประมาณ 350 N โดยมีระยะแขนยื่น (Reach) จากจุดศูนย์กลางเสาถึงจุดยก *L*=0.5 m แรงที่กระทำส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด (*Mmax*) ที่จุดรองรับ ดังนี้

$$M_{max} = P \times L = 350\,\text{N} \times 0.5\,\text{m} = 175\,\text{N} \cdot \text{m}$$

2) การเลือกวัสดุและการคำนวณความแข็งแรง (Stress Calculation) เพื่อแก้ปัญหาโครงสร้างแกว่ง (Unstable) จึงเปลี่ยนมาใช้เหล็กกล่อง (Square Tube) ขนาด 50×50 mm หนา 3.2 mm (Steel A36, *Sy*=250 MPa) โดยมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (*I*) และค่าโมดูลัสหน้าตัด (*Z*) ดังนี้

$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \approx 2.45 \times 10^{-7}\,\text{m}^4$$

$$Z = \frac{I}{c} \approx 9.81 \times 10^{-6}\,\text{m}^3$$

คำนวณค่าความเค้นดัดสูงสุด (σ_{max}) ที่เกิดขึ้นบนแขนยก

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{175}{9.81 \times 10^{-6}} \approx 17.84\,\text{MPa}$$

3) การคำนวณค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ค่าความปลอดภัย (η) ของโครงสร้างแขนยกภายใต้ภาระคงที่ (Static Load)

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{250\,\text{MPa}}{17.84\,\text{MPa}} \approx 14.0$$

หมายเหตุ: ค่าความปลอดภัยที่สูงเพียงพอช่วยยืนยันความมั่นคงขณะใช้งาน และรองรับแรงกระแทก (Dynamic load) ขณะเคลื่อนย้าย

4) การวิเคราะห์การแอ่นตัว (Deflection Analysis) เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพและลดอาการแกว่ง จึงคำนวณการแอ่นตัวที่ปลายแขน (δ)

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{350 \times (0.5)^3}{3 \times (200 \times 10^9) \times (2.45 \times 10^{-7})} \approx 0.3\,\text{mm}$$

ผลวิเคราะห์: การแอ่นตัวเพียง 0.3 mm ถือว่าน้อยมากในเชิงวิศวกรรม ช่วยให้การเล็งตำแหน่งหัวจับเข้าสู่เพลาเครื่องกลึงทำได้แม่นยำและมั่นคง

5) การวิเคราะห์เสถียรภาพและจุดศูนย์ถ่วง (Stability & Center of Gravity) คณะผู้วิจัยออกแบบฐานอุปกรณ์ให้กว้างกว่าระยะเอื้อมของแขนยก โดยตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง (CG) ของเครื่องขณะมีโหลดจะยังคงอยู่ภายในฐานล้อ (Support Base) เพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ (Tipping) โดยกำหนดให้โมเมนต์ต้านการพลิก (*Mr*) ต้องมากกว่าโมเมนต์การพลิก (*Mt*) อย่างน้อย 1.5 เท่า

$$\text{Stability Ratio} = \frac{M_r}{M_t} \geq 1.5$$

การยกระดับมาตรฐานงานผลิตและเสถียรภาพโครงสร้าง: คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงอุปกรณ์โดยมุ่งเน้นการขจัดข้อบกพร่องที่พบในรุ่นต้นแบบ ซึ่งมีการใช้เหล็กบางเกินไปจนส่งผลต่อความมั่นคงขณะใช้งาน โดยในรุ่นพัฒนาใหม่ได้เปลี่ยนมาใช้เหล็กที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Moment of Inertia) สูงขึ้น เพื่อลดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ให้เหลือน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้ให้ความสำคัญกับคุณภาพแนวเชื่อม (Welding Integrity) โดยการเชื่อมเต็มพิกัดและเจียรตกแต่งรอยเชื่อมให้เรียบเนียน เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยและขจัดปัญหาชิ้นงานที่ไม่เรียบร้อยจน ขัดต่อสายตา ผู้ใช้งาน

นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการพ่นสีอุตสาหกรรม (Industrial Paint) เพื่อป้องกันสนิมและสร้างภาพลักษณ์มาตรฐานสากล แก้ไขปัญหาชิ้นงานที่ดูไม่มั่นคง (Unstable) ในรุ่นต้นแบบให้มีความเป็นมืออาชีพยิ่งขึ้น

5.6การออกแบบกลไกและเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี

1) การออกแบบส่วนปลายรับภาระ (End Effector Design) จากข้อวิจารณ์ที่ว่าผู้ใช้ยังต้อง ยกเองหมดเลย ในขั้นตอนเข้าเครื่อง คณะผู้วิจัยจึงเปลี่ยนจากระบบขอเกี่ยวทั่วไป เป็น กลไกแขนเสียบภายใน (Internal Support Arm) ซึ่งมีลักษณะเป็นแกนเหล็กยื่นเข้าไปในรูศูนย์กลางของหัวจับ (Spindle Hole) ทำให้ระบบรอกสามารถรับน้ำหนักได้ 100% ตลอดกระบวนการติดตั้ง

2) เกณฑ์การเลือกวัสดุและกลไกยกเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดตามมาตรฐานวิศวกรรม (Safety Factor) คณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การเลือกวัสดุดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การเลือกวัสดุและเทคโนโลยีเปรียบเทียบกับภาระงาน (Load)

ส่วนประกอบ	เกณฑ์การคัดเลือก (Criteria)	เทคโนโลยีที่เลือกใช้	เหตุผลทางวิศวกรรม
โครงสร้างหลัก	ทนต่อแรงดัด (Bending Moment)	เหล็กกล่อง ความหนา 3.2 mm	ลดการแกว่ง (Unstable) และการเสียรูปขณะรับโหลด 35 kg,
ระบบยก	ความแม่นยำในการปรับระดับ	ชุดรอกโซ่ไฟฟ้า/เกลียวเร่ง	ควบคุมระยะแนวดิ่งได้ละเอียดกว่าการใช้แรงยกเอง,
ระบบเคลื่อนที่	ความต้านทานแรงเสียดทานต่ำ	ล้อโพลียูรีเทน (Bearing Case)	เพิ่มความลื่นไหลในการ "ลุ้น" เข้าพื้นที่แคบ,

3) สมการการคำนวณความปลอดภัย (Static Analysis)คณะผู้วิจัยได้คำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในจุดวิกฤตของแขนยกเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะไม่เกิดการวิบัติ:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

โดยที่

σ = ความเค้นดัด (Bending Stress)

M = โมเมนต์ดัดที่จุดรองรับ (P×L) โดย P=350 นิวตัน

c = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิววัสดุ

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปลี่ยนจากเหล็กบางเป็นเหล็กหนา)

5.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

จากการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างอุปกรณ์ต้นแบบเดิม (เหล็กบาง) และอุปกรณ์ที่พัฒนาใหม่ (เหล็กหนา 3.2 มม. พร้อมระบบ Internal Support) พบตัวเลขเชิงเทคนิคที่สำคัญดังนี้

1)การลดระยะการแกว่ง (Oscillation Reduction): อุปกรณ์เดิมมีระยะแกว่งขณะรับภาระ 35 กก. อยู่ที่ประมาณ 15 มม. ทำให้เล็งตำแหน่งได้ยาก แต่อุปกรณ์ใหม่ลดระยะการแกว่งเหลือเพียง < 2 มม. เพิ่มความแม่นยำและความมั่นคงอย่างมีนัยสำคัญ

2) ประสิทธิภาพการผ่อนแรง (Force Reduction): เปลี่ยนจากการแบกรับน้ำหนักด้วยแรงกาย 35 กก. เป็นสภาวะไร้แรงต้าน (0 กก.) เนื่องจากกลไกแขนเสียบและรอกสามารถรับน้ำหนักแทนผู้ปฏิบัติงานได้ 100%



ภาพที่ 4 อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นตอบโจทย์ด้าน ความแข็งแรง และ ประสิทธิภาพเชิงสรีรศาสตร์

3) ระดับความพึงพอใจ: ผลการประเมินเฉลี่ยจากผู้ใช้งาน 15 ราย อยู่ที่ 4.76 จาก 5.00 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับดีเยี่ยม

5.8 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึงขนาดไม่เกิน 200 มม. พบว่าอุปกรณ์ที่ปรับปรุงใหม่สามารถขจัดข้อบกพร่องด้านความไม่เสถียรของโครงสร้างได้โดยสมบูรณ์จากการเลือกใช้เหล็กโครงสร้างหนา 2.3–3.2 มม. และการควบคุมคุณภาพแนวเชื่อม



ภาพที่ 5 โครงสร้างเหล็กกล่องที่มีความหนาเพิ่มขึ้น

ระบบรอกยกและกลไกแขนเสียบภายในสามารถรับภาระน้ำหนักแทนผู้ปฏิบัติงานได้ 100% (Zero-effort) ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บสะสมบริเวณหลังและเอวจากการยกด้วยมือแบบเดิม, ผลการประเมินจากกลุ่มผู้ใช้งานเป้าหมายจำนวน 15 ราย พบว่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ที่ 4.76 จาก 5.00 โดยผู้ใช้งานเห็นว่าอุปกรณ์มีความมั่นคง แข็งแรง และช่วยลดภาระงานได้อย่างเป็นรูปธรรมสอดคล้องตามหลักสรีรศาสตร์

5.9 อภิปรายผล

ผลการศึกษาพิสูจน์ให้เห็นว่า การใช้อุปกรณ์ผ่อนแรงที่ติดตั้งกลไกแขนเสียบภายใน สามารถตอบโจทย์เป้าหมายเชิงสรีรศาสตร์คือ ทำแล้วไม่เหนื่อยเลย ได้อย่างเป็นรูปธรรม



ภาพที่ 6 อุปกรณ์มีความน่าเชื่อถือสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ใช้งาน

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการยกด้วยมือซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องเกร็งกล้ามเนื้อหลังและแขนเพื่อรักษาความนิ่งขณะเล็งรูเพลา แต่อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นช่วยให้กระบวนการนี้กลายเป็นสภาวะไร้แรงต้าน (Zero-effort) ซึ่งลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ (MSDs) บริเวณหลังและเอวได้อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 7 การใช้อุปกรณ์ผ่อนแรง

การปรับปรุงคุณภาพงานผลิตไม่เพียงแต่ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงวิศวกรรมเท่านั้น แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อ ภาพลักษณ์เชิงอุตสาหกรรม (Industrial Image) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความยอมรับจากผู้ปฏิบัติงาน การเปลี่ยนชุดล้อเลื่อนให้มีความลื่นไหลสูงช่วยให้ขั้นตอนการ ลุ้น หรือจัดตำแหน่งอุปกรณ์เข้าหาเพลาเครื่องกลึงทำได้สะดวกขึ้นโดยไม่ต้องออกแรงผลักดันมากเกินควร สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการลดภาระงานทางสรีรศาสตร์และเพิ่มประสิทธิภาพในพื้นที่จำกัดของห้องปฏิบัติการ

เมื่อเปรียบเทียบกับการยกด้วยมือแบบเดิม (Manual Lifting) พบว่านวัตกรรมนี้สามารถขจัดความเสี่ยงต่อโรค MSDs ได้โดยสมบูรณ์ในขั้นตอนการติดตั้ง ซึ่งเป็นจุดเด่นที่อุปกรณ์ช่วยยกทั่วไปในท้องตลาดมักทำได้เพียงการยกในแนวดิ่ง แต่ยังขาดกลไกประคองเข้าสู่เพลา (Spindle) ทำให้ผู้ใช้ยังต้องออกแรงยกเองในช่วงท้าย อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าอุปกรณ์นำเข้าจากต่างประเทศ แต่ให้สมรรถนะด้านสรีรศาสตร์ที่สอดคล้องกับหน้างานจริงในโรงประลองวิศวกรรมมากกว่า โดยสามารถเปลี่ยนภาระงานหนักให้เป็นสภาวะ ทำแล้วไม่เหนื่อยเลย ได้อย่างเป็นรูปธรรม

เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ช่วยยกทั่วไปในท้องตลาดที่มักทำได้เพียงการประคองน้ำหนักในแนวดิ่ง แต่นวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นที่กลไก Internal Support ซึ่งช่วยรับน้ำหนักแทนผู้ใช้ได้ 100% ตลอดกระบวนการติดตั้งเข้าสู่เพลาเครื่องกลึง (Spindle) นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าอุปกรณ์นำเข้าจากต่างประเทศ แต่ให้สมรรถนะที่สอดคล้องกับหน้างานจริงมากกว่า

ผลการทดสอบที่พบว่าภาระน้ำหนักลดลงเหลือ 0 กก. สอดคล้องกับหลักการ **NIOSH Lifting Equation** ที่มุ่งเน้นการจำกัดแรงที่กระทำต่อกระดูกสันหลังส่วนล่าง (L5/S1) ให้อยู่ในระดับปลอดภัยที่สุด ซึ่งอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำหน้าที่เป็นระบบตัดขาด (Isolation) ระหว่างร่างกายผู้ปฏิบัติงานกับภาระโหลดหนักได้อย่างสมบูรณ์

5.10 ข้อเสนอแนะ

1)ด้านการพัฒนาต่อยอด ควรมีการติดตั้งระบบเซนเซอร์วัดน้ำหนัก (Load Cell) หรือระบบตัดการทำงานอัตโนมัติเมื่อน้ำหนักเกินพิกัด (Overload Protection) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในระดับอุตสาหกรรม

2)ด้านวัสดุอุปกรณ์ อาจพิจารณาเปลี่ยนจากรอกโซ่แบบใช้แรงดึง เป็นรอกไฟฟ้าขนาดเล็กหรือระบบเกลียวขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เพื่อความละเอียดแม่นยำในการปรับระดับความสูงของหัวจับเข้าสู่เพลาเครื่องกลึง (Spindle Height)

3)ด้านการบำรุงรักษา ควรมีการกำหนดตารางตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมและล้อเลื่อนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ความลื่นไหล (Mobility) ของอุปกรณ์คงประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา

5.11 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

1)องค์ความรู้ด้านสรีรศาสตร์เชิงปฏิบัติงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างของการนำหลักการสรีรศาสตร์ (Ergonomics) มาแก้ปัญหาเชิงเทคนิคในสถานศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรม ช่วยลดความเสี่ยงต่ออาการบาดเจ็บสะสม (MSDs) ในกลุ่มนักศึกษาและช่างเทคนิค



ภาพที่ 8 ช่วยลดความเสี่ยงต่ออาการบาดเจ็บสะสม

2)มาตรฐานงานผลิตในอาชีวศึกษา การมุ่งเน้นคุณภาพแนวเชื่อมและการตกแต่งผิวงาน (Finishing) ตามข้อเสนอแนะจากการวิจัย เป็นการยกระดับมาตรฐานผลงานนวัตกรรมอาชีวศึกษาให้เข้าใกล้มาตรฐานเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม

3)ต้นแบบนวัตกรรมลดต้นทุน โครงการนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าการออกแบบกลไกที่ชาญฉลาด (แขนเสียบรับน้ำหนัก) สามารถช่วยผ่อนแรงได้อย่างมหาศาลโดยใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าอุปกรณ์นำเข้าจากต่างประเทศ สร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่องค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีการผลิตของวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์ผ่อนแรงสำหรับเปลี่ยนหัวจับเครื่องกลึง เพื่อลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อคณาจารย์แผนกช่างกลโรงงาน ผู้รับผิดชอบหลักในสาขาวิชาเทคนิคการผลิต ทุกท่าน ได้แก่ นายมานพ เสาะแสวง, นายอนุรักษ์ ไทยสนธิ, นายอุดม เผ่าพงษ์จันทร์, นายธนาการ ประภาสัจจะเวทย์, นายศรายุธ คำไทย และนายนพดล มาลา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาเชิงเทคนิค ถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านการออกแบบกลไก และสนับสนุนการผลิตเครื่องต้นแบบอย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร ครู เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทางการศึกษาทุกท่าน ตลอดจนนักเรียนนักศึกษา ของวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี ที่คอยให้การสนับสนุน มอบโอกาส และอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย

อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่นและบรรลุตามวัตถุประสงค์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] **กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. (2564).** *กฎกระทรวงมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักรปั้นจั่น และหม้อน้ำ พ.ศ. 2564.*

[2] **วิทยา มะเสนา. (2558).** *สรีรศาสตร์ (Ergonomics).* คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[3] **Hibbeler, R. C. (2017).** *Mechanics of Materials* (10th ed.). Pearson.

[4] **Shigley, J. E., & Budynas, R. G. (2014).** *Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.

การพัฒนาและหาประสิทธิภาพของเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารชุมชน

Development and Efficiency Evaluation of a Multi-Purpose Automatic Rotating Grill for Enhancing Community Food Products

ธนาการ ประภาสัจจะเวทย์[1], จาตุรงค์ พึ่งจักคลี่[2], มานพ เสาะแสวง[3], อนุรักษ์ ไทยสนธิ[4] และอุดม เผ่าพงษ์จันทร์[5]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.2 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : thanakrantkpss@stc.ac.th

[2]ตำแหน่ง พนักงานราชการครู สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : chaturong1977@gmail.com

[3]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : Nopmcsp2547@gmail.com

[4]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : anurak669@gmail.com

[5]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สอก.4 Email : machine.lpk1981@gmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพและยกระดับมาตรฐานอาหารวิสาหกิจชุมชน นวัตกรรมสำคัญประกอบด้วยชุดตะแกรงย่างแบบประกบ "บน-ล่าง" พร้อมระบบล็อกปรับระดับได้เพื่อยึดวัตถุดิบให้คงรูปตลอดการหมุน ระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 แรงม้า (186 วัตต์) ร่วมกับ "กลไกการสไลด์" (Sliding Mechanism) เพื่อความสะดวกและความปลอดภัยในการนำอาหารเข้า-ออกพื้นที่ความร้อน อีกทั้งโครงสร้างถูกออกแบบให้ถอดล้างทำความสะอาดได้ง่ายตามหลักสุขาภิบาลอาหาร ผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถลดระยะเวลาการทำงานลงร้อยละ 37.5 เมื่อเทียบกับแรงงานคน โดยสามารถรักษาความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้อย่างดี ต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 5,800 บาท ซึ่งต่ำกว่าราคาเครื่องเชิงพาณิชย์ร้อยละ 65–80 ผลประเมินความพึงพอใจจากผู้ประกอบการ 15 ราย มีคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 4.76 จาก 5.00 คะแนน เครื่องต้นแบบนี้จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันและสุขลักษณะในอุตสาหกรรมอาหารชุมชน

คำสำคัญ: เครื่องย่างอเนกประสงค์, ระบบหมุนอัตโนมัติ, ระบบล็อกตะแกรง, กลไกสไลด์, สุขาภิบาลอาหาร

Abstract

This research project aims to design and develop a multi-purpose automatic rotating grill to enhance productivity and food quality standards for community enterprises. Key mechanical innovations include a sandwich-style grilling grate with adjustable locks for secure food rotation, driven by a 0.25 HP (186-watt) motor. A sliding mechanism is integrated to ensure operational safety and convenience during food loading and unloading. Furthermore, the modular structure is designed for thorough and easy cleaning to meet food sanitation standards. Experimental results demonstrated a 37.5% reduction in production time compared to manual grilling, while maintaining consistent product quality. The production cost is approximately 5,800 THB, which is 65–80% lower than commercial market prices. A user satisfaction survey among 15 entrepreneurs yielded an outstanding average score of 4.76 out of 5.00. This prototype provides a viable technological solution for increasing competitiveness and hygiene standards in the community food processing sector

Keywords: Multi-purpose grill, Automatic rotating system, Grate-locking system, Sliding mechanism, Food hygiene

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารปี 2569 การยกระดับผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานราก [1] อย่างไรก็ตาม การย่างเนื้อสัตว์ในปัจจุบันยังอาศัยแรงงานคนและกรรมวิธีดั้งเดิม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าเครื่องจักรแปรรูปอาหารต้นทุนต่ำสำหรับเกษตรกรรายย่อยมักประสบปัญหาด้านความเสถียรของกลไก โดยเฉพาะระบบยึดวัตถุดิบที่มีความหนาต่างกันซึ่งมักใช้ระบบหนีบแบบตายตัว ทำให้เนื้อสัตว์หลุดร่วงหรือเสียหายระหว่างการหมุน

นอกจากนี้ สุวิทย์ พรมแดน ได้ระบุถึงข้อจำกัดสำคัญของเครื่องย่างในชุมชนว่ามักขาดการออกแบบตามหลักสุขาภิบาลอาหาร (Hygienic Design) [5] ทำให้การทำความสะอาดคราบไขมันสะสมทำได้ยากและเสี่ยงต่อการปนเปื้อน นวัตกรรมกลไกการสไลด์ และระบบล็อกตะแกรงแบบปรับระดับที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จึงถูกออกแบบมาเพื่ออุดช่องว่างดังกล่าว โดยช่วยให้การนำอาหารเข้า-ออกทำได้สะดวกและปลอดภัยกว่าเครื่องย่างรูปแบบเดิมที่ไม่มีระบบรางส่ง

ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์และมีอัตราการสูญเสียสูง ปัญหาสำคัญคือระบบล็อกตะแกรง บน-ล่าง ที่ไม่มั่นคงเมื่อรองรับวัตถุดิบต่างความหนา รวมถึงประเด็นสุขอนามัยที่เครื่องจักรเชิงพาณิชย์ในตลาดมักทำความสะอาดได้ยากและมีต้นทุนสูงเกินกว่าที่เกษตรกรรายย่อยจะลงทุนได้ [6], [5]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติที่บูรณาการนวัตกรรม กลไกการสไลด์ และระบบล็อกตะแกรงแบบปรับระดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและยกระดับมาตรฐานอาหารชุมชน โดยใช้การวัดระยะเวลาปฏิบัติงานจริง (Operating Time) เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะหลักเพื่อให้วิสาหกิจชุมชนสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีที่ตอบโจทย์การใช้งานในพื้นที่ได้อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ

2.2 เพื่อพัฒนาและทดสอบกลไกการสไลด์เพื่อความสะดวกปลอดภัยในการใช้งาน

2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสมรรถนะการทำงานเชิงเวลาและความร้อน

2.4 เพื่อออกแบบโครงสร้างเครื่องตามหลักสุขาภิบาลอาหารที่ง่ายต่อการบำรุงรักษา

2.5 เพื่อประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และต้นทุนการผลิตเทียบกับท้องตลาด

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 ประสิทธิภาพด้านเวลา เครื่องย่างระบบหมุนอัตโนมัติช่วยลดระยะเวลาปฏิบัติงาน (Operating Time) ได้ไม่น้อยกว่า 30% เมื่อเทียบกับการย่างด้วยแรงงานคน

3.2 ความอเนกประสงค์และความมั่นคง ระบบล็อกตะแกรงประกบบน-ล่าง สามารถยึดตรึงวัตถุดิบหลากชนิดให้คงรูปตลอดการหมุน 360 องศา โดยไม่เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์

3.3 ด้านสุขอนามัย กลไกการสไลด์และชุดตะแกรงที่ถอดประกอบได้ ช่วยให้ผู้ใช้งานทำความสะอาดเครื่องได้ง่ายและทั่วถึงตามหลักสุขาภิบาล

3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ต้นทุนการผลิตเครื่องต้นแบบด้วยวัสดุท้องถิ่นต่ำกว่าเครื่องเชิงพาณิชย์ 65–80% และสามารถซ่อมบำรุงรักษาได้เองในพื้นที่

3.5 การยอมรับจากผู้ใช้งาน ผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนไม่น้อยกว่า 80% มีความพึงพอใจต่อประสิทธิภาพ ความสะดวกในการใช้งาน และมาตรฐานความสะอาดของผลิตภัณฑ์จากเครื่องต้นแบบ

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ด้านการพัฒนา มุ่งเน้นการใช้วัสดุในท้องถิ่น และพัฒนากลไกหลักคือระบบล็อกตะแกรงประกบ บน-ล่าง และกลไกการสไลด์

4.2 ด้านผลิตภัณฑ์ รองรับเนื้อสัตว์หลากชนิด (หมู ไก่ ปลา) ตามขนาดตัวที่ใช้งานจริงในชุมชน

4.3 ด้านสมรรถนะ ทดสอบเวลาที่ใช้ในการย่าง (นาที) และประเมินสุขอนามัยหลังการล้างทำความสะอาด

4.4 ด้านประชากร ศึกษาในพื้นที่ จ.สุพรรณบุรี (อู่ทอง ด่านช้าง สองพี่น้อง) โดยเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 15 ราย

4.5 ด้านข้อจำกัด ระยะเวลาดำเนินการ 6–8 เดือน และไม่ครอบคลุมระบบอัตโนมัติขั้นสูงที่ซ่อมบำรุงยาก

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 การออกแบบและผลิต

บูรณาการหลักการวิศวกรรมเครื่องกลเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบสแตนเลส (Food Grade) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 0.25 HP



ภาพที่ 1 เครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ

ในการแก้ปัญหาเชิงโครงสร้าง คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการทางวิศวกรรม 3 ส่วนหลัก ดังนี้

หลักการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล (Machine Elements Design) ใช้ในการพัฒนาระบบล็อกตะแกรงแบบประกบ บน-ล่าง (Sandwich Grate) เพื่อสร้างแรงกดที่เหมาะสมในการยึดตรึงวัตถุดิบให้คงรูป

หลักการยศาสตร์ (Ergonomics) ใช้ในการออกแบบกลไกการสไลด์ (Sliding Mechanism) เพื่อลดภาระทางกายภาพของผู้ปฏิบัติงานและเพิ่มความปลอดภัยจากรังสีความร้อน

การออกแบบเชิงโมดูลาร์ (Modular Design) เพื่อให้ชุดตะแกรงและรางสไลด์สามารถถอดประกอบได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ ตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งานที่ว่า มันต้องล้างด้วย ตามมาตรฐานสุขาภิบาลอาหาร

1) การออกแบบกลไกและระบบขับเคลื่อน (Mechanical and Drive System Design) การออกแบบเน้นความเรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้โครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel 304) เพื่อความทนทานและถูกสุขลักษณะตามมาตรฐานอาหาร ระบบขับเคลื่อนหลักใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 แรงม้า (186 วัตต์) แรงดัน 220 โวลต์ ผ่าน

ระบบส่งกำลังแบบสายพานและเฟืองเพื่อลดความเร็วรอบให้เหมาะสมกับการย่าง โดยสามารถคำนวณความเร็วรอบของตะแกรงย่าง (N_2) ได้จากสมการส่งกำลัง

$$N_2 = N_1 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad \text{--- (1)}$$

เมื่อ

N_1 คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)

D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเล่ย์ขับ

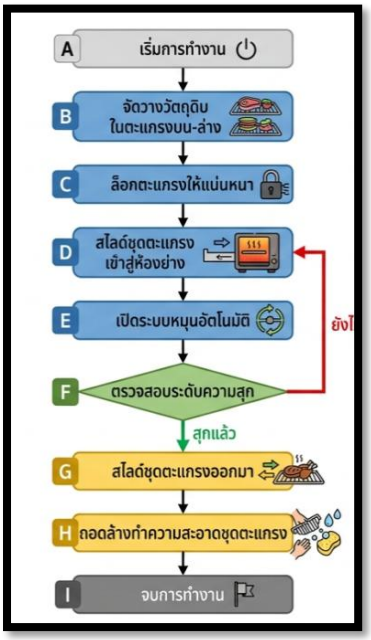
และ D_3 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเล่ย์ตาม

2) นวัตกรรมระบบล็อกตะแกรงและกลไกสไลด์ (Locking and Sliding Mechanism) หัวใจสำคัญของเครื่องย่างชุดนี้คือการพัฒนาชุดตะแกรงแบบ บนและล่าง (Sandwich Grate) เพื่อยึดตรึงวัตถุดิบให้คงที่ระหว่างการหมุน[4] 360 องศา และการติดตั้ง กลไกการสไลด์ (Sliding Mechanism) ที่ช่วยให้การนำอาหารเข้าและออกทำได้โดยการ สไลด์ลงไป สไลด์มา เพื่อลดความเสี่ยงจากการสัมผัสความร้อนโดยตรงของผู้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องย่างอเนกประสงค์

รายการคุณลักษณะ	รายละเอียดเชิงเทคนิค
ระบบขับเคลื่อน	มอเตอร์ไฟฟ้า 0.25 HP (186 W), 220V
กลไกการยึด	ระบบล็อกตะแกรงคู่ (บน-ล่าง) แบบปรับระดับ
กลไกการนำเข้า-ออก	ระบบสไลด์รางคู่ (Sliding Rail)
วัสดุโครงสร้าง	สแตนเลสสตีลเกรดอาหาร (Food Grade)
ความจุต่อรอบ	5.0 กิโลกรัม
ต้นทุนการผลิต	ประมาณ 5,800 บาท

3)แผนผังการทำงานของระบบ (System Flowchart) กระบวนการทำงานของเครื่องถูกออกแบบให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานจริง โดยเริ่มตั้งแต่การจัดวางวัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการทำความสะอาดซึ่งเป็นประเด็นที่ผู้ใช้ให้ความสำคัญอย่างมาก ดังแสดงในภาพที่ 2

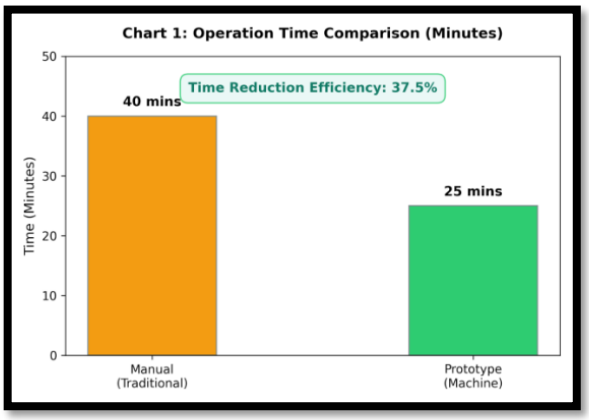


ภาพที่ 2 แผนผังขั้นตอนการทำงานและการบำรุงรักษา

4) การออกแบบเพื่อสุขอนามัยและการบำรุงรักษา (Design for Sanitation) เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานสุขลักษณะที่ดีในการผลิตอาหาร (GMP) และตอบข้อสงสัยของผู้ใช้งานที่ว่า จะล้างยังไง และ มันต้องล้างด้วย คณะผู้วิจัยจึงออกแบบโครงสร้างในรูปแบบ โมดูลาร์ (Modular Design) โดยชุดตะแกรงย่างและระบบรางสไลด์ถูกออกแบบให้มีจุดยึดที่สามารถถอดประกอบได้ด้วยมือเปล่าโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ (Tool-free Disassembly) ผู้ปฏิบัติงานสามารถยกชุดตะแกรงออกจากรางสไลด์เพื่อนำไปขจัดคราบไขมันสะสมได้อย่างทั่วถึง ซึ่งผล

การทดสอบพบว่าการออกแบบนี้ช่วย ลดระยะเวลาการทำความสะอาดลงได้ร้อยละ 46.7 (จาก 15 นาที เหลือเพียง 8 นาที) และช่วยลดปริมาณสิ่งตกค้างหลังการใช้งานได้มากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับเครื่องจักรในรูปแบบเดิม

5) การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้น (Preliminary Performance Metrics) จากการทดลอง จับเวลา การทำงาน พบว่าระบบอัตโนมัติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลาได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในกราฟเปรียบเทียบ



ภาพที่ 3 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงาน (นาที)

จากภาพที่ 3 กราฟที่ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานในการย่างวัตถุดิบระหว่างวิธีดั้งเดิม (การย่างด้วยมือ) และการใช้เครื่องต้นแบบ พบว่า การย่างด้วยมือใช้เวลารวมเฉลี่ย 40 นาที ในขณะที่การใช้เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาเพียง 25 นาที ซึ่งเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการทำงานแล้ว เครื่องต้นแบบสามารถลดระยะเวลาในการทำงานลงได้ถึง 37.5% แสดงให้เห็นว่าระบบกลไกและชุดควบคุมอัตโนมัติของเครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มกำลังการผลิตและประหยัดเวลาได้อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 กลไกการทำงาน

ประกอบด้วยระบบขับเคลื่อนการหมุน 360 องศา [7] ระบบล็อกตะแกรงอเนกประสงค์ และรางสไลด์เข้า-ออกห้องย่าง



ภาพที่ 4 การกระจายความร้อนสู่ผิวสัมผัสเนื้อสัตว์

1) ระบบขับเคลื่อนและการควบคุมการหมุน (Rotation System) เครื่องใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 0.25 แรงม้า (186 วัตต์) ทำหน้าที่ส่งกำลังผ่านระบบเกียร์ทด (Worm Gear) เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการย่าง โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมจะช่วยให้ความร้อนกระจายตัวสู่ผิวสัมผัสของเนื้อสัตว์ได้อย่างทั่วถึง (Uniform Heat Distribution) การทำงานของกลไกการหมุนสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของแรงบิด (Torque) ดังสมการ

$$T = \frac{P \times 60}{2\pi N} \quad \text{--- (2)}$$

เมื่อ

T คือ แรงบิด (N-m)

P คือ กำลังมอเตอร์ (Watts)

และ N คือ ความเร็วรอบ (RPM)

การควบคุมความเร็วรอบที่สม่ำเสมอช่วยลดการสูญเสียความร้อนและป้องกันการไหม้เกรียมเฉพาะจุด

ESTACON 2026 | 17th

ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบหลักเมื่อเทียบกับการย่างด้วยแรงงานคน



ภาพที่ 5 ระบบขับเคลื่อนและเกียร์ทดรอบ

จากการทดสอบเครื่องต้นแบบซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 แรงม้า (186 วัตต์) กำหนดความเร็วรอบมอเตอร์ ($N1$) ที่ 1,440 RPM ผ่านระบบเฟืองทดรอบในอัตราส่วน 1:240 จะได้ความเร็วรอบของตะแกรงย่าง ($N2$) ตามสมการที่ (1) เท่ากับ 6.0 รอบต่อนาที (RPM) ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมต่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ (Uniform Heat Distribution) และเมื่อคำนวณตามสมการที่ (2) จะได้ค่าแรงบิด (T) ที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 296.03 นิวตัน-เมตร (N-m) ซึ่งเพียงพอต่อการขับเคลื่อนชุดตะแกรงที่บรรจุวัตถุดิบน้ำหนัก 5.0 กิโลกรัมได้อย่างเสถียรตลอดรอบการทำงาน

2) ระบบล็อกตะแกรงอเนกประสงค์ (Dual-Grate Locking Mechanism) กลไกหลักในการยึดตรึงวัตถุดิบใช้วิธีการจัดวางแบบ ประกบบน-ล่าง (Sandwich Style) โดยประกอบด้วยตะแกรงสแตนเลสสตีล 304 สองชุดทำงานร่วมกับนวัตกรรม ตัวล็อกปรับระดับได้ (Adjustable Lock) ที่ถูกออกแบบมาให้สอดคล้องกับความหนาของวัตถุดิบหรือ ขนาดตัวที่ใช้งานจริง ในวิสาหกิจชุมชน ระบบล็อกนี้จะทำหน้าที่สร้างแรงกดที่สม่ำเสมอตลอดแนวพื้นที่ย่าง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัตถุดิบจะถูกยึดตรึงอย่างแน่นหนาและคงรูปร่างเดิม ร้อยละ 100 ตลอดกระบวนการหมุน 360 องศา โดยไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือหลุดร่วง แม้จะเป็นเนื้อสัตว์ที่มีโครงสร้างอ่อนตัว เช่น ปลา ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ

3) กลไกการเข้า-ออกห้องย่างแบบสไลด์ (Sliding Mechanism) เพื่อให้สอดคล้องกับประสิทธิภาพด้านเวลาและสุขอนามัย เครื่องได้ติดตั้งรางสไลด์ที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถ สไลด์ลงไป สไลด์มา เพื่อติดตั้งหรือถอดตะแกรงออกจากห้องย่างได้ทันที กลไกนี้ช่วยลดความยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียมการ และเอื้อต่อการทำความสะอาดซึ่งเป็นประเด็นที่ผู้ใช้งานให้ความสำคัญอย่างยิ่ง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ขั้นตอนและกลไกการทำงานของเครื่องย่าง

ขั้นตอนการทำงาน	กลไกที่เกี่ยวข้อง	วัตถุประสงค์เชิงสมรรถนะ
การเตรียม (Loading)	ตะแกรงคู่บน-ล่าง + ตัวล็อก	ยึดวัตถุดิบให้มั่นคงตามขนาดการใช้งานจริง
การนำเข้า (Inlet)	ระบบสไลด์ (Sliding Rail)	ความสะดวกและความปลอดภัย (สไลด์ลงไป-มา)
การแปรรูป (Grilling)	มอเตอร์ 0.25 HP + ระบบหมุน	กระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ 360 องศา
การบำรุงรักษา (Cleaning)	ชุดตะแกรงถอดประกอบได้	มาตรฐานสุขาภิบาลอาหาร ("มันต้องล้างด้วย")

4) ผังลำดับการทำงาน (Process Flowchart)กระบวนการทำงานแบบครบวงจรของเครื่องย่างอเนกประสงค์ แสดงได้ดังภาพที่ 2 ซึ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลา (Efficiency) โดยการจับใช้เวลา ในทุกรอบการผลิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 6 ผังลำดับการทำงาน (Process Flowchart)

จากการทดสอบเบื้องต้น กลไกที่พัฒนาขึ้นนี้ช่วยให้สามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยในการล้างและเตรียมการลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรวมกับประสิทธิภาพของระบบหมุนอัตโนมัติ ทำให้ภาพรวมของกระบวนการสามารถลดเวลาการผลิตลงได้ [6]ประมาณร้อยละ 37.5 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้สำหรับการยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารวิสาหกิจชุมชน

5.3 การเก็บข้อมูล

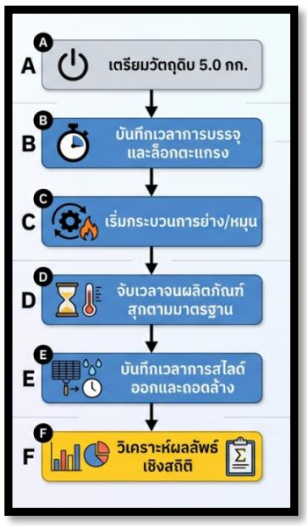
ใช้กระบวนการ จับใช้เวลา (Operating Time) บันทึกข้อมูลตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ 5.0 กก. การย่าง จนถึงการล้างทำความสะอาด

1) การกำหนดตัวแปรและเกณฑ์การทดสอบ การทดสอบจะดำเนินการภายใต้สภาวะควบคุม โดยใช้มาตรฐานปริมาณวัตถุดิบ 5.0 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต เพื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการย่างด้วยแรงงานคน (Manual) และการใช้เครื่องย่างต้นแบบ (Prototype) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1.ตัวแปรอิสระ วิธีการย่าง (Manual vs. Automatic) และประเภทของเนื้อสัตว์

2.ตัวแปรตาม ระยะเวลาในการปรุงสุก (นาที) ความสะดวกในการล้างทำความสะอาด (นาที) และความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์

2) ขั้นตอนการเก็บข้อมูลเชิงสมรรถนะ (Performance Data Collection) ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลผ่านกระบวนการ จับใช้เวลา โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและนาฬิกาจับเวลาดิจิทัล ตามขั้นตอนใน Flowchart



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลสมรรถนะ

3) การคำนวณประสิทธิภาพการลดเวลา (Efficiency Calculation) ประสิทธิภาพในการประหยัดเวลา (E_t) ของเครื่องต้นแบบ สามารถคำนวณได้จากสูตรเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

$$E_t = \left(\frac{T_m - T_p}{T_m} \right) \times 100 \qquad \text{--- (3)}$$

เมื่อ

Tm คือ เวลาเฉลี่ยในการย่างด้วยมือ

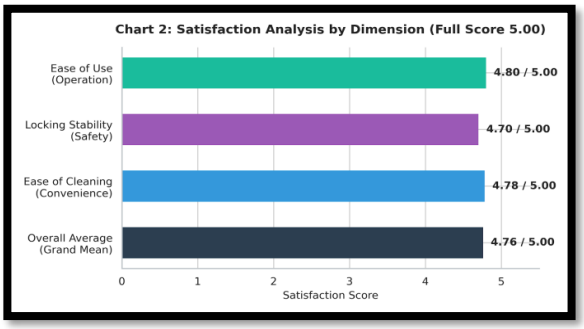
และ *Tp* คือ เวลาเฉลี่ยในการย่างด้วยเครื่องต้นแบบ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลา (วัตถุดิบ 5.0 กก.)

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	วิธีดั้งเดิม (นาที)	เครื่องต้นแบบ (นาที)	ประสิทธิภาพ (%)
ระยะเวลาการย่าง	40.0	25.0	37.5%

การล้างทำความสะอาด	15.0	8.0	46.7%
รวมระยะเวลา	**60.0**	**35.5**	**40.8%**

4) การประเมินความพึงพอใจด้านการใช้งานและสุขอนามัยคณะผู้วิจัยให้ความสำคัญกับคำถามจากกลุ่มเป้าหมายที่ว่า จะล้างยังไง และ มันต้องล้างด้วย จึงใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ประเมินจากกลุ่มตัวอย่างวิสาหกิจชุมชน 15 รายในหัวข้อ ด้านกลไกความแน่นหนาของ ตัวล็อกตะแกรง บน-ล่าง ด้านความสะดวกประสิทธิภาพของระบบ สไลด์เข้า-ออก ด้านสุขอนามัย ความง่ายในการล้างทำความสะอาดตามวิธีการที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 8 กราฟผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจ

ผลการวิเคราะห์เจตคติหรือความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อเครื่องต้นแบบ ในภาพรวมพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในระดับ มากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.76) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ด้านที่มีระดับความพึงพอใจสูงที่สุดคือ ด้านความง่ายในการใช้งาน ($\overline{X}$ = 4.80) รองลงมาคือ ด้านความสะดวกในการล้างทำความสะอาด ($\overline{X}$ = 4.78) และ ด้านความมั่นคงของระบบล็อก ($\overline{X}$ = 4.70) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตอบโจทย์ผู้ใช้งานทั้งในแง่ของกายศาสตร์ (Ergonomics) และความปลอดภัยในการปฏิบัติงานอย่างดีเยี่ยม

5) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติข้อมูลเชิงปริมาณทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) โดยมีการใช้สถิติทดสอบ t-test แบบ Dependent Sample เพื่อยืนยันว่าประสิทธิภาพในการลดเวลาและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 หรือไม่ เพื่อสร้างความมั่นใจในเชิงวิชาการก่อนการนำไปเผยแพร่สู่ชุมชนอู่ทอง ด่านช้าง และสองพี่น้องต่อไป

5.4 การประเมินผล

วิเคราะห์ความพึงพอใจด้วยมาตราส่วน Likert Scale 5 ระดับ และทดสอบความแตกต่างเชิงสถิติด้วย t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ ดำเนินการโดยมุ่งเน้นการตอบโจทย์เชิงเทคนิคและข้อกังวลของผู้ใช้งานจริงจากแหล่งข้อมูล (Field Data) โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานการทดสอบกับวัตถุดิบน้ำหนัก 5.0 กิโลกรัมต่อรอบ ผลการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการทดสอบสมรรถนะเชิงเวลาและความร้อน (Thermal and Time Performance)จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีการย่างแบบเดิม (แรงงานคน) และเครื่องต้นแบบ พบว่าระบบหมุนอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้าน

เวลาได้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลจากการ จับใช้เวลาแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนในทุกประเภทวัตถุดิบ

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานเฉลี่ย (นาที) ต่อปริมาณวัตถุดิบ 5 กิโลกรัม

ประเภทวัตถุดิบ	วิธีการย่างด้วยมือ (คน)	เครื่องต้นแบบ (Prototype)	ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (%)
หมูย่าง (ขนาดมาตรฐาน)	40.0	25.0	37.5%
ไก่ย่าง	45.0	28.0	37.7%
ปลาย่าง	35.0	22.0	37.1%
ค่าเฉลี่ย	**40.0**	**25.0**	**37.5%**

ประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังการผลิต (*C*) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนน้ำหนักวัตถุดิบต่อเวลา ดังสมการ

$$C = \frac{W}{T} \times 60 \quad \text{--- (4)}$$

เมื่อ

C คือ กำลังการผลิต (กก./ชม.)

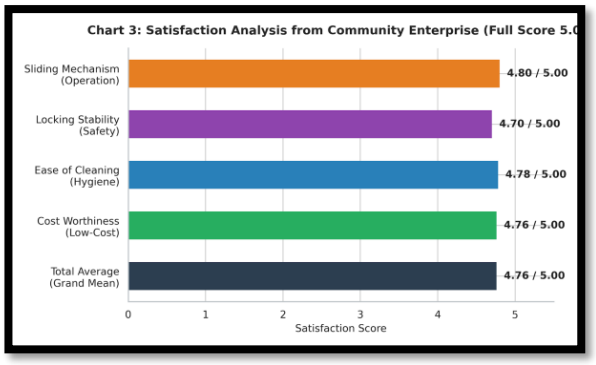
W คือ น้ำหนัก (5 กก.)

และ *T* คือ เวลาที่ใช้ (นาที)

จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 12 กก./ชม. ในขณะที่แรงงานคนทำได้เพียง 7.5 กก./ชม.

2) ผลการประเมินกลไกการล็อกและการสไลด์ (Mechanism Evaluation)ระบบการวางตะแกรงแบบ บน-ล่าง และ ตัวล็อก ที่พัฒนาขึ้นสามารถยึดตรึงวัตถุดิบได้มั่นคงร้อยละ 100 ตลอดการหมุน 360 องศา แม้จะเป็นวัตถุดิบที่มีโครงสร้างอ่อนตัว เช่น ปลา นอกจากนี้ กลไกการสไลด์ (Sliding Mechanism) ที่ช่วยให้สไลด์ตะแกรงเข้า-ออกสามารถลดระยะเวลาการติดตั้งวัตถุดิบลงเหลือเพียง 2.5 นาที ต่อรอบ

3) ผลประเมินด้านสุขอนามัยและการบำรุงรักษา (Hygiene and Maintenance)จากการที่ผู้ใช้เน้นย้ำว่า จะล้างยังไง และ มันต้องล้างด้วย ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาด พบว่าการออกแบบให้ชุดตะแกรงถอดแยกชิ้นได้ช่วยลดเวลาการล้างลงจาก 15 นาที เหลือเพียง 8 นาที (ลดลงร้อยละ 46.7)



ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบคะแนนความพึงพอใจรวม

จากภาพแผนภูมิกราฟ เมื่อทำการวิเคราะห์เกณฑ์ระดับความพึงพอใจของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่มีต่อนวัตกรรมเครื่องต้นแบบในมิติต่างๆ พบว่า ในภาพรวมผู้ใช้งานมีคะแนนเฉลี่ยรวมสะท้อนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.76 คะแนน จากคะแนนเต็ม 5.00 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ระดับ มากที่สุด เมื่อพิจารณาลงรายละเอียดเป็นรายมิติ พบว่าด้านที่มีระดับผลคะแนนสูงเป็นอันดับแรกคือ ด้านกลไกสไลด์ ($\overline{X}$ = 4.80) เนื่องจากระบบสไลด์ช่วยลดขั้นตอนและผ่อนแรงทางกายศาสตร์ในการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบเข้าและออกจากห้องย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถัดมาคือด้านความสะดวกในการล้าง (Hygiene) ($\overline{X}$ = 4.78) และ ด้านความคุ้มค่าของต้นทุน (Low-Cost) ($\overline{X}$ = 4.76) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างและราคาต้นทุนของเครื่องมีความสอดคล้องเหมาะสมกับการลงทุนในระดับฐานราก โดยมี ด้านความมั่นคงของตัวล็อก

ตะแกรง อยู่ที่ระดับคะแนน ($\overline{X}$ = 4.70) ซึ่งทุกมิติการประเมินล้วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานในระดับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

4) อภิปรายผล (Discussion) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติสามารถแก้ปัญหาหลักของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม ดังนี้

1.ด้านประสิทธิภาพ การลดเวลาการย่างได้ร้อยละ 37.5 สอดคล้องกับสมมติฐาน และช่วยลดความเสี่ยงจากการสัมผัสความร้อนของผู้ปฏิบัติงานผ่านกลไกสไลด์

2.ด้านความอเนกประสงค์ ระบบตัว ล็อกที่ปรับระดับได้รองรับ ขนาดตัวที่ใช้งานจริง ทำให้สามารถย่างหมู ไก่ และปลา ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างเครื่อง

3.ด้านสุขาภิบาล การตอบโจทย์ข้อกังวลเรื่องวิธีการล้าง ด้วยการออกแบบโมดูลาร์ (Modular Design) ช่วยยกระดับมาตรฐานความสะอาดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สมหมาย และคณะ (2562) ที่ระบุว่าเทคโนโลยีต้นทุนต่ำช่วยเพิ่มความสะอาดและมูลค่าผลผลิตได้[2], [3]

4.ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ด้วยต้นทุนการผลิตประมาณ 5,800 - 6,000 บาท ซึ่งต่ำกว่าท้องตลาดร้อยละ 65–80 ทำให้วิสาหกิจชุมชนในเขตอู่ทอง ด่านช้าง และสองพี่น้อง สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีนี้ได้อย่างยั่งยืน [2]

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยและพัฒนานวัตกรรมเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี คณะผู้วิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญและให้ข้อเสนอแนะเพื่อการต่อยอดเชิงพาณิชย์และเชิงวิชาการได้ดังนี้

1)ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อยอด (Technical Recommendations)

1.การปรับปรุงวัสดุและระบบทำความสะอาด ควรมีการพัฒนาชุดตะแกรงโดยใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงขึ้น และเพิ่มระบบแปรงขัดอัตโนมัติหรือระบบพ่นน้ำแรงดันสูงเพื่อลดภาระของผู้ใช้ในการทำความสะอาดตามข้อเสนอแนะในคลิปวิดีโอ

2.การศึกษาแหล่งพลังงานทางเลือก ในอนาคตควรมีการวิจัยเชิงเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไฟฟ้าและก๊าซหุงต้ม (LPG) หรือพลังงานชีวมวล เพื่อเพิ่มทางเลือกในการลดต้นทุนเชื้อเพลิงให้กับชุมชนที่มีบริบทต่างกัน

3.ระบบควบคุมอัจฉริยะ สามารถติดตั้งระบบ Sensor ตรวจสอบอุณหภูมิภายในเนื้อสัตว์ที่เชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน เพื่อความแม่นยำสูงสุดในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม (SME 4.0)

2) ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการส่งเสริม (Policy Recommendations)

1.การถ่ายทอดเทคโนโลยี ควรจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) ร่วมกับวิทยาลัยเทคนิคในพื้นที่อู่ทอง ด่านช้าง และสองพี่น้อง เพื่อให้ความรู้ด้านการบำรุงรักษาและการใช้งานเครื่องอย่างถูกวิธีแก่สมาชิกวิสาหกิจชุมชน

2.การสนับสนุนเงินทุน หน่วยงานท้องถิ่นควรมีบทบาทในการสนับสนุนงบประมาณการจัดซื้อเครื่องจักรต้นทุนต่ำนี้ผ่านกองทุนหมู่บ้านหรือ

โครงการพัฒนาวิสาหกิจชุมชน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์อาหารไทย

8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการพัฒนาและหาประสิทธิภาพของเครื่องย่างอเนกประสงค์ระบบหมุนอัตโนมัติเพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารชุมชน ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อคณาจารย์แผนกช่างกลโรงงาน ผู้รับผิดชอบหลักในสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต ทุกท่าน ได้แก่ นายมานพ เสาะแสวง, นายอนุรักษ์ ไทยสนธิ, นายอุดม เผ่าพงษ์จันทร์, นายธนาการ ประภาสัจจะเวทย์, นายกฤษณ์ ธันยภัคสกุล, นางสาวอัญชลี ศรีทองใบ, นายชวลิต เถาเครือมาต, นายศรายุธ คำไทย และนายนพดล มาลา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาเชิงเทคนิค ถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านการออกแบบกลไก และสนับสนุนการผลิตเครื่องต้นแบบอย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร ครู เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทางการศึกษาทุกท่าน ตลอดจนนักเรียน นักศึกษา ของวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี ที่คอยให้การสนับสนุน มอบโอกาส และอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่นและบรรลุตามวัตถุประสงค์

9. เอกสารอ้างอิง

[1] กอบชัย เดชเกรียงไกรกุล, *เทคโนโลยีการจัดการเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมอาหารชุมชน*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์, 2562.

[2] สมหมาย จันทรมาลา และคณะ, “การพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปอาหารต้นทุนต่ำเพื่อยกระดับผลผลิตเกษตรกรรายย่อย,” *วารสารเทคโนโลยีเกษตร*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 45-52, 2562.

[3] วิชัย กุลวิจิตร, “การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร: นวัตกรรมและมาตรฐานความสะอาดสำหรับวิสาหกิจชุมชน,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 22-30, 2560.

[4] ชัยวัฒน์ วงศ์ศรี, *การออกแบบระบบส่งกำลังและกลไกขับเคลื่อนในงานวิศวกรรมเกษตร*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2565.

[5] สุวิทย์ พรมแดน, “แนวทางการออกแบบเครื่องจักรกลตามหลักการสุขาภิบาลอาหาร (Hygienic Design) สำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก,” *วารสารวิศวกรรมแปรรูปอาหาร*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 112-125, 2566.

[6] J. R. Smith, *Advanced Automation in Small-Scale Food Processing: Efficiency and Design*, London: Academic Press, 2024.

[7] A. Brown and K. Lee, “Optimization of Sliding Mechanisms in Food Machinery,” *International Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 20, no. 3, pp. 301-315, 2025.

การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองด้วยการสเปรย์น้ำ

Study on the Effect of Water Flow Rate on Particulate Matter Removal Efficiency using Water Spraying

ภากร กล่ำพิมาย[1], รพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ[2] , เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[3] และ ปฏิวัติ วรามิตร[4*]

[1]โปรแกรมวิชาช่างจักรกลหนัก คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

[3]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

[4]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองจังหวัดนครราชสีมา

*ผู้ติดต่อ: pathiwat.wa@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ของระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานระหว่างไซโคลนและสเปรย์น้ำ (HybridแSystem) สำหรับควบคุมฝุ่นจากกระบวนการเผาไหม้ชีวมวล โดยใช้หัวฉีดแบบแผ่เป็นหัวฉีดมาตรฐาน การทดลองดำเนินการภายใต้ความเร็วลมคงที่ 15 m/s และกำหนดอัตราการไหลของน้ำ 4 ระดับ ได้แก่ 5, 6.5, 6.8 และ 7.15 L/min ประเมินสมรรถนะของระบบจากค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองก่อนและหลังผ่านระบบ พร้อมวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น อัตราการลดความเข้มข้นของฝุ่น (CRR) และการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEC) ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของน้ำ 6.5 L/min ให้สมรรถนะดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด PM2.5 และ PM10 เท่ากับ 52.43% และ 64.62% ตามลำดับ ขณะที่ค่า CRR ของ PM2.5 และ PM10 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4,845.75 และ 9,507.45 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า SEC ต่ำที่สุดเท่ากับ 142.21 Wh/kg นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำสูงเกินระดับที่เหมาะสมไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น แต่กลับส่งผลให้ประสิทธิภาพและค่า CRR ลดลง ขณะที่การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสาน และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นควบคู่กับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การดักจับแบบเปียก, ฝุ่นละออง PM2.5, ฝุ่นละออง PM10, ไซโคลน, การเผาไหม้ขยะชีวมวล

Abstract

This study investigated the effect of water flow rate on the removal efficiency of PM2.5 and PM10 using a hybrid dust collection system consisting of a cyclone separator and a water spray chamber for controlling particulate emissions from biomass combustion. A flat-fan nozzle was selected as the standard nozzle. Experiments were conducted at a constant airflow velocity of 15 m/s, while four water flow rates (5.0, 6.5, 6.8, and 7.15 L/min) were evaluated. System performance was assessed by measuring

particulate concentrations before and after treatment. Dust removal efficiency, concentration reduction rate (CRR), and specific energy consumption (SEC) were analyzed under identical operating conditions.

The results showed that a water flow rate of 6.5 L/min provided the optimum operating condition, achieving PM2.5 and PM10 removal efficiencies of 52.43% and 64.62%, respectively. The highest CRR values for PM2.5 and PM10 were 4,845.75 and 9,507.45 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$, respectively, while the lowest SEC was 142.22 Wh/kg of biomass. Increasing the water flow rate beyond the optimum level reduced both removal efficiency and CRR, whereas energy consumption increased. These findings indicate that water flow rate is a key parameter affecting the performance of the hybrid dust collection system. Appropriate flow rate selection can improve particulate removal while maintaining efficient energy utilization.

Keywords: Wet scrubbing, PM2.5, PM10, Cyclone separator, Biomass combustion

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศโดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) และ 10 ไมครอน (PM10) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน [1] โดยแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญ ได้แก่ การเผาไหม้ชีวมวล กระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง และกิจกรรมก่อสร้างต่าง ๆ [2] ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับควบคุมและลดการปลดปล่อยฝุ่นละอองจึงเป็นแนวทางสำคัญ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ ได้มีกลุ่มผู้วิจัยทำการการศึกษาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีควบคุมฝุ่นละอองหลายรูปแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก Wansom และคณะ [3] พบว่าระบบ Wet Scrubber สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีการควบคุมขนาดละอองน้ำและอัตราส่วนน้ำต่ออากาศอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ Zhang และคณะ [4] พบว่าการพ่นละอองน้ำร่วมกับการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเพิ่มการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเพิ่มสูงขึ้น และจากการศึกษาเบื้องต้นของคณะผู้วิจัยที่เปรียบเทียบรูปแบบการพ่นของหัวฉีดสเปรย์น้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่ หัวฉีดพ่นหมอก หัวฉีดพ่นละอองน้ำ และหัวฉีดพ่นแบบแผ่ พบว่าหัวฉีดแบบแผ่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นสูงที่สุด จึงมีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานระหว่างไซโคลนและสเปรย์น้ำ [5]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Wet Scrubber การพ่นละอองน้ำ และรูปแบบหัวฉีดในการกำจัดฝุ่นละอองแล้ว แต่ยังขาดการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อสมรรถนะของระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานระหว่างไซโคลนและสเปรย์น้ำภายใต้สภาวะการเผาไหม้ชีวมวล นอกจากนี้ ยังมีการรายงานผลที่เชื่อมโยงประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นกับอัตราการลดความเข้มข้นของฝุ่น (CRR) และการใช้พลังงานจำเพาะ

(SEC) ค่อนข้างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัด PM2.5 และ PM10 รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น ค่า CRR และค่า SEC เพื่อกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสาน โดยใช้หัวฉีดแบบแผ่เป็นหัวฉีดมาตรฐานในการทดลอง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการทดลอง

2.1 ฝุ่นละอองขนาดเล็กและมาตรฐานคุณภาพอากาศ

ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter: PM) เป็นอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและสุขภาพของประชาชนโดยตรง เมื่อมีการสูดดมเข้าสู่ร่างกาย อนุภาคขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 สามารถแทรกซึมเข้าสู่หลอดลมส่วนลึกและถุงลมปอดได้ บางส่วนอาจผ่านเข้าสู่กระแสเลือด ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อโรคระบบทางเดินหายใจและโรคหัวใจและหลอดเลือด [6] ด้วยเหตุนี้กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทย ได้กำหนดค่ามาตรฐาน PM2.5 เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพอากาศ [2]

2.2 หลักการดักจับฝุ่นละออง

การกำจัดฝุ่นละอองออกจากกระแสอากาศสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายกลไกทางกายภาพ ซึ่งแต่ละกลไกจะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค สภาพการไหลของอากาศ และลักษณะของตัวกลางดักจับ [7]

2.2.1 กลไกกระแทกเฉื่อย

กลไกนี้สามารถเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคฝุ่นที่มีมวลและโมเมนตัมเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ทันตามแนวการไหลที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ฝุ่นพุ่งเข้าชนกับหยดน้ำหรือพื้นผิวของตัวกลางดักจับโดยตรง กลไกนี้มีบทบาทสำคัญในการกำจัดอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ [8]

2.2.2 กลไกการแพร่กระจายแบบบราวเนียน

การเคลื่อนที่จะได้รับอิทธิพลจากการชนกับโมเลกุลของอากาศอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มในทุกทิศทางหรือที่เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ช่วยเพิ่มโอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสกับหยดน้ำหรือพื้นผิวดักจับ ส่งผลให้สามารถกำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [9]

2.2.3 กลไกการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

จะเกิดขึ้นเมื่อกระแสอากาศเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในอุปกรณ์ เช่น ไซโคลน อนุภาคฝุ่นที่มีมวลมากกว่าจะได้รับแรงเหวี่ยงมากกว่าอากาศ ส่งผลให้เคลื่อนที่ออกสู่ผนังของอุปกรณ์ก่อนตกลงสู่ส่วนเก็บฝุ่น กลไกดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีในการกำจัดอนุภาคขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม [10]

2.2.4 กลไกการสกัดกั้น

จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นกระแสอากาศและผ่านเข้าใกล้พื้นผิวของตัวกลางดักจับในระยะที่เพียงพอให้เกิดการสัมผัส แม้อนุภาคจะยังคงเคลื่อนที่ตามแนวการไหลก็ตาม เมื่อเกิดการสัมผัส อนุภาคจะถูกยึดเกาะและถูกแยกออกจาก

กระแสอากาศ กลไกนี้มีความสำคัญต่อการกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีแรงเฉื่อยต่ำ [11]

2.2.5 กลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงดึงดูดของโลกในการแยกอนุภาคออกจากกระแสอากาศ เมื่ออนุภาคมีมวลมากพอ แรงโน้มถ่วงจะมีอิทธิพลเหนือแรงต้านจากการไหลของอากาศ กลไกนี้เหมาะสำหรับการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่และมักถูกประยุกต์ใช้ในระบบห้องพักฝุ่นของโรงงานอุตสาหกรรม [12]

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นขึ้นอยู่กับทั้งขนาดของอนุภาคและลักษณะการไหลของอากาศ ดังนั้น การทำงานร่วมกันของหลายกลไก เพื่อเพิ่มโอกาสในการกำจัดอนุภาคในช่วงขนาดที่แตกต่างกัน และช่วยลดปริมาณฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 อัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง (Concentration Reduction Rate: CRR)

เป็นค่าที่ใช้ประเมินระบบกำจัดฝุ่นในการลดความเข้มข้นของฝุ่นละอองภายในช่วงเวลา ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน จะช่วยให้สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการลดความเข้มข้นของได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยค่าดังกล่าวแสดงถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นฝุ่นต่อหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$CRR = \frac{(C_{in} - C_{out})}{t} \qquad (1)$$

เมื่อ

CRR คือ อัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง, $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$

C_{in} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดฝุ่น, $\mu g/m^3$

C_{out} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่น, $\mu g/m^3$

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ, h

ทั้งนี้ ค่าอัตราการลดความเข้มข้นของฝุ่นละอองไม่ได้ใช้ทดแทนค่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง แต่ใช้เป็นตัวแปรเสริมในการวิเคราะห์ผล เพื่อแสดงข้อมูลในอีกมิติหนึ่งของการทำงานของระบบดักจับฝุ่นละออง

2.4 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น

ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวพ่นน้ำแต่ละชนิด เพื่อประเมินว่าหัวพ่นแต่ละรูปแบบมีความสามารถในการลดฝุ่นละอองได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีมาตรการควบคุม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$\eta_{DC} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ

η_{DC} คือ ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น, %

C_{in} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดฝุ่น, $\mu g/m^3$

C_{out} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองหลังผ่านระบบสเปรย์น้ำ, $\mu g/m^3$

2.5 การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC)

เพื่อประเมินความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานจริงและเปรียบเทียบความเหมาะสมของแต่ละสภาวะการทำงานได้ โดยกำหนดดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อมวลชีวมวลที่เผา ซึ่งแสดงถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้ในการควบคุมมลพิษต่อชีวมวล 1 กิโลกรัม

สามารถนำไปใช้ประเมินต้นทุนด้านพลังงานของระบบควบคุมมลพิษ ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$SEC = \frac{E}{m_b} \quad (3)$$

เมื่อ

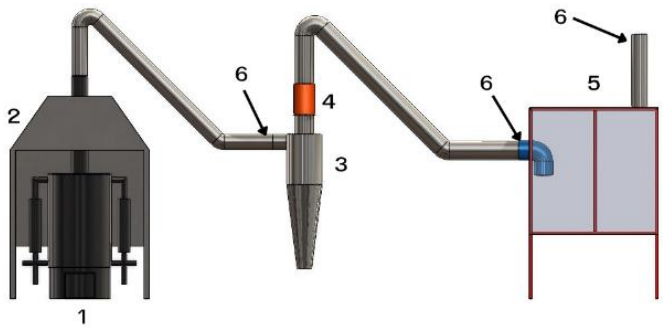
SEC คือ การใช้พลังงานจำเพาะของระบบ, Wh/kg

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ, Wh

m_b คือ มวลชีวมวลที่เผา, kg

2.6 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองในแต่ละระดับอัตราการไหลของน้ำดำเนินการซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยระบบตรวจวัดฝุ่นละออง PMS5003 ทำการบันทึกค่าความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 ทุก ๆ 30 วินาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง ข้อมูลที่ได้จากแต่ละการทดลองถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นผลการทดลองและประเมินความสม่ำเสมอของข้อมูลในแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งพัฒนาต่อยอดมาจากงานวิจัยก่อนหน้า โดยมีการปรับปรุงระบบการสเปรย์น้ำเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

2.6.1 เตาเผาชีวมวลขนาด 200 ลิตร

ใช้เป็นแหล่งกำเนิดควันและฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลภายใต้สภาวะควบคุม

2.6.2 ปล่องรวมควัน

ทำหน้าที่ลำเลียงก๊าซและฝุ่นละอองจากเตาเผาเข้าสู่ระบบดักจับฝุ่น

2.6.3 ไซโคลน

ทำหน้าที่แยกอนุภาคฝุ่นขั้นต้นเพื่อลดอุณหภูมิและภาระการทำงานของห้องพ่นสเปรย์น้ำ

2.6.4 โบลเวอร์

ทำหน้าที่สร้างและควบคุมการไหลของอากาศภายในระบบทดลอง

2.6.5 ห้องพ่นสเปรย์น้ำ

เป็นส่วนกำจัดฝุ่นละอองขั้นที่สอง โดยอาศัยการสัมผัสระหว่างละอองน้ำและอนุภาคฝุ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ

2.6.6 ระบบตรวจวัดฝุ่นละออง

ใช้เซนเซอร์ PMS5003 จำนวน 3 ตำแหน่ง เพื่อวัดความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10

2.6.7 ระบบควบคุมอัตราการไหลและห้องเสปรย์น้ำ

ระบบจ่ายน้ำประกอบด้วยปั๊มน้ำ ถังพักน้ำ และสวิตช์หรี่ไฟระบบไฟฟ้า (Dimmer Switch) โดยปรับอัตราการไหลของน้ำ 4 ระดับ และใช้หัวฉีดแบบแผ่ เนื่องจากจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัด PM10 ได้สูงกว่าหัวฉีดรูปแบบอื่น [5] ดังรูปที่ 2 เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำ การใช้กระแสไฟฟ้า และกำหนดนิยามของอัตราการไหล ในการศึกษานี้ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 หัวฉีดแบบแผ่

ตารางที่ 1 อัตราการไหลของน้ำและกระแสไฟฟ้าที่ระบบใช้ในการทดลอง

ระดับการทดลอง	อัตราการไหล (L/min)	กระแสไฟฟ้า (A)
Q1	5	2.663
Q2	6.5	2.743
Q3	6.8	2.823
Q4	7.15	2.953

3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า เมื่อปรับอัตราการไหลในระดับ Q1 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 5 L/min หัวพ่นไม่สามารถสร้างละอองฝอยได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้น้ำไหลออกในลักษณะเป็นสายและหยดน้ำขนาดใหญ่แทนการกระจายตัวเป็นละอองฝอย ซึ่งลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างละอองน้ำกับอนุภาคฝุ่นและส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นละออง

ดังนั้น การทดลองจึงกำหนดช่วงอัตราการไหลของน้ำให้อยู่ในระดับที่หัวพ่นสามารถสร้างละอองน้ำได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ เพื่อให้ผลการทดลองสะท้อนสมรรถนะของระบบดักจับฝุ่นภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม

3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10

เป็นค่าแสดงผลในตารางเป็นผลต่างระหว่างความเข้มข้นฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ก่อนเข้าและหลังผ่านระบบ โดยค่าที่สูงจะแสดงถึงความสามารถของระบบในการกำจัดฝุ่นละอองได้มากขึ้น ดังสมการที่ (4)

$$\Delta PM = C_{in} - C_{out} \qquad (4)$$

เมื่อ

ΔPM คือ ค่าความเข้มข้นของฝุ่นที่ระบบสามารถกำจัดได้, $\mu g/m^3$

C_{in} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดฝุ่น, $\mu g/m^3$

C_{out} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองหลังผ่านระบบสเปรย์น้ำ, $\mu g/m^3$

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำ 6.5 L/m นั้นสามารถลดความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 ได้สูงที่สุด ขณะที่ค่าความเข้มข้นก่อนเข้าสู่ระบบมีค่าใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง สะท้อนให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่มีส่วนในการช่วยเพิ่มโอกาสการสัมผัสระหว่างละอองน้ำและอนุภาคฝุ่น

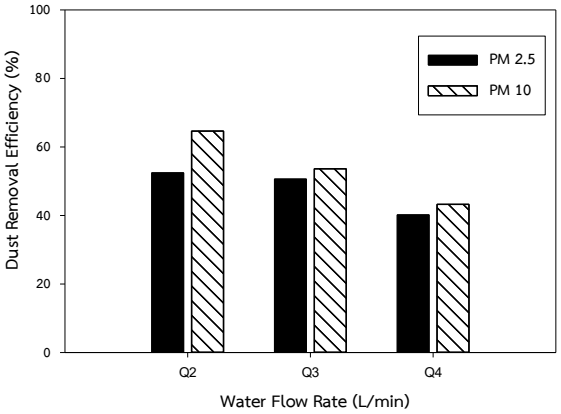
ตารางที่ 2 ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการลดความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10

ระดับอัตราการไหล (L/min)	ΔPM2.5 ($\mu g/m^3$)	ΔPM10 ($\mu g/m^3$)
6.5	1,615.25	3,169.56
6.8	1,560.45	2,899.56
7.15	1,396.05	2,089.29

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง

จากรูปที่ 3 ผลการทดลองแสดงให้เห็นอัตราการไหลน้ำระดับ Q2 นั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัด

PM2.5 และ PM10 สูงที่สุด 52.43% และ 64.62% ตามลำดับ ขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลน้ำเป็น Q3 และ Q4 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นทั้งสองขนาดมีแนวโน้มลดลง

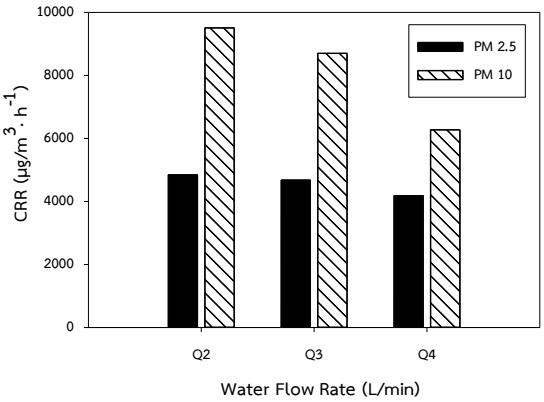


รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10

ผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการไหลน้ำไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเพียงอย่างเดียว

3.3 อัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง (Concentration Reduction Rate; CRR)

จากรูปที่ 4 พบว่า อัตราการไหลน้ำมีผลต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง โดยเมื่ออัตราการไหลน้ำเพิ่มขึ้นจาก Q2 ไปเป็น Q3 และ Q4 ค่า CRR ของทั้ง PM2.5 และ PM10 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับฝุ่น PM2.5 ค่า CRR ลดลงจาก 4,845.75 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ที่ Q2 เหลือ 4,681.35 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ที่ Q3 และ 4,188.15 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ที่ Q4 ตามลำดับ ขณะที่ค่า CRR ของ PM10 ลดลงจาก 9,507.45 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ที่ Q2 เหลือ 4188.15 $\mu g/m^3 \cdot h^{-1}$ ที่ Q4 แสดงให้เห็นว่าความสามารถของระบบในการลดความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในหน่วยเวลาลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลน้ำเกินกว่าระดับที่เหมาะสม



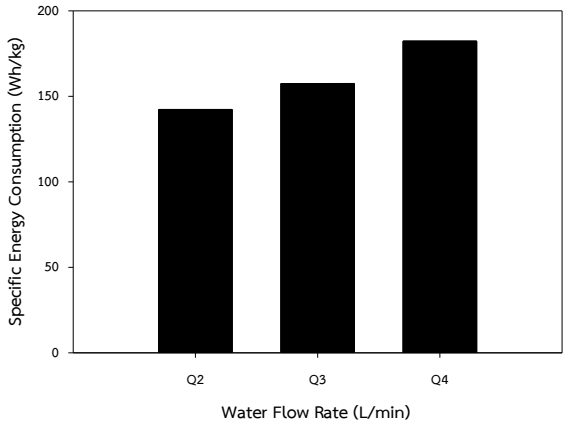
รูปที่ 4 อัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง ของ PM 2.5 และ PM10

ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่พบว่า Q2 นั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดทั้งสำหรับ PM2.5 และ PM10 สาเหตุที่เป็นไปได้คือ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลระหว่างอนุภาคฝุ่นและละอองน้ำลดลง ส่งผลให้ค่า CRR มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลน้ำที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่า CRR ของ PM10 สูงกว่า PM2.5 ในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจาก PM10 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าและมีค่าแรงเฉื่อยสูงกว่า จึงสามารถถูกดักจับผ่านกลไก Inertial Impaction และ Interception ได้ง่ายกว่า ขณะที่ PM2.5 มีขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศได้ดี จึงมีโอกาสหลีกเลี่ยงการชนกับละอองน้ำมากกว่า ส่งผลให้มีค่า CRR ต่ำกว่า PM10

3.4 การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC)

จากรูปที่ 5 พบว่าค่าการใช้พลังงานจำเพาะ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลน้ำ Q2, Q3 และ

Q4 ให้ค่า SEC 142.21 , 157.31 และ 182.21 Wh/kg ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะตามระดับอัตราการไหล

แสดงให้เห็นว่าระบบต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นต่อการเผาชีวมวล 1 กิโลกรัมเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลน้ำเข้าสู่ระบบ พบว่าจากการที่เพิ่มอัตราการไหลน้ำส่งผลให้ปั๊มน้ำต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้โดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า SEC สูงขึ้นตามอัตราการไหลน้ำที่เพิ่มขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ของระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานระหว่างไซโคลนและสเปรย์น้ำ โดยใช้หัวฉีดแบบแผ่ และอัตราการไหลน้ำ 4 ระดับ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 อัตราการไหลของน้ำต่อการกำจัดฝุ่น PM2.5 และ PM10

อัตราการไหลของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของระบบอย่างชัดเจน โดยอัตราการไหลของน้ำ 6.5 L/min (ระดับQ2) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 52.43 สำหรับ PM2.5 และร้อยละ 64.62 สำหรับ PM10 ขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลน้ำเป็น 6.8 และ 7.15 L/min ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นลดลง

4.2 อัตราการไหลของน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและค่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง

ค่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นฝุ่นละออง มีแนวโน้มสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น โดย Q2 ให้ค่า CRR สูงที่สุดทั้งสำหรับ PM2.5 และ PM10 ขณะที่ PM10 มีค่า CRR สูงกว่า PM2.5 ในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ถูกดักจับได้ง่ายกว่าผ่านกลไกการกระแทกเฉื่อยและการสกัดกั้น

4.3 อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมต่อการใช้พลังงาน

การใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลน้ำ โดย Q2 ให้ค่า SEC ต่ำที่สุดเท่ากับ 142.21 Wh/kg ในขณะที่ Q4 ให้ค่า SEC สูงที่สุด 182.21 Wh/kg ซึ่งมีค่าต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 22 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลน้ำส่งผลให้ระบบใช้พลังงานมากขึ้นโดยไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำระดับ Q2 มีค่า 6.5 L/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานที่ศึกษา เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นและ CRR ทั้ง PM2.5 และ PM10 สูงที่สุด และมีการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด จึงเป็นจุดทำงานที่เหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและปรับปรุงระบบดักจับฝุ่นแบบผสมผสานสำหรับการควบคุมมลพิษทางอากาศจาก

การเผาไหม้ชีวมวล เพื่อให้สามารถกำจัดฝุ่นละอองได้อย่างมีประสิทธิภาพควบคู่กับการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้สนับสนุนในการทดลองจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Health Effects Institute. (2024). State of Global Air 2024. Boston, MA: Health Effects Institute.

[2] ราชกิจจานุเบกษา. (2565). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนในบรรยากาศโดยทั่วไป. เล่ม 139, ตอนพิเศษ 163 ง, 8 กรกฎาคม 2565, หน้า 21–22.

[3] Wansom, A., Maneechot, P., Jiteurtragool, N., & Vitidsant, T. (2023). PM2.5 collection enhancement in a smart hybrid wet scrubber tower. Processes, 11(12), 3306.

[4] Zhang, X., Li, Y., Wang, H., & Chen, J. (2023). Spraying coupled with turbulence mechanisms enhanced the removal of fine particles in wet flue gas. Powder Technology, 426, 118634.

[5] ภากร กล่ำพิมาย, รพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์ และ ปฏิวัติ วรามิตร. (2569). การศึกษาแนวทางการลดฝุ่นละอองขนาดเล็กจากการเผาขยะชีวมวล. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 40 (MENETT 40), จังหวัดนครปฐม, ประเทศไทย.

[6] จินตนา ประชุมพันธ์. (2561). PM2.5 ฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศกับวิกฤตสุขภาพที่คนไทยจะต้องแลก. [ระบบออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 21 พฤศจิกายน 2568.

[7] Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2011). Air Pollution Control Engineering (2 nd ed.). Waveland Press.

[8] Hinds, W. C. (1999). Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles (2 nd ed.). John Wiley & Sons.

[9] Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). Perry's Chemical Engineers' Handbook (8 th ed.). McGraw-Hill.

[10] Lee, K. W., & Liu, B. Y. H. (1980). On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. Journal of the Air Pollution Control Association, 30(4), 377–381.

[11] Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2008). Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation. Springer.

[12] Vallero, D. A. (2014). Fundamentals of Air Pollution (5th ed.). Academic Press.

เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพา

A Portable Leucaena Leucocephala Uprooting Device

ศิวกร ศรีธัญญากร[1], พรสวรรค์ ทองใบ[1], ธีระ ฮวบขุนทด[1],สุรเดช สินจะโป๊ะ[1],
สุพัตรา สิงห์นิสัย[2], ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา[3] และ ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์[1,*]

[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[2]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[3]สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: taveesin.le@rmuti.ac.th, 0800274156

บทคัดย่อ

ในพื้นที่บริเวณรอบที่พักอาศัยหรือพื้นดินรอบอาคารมักมีวัชพืชและต้นไม้ขนาดเล็กขึ้นหนาแน่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นกระถินบ้านซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้ก็จะมีลำต้นที่โตขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ประสบปัญหาในการกำจัดให้หมดไปได้ยาก และในการกำจัดหากถอนไม่ถึงรากก็จะเกิดการงอกซ้ำได้ ซึ่งเครื่องมือแบบดั้งเดิม เช่น จอบ เสียม หรือเครื่องถอนรากแบบทั่วไปมักมีข้อจำกัดด้านการใช้กับต้นกระถินบ้าน ผู้จัดทำจึงได้พัฒนาเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพาที่อาศัยหลักการโมเมนต์ของแรงเพื่อช่วยทุ่นแรงในการถอน ในการทดลองได้กำหนดตัวแปรต้นคือระยะดึงด้ามจับที่ 8,00, 1,000 และ 1,200 มิลลิเมตร และแรงดึงด้ามจับที่ 50, 100, 150 และ 200 นิวตัน ส่วนตัวแปรตามคือแรงถอน ผลการทดลองพบว่า ต้นกระถินบ้านที่มีขนาดลำต้น 25 มิลลิเมตร ต้องใช้แรงถอนสูงสุด 425 นิวตัน ในขณะที่เครื่องช่วยถอนวัชพืชแบบพกพาที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างแรงถอนได้สูงสุดถึง 1,465 นิวตัน ที่ระยะดึงด้าม 1,000 มิลลิเมตรโดยใช้แรงดึง 200 นิวตัน ทั้งนี้สรุปได้ว่าเครื่องถอนต้นกระถินนี้สามารถใช้งานได้จริงในการถอนต้นกระถินบ้านออกจากดิน และยังพบว่าเครื่องสามารถช่วยผ่อนแรงที่ผู้ใช้ต้องใช้ในการถอนต้นกระถินบ้านได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: เครื่องช่วยถอนวัชพืชแบบพกพา, กระถินบ้าน, แรงถอน

Abstract

Areas surrounding residential dwellings or building perimeters are often densely overgrown with weeds and small trees, particularly Leucaena leucocephala. If left unmanaged, this species grows rapidly, making complete removal difficult; furthermore, if the roots are not fully extracted, regrowth readily occurs. Conventional tools such as hoes, spades, or standard root-pulling devices present limitations when applied to the removal of L. leucocephala. This study therefore developed a portable Leucaena-uprooting device based on the principle of moment of force to reduce the physical effort required for extraction. The experiment employed lever arm lengths of 800, 1,000, and 1,200 mm and applied handle forces of 50, 100, 150, and 200 N as independent variables, with pulling force as the dependent variable. Results showed that L. leucocephala with a stem diameter of 25 mm required a maximum extraction force of 425 N, whereas the developed portable device was capable of generating a maximum pulling force of 1,485 N at a lever arm length of 1,000 mm and an applied force of 200 N. These findings indicate that the developed device is practically effective for uprooting L. leucocephala from soil and clearly demonstrates its ability to substantially reduce the physical effort required of the user during the extraction process.

Keywords: portable weed-pulling assist device, Leucaena leucocephala, extraction force.

1. บทนำ

ในบริเวณพื้นที่รอบที่พักอาศัยหรือพื้นดินรอบอาคารมักมีวัชพืชและต้นไม้ขนาดเล็กขึ้นหนาแน่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นกระถินบ้าน (Leucaena leucocephala) ซึ่งเป็นวัชพืชต่างถิ่นรุกรานที่มีระบบรากแก้วหยั่งลึกและแข็งแรง แพร่พันธุ์ง่าย [1] ซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้ก็จะมีลำต้นที่โตขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ประสบปัญหาในการกำจัดให้หมดไปได้ยาก และในการกำจัดหากถอนไม่ถึงรากก็จะเกิดการงอกซ้ำได้ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้กำจัดแบบดั้งเดิม เช่น จอบ เสียม หรือเครื่องถอนรากแบบต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด และต้นแบบในการวิจัย [4-14] ยังเป็นเครื่องมือที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อถอนต้นกระถินบ้านโดยเฉพาะทำให้มีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ด้านขนาดที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไป รูปทรงที่เป็นแบบตายตัวไม่สามารถปรับตามขนาดของลำต้นได้ทำให้การจับยึดเพื่อถอนที่ยังไม่สะดวก ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดพัฒนาเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพาที่มีขนาดและรูปทรงที่ใช้งานสะดวก รวมถึงมีกลไกช่วยการจับยึดลำต้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานและประยุกต์หลักโมเมนต์เพื่อช่วยผ่อนแรงในการถอนต้นกระถินบ้านด้วยและการวิจัยจะทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงในการถอนรากพืช

แรงในการถอนต้นไม้ออกจากดินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของดิน ความแน่นและความชื้นในดิน รวมถึงลักษณะของรากพืช ดินเหนียวมีแรงยึดเกาะสูงเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและเกาะตัวกันแน่น ดินที่มีความแน่นหรือถูกกดอัดมากจะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น และพืชที่มีรากแก้วหยั่งลึกอย่างกระถินบ้านจะถอนยากกว่าพืชที่มีระบบรากตื้น [2]

2.2 หลักการโมเมนต์ของแรง

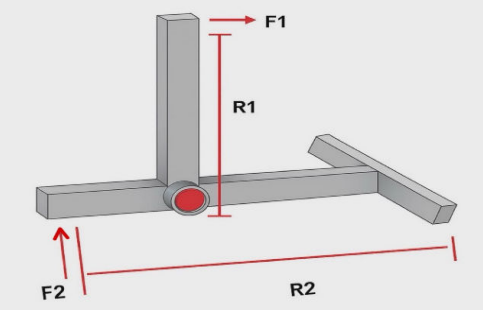
โมเมนต์ของแรง (M) คือผลคูณระหว่างขนาดของแรง (F) กับระยะตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง (d) ดังสมการที่ (1)

$$M = F \times d \quad (1)$$

ในระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุล ผลรวมของโมเมนต์ทั้งหมดรอบจุดหมุนต้องเท่ากับศูนย์ ดังสมการ (2) สำหรับสมดุลของโมเมนต์ระหว่างสองแรง [3]

$$F_1 \times R_1 = F_2 \times R_2 \quad (2)$$

โดย F_1 คือแรงที่ผู้ใช้ออก (N), R_1 คือระยะจากจุดหมุนถึงจุดออกแรง (m), F_2 คือแรงถอน (N) และ R_2 คือระยะจากจุดหมุนถึงจุดยึดต้นไม้ (m)



รูปที่ 1 รูปประกอบการคำนวณ

3. วิธีดำเนินการ

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่อง

เครื่องช่วยถอนวัชพืชแบบพกพาออกแบบโดยอาศัยหลักโมเมนต์ของแรง ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 5 ส่วน ได้แก่ (1) ด้ามจับ: ท่อเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm ยาว 1,300 mm (2) ตัวเครื่อง: ทำจากเหล็กกล่อง 35×35 mm เชื่อมเป็นโครงสร้างหลักยาวรวม 185 mm (3) แกนสไลด์: ยาว 140 mm สำหรับปรับตำแหน่งการหนีบ (4) น็อตและสกรูยึดขนาด M 14 และ (5) เหล็กรู ยาว 100 mm หนา 5 mm ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2

หลักการทำงานของเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านเมื่อผู้ใช้ดันด้ามจับไปด้านหน้าจะทำให้แกนสไลด์เปิดออกทำให้ชุดจับยึดลำต้นจะขยายและเมื่อผู้ใช้ดึงด้ามจับไปด้านหลังแกนสไลด์บีบลงทำให้ชุดจับยึดลำต้นบีบลำต้นของต้นกระถินบ้านและเมื่อผู้ใช้ออกแรงเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดโมเมนต์รอบจุดหมุน และจะเกิดการทดแรงตามหลักโมเมนต์ ซึ่งการการคำนวณแรงที่ใช้ในการถอนต้นกระถินบ้านจะกำหนดแรงถอนที่ต้องการ F_2 = 500 N (เผื่อจากค่าการทดลองแรงถอน

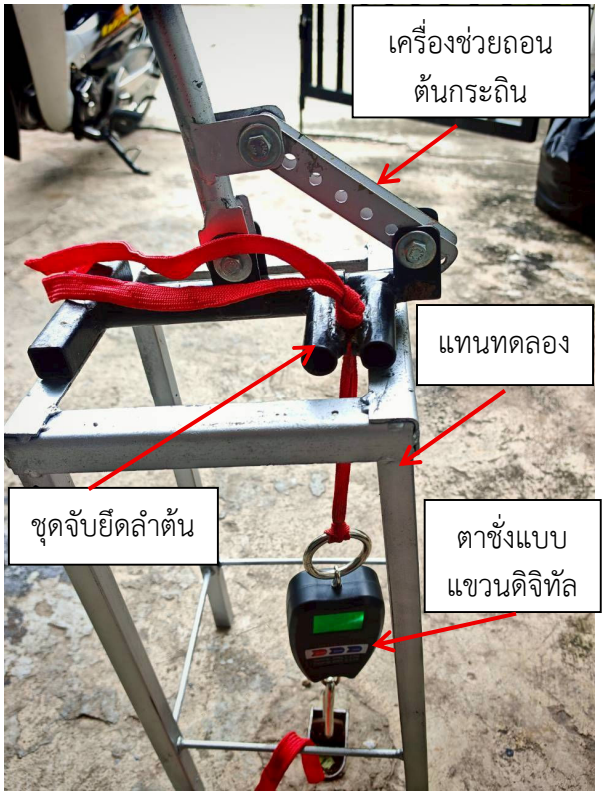
จริงสูงสุดที่ 425 N) กำหนดให้ R_2 = 185 mm และ R_1 = 800 mm ซึ่งกำหนดมาจากลักษณะทางกายภาพของความสูงของร่างกายเพื่อไม่ให้เกิดการก้มหรือหงายขณะทำงาน ดังนั้นแล้วจะได้ F_1 = (500 × 185) / 800 = 115.63 N ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้ต้องออกแรงเพียง 115.63 N ก็สามารถถอนต้นกระถินบ้านที่ต้องการแรงถอน 500 N ได้



รูปที่ 2 เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพา

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองถอนต้นกระถินจริงจะใช้ต้นกระถินบ้านที่ขึ้นอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ซึ่งดินบริเวณดังกล่าวจะเป็นดินลักษณะร่วนปนทราย โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้



รูปที่ 3 ชุดทดลองหาแรงถอนเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้าน

การทดลองที่ 1 หาค่าแรงถอนจริงของต้นกระถินบ้าน: วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นกระถินบ้าน ติดตั้งอุปกรณ์จับยึด และใช้ตาชั่งแขวนดิจิทัล crane scale -200 kg ดึงในแนวดิ่งและบันทึกแรงสูงสุดก่อนต้นกระถินจะหลุด

การทดลองที่ 2 ทดลองแรงถอนจากเครื่อง: ติดตั้งเครื่องบนแท่นทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งมีการกำหนดระยะดึงด้ามจับที่ 800, 1000 และ 1200 mm ใช้แรงดึงที่ 50, 100, 150 และ 200 N ซึ่งจะมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อการทดลองและบันทึกค่าแรงถอนเฉลี่ย

การทดลองที่ 3 ทดลองการใช้งานจริงในภาคสนาม: นำเครื่องไปถอนต้นกระถินบ้านในพื้นที่จริง โดยใช้ระยะดึงด้ามจับที่ 800, 1,000 และ 1,200 mm และวัดแรงดึงสูงสุดเมื่อถอนต้นกระถินบ้านออกสำเร็จ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ค่าแรงถอนต้นกระถินบ้าน

ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาค่าแรงถอนต้นกระถินบ้าน

เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (mm)	แรงถอน (N)
11	105
14	185
15	206
16	258
18	319
19	383
20	403
25	425

จากตารางที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าแรงถอนจริงจากต้นกระถินบ้านซึ่งจะพบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นกระถินบ้านที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ต้องใช้แรงถอนสูงขึ้นตามไปด้วย โดยขนาดลำต้นกระถินบ้าน 25 mm ต้องใช้แรงถอนสูงถึง 425 N ซึ่งเป็นขนาดลำต้นสูงสุดที่ทำการทดลอง

4.2 ผลการคำนวณแรงถอนจากหลักโมเมนต์

ตารางที่ 2 แรงดึงด้ามจับและแรงถอนจากการคำนวณ (R_2 = 185 mm)

แรงดึง F_1 (N)	ระยะดึง R_1 (mm)	แรงถอน F_2 (N)
50	800	216
	1000	270
	1200	324
100	800	432
	1000	541
	1200	649

ตารางที่ 2 แรงดึงด้ามจับและแรงถอนจากการคำนวณ (R_2 = 185 mm) (ต่อ)

แรงดึง F_1 (N)	ระยะดึง R_1 (mm)	แรงถอน F_2 (N)
150	800	649
	1000	811
	1200	973
200	800	865
	1000	1081
	1200	1297

จากตารางที่ 2 เป็นผลการคำนวณเพื่อหาค่าแรงถอนด้วยวิธีโมเมนต์ดังสมการที่ 2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อแรงดึงและระยะดึงด้ามจับเพิ่มขึ้นแรงถอนก็จะเพิ่มขึ้นตามทฤษฎีโมเมนต์ โดยแรงถอนสูงสุดที่คำนวณได้คือ 1,297 N ที่แรงดึง 200 N ระยะดึงด้ามจับที่ 1,200 mm

4.3 ผลการทดลองหาแรงถอนจากเครื่อง

ตารางที่ 3 แรงถอนเฉลี่ยจากการทดลองเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพา

แรงดึง F_1 (N)	ระยะดึง R_1 (mm)	แรงถอนเฉลี่ย F_2 (N)	SD
50	800	309	12
	1000	368	6
	1200	513	9
100	800	609	10
	1000	722	9
	1200	791	5
150	800	920	8
	1000	1073	25
	1200	1236	23
200	800	1250	21
	1000	1465	27
	1200	n/a	n/a

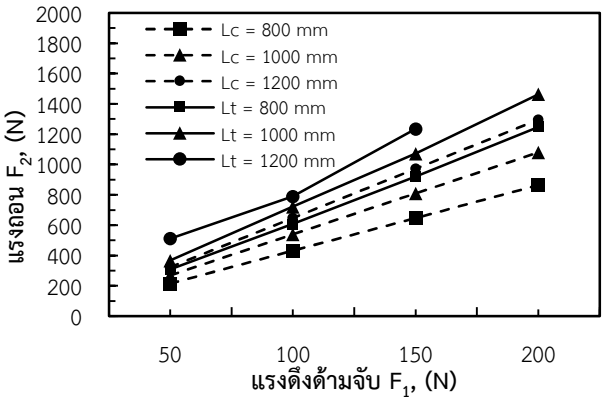
ตารางที่ 3 จะแสดงค่าแรงถอนเฉลี่ยจากการทดลองเครื่องช่วยถอนวัชพืชแบบพกพา ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงถอนจากการทดลองก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับวิธีการคำนวณตามทฤษฎีโมเมนต์ คือเมื่อแรงดึงและระยะดึงด้ามจับเพิ่มขึ้น แรงถอนก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแรงถอนสูงสุดที่ทดลองได้คือ 1,465 N ที่แรงดึง 200 N ระยะดึง 1,000 mm ส่วนแรงดึง 200 N ที่ระยะ 1,200 mm ไม่สามารถทดลองได้ (n/a) เนื่องจากด้ามจับจะเกิดการโค้งงอ

4.4 ผลการทดลองถอนจริงในภาคสนาม

ตารางที่ 4 ผลการทดลองใช้เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านในภาคสนาม

ระยะดึงด้ามจับ (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (mm)	แรงดึงด้ามจับ (N)
800	10	95
	12	103
	15	141
	16	169
	20	180
1000	13	66
	14	70
	15	90
	16	113
	17	130
1200	10	30
	15	76
	17	116
	18	127
	20	135

จากตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองใช้เครื่องถอนต้นกระถินบ้านในภาคสนามพบว่าเครื่องสามารถถอนต้นกระถินบ้านได้จริงในทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นกระถินที่ใช้ในการทดลอง (ทดลองกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นกระถินบ้านไม่เกิน 20 mm) ซึ่งใช้แรงดึงด้ามจับสูงสุดเพียง 180 N ที่ระยะ 800 mm ซึ่งถือว่าใช้แรงดึงที่น้อยมากช่วยให้เพิ่มแรงถอนได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการถอนด้วยมือเปล่า



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและผลจากการทดลอง

จากรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและผลจากการทดลองเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้าน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแรงดึงด้ามจับเพิ่มสูงขึ้นแรงถอนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งจากการคำนวณและจากการทดลองและจะเห็นได้อีกว่าเมื่อระยะดึงด้ามจับจากกรณีทดลอง (Lt) เพิ่มขึ้นแรงถอนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันกับการคำนวณ คือเมื่อระยะดึงด้ามจับกรณีคำนวณ (Lc) เพิ่มขึ้นแรงถอนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกันซึ่งก็ตรงตามหลักการของโมเมนต์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกรณีคำนวณและกรณีทดลองจะเห็นได้ว่าค่าแรงถอนจากการคำนวณจะมีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดลองอยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งอันจะเป็นผลมาจากการคำนวณจะใช้ระยะและรูปทรงที่คงที่แต่ในการทำงานจริงตัวเครื่องจะมีการเคลื่อนไหวทำให้ระยะและรูปทรงเปลี่ยนไปได้ รวมถึงการคำนวณยังไม่ได้คิดรวมน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างเครื่องด้วย จึงทำให้ผลที่ออกมามีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงตามมา แต่ทั้งนี้ค่าที่ตัวเครื่องทำได้นั้นก็ช่วยผ่อนแรงให้ผู้ใช้งานออกแรงน้อยลงด้วย ในกรณีคำนวณเครื่องช่วยถอนจะสามารถ

ผ่อนแรงสูงสุดได้ที่ 6.49 เท่า แต่การทดลองจริงเครื่องสามารถผ่อนแรงเฉลี่ยได้ถึง 8.8 เท่า (คิดที่ระยะดึงด้ามจับ 1,200 mm) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากที่กล่าวมาไว้ในเบื้องต้น

5. สรุปผลการทดลอง

เครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านสามารถทำการถอนต้นกระถินบ้านได้จริงตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยเครื่องสามารถจับยึดต้นกระถินได้ทุกขนาดทดลอง (ทดลองขนาดลำต้นไม่เกิน 20 mm) โดยเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านแบบพกพาสามารถช่วยผ่อนแรงเฉลี่ยได้ถึง 8.8 เท่า กรณีระยะดึงด้ามจับ 1,200 mm โดยผลการคำนวณและทดลองมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันแต่ค่าจากการทดลองจะมีค่าที่สูงกว่าการคำนวณอันเนื่องจากยังไม่ได้คำนึงถึงรูปทรงที่เปลี่ยนไปขณะทำงานและน้ำหนักของตัวเครื่องที่ยังไม่ได้นำมาพิจารณาเข้าไปด้วยในการออกแบบ โดยเครื่องช่วยถอนต้นกระถินบ้านนี้สามารถให้แรงถอนสูงสุดได้ที่ 1,465 N ที่ระยะดึงด้ามจับ 1,000 mm และใช้แรงดึงด้ามจับ 200 N

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณนักศึกษา อาจารย์ และบุคลากรสาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายวิษณุ หนองบุญ และนายญาณวิทย์ สมบูรณ์ อีกทั้งต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการจัดสร้างและทดลองจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] kriang3tee. (2568). ต้นกระถินบ้าน. https://peakd.com/thai/@kriang3tee/qhvu0s

[2] คัดคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ และณภัทรดนัย. (2568). โมเมนต์ของแรง. https://ngthai.com/science/40756

[3] Thananthorn. (2568). สมดุลของโมเมนต์. https://nervoussystem125.wordpress.com

[4] เสรี วงส์พิเชษฐ. (2551). การพัฒนาอุปกรณ์ขุดมันสำปะหลังแบบใช้รถไถเดินตามรายงานวิจัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[5] มัณฑนา นันติ และคณะ. (2565). ความแข็งแรงเฉือนของดินเสริมกำลังด้วยระบบรากต้นกระถินเทพา. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, น. GTE04-1.

[6] ชินวัฒน์ ณะอินคะ และคณะ. (2563). อุปกรณ์ช่วยถอนต้นไม้. Thailand Innovation Portal.

[7] วสุ สันติมิตร และคณะ. (2560). การพัฒนาเครื่องทุ่นแรงในการผลิตพืชแบบบูรณาการ รายงานวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

[8] ศิริเจษฎ์ กองแก้ว, สิงห์รัญ ชารี, ประไพพรรณ สิทธิกูล, บัณฑิต ทองสร้อย และ กฤษณ์ ผลโพธิ์ (2564). การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดวัชพืชในแปลงข้าวโพดหวาน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 27(2), 12–18.

[9] Goel, A. K., Behera, D., Behera, B. K., Mohanty, S. K. and Nanda, S. K. (2008). Development and ergonomic evaluation of manually operated weeder for dry land crops. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, 10, Manuscript PM 08 009.

[10] Yadav, R. and Pund, S. (2007). Development and ergonomic evaluation of manual weeder. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, 9, Manuscript PM 07 022.

[11] Jayaseelan, V., Kumar, R. M., and Kannan, M. M. (2020). Design and fabrication of battery operated weeder machine. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7(5), 4245–4249.

[12] Muhammad, A. I., and Attanda, M. L. (2012). Development of hand push mechanical weeder. Proceedings of the 33rd National Conference and Annual General Meeting of the Nigerian Institute of Agricultural Engineers, Bauchi, Nigeria, November 5–9, 2012.

[13] Saleh, A., and Suleiman, M. (2021). Design, construct and evaluation of a single row hand-pushed mechanical weed control machine. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 25(3), 401–406.

[14] Oliveira, M. V. M., Cunha, J. P. B., Oliveira, R. T. C., de Barros, M. M., & Costa, A. G. (2025). Development and validation of a prototype of a manual intra-row mechanical weeder in vegetable beds. Spanish Journal of Agricultural Research, 23(2), Article e21169.

การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอจำเพาะของเหล็กกล้าอุตสาหกรรม เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์

A Comparative Study on Specific Wear Rates of Industrial Steels for Organic Fertilizer Blade Applications

ศรายุทธ แย้มสรวล[1*], ยศภัทรชัย คณิตปัญญาเจริญ[2] อดุลย์ พุกอินทร์[3]

[1,2] สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[3] สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

*ผู้ติดต่อ: sarayut.yaemsuan@gmail.com, โทร. 097 923 5906

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กสามเกรดที่มีบทบาทต่างกันในงานวิศวกรรม ได้แก่ SS400, SKD11 และ SUS304 เพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์ผง การทดสอบใช้วิธี Ball-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-23 บนเครื่อง Bruker UMT Tribometer ในสภาวะแห้ง (dry sliding) ที่อุณหภูมิห้องในห้องปฏิบัติการ ภายใต้แรงกด 5 นิวตัน ความเร็วรอบ 1,470 รอบต่อนาที รัศมีการเลื่อน 7.5 มิลลิเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คิดเป็นระยะทางการเลื่อนรวม 4,156 เมตร (จากจำนวนรอบสะสม 88,200 รอบ) จำนวน 3 ชิ้นต่อชนิด (n = 3) พร้อมวัดปริมาตรการสึกหรอด้วยเครื่อง Keyence 3D Profilometer VR-6200 และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ผลวิจัยพบว่า SKD11 มีอัตราการสึกหรอจำเพาะ (k) เฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 4.65×10^{-6} mm³/N·m รองลงมาคือ SS400 (8.02×10^{-6}) และ SUS304 (14.70 × 10-6) ตามลำดับ โดย SUS304 สึกหรอเร็วกว่า SKD11 ถึง 3.16 เท่า ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F_{2,6} = 13.75$, $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.821$) และผลทดสอบรายคู่ (Tukey HSD) ยืนยันว่า SKD11 สึกหรอต่ำกว่า SUS304 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยอินทรีย์ผง (pH 7.3 ความชื้น 24.4% โครเมียม 16.3 mg/kg และทองแดงรวม 43.7 mg/kg ซึ่งทำหน้าที่เป็นอนุภาคขัดสี) และการประเมินแบบหลายเกณฑ์ สรุปได้ว่า SKD11 เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์ เนื่องจากต้านทานการสึกหรอได้ดี สูญเสียเนื้อวัสดุ น้อยที่สุด และให้ผลที่สม่ำเสมอ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ) โดยได้คะแนนรวมสูงสุด 85.0 จาก 100 คะแนน ทั้งนี้ ผลการทดสอบสะท้อนสภาวะแห้งในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาวะหน้างานจริงที่เป็นแบบกึ่งเปียก

คำสำคัญ: การสึกหรอ, เหล็กเครื่องมือ SKD11, การทดสอบ Ball-on-Disk, ปุ๋ยอินทรีย์, ใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์

Abstract

This research compares the wear behaviour of three steel grades with different engineering applications—SS400, SKD11, and SUS304—to determine the most suitable material for powdered organic fertilizer mixing blades. Wear testing followed the ball-on-disk method in accordance with ASTM G99-23 on a Bruker UMT Tribometer, under dry sliding at ambient laboratory temperature, with a 5 N

load, 1,470 rpm, 7.5 mm sliding radius and 1-hour duration, giving a total sliding distance of 4,156 m (from 88,200 accumulated revolutions), with n = 3 specimens per grade. Wear volume was measured using a Keyence VR-6200 3D Profilometer, followed by statistical analysis. SKD11 exhibited the lowest mean specific wear rate (k) of 4.65 × 10^{-6} mm³/N·m, followed by SS400 (8.02 × 10^{-6}) and SUS304 (14.70 × 10^{-6}); SUS304 wore 3.16 times faster than SKD11. ANOVA showed a statistically significant difference ($F(2,6) = 13.75$, $p = 0.006$, $\eta^2 = 0.821$), and Tukey HSD confirmed that SKD11 wore significantly less than SUS304 ($p < 0.05$) but did not differ significantly from SS400. Considering the fertilizer chemistry (pH 7.3, moisture 24.4%, Cr 16.3 mg/kg, Cu 43.7 mg/kg, acting as abrasive particles) together with a multi-criteria assessment, SKD11 is the most suitable material, owing to its superior wear resistance, minimal material loss and high consistency (low SD), achieving the highest overall score of 85.0 out of 100. These results reflect dry laboratory conditions, which may differ from the semi-wet conditions of actual field use.

Keywords: Wear Resistance, SKD11 Tool Steel, Ball-on-Disk Tribology, Organic Fertilizer, Fertilizer Crusher Blade

1. บทนำ

ปุ๋ยอินทรีย์มีบทบาทสำคัญต่อเกษตรกรรมยั่งยืน และต้องควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร [14] กระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ผงต้องอาศัยการบดและตีวัตถุดิบให้ละเอียดสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นภาระหนักต่อใบมีดตีและทำให้เกิด การสึกหรออย่างรวดเร็ว ศิวะ และคณะ [1] รายงานว่าการสึกหรอของใบมีดในเครื่องบดและร่อนปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพส่งผล โดยตรงต่ออายุการใช้งานของเครื่องจักร การเลือกวัสดุใบมีดที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยกำหนดทั้งประสิทธิภาพการผลิต ต้นทุน การบำรุงรักษา และความทนทานของเครื่องจักร ยิ่งไปกว่านั้น ปุ๋ยอินทรีย์ผงยังประกอบด้วยอนุภาคโครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในรูปออกไซด์ที่มีความแข็งสูง ทำหน้าที่เป็นสารขัดสี (abrasive) ขณะที่ความชื้นและความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ย ยังเสริมกลไกการสึกหรอแบบยึดติด (adhesive wear) และการกัดกร่อน โดย Bachrudin และ Sugeng [2] และธีร์และคณะ [11] พบตรงกันว่าการเลือกวัสดุที่แข็งและทนสึกหรอสูง หรือการปรับปรุงผิว ช่วยยืดอายุการใช้งานได้ชัดเจน

อย่างไรก็ตาม การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กหลายเกรดภายใต้เงื่อนไขจำเพาะกับงานตีปุ๋ยอินทรีย์ พร้อมการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงปริมาณ ยังมีอยู่จำกัด งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็ก 3 ชนิด คือ SS400, SKD11 และ SUS304 ด้วยการทดสอบ Ball-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-23 [15] ร่วมกับการวิเคราะห์ One-way ANOVA, Tukey HSD และการประเมินแบบหลายเกณฑ์ (multi-criteria) ที่นำคุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยมาพิจารณา ประกอบ เพื่อให้ได้ข้อสรุปเชิงวิศวกรรมว่าวัสดุใดเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ ขอบเขตของการทดสอบเป็นการจำลองการสึกหรอใน สภาวะแห้ง (dry

sliding) ที่อุณหภูมิห้องภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาวะหน้างานจริงที่เป็นแบบกึ่งเปียก (semi-wet)

2. ทฤษฎีและกลไกการสึกหรอ

การสึกหรอ (wear) คือการสูญเสียเนื้อวัสดุจากพื้นผิวที่สัมผัสและเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน กลไกที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มี 2 กลไกหลัก ได้แก่ การสึกหรอแบบขัดสี (abrasive wear) ซึ่งเกิดจากอนุภาคแข็ง เช่น ออกไซด์ของ Cr และ Cu ในปุ๋ย ขูดถูพื้นผิวโลหะ และการสึกหรอแบบยึดติด (adhesive wear) ซึ่งเด่นชัดในเหล็กกลุ่มออสเทนนิติกที่มีความแข็งต่ำและมี พฤติกรรมการแข็งตัวจากการขึ้นรูปเย็น (work hardening) สูง [9, 18]

ระยะทางการเลื่อนรวม (sliding distance, L) ของการทดสอบแบบ Ball-on-Disk คำนวณได้จากผลคูณของเส้นรอบวง ของรอยเลื่อน ($2\pi R$) กับจำนวนรอบสะสม ($N \times t$) ตามสมการที่ (1) และอัตราการสึกหรอจำเพาะ (specific wear rate, k) ตามมาตรฐาน ASTM G99-23 คำนวณได้จากปริมาตรการสึกหรอ (V) หารด้วยผลคูณของแรงกด (F) กับระยะทางการเลื่อน (L) ตามสมการที่ (2) [15]

$$L = 2\pi RNt \quad (1)$$

$$k = V / (F \times L) \quad (2)$$

เมื่อ L คือ ระยะทางการเลื่อน (m), s

R คือ รัศมีรอยสึก (m),

N คือ ความเร็วรอบ (rev/min),

t คือ เวลาทดสอบ (min),

k คือ อัตราการสึกหรอจำเพาะ ($mm^3/N \cdot m$),

V คือ ปริมาตรการสึกหรอ (mm^3)

F คือ แรงกดตั้งฉาก (N)

นอกจากนี้ยังบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (coefficient of friction, COF) ตลอดการทดสอบเพื่อประเมิน พฤติกรรมการเสียดทานของคู่สัมผัสควบคู่ไปด้วย

3. วัสดุและวิธีการ

3.1 วัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบประกอบด้วยเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ (1) SS400 เหล็กโครงสร้างคาร์บอนต่ำ JIS G3101 ราคาถูกใช้งานทั่วไป (2) SKD11 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นผสมคาร์บอนและโครเมียมสูง และ (3) SUS304 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 18Cr-8Ni JIS G4304 ที่ทนการกัดกร่อนสูง ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 25 × 25 มม. หนา 5 มม. ขัดผิวด้วยกระดาษทราย SiC #240 จนได้ $Ra \leq 0.8$ μm องค์ประกอบทางเคมีและความแข็งแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ ได้แปลงหน่วยความแข็งให้อยู่ใน ระบบเดียวกัน (Vickers, HV) เพื่อเปรียบเทียบเชิงตัวเลข พบว่า SKD11 (ชุบแข็ง) แข็งสูงสุด 58–62 HRC (≈ 650–746 HV) รองลงมา SUS304 (อบอ่อน) ≈ 187 HB (≈ 196 HV) และ SS400 ต่ำสุด ≈ 120 HB (≈ 126 HV)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและความแข็งของเหล็กทดสอบ [16, 17]

ธาตุ (% น้ำหนัก)	SS400	SKD11	SUS304
C	≤ 0.20	1.40–1.60	≤ 0.08
Cr	–	11.0–13.0	18.0–20.0
Ni	–	–	8.0–10.5
Mn	≤ 1.40	≤ 0.60	≤ 2.00
Si	–	≤ 0.40	≤ 1.00

ความแข็ง (HRC)	–	58–62	–
ความแข็ง (HB)	≈ 120	–	≈ 187
≈ HV (แปลงหน่วย)	≈ 126	650–746	≈ 196

หมายเหตุ: การแปลงหน่วยความแข็งเป็น HV อ้างอิงตาราง ASTM E140

3.2 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบดำเนินการบนเครื่อง Bruker UMT Tribometer แบบ Ball-on-Disk โดยใช้ลูกบอล SiC เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตรเป็นคู่สัมผัส ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G99-23 [15] ในสภาวะแห้ง (dry sliding) ที่อุณหภูมิห้อง โดยกำหนดแรงกดในแนวดิ่ง $F = 5$ นิวตัน ความเร็วรอบ $N = 1{,}470$ รอบต่อนาที รัศมีรอยสึก $R = 7.5$ มิลลิเมตร เป็นเวลา $t = 60$ นาที เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในสมการที่ (1) จะได้จำนวนรอบสะสมเท่ากับ 88,200 รอบ และระยะทางการเลื่อนรวม L เท่ากับ 4,156 เมตร ภายหลังการทดสอบ วัดปริมาตรการสึกหรอ V ด้วยเครื่อง Keyence 3D Profilometer VR-6200 Series แล้วคำนวณอัตรา การสึกหรอจำเพาะ k ตามสมการที่ (2)

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ค่าเฉลี่ยปริมาตรการสึกหรอนำมาเปรียบเทียบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับ นัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และทดสอบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD พร้อมประเมินขนาดอิทธิพลด้วยค่า Eta-squared (η^2) ตามเกณฑ์ Cohen (1988) โดยได้ตรวจสอบข้อสมมติฐานทั้งความเป็นอิสระของข้อมูล การกระจายแบบปกติ และ ความเท่ากันของความแปรปรวน ทั้งนี้ จำนวนชิ้นงานต่อกลุ่มเท่ากับ 3 ชิ้น ($n = 3$) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของขนาดตัวอย่างที่ควร พิจารณาในการตีความผล

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยอินทรีย์

ผลการวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ผง (ตารางที่ 2) พบว่ามีค่า pH 7.3 (กลางถึงด่างอ่อน) ความชื้น 24.4% อินทรียวัตถุ 18.1% และ ดัชนีการงอก 86.4% บ่งชี้ว่าปุ๋ยมีคุณภาพดี แต่ในแง่การสึกหรอตรวจพบทองแดงรวม 43.733 mg/kg และโครเมียม 16.334 mg/kg ซึ่งอนุภาคโลหะในรูปออกไซด์ (เช่น Cr_2O_3 และ CuO) มีความแข็งสูงและทำหน้าที่เป็นสารขัดสีเร่งการสึกหรอ ขณะที่ สารหนู 3.900 mg/kg และตะกั่ว 3.656 mg/kg ยังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร [14]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยอินทรีย์ผง

รายการ	ผลวิเคราะห์	หน่วย
pH	7.3	–
ความชื้น	24.4	%
อินทรียวัตถุ	18.1	%
อินทรีย์คาร์บอน	10.5	%
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	0.7	dS/m
ดัชนีการงอก	86.4	%
ไนโตรเจนรวม	1.1	%
ฟอสฟอรัส (P_2O_5)	2.8	%
โพแทสเซียม (K_2O)	0.40	%
Chromium (Cr)	16.334	mg/kg
Total Copper (Cu)	43.733	mg/kg
Arsenic (As)	3.900	mg/kg
Lead (Pb)	3.656	mg/kg
C/N ratio	13:1	–

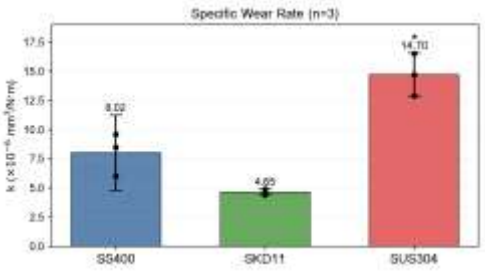
4.2 ผลการทดสอบการสึกหรอ

ตารางที่ 3 สรุปผลการทดสอบ (n = 3) และรูปที่ 1 เปรียบเทียบค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะ (k) พร้อมแถบความ คลาดเคลื่อน (error bar, SD) พบว่า SKD11 มีค่า k ต่ำที่สุด (4.65 × 10-6 $mm^3/N·m$) ขณะที่ SUS304 สูงที่สุด สูงกว่า SKD11 ถึง 3.16 เท่า และ SS400 อยู่ระหว่างกลาง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการสึกหรอ (Mean ± SD, n = 3)

ชนิด	COF	Vol. (mm^3)	k ($\times 10^{-6}$)
SS400	0.55±0.04	0.193±0.080	8.02±3.23
SKD11	0.57±0.03	0.107±0.006	4.65±0.24
SUS304	0.58±0.01	0.321±0.036	14.70±1.87

ปริมาตรการสึกหรอและความลึกรอยสึกหรอ (ตารางที่ 3) สอดคล้องกัน กล่าวคือ SUS304 มีทั้งปริมาตร (0.321 mm^3) และ ความลึก (0.008 mm) สูงสุด เข้ากันได้ดีกับกลไก adhesive wear ที่เด่นชัดในเหล็กออสเทนนิติก [9, 18] ในทางกลับกัน SKD11 มีปริมาตรต่ำสุดเพียง 0.107 mm^3 สะท้อนการต้านทานการสูญเสียวัสดุได้ดี



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบ Specific Wear Rate (k) พร้อม error bar (SD) และค่าชิ้นงานรายชิ้น (* p < 0.05 Tukey HSD)

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (COF) และการวิเคราะห์ ANOVA

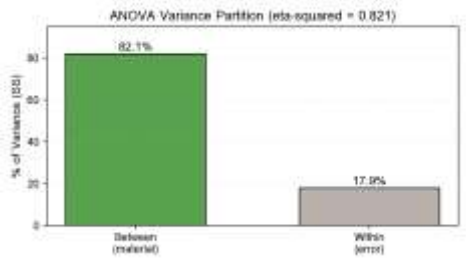
ค่า COF ของเหล็กทั้งสามชนิด (ตารางที่ 3) อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน (0.55–0.58) ANOVA ยืนยันว่าไม่พบความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญ ($F_{2,6}$ = 0.69, p = 0.536) สะท้อนว่า COF เป็นคุณสมบัติของระบบ (system property) ที่ขึ้นกับสภาวะทดสอบและ คู่สัมผัส มากกว่าจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ [18] ในทางกลับกัน ANOVA ของปริมาตรการสึกหรอ (ตารางที่ 4) พบว่า $F_{2,6}$ = 13.75 > F_crit = 5.14 และ p = 0.006 < 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า η^2 = 0.821 (large effect ตามเกณฑ์ Cohen 1988) หมายความว่า 82.1% ของความแปรปรวนอธิบายได้ด้วยชนิดวัสดุ ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA สำหรับปริมาตรการสึกหรอ

แหล่ง	SS	df	MS	F
ระหว่างกลุ่ม	0.0875	2	0.0437	13.75*
ภายในกลุ่ม	0.0191	6	0.00318	–
รวม	0.1066	8	–	–

* p = 0.006 < 0.05 | η^2 = 0.821 (large effect) | F_crit(2,6) = 5.14

ทั้งนี้ อัตราส่วน SD สูงสุดต่อต่ำสุด ≈ 6.3 สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับทั่วไป(SD ratio < 3) การศึกษาต่อยอดจึงควรยืนยัน ผลด้วย Welch's ANOVA เพิ่มเติม เพื่อความรัดกุมของข้อสรุปทางสถิติ



รูปที่ 2 การแบ่งส่วนความแปรปรวนจาก ANOVA ชนิดวัสดุอธิบายความแปรปรวนได้ 82.1% (η^2 = 0.821, large effect)

4.4 การทดสอบ Tukey HSD

ตารางที่ 5 แสดงผล Tukey HSD (HSD = 0.141 mm³, q_crit = 4.34, α = 0.05) พบว่าคู่ SKD11 vs SUS304 แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ (|0.214| > HSD) ส่วนคู่อื่นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อจัดกลุ่มเนื้อเดียวกัน (homogeneous groups) จึงแบ่งได้เป็น (SS400, SKD11) และ (SUS304)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบรายคู่ (Tukey HSD, α = 0.05)

คู่เปรียบเทียบ	ผลต่าง mm³	HSD	ผล
SS400 vs SKD11	0.086	0.141	ไม่มีนัยสำคัญ
SS400 vs SUS304	0.128	0.141	ไม่มีนัยสำคัญ
SKD11 vs SUS304	0.214	0.141	มีนัยสำคัญ *

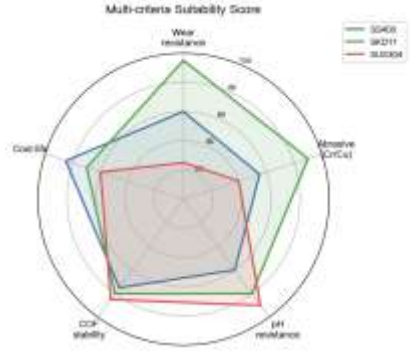
*เครื่องหมาย * หมายถึงคู่ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ α = 0.05

4.5 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติปุ๋ยกับการสึกหรอ

รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิเรดาร์ (radar chart) ประเมินความเหมาะสมรวมของเหล็กทั้งสามชนิดใน 5 มิติ โดยคะแนนเป็นการ ประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted score) ตามความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ต่อการใช้งานจริง ได้แก่ ความทนสึกหรอ 35% ความต้านทานอนุภาคขัดสี (Cr/Cu) 25% ความต้านทาน pH 15% ความเสถียร COF 10% และความคุ้มค่า 15% ดังตารางที่ 6 พบว่า SKD11 ได้คะแนนสูงสุดในด้านความทนสึกหรอ (95) และความต้านทานอนุภาคขัดสี (90) ซึ่งเข้ากันได้ดีกับโครงสร้าง จุลภาคที่มีคาร์ไบด์ $(Cr,Fe)_7C_3$ กระจายตัวสม่ำเสมอ [5] แม้ SUS304 จะได้คะแนนสูงด้านความทนการกัดกร่อน (pH) และ ความชื้น แต่ค่า pH 7.3 ของปุ๋ยไม่ใช่สภาวะกัดกร่อนรุนแรง คุณสมบัติด้านการกัดกร่อนจึงไม่ใช่ปัจจัยชี้ขาดสำหรับงานนี้ ผลคะแนนรวมถ่วงน้ำหนักสรุปได้ว่า SKD11 ได้คะแนนสูงสุด 85.0 รองลงมาคือ SS400 (63.5) และ SUS304 (46.5)

ตารางที่ 6 การประเมินความเหมาะสมแบบหลายเกณฑ์

เกณฑ์	น้ำหนัก	SS400	SKD11	SUS304
ความทนสึกหรอ (k)	35%	60	95	25
ทน abrasive Cr/Cu	25%	55	90	40
ความต้านทาน pH	15%	60	80	90
ความเสถียร COF	10%	75	80	85
ความคุ้มค่า	15%	85	70	60
คะแนนรวม	100%	63.5	85.0	46.5



รูปที่ 3 Radar Chart ประเมินความเหมาะสมสำหรับใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์ผง SKD11 ครองพื้นที่มากที่สุด

5. อภิปรายผล

SKD11 แสดงสมรรถนะต้านทานการสึกหรอสูงสุด (k = 4.65 × 10-6 mm³/N·m) สอดคล้องกับอัครวัฒน์ และคณะ[5] ที่ว่า SKD11 เป็นเหล็กเครื่องมืองานเย็นคาร์บอนและโครเมียมสูง เมื่อชุบแข็งจะเกิดคาร์ไบด์ (Cr,Fe)7C3 กระจายตัวในเนื้อพื้น ทำให้ผิวแข็ง โดย Mac และคณะ [6] และ Trung และ Phuc [7] ยืนยันว่า SKD11 ชุบแข็งมีความแข็ง 58–62 HRC คาร์ไบด์ที่แข็งกว่าอนุภาคขัดสีในปุ๋ยจึงทำหน้าที่เสมือนเกราะปกป้องเนื้อพื้นในกลไก abrasive wear ตรงข้ามกับ SUS304 ที่สึกหรอสูงสุด เพราะเป็นเหล็กออสเทนนิติกที่ความแข็งต่ำและ work hardening สูง ผิวสัมผัสจึงยึดติดและฉีกขาดแบบ adhesive wear ทั้งนี้ การอ้างอิงกลไกระดับโครงสร้างจุลภาคดังกล่าว [5, 9, 18] จำเป็นต้องยืนยันด้วยการตรวจสอบพื้นผิว รอยสึกของตัวอย่างจริงด้วยกล้องจุลทรรศน์ (OM หรือ SEM) หลังการทดสอบ ซึ่งเป็นแนวทางที่ควรดำเนินการต่อไป

สำหรับSUS304 Lu และ Yeh [8] รายงานว่าทนสึกหรอค่อนข้างต่ำ แต่ปรับปรุงได้ด้วยการเสริมอนุภาค TiC ขณะที่ Mateescu และคณะ [9] และ Hosiyama และคณะ [10] แสดงว่าต้องใช้การปรับปรุงผิว เช่น การพ่นไนไตรด์ (nitriding) ตอกย้ำว่า SUS304 ในสภาพปกติยังไม่เหมาะกับงานสึกหรอรุนแรง ส่วน SS400 ให้ค่า k ปานกลาง และ Tukey HSD ไม่ต่าง จาก SKD11 อย่างมีนัยสำคัญ แต่ SD ของ SKD11 ต่ำกว่ามาก จึงให้อายุการใช้งานที่ยาวนานและคาดการณ์ได้แม่นยำกว่า โดยธีร์ และคณะ [11] ชี้ว่า SS400 ต้องเพิ่มคาร์บอนที่ผิว (carburizing) ก่อนใช้เป็นใบมีด สอดคล้องกับณภัทร และคณะ [12] (อิทธิพลของการอบคืนตัวต่ออายุมีดตัดโคนอ้อย) สมศักดิ์ [13] (การพัฒนาวัสดุใบมีดตัด) มนตรี [3] (วิธี TOPSIS) และ อดุลย์ และคณะ [4] (การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล) ที่เน้นความสำคัญของการเลือกวัสดุที่สมดุลระหว่างความแข็ง ความทนสึกหรอ และต้นทุน

อนุภาคโครเมียม (16.3 mg/kg) และทองแดง (43.7 mg/kg) ในปุ๋ยทำหน้าที่เป็นอนุภาคขัดสีเร่งการสึกหรอ ขณะที่ความชื้น 24.4% ในสภาวะกึ่งเปียก (semi-wet) อาจเพิ่มการสึกหรอแบบยึดติดในเหล็กออสเทนนิติก ผลนี้สอดคล้องกับศิวะ และคณะ [1] และ Bachrudin และ Sugeng [2] ที่ยืนยันว่าการสึกหรอของใบมีด SKD11 เป็นแบบ edge/abrasive wear เมื่อประมวลหลักฐาน ทั้งหมดจึงสนับสนุนการเลือกใช้ SKD11 โดยยอมแลกต้นทุนวัสดุที่สูงขึ้นเล็กน้อยกับอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งคุ้มค่าในระยะยาว

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

ผลการวิเคราะห์ ANOVA ($F_{2,6}$ = 13.75, p = 0.006, η^2 = 0.821) ยืนยันความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอัตรา การสึกหรอระหว่างเหล็กทั้งสามชนิด และ Tukey HSD ระบุว่า SKD11 แตกต่างจาก SUS304 อย่างมีนัยสำคัญ($p < 0.05$) ในขณะที่ SKD11 ไม่แตกต่างจากSS400 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. SKD11 มีค่า k ต่ำสุด 4.65 × 10^{-6} mm³/N·m และมีความสม่ำเสมอของผลสูง (SD ต่ำสุด) จึงเหมาะสมที่สุด สำหรับใบมีดตีปุ๋ยอินทรีย์ผง ทั้งนี้อ้างอิงจากการประเมินแบบหลายเกณฑ์ (multi-

criteria) ร่วมกับความสม่ำเสมอของข้อมูล มิใช่จากค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว

2. แม้ SKD11 จะมีค่า k เฉลี่ยต่ำกว่า SS400 แต่ผลทางสถิติพบว่า SKD11 ไม่แตกต่างจาก SS400 อย่างมีนัยสำคัญ (จัดอยู่ในกลุ่มเนื้อเดียวกันทางสถิติ)

3. SUS304 มีการสึกหรอสูงสุดถึง 3.16 เท่าของ SKD11 จึงไม่เหมาะสม แม้ทนการกัดกร่อนได้สูงก็ตาม

4. อนุภาค Cr 16.3 mg/kg และ Cu 43.7 mg/kg ในปุ๋ยทำหน้าที่เป็นอนุภาคขัดสี ซึ่ง SKD11 ต้านทานได้ดีที่สุด

5. ค่า $\eta^2 = 0.821$ แสดงว่าชนิดของเหล็กเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมอัตราการสึกหรอ (large effect) โดยการประเมิน แบบหลายเกณฑ์ยืนยันว่า SKD11 ได้คะแนนรวมสูงสุด 85.0/100

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดคือ ดำเนินการในสภาวะแห้งที่อุณหภูมิห้อง ด้วยจำนวนตัวอย่าง $n = 3$ ต่อกลุ่ม ซึ่งเป็นขนาดตัวอย่าง ที่จำกัด และคะแนนถ่วงน้ำหนักในการประเมินแบบหลายเกณฑ์กำหนดจากความสำคัญเชิงการใช้งาน ผู้วิจัยจึงเสนอแนะแนวทาง เชิงวิศวกรรมสำหรับการศึกษาต่อไปดังนี้

1. ทดสอบภาคสนาม (field test) ด้วยใบมีดจริงในกระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ระดับอุตสาหกรรม เพื่อยืนยันผลในสภาวะ การทำงานจริงที่เป็นแบบกึ่งเปียก (semi-wet)

2. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวรอยสึกของตัวอย่างจริงหลังการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (OM หรือ SEM) เพื่อยืนยันกลไกการสึกหรอ พร้อมเพิ่มจำนวนตัวอย่างต่อกลุ่มและยืนยันด้วย Welch's ANOVA เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นทางสถิติ

3. ปรับปรุงผิววัสดุ เช่น การพ่นไนไตรด์ (nitriding) สำหรับเหล็ก SUS304 และ SS400 เพื่อเพิ่มความแข็งผิวและ ความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งอาจทำให้เหล็กราคาประหยัดใช้งานทดแทน SKD11 ได้

4. ควรทดสอบความแข็ง (hardness) และความเหนียว (toughness) ของเหล็กทั้งสามชนิดเพิ่มเติม แล้วนำมาพิจารณาร่วมกับอัตราการสึกหรอ เพื่อให้การคัดเลือกวัสดุสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) สำหรับการทดสอบการสึกหรอ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยอินทรีย์ และบริษัททิพย์สุโขทัย ไบโอ-เทค จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ศิวะ มาประเสริฐ, คมกริช ตั้นคำ และ เอนก กล้าหาญ. (2554). การสึกหรอของใบมีดของเครื่องบดพร้อมร่อนปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[2] Bachrudin, & Sugeng, M. (2024). “Effect of Cutting Speed Variation on Wear and Life of Lathe Tool Blade in SKD11 Steel Material.” Dinasti International Journal of Education Management and Social

Science (DIJEMSS) 6(1): 115–123. doi:10.38035/dijemss

[3] มนตรี วิมล. (2567). “การคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำใบมีดตัดโคนในรถตัดอ้อยโดยใช้วิธีการ TOPSIS และ ROC.” วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม 17(1): 46–58.

[4] อดุลย์ พุกอินทร์, ธนาพล กันยา, ประจิม มูลแสน, ดนัย สุกกล่ำ, นิมิต อยู่เป็นสุข, ปรีชา ภู่สมบัติขจร และ ชัชพล เกษวิริยะกิจ. (2568). “การหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมสำหรับงานบำรุงรักษาโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 7(3): 312–325.

[5] อัครวัฒน์ ใบกว้าง, เอกรินทร์ ทองอนุ, สุกิจ ขัดชอนใบ, สหรัฐ ถาวรรัตน์ และ ภาคภูมิ จำปีเรือง. (2568). “ผลกระทบของกระบวนการกดรีดผิวด้วยเซรามิกบอลที่มีต่อความแข็งผิวและความเค้นตกค้างในเหล็ก SKD11.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา 13(2): 26–40.

[6] Mac, T.-B., Luyen, T.-T., & Nguyen, D.-T. (2023). “Impact of High-Speed and Thermal-Assisted Machining on Tool Wear during Milling of SKD11 Steel.” Metals 13(5): 971. doi:10.3390/met13050971

[7] Trung, L.C., & Phuc, T.T. (2024). “Wear Mechanism of an AlCrN-Coated Solid Carbide Endmill Cutter during Milling of Tempered JIS SKD11 Steel.” Coatings 14(8): 923. doi:10.3390/coatings14080923

[8] Lu, C.-J., & Yeh, J.-W. (2023). “Improved Wear and Corrosion Resistance in TiC-Reinforced SUS304 Stainless Steel.” Journal of Composites Science 7(1): 34. doi:10.3390/jcs7010034

[9] Mateescu, A.O., et al. (2021). “Stainless Steel Surface Nitriding in Open Atmosphere Cold Plasma.” Materials 14(17): 4836. doi:10.3390/ma14174836

[10] Hosiyama, T., et al. (2025). “Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel Using Ti and Mo Metal Screens.” ISIJ International 65(1): 127–132. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-251

[11] ธีร์ เชาวนนทปัญญา, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ชัยวัฒน์ พีรทัตสุวรรณ. (2560). “การศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับใบมีดทางการเกษตร.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 6(2): 1–12.

[12] ณภัทร อินทนนท์, ศักดาฤทธิ์ สง่าลี, สิทธิพร สิทธิบุตร และ ประพันธ์ ยาวระ. (2565). “อิทธิพลของอุณหภูมิอบคืนตัวที่มีต่ออายุการใช้งานของมีดตัดโคนอ้อย.” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 15(2): 45–56.

[13] สมศักดิ์ ประเสริฐสุข. (2556). การศึกษาและการพัฒนาวัสดุใบมีดตัด. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

[14] กรมวิชาการเกษตร. (2564). มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

[15] ASTM International. (2023). ASTM G99-23: Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[16] วิริยากร ธรรมสอน. (2562). คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304. เอกสารประกอบการสอน วิชาวัสดุวิศวกรรม. ตาก:

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก.

[17] ลักษิกา อยู่สุวรรณ. (2563). การวิเคราะห์ความเค้นและค่าความปลอดภัยของจุดยึดด้านล่างของกระบอกไฮดรอลิกส์. รายงานการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม. กรุงเทพฯ.

[18] Fang, L., et al. (2022). “Movement Patterns of Abrasive Particles in Three-Body Abrasion.” J. Bio-Tribo-Corrosion 8(1): 28. doi:10.1007/s40735-022-00628-8.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบแผงอินฟาเรด

Development and Improvement of an Infrared Panel Hot Air Dryer.

ไชยวัฒน์ มัชฌมะบุระ[1], วริศา ดวงโพธิ์ศรี[1], เดชาวัต มั่นกลาง[2],
ประสิทธิ โสภา[2],ประยูร จอมเหล้าพีรติกุล[2], ภูชิสส์ ตันวาณิชกุล[2],
อาภาภรณ์ จอมเหล้าพีรติกุล[2]

[1] นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
[2] อาจารย์สาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: E-mail:chatree.ma@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์:0900254459

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบทำความร้อนของเครื่องอบลมร้อนแบบแผงรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตปลานิลแดดเดียว เพื่อแก้ไขปัญหาจากกรรมวิธีการตากแดดธรรมชาติแบบดั้งเดิมที่ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำล่าช้า เกิดการสะสมของจุลินทรีย์ เนื้อปลาสูญเสียความยืดหยุ่น เนื้อสัมผัสเละ เกิดกลิ่นคาวและกลิ่นหืนจากการเกิดออกซิเดชัน ตลอดจนมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของฝุ่นละอองและแมลงพาหะ คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบทำความร้อนด้วยแก๊สแบบสองทิศทาง โดยติดตั้งแผงอินฟราเรดที่ด้านล่างให้ความร้อนกระจายตัวขึ้นผ่านแผ่นแพลทและติดตั้งที่ด้านข้างของตัวเครื่องเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยความชื้นออกจากเนื้อปลาอย่างทั่วถึง พร้อมทั้งติดตั้งระบบพัดลมระบายความชื้นอัตโนมัติที่เริ่มทำงานตามระดับอุณหภูมิและความชื้นที่สะสมในห้องอบ เพื่อป้องกันสภาวะอบอ้าว จากผลการทดสอบการทำงานของระบบในการแปรรูปปลานิลแดดเดียวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าสามารถลดมวลเนื้อปลาจาก 4.19 ± 0.44 g เหลือ 2.43 ± 0.09 g และลดความชื้นจากร้อยละ 74.20 ± 1.35 ลงมาอยู่ที่ร้อยละ 55.18 ± 1.12 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความชื้นของปลานิลแดดเดียว (ร้อยละ 50–60) ค่า A_w ลดลงสู่ระดับปลอดภัยที่ 0.78 ± 0.02 ค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 ± 0.02 kg/cm^2 ทำให้เนื้อปลาเหนียวนุ่มคงรูป และคงคุณภาพสีที่ดี ($L^* = +27.80 \pm 0.82$, $a^* = +16.10 \pm 0.48$, $b^* = +4.10 \pm 0.27$) โดยไม่เกิดการไหม้เกรียมหรือคล้ำเสีย

***คำสำคัญ**: ลักษณะทางกายภาพ, เนื้อปลานิล,* ค่าความชื้น

Abstract

This research aimed to design and develop a heating system for a combined hot-air and infrared radiation dryer for semi-dried Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) production, specifically addressing the critical limitations of traditional open-sun drying. Conventional sun drying suffers from uncontrollable environmental factors, slow and uneven drying rates, microbial proliferation, tissue softening, rancidity,

and high contamination risks from dust and insect vectors. To overcome these issues, a dual-direction gas infrared heating system was developed, featuring bottom heating conducted through a heat-transfer plate combined with lateral infrared panels to maximize the geometric view factor and enhance overall moisture evaporation efficiency. Additionally, an automated moisture exhaust fan was integrated to operate in accordance with chamber temperature and relative humidity, effectively preventing internal steaming conditions. Performance evaluation during drying at $60°C$ for 4 hours demonstrated that the system successfully reduced the average fillet mass from 4.19 ± 0.44 g to 2.43 ± 0.09 g and lowered the moisture content from $74.20 \pm 1.35\%$ to $55.18 \pm 1.12\%$, conforming to the standard moisture range for semi-dried fish (50–60%). The water activity (A_w) decreased to a safe level of 0.78 ± 0.02, the firmness increased to 0.75 ± 0.02 kg/cm^2 providing a firm and elastic texture, and optimal color attributes were maintained without thermal darkening ($L^* = +27.80 \pm 0.82$, $a^* = +16.10 \pm 0.48$, $b^* = +4.10 \pm 0.27$).

Keywords: Physical characteristics, Nile tilapia fillet, Dry-basis moisture content

1.บทนำ

การอบแห้ง เป็นการกำจัดความชื้นออกด้วยวิธีทางความร้อน โดยการให้ความร้อน เพื่อการระเหยความชื้นออกสู่ตัวกลางซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศร้อนและแห้ง โดยอากาศดังกล่าว นอกจากจะเป็นแหล่งความร้อนเพื่อการระเหยแล้ว ยังทำหน้าที่พาความชื้นจากการระเหยออกจากห้องอบแห้งด้วยวิธีการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรจะทำให้ผลผลิตทางการเกษตร นั้นเก็บรักษาได้ยาว นานขึ้น และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตนั้นๆ ซึ่งได้รับคามนิยมมากขึ้นในกระบวนการอบแห้งทั้งในภาคอุตสาหกรรมขนาดเล็กและในอุตสาหกรรมขนาดกลางรวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่ง เมื่อมีการอบ แห้งจะมี การระเหยของน้ำที่ออกมาจากผลผลิตทางการเกษตร เรียกว่า ความชื้น ขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิตทางการเกษตรว่าจะมีปริมาณน้ำภายในผลผลิตมากน้อยเพียงใดในกระบวนการผลิตทางการเกษตรการอบแห้ง ขั้นตอนการอบแห้งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผลิต ภัณฑ์อบแห้ง การอบแห้งชั้นบางเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการผลิตผลผลิตทางการเกษตรเพราะมีราคาและค่าบำรุงรักษาเครื่องค่อนข้างต่ำ และใช้เวลาในการอบแห้งน้อย โดยการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบถาดจะอาศัยลมร้อนจากแหล่งความร้อนซึ่งอาจจะเป็นก๊าซหุงต้ม หรือไฟฟ้าโดยจะไหลผ่านอาหารที่วางเป็นชั้นในชั้นของถาดจะมีรู มีระบบบังคับทิศทางการไหลของลมร้อนภายในเครื่องอบแห้ง โดยใช้แผ่นเหล็กกั้นเพื่อให้ลมร้อนไหลอย่างสม่ำเสมอ และทั่วถึงทุกส่วน (รุ่งศิริ อรุณพานิชเลิศ, 2554)

การแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) เป็นกลไกที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (zero absolute temperature) โดยรังสีอินฟราเรด (infrared) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของรังสีความร้อน (thermal radiation) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 μm ถึง 100 μm ผู้ค้นพบรังสีอินฟราเรด คือ นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir William Herschel จากการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึม ซึ่งรังสีอินฟราเรดนี้อยู่ในช่วงคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของแสงสี แดง มนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นแต่สามารถรู้สึกถึงความร้อนได้

จากการศึกษางานวิจัยเครื่องอบแห้งลมร้อนผลผลิตทางการเกษตร ของนางสาวมาริษา คำทุย และนางสาววินิดา คุ้มไพทูลย์ ปี พ.ศ. 2562 ได้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชัน พบว่าเครื่องอบแห้งมีแผงอิฟาเรดเพียงจุดเดียว และอุณหภูมิภายในตู้ไม่สเถียรภาพ ดังนั้น คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตู้อบลมร้อนเพื่อพัฒนาระบบความร้อนด้วยแก๊สแบบแผงอินฟราเรดเพิ่มเป็นสองจุดจากมีเพียงจุดเดียวด้านล่างด้านล่างเข้าไปให้เป็นสองจุดเพื่อการเพิ่มประสิทธิ ภาพการระเหยความชื้นออกมาจากวัสดุให้เร็วขึ้นและการระบายความชื้นออกจากตู้อบเมื่อสภาวะอากาศภายในเข้าสู่สมดุลด้วยพัดลมระบายความชื้นควบคุมได้แบบอัตโนมัติ หลักการทำงาสนของตู้อบ คือเมื่อนำวัสดุเข้าตู้อบพัดลมจะไม่ทำงาน ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงที่คงที่ที่กำหนดไว้และความชื้นของวัสดุลดลง ความชื้นในอากาสเพิ่มขึ้นพัดลมจะเริ่มทำงานจากมากไปน้อย เมื่ออุณหภูมิคงที่ความชื้นในวัสดุและความชื้นในอากาศคงที่เพิ่มขึ้นแต่งยังไม่ถึงความชื้นที่กำหนดทั้งนี้ความเร็วลมจะไม่ส่งผลต่อการเผาไหม้ที่แผงอินฟราเรด

หลักการคือปริมาณพลังงานรังสีความร้อนที่วัตถุเป้าหมาย (เช่น อาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบ) จะได้รับจากแหล่งกำเนิดความร้อน (แผงอินฟราเรด) ขึ้นอยู่กับมุมมองและพื้นที่หน้าตัดที่เผชิญหน้ากันโดยตรง (Geometric orientation) เดิมมีแผงรังสีเฉพาะด้านข้างรังสีอินฟราเรดจะตกกระทบผลิตภัณฑ์หลักๆ แค่ด้านซ้าย ทำให้พื้นที่ส่วนล่างของผลิตภัณฑ์ไม่ได้รับรังสีโดยตรง (เกิดมุมอับหรือเงารังสี) การเพิ่มแผงอินฟราเรดที่ด้านล่างเป็นการเพิ่มค่า View Factor ทำให้รังสีสามารถตกกระทบผิวสัมผัสของวัตถุได้ครอบคลุมและทั่วถึงมากขึ้น (Total Surface Exposure)

ปรับปรุงตู้อบลมร้อนโดยการเพิ่มแผงแผ่รังสีอินฟราเรดที่บริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง (เพิ่มเติมจากเดิมที่มีเฉพาะด้านข้าง) มีวัตถุประสงค์เพื่อ เพิ่มค่าปัจจัยทัศนียภาพ (View Factor) ระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยลดมุมอับของรังสีความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้รับฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (Net Heat Flux) ที่สูงขึ้นและครอบคลุมทุกพื้นผิว นอกจากนี้ การจัดวางแผงรังสีในลักษณะล้อมรอบ (ด้านข้างและด้านล่าง) ยังช่วยส่งเสริม ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Thermal Uniformity) ภายในห้องอบ ช่วยเร่งกลไกการระเหยของความชื้น (Drying Kinetics) และทำงานร่วมกับระบบลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบลดลงและประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น

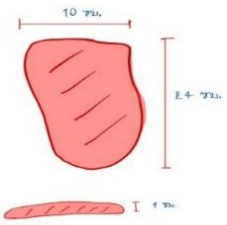
2. วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการอบแห้ง

2) เพื่อออกแบบตู้อบลมร้อน ระบบควบคุมแก๊สหุงต้มแบบแผงอินฟราเรด

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบแผงอินฟราเรดนี้ใช้ปลานิลมาทำการทดสอบครั้งนี้ การศึกษาลักษณะทางกายภาพของปลาเพื่อพัฒนา และออกแบบระบบทำความร้อนให้ตัวเครื่อง ซึ่งประกอบด้วย



1) ชั่งน้ำหนัก วัดค่าความกว้าง ความยาวของขนาดปลาที่จะใช้ในการทำการทดลอง โดยจะหั่นปลาให้ได้ขนาด กว้าง 10 ซม. ยาว 24 ซม. และความหนาของเนื้อ 1 ซม.

2) ค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC มาตรฐานเปียก มาตรฐานแห้ง ค่าสี ค่าความแน่นเนื้อ และค่า Aw โดยการอบในเครื่องอบลมร้อนแบบแผงอินฟราเรดอบเป็น เวลา 5 ชม. โดยจะเริ่มจาก การเอาเนื้อเข้าอบจำนวน 10 ถาด และนำออกทุกชั่วโมงเป็นจำนวน

5 ครั้ง บันทึกข้อมูลแล้วนำค่าที่ได้จากการทำลองไปคำนวณ และนำเข้าอบอีกครั้ง ให้ครบเวลา 24 ชม. จึงนำออกมาหาค่าหลังการอบครบอีกครั้งและเพื่อให้ได้ค่าประมาณ ทำซ้ำ 3 ครั้งจึงได้ค่าเฉลี่ย ดังสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้นร้อยละของน้ำหนัก} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักของกระป๋อง, กรัม

W_2 = น้ำหนักของเนื้อ, กรัม

W_3 = น้ำหนักของกระป๋องและเนื้อ, กรัม

3.2 คุณลักษณะทางกายภาพ

1) เนื้อปลานิลสด (*Oreochromis niloticus*) แล่แบบฟิลเลต์ (Fillet) มีลักษณะทางสัณฐานเป็นแผ่นเนื้อหนาแบน ผิวหน้าเรียบเนียนและมีความชุ่มชื้นตามธรรมชาติ เนื้อส่วนใหญ่ปรากฏสีขาวนวลกึ่งโปร่งแสงอมชมพูเรื่อ โดยมีแถบกล้ามเนื้อส่วนเข้ม (Dark muscle) สีแดงอมน้ำตาลพาดผ่านตามแนวยาวบริเวณแกนกลางและแนวด้านข้างลำตัวอย่างเด่นชัด

โครงสร้างทางกายภาพและเนื้อสัมผัสมีความแน่นเนื้อ (Firmness) และความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง คืนตัวได้ทันทีโดยไม่ปรากฏรอยบุ๋มตกค้างเมื่อได้รับแรงกด มวลกล้ามเนื้อแต่ละมัด (Myotomes) เรียงตัวเป็นระเบียบและถูกยึดเกาะกันอย่างเหนียวแน่นด้วยเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Myocommata) โดยไม่พบการหลุดลุ่ยหรือฉีกขาดของเส้นใยกล้ามเนื้อ

นอกจากนี้ เนื้อปลายังมีความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water Holding Capacity) สูง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำอิสระ (Drip loss) ต่ำ ไม่มีเมือกเหนียวข้นหรือความลื่นผิดปกติปกคลุมผิวหน้า และคงกลิ่นเฉพาะตัวที่เป็นกลิ่นคาวสดตามธรรมชาติของสัตว์น้ำจืด ปราศจากกลิ่นเหม็นเปรี้ยวหรือกลิ่นแอมโมเนียจากการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์และการสลายตัวของสารประกอบไนโตรเจน

3) เชื้อเพลิงที่ใช้ จะเป็นแก๊สหุงต้มทั่วไปที่ใช้ในครัวเรือน (*LPG*) สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบได้ ดังสมการนี้

$$\eta_{th} = (\frac{Q_{useful}}{Q_{input}}) \times 100$$

เมื่อ η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง (เปอร์เซ็นต์, %)

Q_{useful} = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ (กิโลจูล, kJ หรือ เมกะจูล, MJ)

Q_{input} = พลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบเครื่องอบแห้ง (kJ หรือ MJ)

4. ผลการวิจัยและอภิปลายผล

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของปลานิล ซึ่งประกอบไปด้วย วัดขนาดความกว้าง ความยาว ความหนา น้ำหนัก ค่าสี ค่าa_w ค่าความแน่นเนื้อ และค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC

ตารางที่ 1 เนื้อปลานิลก่อนเข้าอบ

รายการ	ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± SD)
มวลเนื้อปลานิลสดปรุงแดดเดียว (g)	4.19^{a} ± 0.44
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Aw)	0.90^{a} ± 0.02
ค่าสี: ความสว่าง (L*)	26.87^{a} ± 6.46
ค่าสี: ค่าสีแดง (a*)	15.58^{b} ± 3.23
ค่าสี: ค่าสีเหลือง (b*)	4.18^{b} ± 2.47
ค่าความแน่นเนื้อปลาผลิต (kg/cm²)	0.64^{c} ± 0.09

ตารางที่ 2 ปลานิลอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-4 ชม. เพื่อหาเวลาในการทำปลานิลแดดเดียว

ชั่วโมงในการอบ	มวลเนื้อปลานิลอบปรุงแดดเดียว เฉลี่ย (g)	มวลเนื้อปลานิลอบพร้อมลาด เฉลี่ย (g)	ค่า Aw	ค่าสี			ค่าความแน่นเนื้อ (kg/cm²)	ความชื้น (%)
				L*	a*	b*		
0	4.19 ± 0.44	12.54 ± 0.45	0.90 ± 0.02	+26.87 ± 6.46	+15.58 ± 3.23	+4.18 ± 2.47	0.64 ± 0.09	74.20 ± 1.35
1	3.65 ± 0.12	12.00 ± 0.15	0.87 ± 0.02	+32.40 ± 0.85	+18.50 ± 0.65	+3.60 ± 0.35	0.60 ± 0.03	68.25 ± 1.15
2	3.18 ± 0.10	11.53 ± 0.12	0.84 ± 0.01	+31.20 ± 0.72	+17.40 ± 0.52	+3.90 ± 0.28	0.64 ± 0.02	63.40 ± 0.98
3	2.75 ± 0.08	11.10 ± 0.11	0.81 ± 0.02	+29.00 ± 0.68	+16.60 ± 0.45	+4.10 ± 0.24	0.69 ± 0.03	59.80 ± 0.85
4	2.43 ± 0.09	10.78 ± 0.10	0.78 ± 0.02	+27.80 ± 0.82	+16.10 ± 0.48	+4.10 ± 0.27	0.75 ± 0.02	55.18 ± 1.12

จากตารางผลการทดลองที่ 2 พบว่า ระยะเวลาในการอบมีความสัมพันธ์แบบแปรผันกับความชื้นและ ค่า a_w โดยการอบเวลาที่นานขึ้นจะช่วยลดความชื้นและค่า a_w ได้ดีขึ้น ความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้เนื้อปลาสูญเสียน้ำหนัก

โดยมีรายละเอียดและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังนี้ กระบวนการอบแห้งเนื้อปลานิลปรุงรสเพื่อผลิตเป็นปลานิลแดดเดียวตลอดช่วงระยะเวลา 0 ถึง 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นเนื้อส่งผลให้มวลเฉลี่ยของเนื้อปลาค่อยๆ ลดลงจาก 4.19 กรัม เหลือเพียง 2.43 กรัม ในชั่วโมงที่ 4 ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้นที่ลดระดับลงจากร้อยละ 74.20 สู่ร้อยละ 55.18 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (A_w) ลดต่ำลงจาก 0.90 มาอยู่ที่ 0.78 ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรคและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

ขณะเดียวกัน การระเหยของน้ำยังส่งผลให้โครงสร้างเส้นใยโปรตีนในเนื้อปลาประสานตัวกันแน่นขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยสะท้อนผ่านค่าความแน่นเนื้อที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.64 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สู่ระดับ 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำให้เนื้อปลามีความคงรูปและให้สัมผัสเหนียวนุ่มที่พึงประสงค์ ในส่วนของคุณภาพด้านสี พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ปรับตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 26.87 เป็น 27.80 ขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ยังคงรักษาระดับความสดใหม่ไว้ได้ดีโดยไม่เกิดการไหม้เกรียมหรือเปลี่ยนสีไปในทางลบ

จากการประเมินคุณลักษณะทั้งหมด ชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาการอบที่ 4 ชั่วโมง ถือเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแปรรูปปลานิลแดดเดียว เนื่องจากให้ระดับความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์กึ่งแห้ง ควบคู่ไปกับการรักษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและสีสันของเนื้อปลาได้อย่างลงตัว

ตารางที่ 3 ปลานิลอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชม.

กลุ่มตัวอย่าง	มวลเนื้อปลานิลอบปรุงแดดเดียว เฉลี่ย (g)	มวลเนื้อปลานิลอบพร้อมาด เฉลี่ย (g)	ค่า Aw	ค่าสี			ค่าความแน่นเนื้อ (kg/cm²)	ความชื้น (%)
				L*	a*	b*		
1	2.38 ± 0.08	10.83 ± 0.12	0.78 ± 0.02	+26.5 ± 0.81	+8.3 ± 0.42	+4.6 ± 0.35	0.75 ± 0.03	56.42 ± 0.85
2	2.45 ± 0.07	10.90 ± 0.09	0.77 ± 0.01	+27.2 ± 0.65	+7.9 ± 0.29	+3.8 ± 0.18	0.76 ± 0.02	54.80 ± 0.72
3	2.52 ± 0.09	10.97 ± 0.11	0.79 ± 0.02	+28.4 ± 1.05	+9.1 ± 0.48	+4.2 ± 0.22	0.74 ± 0.04	58.15 ± 0.94
4	2.32 ± 0.06	10.77 ± 0.08	0.76 ± 0.01	+26.9 ± 0.74	+8.0 ± 0.38	+4.0 ± 0.26	0.78 ± 0.03	53.25 ± 0.65
5	2.40 ± 0.08	10.85 ± 0.10	0.77 ± 0.02	+27.8 ± 0.93	+7.7 ± 0.31	+4.5 ± 0.30	0.77 ± 0.02	55.60 ± 0.80
ค่าเฉลี่ย	2.41 ± 0.07	10.86 ± 0.07	0.77 ± 0.01	+27.36 ± 0.74	+8.20 ± 0.55	+4.22 ± 0.33	0.76 ± 0.02	55.64 ± 1.83

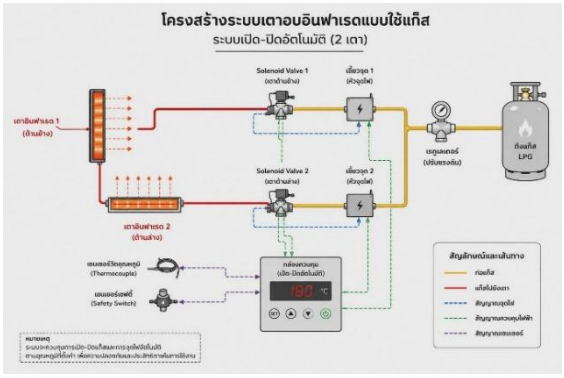
จากผลการทดลองตารางที่ 3 ผลการทดสอบเนื้อปลานิลปรุงรสแดดเดียวทั้ง 5 ซ้ำ แสดงคุณภาพที่มีความสม่ำเสมอและเหมาะสม โดยมีมวลเนื้อปลา

เฉลี่ย 2.41 ± 0.07 g (มวลรวมถาด 10.86 ± 0.07 g) ปริมาณความชื้นลดลงมาอยู่ที่ 55.64 ± 1.83% ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานของปลาแดดเดียว (50–60%) สอดคล้องกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี (A_w) ที่ 0.77 ± 0.01 ซึ่งปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ด้านเนื้อสัมผัสมีค่าความแน่นเนื้อที่ 0.76 ± 0.02 kg/cm² พร้อมทั้งคงสภาพสีที่ดี ($L^* = +27.36 \pm 0.74$, $a^* = +8.20 \pm 0.55$, $b^* = +4.22 \pm 0.33$) ไม่ไหม้เกรียมหรือคล้ำเสีย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเนื้อปลานิล พบปัญหาการตากแดดตามธรรมชาติแบบดั้งเดิม คือการไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อม สภาพอากาศ ความร้อน และความเข้มแสงแดดได้ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำออกจากเนื้อปลาเป็นไปอย่างล่าช้าและไม่สม่ำเสมอ ความชื้นที่ตกค้างสะสมอยู่ภายในชิ้นเนื้อเป็นเวลานาน กลายเป็นสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เนื้อปลาสูญเสียความยืดหยุ่น เนื้อสัมผัสเละ ไม่เหนียวนุ่มคงรูปตามที่ต้องการ อีกทั้งการสัมผัสกับอากาศและแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานานยังเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้สีของเนื้อปลาซีดขุ่นหรือคล้ำเสีย เกิดกลิ่นคาวและกลิ่นหืนรุนแรง รวมถึงมีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนของฝุ่นละออง เชื้อรา และแมลงพาหะนำโรค

ดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบการทำความร้อนเครื่องอบลมร้อนแบบแผงรังสีอินฟราเรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความชื้นภายในตัวเครื่อง โดยการออกแบบระบบจุดแก๊สสองทาง คือ ด้านล่างเพื่อให้ความร้อนกระจายตัวขึ้นด้านบนด้วยการถ่ายเทความร้อนผ่านแพลท และด้างข้างของตัวเครื่องเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยความชื้นในอากาศ เมื่อเคลื่อนออกจากวัสดุ พร้อมทั้งติดตั้งระบบพัดลมระบายความชื้นเพื่อระบายความชื้นที่อยู่ภายในตัวเครื่อง ด้วยพัดลมระบบพัดลมระบายความชื้นควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ คือ เมื่อนำวัสดุเข้าตู้อบพัดลมจะยังไม่ทำงาน อุณหภูมิและความชื้นแปรผันตามกัน ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงคงที่ที่ได้กำหนดไว้และความชื้นวัสดุลดลง ความชื้นอากาศเพิ่มขึ้น พัดลมจึงจะเริ่มทำงานจากมากไปน้อย เมื่ออุณหภูมิคงที่ความชื้นในวัสดุคงที่และความชื้นในอากาศคงที่



ผลการทดสอบการทำงานของระบบในการแปรรูปปลานิลแดดเดียวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าสามารถลดมวลเนื้อปลาจาก 4.19 ± 0.44 g เหลือ 2.43 ± 0.09 g และลดความชื้นจากร้อยละ 74.20 ± 1.35 ลงมาอยู่ที่ร้อยละ 55.18 ± 1.12 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความชื้นของปลานิลแดดเดียว (ร้อยละ 50–60) ค่า A_w ลดลงสู่ระดับปลอดภัยที่ 0.78 ± 0.02 ค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 ± 0.02 kg/cm^2 ทำให้เนื้อปลาเหนียวนุ่มคงรูป และคงคุณภาพสีที่ดี ($L^* = +27.80 \pm 0.82$, $a^* = +16.10 \pm 0.48$, $b^* = +4.10 \pm 0.27$) โดยไม่เกิดการไหม้เกรียมหรือคล้ำเสีย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ว่าที่ร้อยตรีเดชาวัต มั่นกลาง ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ และได้รับการสนับสนุน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น และ ความเห็นในรายงานผลโครงการเป็นของผู้รับการสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาเอื้อเฟื้อสถานที่ ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] AOAC Official Methods for Moisture Analysis Mettler-Toledo, 2020. สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2569

[2] จุฑารัตน์ เอื้อปัยจะศิลา, 2559 การถ่ายเทความร้อน. (ออนไลน์) สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม

[3] Determination of Moisture Content in Agricultural Products Brooker et al., 1992. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2569

[4] การหาปริมาณความชื้นของผลิตผลทางการเกษตรและนิยามตัวแปร ศรัญญา และคณะ, 2563. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2569

[5] งานวิจัยเครื่องอบแห้งลมร้อนผลผลิตทางการเกษตร ของนางสาวมาริษา คำทุย และนางสาววินิดา คุ้มไพทูลย์ ปี พ.ศ. 2562 สืบค้นเมื่อ 23 พฤษภาคม 2569

[6] Physical and Texture Properties of Fish Meat Sitthikul, 2021. สืบค้นเมื่อ 23 พฤษภาคม 2569

[7] Infrared radiation / การแผ่รังสีอินฟราเรด - Food Wiki | Food Network Solution นวภัทรา, 2555. สืบค้นเมื่อ 14 กรกฎาคม 2569

[8] สูตรคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งและนิยามตัวแปร สมชาติ, 2545. สืบค้นเมื่อ 14 กรกฎาคม 2569

[9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2558). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ปลาน้ำจืดแดดเดียว (มผช. 299/2558). กระทรวงอุตสาหกรรม. สืบค้นเมื่อ 14 กรกฎาคม 2569

การประเมินสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวสองชั้นและสามชั้นภายใต้การควบคุมอากาศปฐมภูมิสำหรับงานหุงต้ม

PERFORMANCE EVALUATION OF POROUS MEDIA BURNERS WITH SINGLE- DOUBLE- AND TRIPLE LAYER STRUCTURES UNDER CONTROLLED PRIMARY AIR FOR COOKING APPLICATIONS

ปฐมพงศ์ เกษตรสิงห์[1], กานต์ กอมณี[2], จักราวุธ หอมมาลา[1], ทรงสุภา พุ่มชุมพล[1], ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์[1], วิระพันธ์ สีหานาม[1], อริสรา อิสระ[1], อำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1] และ อภินันต์ นามเขต[1,*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85 ถนนสถลมาร์ค ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[2] สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
214 หมู่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000
*ผู้ติดต่อ: E-mail: apinunt.n@ubu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 045-353-309, เบอร์โทรสาร: 045-353-308

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างวัสดุพรุนแบบหลายชั้นและการควบคุมอากาศปฐมภูมิต่อสมรรถนะของหัวเผาแก๊สหุงต้ม โดยเปรียบเทียบหัวเผาวัสดุพรุนแบบเม็ดอะลูมินาอัดแน่นชนิดชั้นเดียว สองชั้น และสามชั้น การทดลองดำเนินการตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 8 kW และปรับมุมช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° พร้อมตรวจวัดการกระจายอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ CO และ NOx ผลการทดลองพบว่า หัวเผาแบบสามชั้นให้เปลวไฟภายในชั้นวัสดุพรุนที่มีเสถียรภาพสูงสุด โดยมีอุณหภูมิสูงสุด 828.90°C ที่มุม 120° และให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 57.67% รองลงมาคือแบบสองชั้นและชั้นเดียว ซึ่งมีค่า 56.63% และ 54.58% ตามลำดับ โดยมุม 30° ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเหมาะสมที่สุด หัวเผาแบบสองชั้นและสามชั้นปลดปล่อย CO ประมาณ 101–241 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 1,000 ppm ขณะที่แบบชั้นเดียวมีค่า 431–1,830 ppm เนื่องจากเกิดการเป่าดับและการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ ส่วน NOx มีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมช่องทางเข้าอากาศเพิ่มขึ้น ผลการศึกษายืนยันว่าโครงสร้างวัสดุพรุนแบบไล่ระดับสามชั้นสามารถเพิ่มเสถียรภาพของเปลวไฟ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และคุณภาพการเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องใช้ระบบจ่ายอากาศเสริม

คำสำคัญ: หัวเผาวัสดุพรุน, เสถียรภาพของเปลวไฟ, การเกิดมลพิษ, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Abstract

This study investigated the effects of multilayer porous structures and primary air control on the performance of LPG cooking burners. Single, double and triple layer packed bed burners filled with alumina pellets were experimentally compared. Tests were conducted according to DIN EN 203-2 at a fixed firing rate of 8 kW and primary air inlet angles of 0°, 30°, 60°, 90° and 120°. Flame temperature distribution, thermal efficiency and emissions (CO and NOx) were evaluated. The triple layer burner produced the most stable embedded flame, reaching a maximum temperature of 828.90°C at 120°. Its maximum thermal efficiency was 57.67%, compared with 56.63% and 54.58% for the double and single layer burners, respectively, while the optimum thermal efficiency occurred at 30°. CO emissions from the double and triple layer burners were approximately 101–241 ppm and remained below the 1,000 ppm criterion, whereas the single layer burner emitted 431–1,830 ppm because of flame blow-off and

flashback. NOx emissions tended to decrease as the primary air inlet angle increased. These findings demonstrate that graded triple layer packing improves flame stability, thermal efficiency and combustion quality without requiring an auxiliary air supply system.

Keywords: Porous media burner, Flame stability, Pollutant emissions, Thermal efficiency.

1. บทนำ

พลังงานที่ใช้ในการหุงต้มในภาคครัวเรือนยังคงเป็นสัดส่วนที่สำคัญของการใช้เชื้อเพลิงโดยรวม โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ซึ่งมีการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG) อย่างแพร่หลาย แม้ว่า LPG จะถูกจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีความสะอาดกว่าชนิดอื่น แต่เตาแก๊สหุงต้มแบบดั้งเดิมในปัจจุบันยังคงประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำ การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ และการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการปลดปล่อยมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนควบคู่ไปกับการลดการปลดปล่อยมลพิษ โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบหุงต้มเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในแนวทางที่มีศักยภาพสูงคือ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุน ซึ่งมีจุดเด่นในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับภายในระบบ ช่วยเสถียรภาพของเปลวไฟ และขยายขอบเขตการทำงานของระบบเผาไหม้ การบูรณาการวัสดุพรุนเข้ากับหัวเผาแก๊สช่วยส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเข้มข้นระหว่างของแข็งและแก๊ส ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น แม้ในสภาวะส่วนผสมบาง ทั้งยังช่วยลดการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้ งานวิจัยก่อนหน้ารายงานว่าวัสดุพรุนสามารถช่วยลดความผันผวนของเปลวไฟ ลดอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ และลดการปลดปล่อยมลพิษ เช่น CO และ NOx ผ่านกลไกการดักจับเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการนำและการแผ่รังสีภายในโครงสร้างพรุน

วัสดุพรุนหลากหลายชนิด เช่น โฟมเซรามิก และเม็ดอะลูมินา ได้รับการนำมาศึกษาเพื่อใช้ในระบบการเผาไหม้ โดยหัวเผาวัสดุพรุนแบบอัดแน่น (Packed bed) ด้วยเม็ดอะลูมินา ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกล ทนต่ออุณหภูมิสูง และสามารถผลิตได้ง่าย งานวิจัยเชิงทดลองและเชิงตัวเลขจำนวนมากแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุพรุนในหัวเผาช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเปลวไฟและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการใช้วัสดุพรุนที่มีสมบัติคงที่ตลอดทั้งชั้นการเผาไหม้ โดยเฉพาะการจัดเรียงแบบชั้นเดียวที่มีค่าความพรุนและขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ

จากข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพรุนแบบอัดแน่นที่มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบชั้นเดียว, แบบสองชั้น และแบบสามชั้น ภายใต้การควบคุมการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิ เม็ดอะลูมินาถูกเลือกใช้เป็นวัสดุพรุนเนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและเหมาะสมต่อการใช้งานในเตาแก๊สหุงต้ม การทดลองดำเนินการตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 8 กิโลวัตต์ โดยศึกษาผลของการปรับมุมองศาช่องทางเข้าของอากาศปฐมภูมิในช่วง 0 ถึง 120 องศา เพื่อปรับขนาดช่องทางเข้าของอากาศส่วนแรก ที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ

สมมติฐานหลักของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบหัวเผาวัสดุพรุนแบบสามชั้นที่เหมาะสมร่วมกับการควบคุมการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิอย่างเหมาะสม จะสามารถเพิ่มความสมบูรณ์ของการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งลดการปลดปล่อยมลพิษภายใต้สภาวะการทำงานแบบเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง ผลการศึกษาที่ได้

คาดว่าจะช่วยเพิ่มพูนความเข้าใจเชิงพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมของเปลวไฟในวัสดุพรุนแบบหลายชั้น และเป็นแนวทางเชิงวิศวกรรมสำหรับการพัฒนาหัวเผาแก๊สหุงต้มที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถประยุกต์ใช้กับระบบเตาแก๊สที่มีอยู่เดิมได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลัก

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการเผาไหม้ในวัสดุพรุนเริ่มได้รับความสนใจอย่างจริงจังตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1990 โดยมีเป้าหมายหลักในการอธิบายกลไกพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนและเสถียรภาพของเปลวไฟภายในตัวกลางพรุน Howell et al. [1] รายงานว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเข้มข้นระหว่างแก๊สและวัสดุพรุนช่วยให้เปลวไฟสามารถคงอยู่ได้แม้ในสภาวะส่วนผสมบาง และช่วยลดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ต่อมา Oliveira and Kaviany [2] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีที่แสดงให้เห็นบทบาทร่วมกันของการนำและการแผ่รังสีความร้อนภายในวัสดุพรุนต่อการตรึงตำแหน่งของเปลวไฟ งานของ Mujeebu et al. [3] และ Weclas [4] ได้ขยายกรอบแนวคิดดังกล่าวไปสู่การอธิบายเชิงระบบ โดยชี้ให้เห็นว่าการหมุนเวียนความร้อนภายในโครงสร้างวัสดุพรุนเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการเผาไหม้และลดการปลดปล่อยมลพิษ ขณะที่ Kamal and Mohamad [5] ได้ทบทวนงานวิจัยในช่วงแรกอย่างเป็นระบบและสรุปว่า สมบัติการกักเก็บและถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุพรุนเป็นปัจจัยกำหนดขอบเขตการทำงานของเปลวไฟ ทั้งในแง่ของการเกิดการเป่าดับ (blow-off) และการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ (flashback)

จากพื้นฐานทางทฤษฎีดังกล่าว ได้มีการนำวัสดุพรุนหลากหลายชนิดมาประยุกต์ใช้กับหัวเผา เช่น โฟมเซรามิก ซิลิกอนคาร์ไบด์ และเม็ดอะลูมินา โดยหัวเผาวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างแบบเม็ดกลมอัดแน่นได้รับความนิยมเนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ต่อมา Herrera et al. [6] ศึกษาหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ใช้เม็ดอะลูมินา (Al_2O_3) แบบอัดแน่นและรายงานว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้เมื่อเทียบกับเตาแบบดั้งเดิม (CB) ในขณะที่ Pantangi et al. [7] และ Muthukumar and Shyamkumar [8] แสดงให้เห็นว่าการใช้หัวเผาวัสดุพรุนสำหรับครัวเรือนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดการปลดปล่อยมลพิษ CO อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยในระยะหลังเริ่มให้ความสนใจกับการจัดเรียงวัสดุพรุนแบบหลายชั้นหรือแบบไล่ระดับมากขึ้น โดย Hayashi et al. [9] รายงานว่าหัวเผาวัสดุพรุนแบบสองชั้นที่แยกบริเวณการอุ่น (preheating zone) และบริเวณการเผาไหม้ (combustion zone) สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและเสถียรภาพของเปลวไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทำนองเดียวกัน Liao et al. [10] แสดงให้เห็นว่ารูปแบบหน้าตัดและโครงสร้างของวัสดุพรุนมีผลต่อขอบเขตเสถียรภาพของการเผาไหม้

นอกเหนือจากโครงสร้างของวัสดุพรุนแล้ว การเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิยังเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพการผสมอากาศและเชื้อเพลิงและความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ งานวิจัยเชิง CFD และเชิงทดลองหลายชิ้น เช่น Matthujak et al. [11] และ Wichangarm et al. [12] รายงานว่าการปรับรูปแบบการไหลของอากาศ เช่น การสร้างการหมุนวน หรือการปรับขนาดของช่องอากาศ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดการใช้พลังงานได้ อย่างไรก็ตาม งานเหล่านี้ส่วนใหญ่ศึกษาในหัวเผาแบบไม่ใช้วัสดุพรุน สำหรับหัวเผาวัสดุพรุน Alrashidi et al. [13] แสดงให้เห็นว่าค่าความพรุนและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพของเปลวไฟในชั้นวัสดุพรุน แต่ยังไม่ได้พิจารณาผลของการปรับขนาดช่องทางเข้าของอากาศส่วนแรกภายใต้สภาวะการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเองซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน

ในด้านการปลดปล่อยมลพิษ งานวิจัยจำนวนมากชี้ว่า CO เป็นตัวชี้วัดสำคัญของความสมบูรณ์ในการเผาไหม้ Muthukumar and Shyamkumar [8] และ

Pantangi et al. [7] รายงานว่าหัวเผาวัสดุพรุนสามารถลด CO ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเตาแบบดั้งเดิม Liu et al. [14] เสริมว่าการออกแบบโครงสร้างวัสดุพรุนที่เหมาะสมสามารถขยายช่วงเสถียรภาพของการเผาไหม้และควบคุมระดับ CO ให้อยู่ในเกณฑ์ต่ำได้ภายใต้ช่วงการทำงานที่กว้าง อย่างไรก็ตาม การใช้งานจริงของเตาแก๊สสำหรับครัวเรือนยังมีจำกัด แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งรายงานสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุน แต่หลายการศึกษายังดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการโดยไม่อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบสำหรับเตาแก๊สหุงต้ม งานของ Pantangi et al. [7] และ Herrera et al. [6] ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการทดสอบตามมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน DIN EN 203-2 [15] เพื่อให้ผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบและนำไปประยุกต์ใช้จริงได้ อย่างไรก็ตาม ยังขาดการศึกษาที่ผสานการออกแบบวัสดุพรุนแบบหลายชั้น การควบคุมการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิ และการทดสอบภายใต้มาตรฐานเดียวกันอย่างครบถ้วน

จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า แม้พื้นฐานทางทฤษฎีของการเผาไหม้ในวัสดุพรุนและศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดการปลดปล่อยมลพิษจะได้รับการยืนยันอย่างชัดเจน แต่ยังคงมีช่องว่างขององค์ความรู้ (Research Gap) ในเชิงการประยุกต์ใช้กับเตาแก๊สหุงต้มมาตรฐาน โดยเฉพาะการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างหัวเผาวัสดุพรุนแบบชั้นเดียว (single layer) แบบสองชั้น (double layer) และแบบสามชั้น (triple layer) ซึ่งพิจารณาผลของการปรับขนาดช่องทางเข้าของอากาศส่วนแรกภายใต้สภาวะการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง และการทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [15] ช่องว่างดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันสำคัญของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาและประเมินหัวเผาที่มีศักยภาพในการให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและการปลดปล่อยมลพิษต่ำสำหรับการใช้งานจริงในระดับครัวเรือน

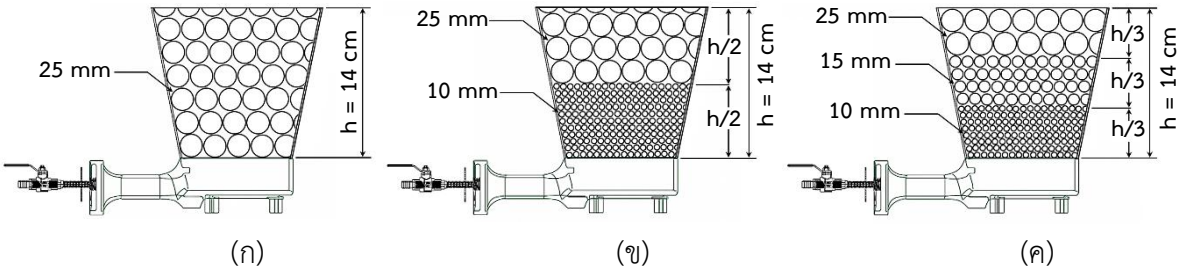
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อประเมินสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนสำหรับงานหุงต้มภายใต้สภาวะการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิด้วยตนเอง โดยมุ่งศึกษาผลของโครงสร้างวัสดุพรุนและระดับการควบคุมอากาศปฐมภูมิต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ เพื่อให้ผลการทดลองสะท้อนการใช้งานจริงของเตาแก๊สหุงต้ม การออกแบบการทดลองจึงกำหนดตัวแปรอิสระ ตัวแปรตาม และเงื่อนไขการทดสอบอย่างเป็นระบบ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1

หัวเผาที่ใช้ในการศึกษาถูกพัฒนาขึ้นโดยดัดแปลงจากเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป และออกแบบให้เป็นหัวเผาวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สและวัสดุพรุน โครงสร้างหัวเผาถูกแบ่งออกเป็นสามรูปแบบ ได้แก่ หัวเผาวัสดุพรุนแบบชั้นเดียว แบบสองชั้นและแบบสามชั้น ดังรูปที่ 1 โดยทั้งสามแบบมีขนาดทางเรขาคณิต อัตราการป้อนเชื้อเพลิง และสภาพการจ่ายอากาศเหมือนกันทุกประการ เพื่อให้การเปรียบเทียบผลสะท้อนอิทธิพลของโครงสร้างวัสดุพรุนโดยตรง หัวเผาแบบชั้นเดียวประกอบด้วยเม็ดอะลูมินาทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จัดเรียงแบบอัดแน่นตลอดความสูงของชั้นวัสดุพรุน ในขณะที่ แบบสองชั้นถูกออกแบบให้แบ่งวัสดุพรุนออกเป็นสองชั้นที่มีความสูงเท่ากัน โดยชั้นบนใช้เม็ดอะลูมินาขนาด 25 มิลลิเมตร และชั้นล่างขนาด 10 มิลลิเมตร และแบบสามชั้น วัสดุพรุนแบ่งออกเป็นสามชั้นที่มีความสูงเท่ากัน โดยชั้นบนใช้เม็ดอะลูมินาขนาด 25 มิลลิเมตร ชั้นกลางขนาด 15 มิลลิเมตร และชั้นล่างขนาด 10 มิลลิเมตร การจัดเรียงดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนและลักษณะการไหลภายในหัวเผาตามแนวแกน ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มการอุ่นล่วงหน้าของสารตั้งต้น และส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับภายในโครงสร้างวัสดุพรุนอย่างมีประสิทธิภาพ

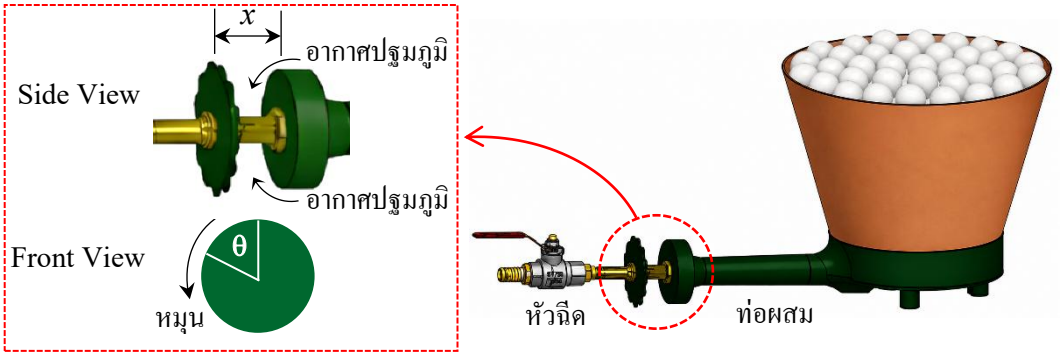
ตารางที่ 1 ตัวแปรและเงื่อนไขในการทดสอบ

หมวด	ตัวแปร	ค่า / ระดับ
ตัวแปรอิสระ	โครงสร้างหัวเผาวัสดุพรุน	ชั้นเดียว (Al_2O_3 ขนาด 25 mm)
		สองชั้น (บน 25 mm / ล่าง 10 mm)
		สามชั้น (บน 25 mm / กลาง 15 mm / ล่าง 10 mm)
	มุมองศาช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (θ)	0°, 30°, 60°, 90° และ 120°
ตัวแปรควบคุม	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR)	8 kW
	เชื้อเพลิง	LPG
	โหมดการจ่ายอากาศ	Natural draft
	มาตรฐานการทดสอบ	DIN EN 203-2
ตัวแปรตาม	การกระจายอุณหภูมิ	T
	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	η_{th}
	การปลดปล่อยมลพิษ	CO และ NOx (ppm, dry basis)



รูปที่ 1 โครงสร้างหัวเผาวัสดุพรุน (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น และ (ค) แบบสามชั้น

หลักการทำงานของหัวเผาเริ่มจากปล่อยก๊าซ LPG ผ่านหัวฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่อผสม ดังรูปที่ 2 โดยการไหลของเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงจะเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิจากบรรยากาศโดยรอบเข้าสู่ระบบตามหลักการการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง (Natural draft) ส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงจะไหลผ่านเข้าสู่ชั้นวัสดุพรุนและถูกจุดติดไฟภายในโครงสร้างวัสดุพรุน ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทไปยังเม็ดวัสดุพรุนและหมุนเวียนกลับไปยังบริเวณด้านล่างของเปลวไฟ ส่งผลให้สารตั้งต้นได้รับการอุ่นล่วงหน้าก่อนเข้าสู่บริเวณปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของการเผาไหม้และเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยเฉพาะภายใต้สภาวะการทำงานแบบส่วนผสมบางที่พบได้บ่อยในเตาแก๊สหุงต้ม การควบคุมปริมาณอากาศปฐมภูมิในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยปรับมุมองศาช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (θ) ที่บริเวณปากทางเข้าท่อผสม ดังรูปที่ 2 ซึ่งกำหนดค่าไว้ที่ 0, 30, 60, 90 และ 120 องศา การปรับมุม θ ส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าของอากาศ ซึ่งการเพิ่มมุม θ ทำให้ระยะช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (x) เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 2 ทำให้สามารถควบคุมระดับปริมาณอากาศส่วนแรก โดยไม่ต้องเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง วิธีการควบคุมอากาศในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรก (primary air) ต่อพฤติกรรมของการเผาไหม้ และเสถียรภาพของเปลวไฟได้อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง



รูปที่ 2 การปรับมุมองศาช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม θ และระยะ x ต่าง ๆ

ตัวแปร	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4	ระดับ 5
มุมองศาช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ, θ (องศา)	0	30	60	90	120
ระยะช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ, x (mm)	0	0.2	0.4	0.6	0.8

การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของหัวเผา ดำเนินการตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [15] โดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Boiling test) ดังรูปที่ 3 เพื่อให้ผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นและสะท้อนสมรรถนะการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ก่อนเริ่มการทดสอบจะทำการอุ่นหัวเผาจนเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นวางภาชนะต้มบนฐานวางหม้อและเติมน้ำตามปริมาณ 30.6 กิโลกรัม อุณหภูมิของน้ำถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และบันทึกค่าด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแบบต่อเนื่องตลอดช่วงการทดลอง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผา (η_{th}) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับกับพลังงานเคมีทั้งหมดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง ตามสมการที่ (1) สมการดังกล่าวสะท้อนหลักการพื้นฐานของการถ่ายเทพลังงานในกระบวนการหุงต้ม โดยพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับถูกพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำในช่วงการทดสอบ ขณะที่พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบถูกคำนวณจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ร่วมกับค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) ของเชื้อเพลิงและระยะเวลาการทดสอบ

$$\eta_{th} = \frac{m_{water} C_{p,water} \left(T_{water,f} - T_{water,i}\right)}{\dot{m}_{LPG} \times LHV \times t} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ

η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, (%)

m_{water} คือ มวลของน้ำ, (kg)

$C_{p,water}$ คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg.K)

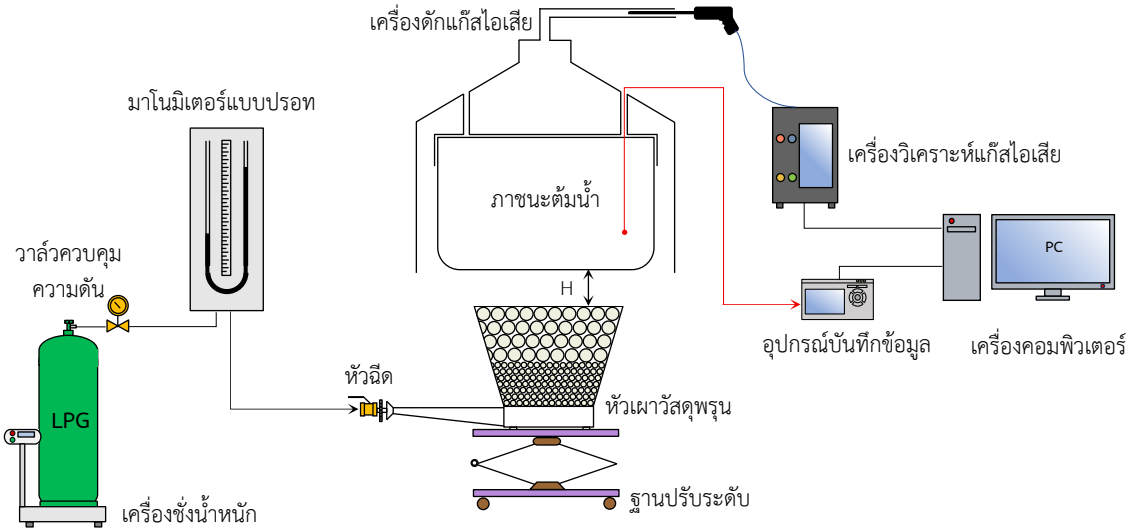
$T_{water,i}$ คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น, (K)

$T_{water,f}$ คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย, (K)

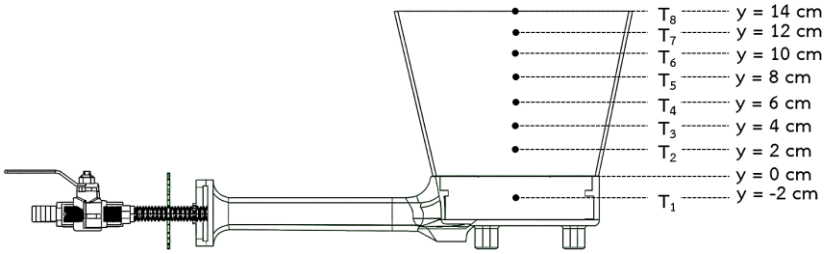
$\dot{m}_{LPG}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, (kJ/kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ, (s)



รูปที่ 3 แผนภาพชุดการทดลองตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [15]



รูปที่ 4 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุน

การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR) คงที่เท่ากับ 8 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับช่วงกำลังความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน การปรับและควบคุมค่า FR นั้นสามารถทำได้โดยการปรับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเชื้อเพลิง ($\dot{m}_{LPG}$) ซึ่งค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของหัวเผาสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2)

$$FR = \dot{m}_{LPG} \times LHV \qquad (2)$$

การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษ CO และ NOx ถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ผ่านการสอบเทียบก่อนการทดลอง โดยเก็บตัวอย่างก๊าซจากบริเวณเหนือหัวเผาในช่วงที่การเผาไหม้อยู่ในสภาวะคงตัว ค่าที่วัดได้ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ โดยก๊าซ CO และ NOx ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียแบบพกพา รุ่น Testo 350 (Testo SE & Co. KGaA, Germany) ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ก๊าซอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านการเผาไหม้ เครื่องมือดังกล่าวสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซในลักษณะไอเสียแบบฐานแห้ง (Dry basis) และมีความคลาดเคลื่อนของการวัดต่ำ โดยก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบเครื่องมือและดูดตัวอย่างก๊าซผ่านเครื่องดักแก๊สไอเสีย (hood) ที่ติดตั้งเหนือหัวเผา เพื่อให้การเก็บตัวอย่างก๊าซมีความสม่ำเสมอและลดผลกระทบจากการรบกวนของอากาศภายนอก

การวัดอุณหภูมิในกระบวนการทดลองดำเนินการโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดถูกเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอัตโนมัติ (Data logger) รุ่น GL220 (Graphtec Corporation, Japan) ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแบบต่อเนื่องหลายช่องสัญญาณพร้อมกัน การวัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองดำเนินการโดยการชั่งน้ำหนักถังแก๊ส LPG ก่อนและหลังการทดลองด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลที่มีความละเอียดสูง ซึ่งช่วยให้สามารถคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้อย่างถูกต้อง

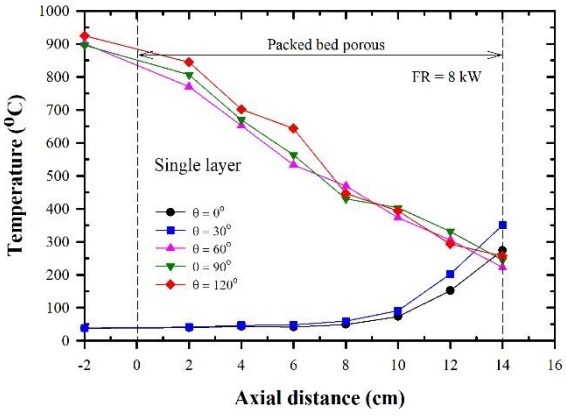
เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพรุนและระบุตำแหน่งของบริเวณปฏิกิริยาเผาไหม้ ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ตามแนวแกนกลางของหัวเผา เทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้งทั้งหมดจำนวน 8 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 โดยจัดเรียงตามแนวแกนตั้งของหัวเผาในช่วงตั้งแต่บริเวณก่อนเข้าสู่ชั้นวัสดุพรุนจนถึงบริเวณเหนือชั้นวัสดุพรุนด้านบน ตำแหน่งแรก (T1) ถูกติดตั้งที่ระดับต่ำกว่าขอบล่างของชั้นวัสดุพรุน 2 เซนติเมตร (y = −2 cm) เพื่อใช้เป็นตัวแทนอุณหภูมิของส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่โครงสร้างวัสดุพรุน ขณะที่ตำแหน่งถัดไป (T2 ถึง T8) ถูกติดตั้งเพิ่มขึ้นตามแนวแกนกลางของหัวเผาทีละ 2 เซนติเมตร ครอบคลุมตำแหน่งภายในชั้นวัสดุพรุนและบริเวณเหนือหัวเผา โดยตำแหน่งสุดท้ายอยู่ที่ระดับ y = 14 cm ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์บทบาทของโครงสร้างวัสดุพรุนต่อการอุ่นล่วงหน้าของสารตั้งต้น การถ่ายเทความร้อนย้อนกลับและเสถียรภาพของเปลวไฟภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน

การทดลองแต่ละเงื่อนไขถูกทำซ้ำอย่างน้อยสามครั้ง และนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยก่อนการวิเคราะห์ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลและรองรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุนแบบชั้นเดียว แบบสองชั้น และแบบสามชั้นภายใต้ระดับการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิที่แตกต่างกัน

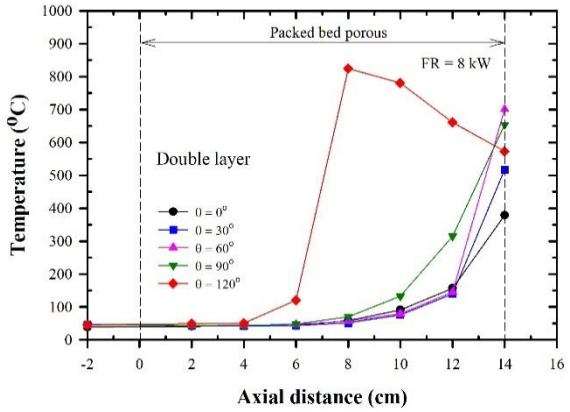
4. ผลการทดลอง

4.1 การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟ

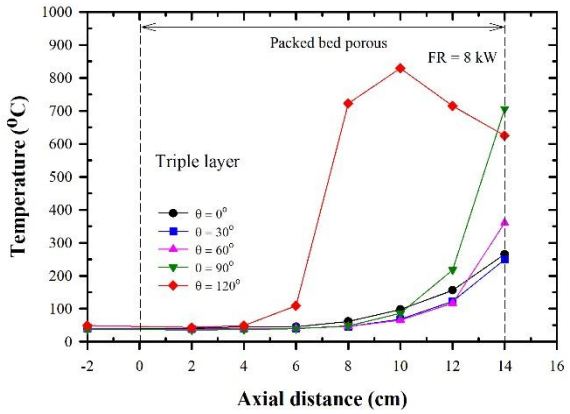
รูปที่ 5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบชั้นเดียว (single layer) เป็นการทดสอบกรณีที่ FR เท่ากับ 8 kW โดยมีการปรับเปลี่ยน θ เท่ากับ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° ผลที่ได้พบว่ากรณีการเปิดมุม θ ต่ำๆ คือมุม 0° และ 30° ส่งผลให้เปลวไฟลุกติดที่ภายนอกด้านบนหัวเผา เนื่องมาจากการปรับช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิที่แคบทำให้มีปริมาณอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ดังนั้นภายในหัวเผาตำแหน่งชั้นวัสดุพรุนจะไม่ปรากฏการติดไฟ และจะไปติดไฟที่ด้านบนหัวเผาแทน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอากาศจากภายนอกที่อยู่รอบๆ หัวเผา ในขณะเดียวกันเมื่อเปิดมุม θ มากขึ้น เช่น ตั้งแต่ 60° เป็นต้นไป ส่งผลให้เปลวไฟเกิดการไหลย้อนกลับ ซึ่งหมายถึงเปลวไฟติดที่ตำแหน่งด้านล่างของหัวเผาใต้ชั้นวัสดุพรุน เนื่องมาจากการเพิ่มช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิส่งผลให้มีปริมาณอากาศส่วนแรกเพิ่มมากขึ้นได้ส่วนผสมที่มีอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้ความเร็วการลามของเปลวไฟเพิ่มมากยิ่งขึ้นซึ่งมีทิศทางการลามของเปลวไฟไปยังส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสภาวะที่เปลวไฟไม่เสถียร ดังนั้นกรณีหัวเผาแบบชั้นเดียวการเผาไหม้ไม่เสถียรและไม่เกิดการลุกติดไฟภายในชั้นวัสดุพรุนส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนภายในหัวเผามีประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบชั้นเดียว



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบสองชั้น



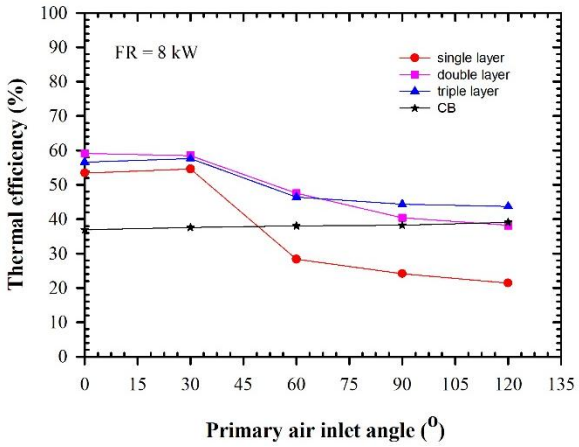
รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบสามชั้น

การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบสองชั้น (Double layer) แสดงดังรูปที่ 6 เป็นการทดสอบกรณีที่ FR เท่ากับ 8 kW โดยมีการปรับเปลี่ยนมุม θ พบว่า ที่มุม θ ต่ำ ตำแหน่งเปลวไฟอยู่บริเวณด้านบนของหัวเผา เนื่องจากมีปริมาณอากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ภายในชั้นวัสดุพรุน และเมื่อเพิ่มมุม θ เท่ากับ 120° พบว่าตำแหน่งเปลวไฟขยับเข้าสู่ภายในชั้นวัสดุพรุน ที่ตำแหน่ง y = 8 เซนติเมตร เปลวไฟไม่สามารถไหลย้อนกลับไปติดด้านล่างของชั้นวัสดุพรุนเหมือนกรณีหัวเผาแบบชั้นเดียว เนื่องจากกรณีหัวเผาแบบสองชั้นอาศัยข้อดีของเม็ดวัสดุพรุนชั้นล่างที่เล็กกว่าชั้นบนช่วยป้องกันไม่ให้เปลวไฟไหลย้อนกลับลงมาติดด้านล่างหัวเผา และบริเวณวัสดุพรุนชั้นล่างนี้ยังช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนและอุ่นส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศก่อนเข้าสู่บริเวณการเผาไหม้ ส่งผลให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพดีกว่าแบบชั้นเดียว

ในขณะที่การกระจายอุณหภูมิของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบสามชั้น (Triple layer) แสดงดังรูปที่ 7 ที่ FR เท่ากับ 8 kW โดยมีการปรับเปลี่ยนมุม θ พบว่าโครงสร้างแบบไล่ระดับความพรุนช่วยควบคุมตำแหน่งของบริเวณการเผาไหม้ได้ดีที่สุด โดยที่มุม 120° ตำแหน่งเปลวไฟขยับเข้าสู่ภายในชั้นวัสดุพรุน ที่ตำแหน่ง y = 10 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบสองชั้นซึ่งสะท้อนถึงการควบคุมตำแหน่งการเผาไหม้ที่เหมาะสม ซึ่งให้อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 828.90°C แสดงให้เห็นว่าบริเวณการเผาไหม้สามารถคงตัวอยู่ภายในชั้นวัสดุพรุนได้อย่างเหมาะสม เม็ดวัสดุพรุนขนาดเล็กที่ชั้นล่างช่วยส่งเสริมการอุ่นส่วนผสมล่วงหน้า ขณะที่ชั้นกลางที่มีเม็ดวัสดุพรุนขนาด 15 มิลลิเมตร ช่วยให้การเปลี่ยนผ่านของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และชั้นบนใช้เม็ดวัสดุพรุนขนาด 25 มิลลิเมตร ช่วยรองรับบริเวณการเผาไหม้ ดังนั้น แบบสามชั้นจึงช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเปลวไฟ ลดแนวโน้มการไหลย้อนกลับของเปลวไฟ (flashback) และการเผาไหม้ภายในชั้นวัสดุพรุนยังช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนภายในชั้นวัสดุพรุนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพโดยตรงและให้พฤติกรรมการเผาไหม้ที่เหมาะสม

4.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th})

รูปที่ 8 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาวัสดุพรุน เป็นการทดสอบกรณีที่ FR เท่ากับ 8 kW โดยมีการปรับเปลี่ยนมุม θ เท่ากับ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° ผลที่ได้พบว่า ทั้งกรณีหัวเผาแบบชั้นเดียว หัวเผาแบบสองชั้น และหัวเผาแบบสามชั้นให้ผลที่เหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มมุม θ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเปลวไฟฝังติดอยู่ภายในชั้นวัสดุพรุนและยิ่งมุม θ มีค่า

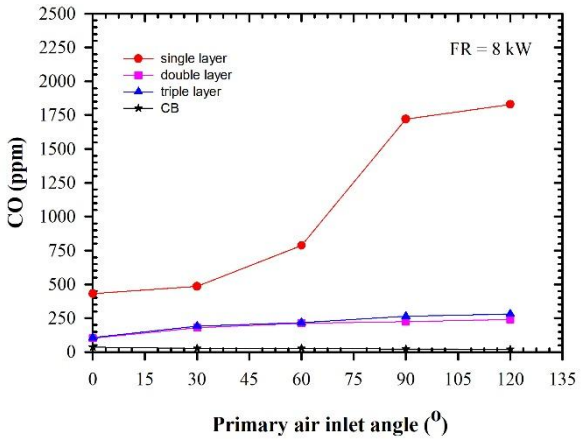


รูปที่ 8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผา

มากยิ่งขึ้นยิ่งทำให้เกิดเปลวไฟไหลย้อนกลับไปติดด้านล่างหัวเผาใต้ชั้นวัสดุพรุน ดังนั้นความร้อนที่จะถ่ายเทไปด้านบนเพื่อส่งถ่ายไปยังหม้อเพื่อใช้ในการต้มน้ำจึงมีปริมาณต่ำ เพราะความร้อนส่วนใหญ่อยู่ภายในหัวเผาและอยู่ห่างจากก้นหม้อภาชนะ ดังนั้นการปรับมุม θ มากเกินไปส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งพบว่ามุมที่เหมาะสมคือ θ = 30° เนื่องจากให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด เป็นมุมที่มีช่องว่างให้อากาศถูกเหนี่ยวนำเข้ามาใช้เพื่อการเผาไหม้และไม่ส่งผลให้เปลวไฟเกิดการไหลย้อนกลับ และพบว่าหัวเผาแบบสามชั้น (Triple layer) ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด เท่ากับ 57.67% ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแบบสองชั้น (Double layer) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.63% ในขณะเดียวกันหัวเผาแบบชั้นเดียว (Single layer) ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเพียง 54.58% ดังนั้น หัวเผาวัสดุพรุนแบบสามชั้นให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นเนื่องจากหัวเผาวัสดุพรุนแบบสามชั้นเผาไหม้ได้เปลวไฟที่เสถียรกว่าและไม่เกิดการไหลย้อนกลับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างหัวเผาวัสดุพรุนกับหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) พบว่า หัวเผาวัสดุพรุนให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเนื่องจากข้อดีของวัสดุพรุนที่ช่วยส่งเสริมการเผาไหม้โดยเฉพาะที่มุม θ เท่ากับ 30°

4.3 การปลดปล่อยมลพิษ CO และ NOx

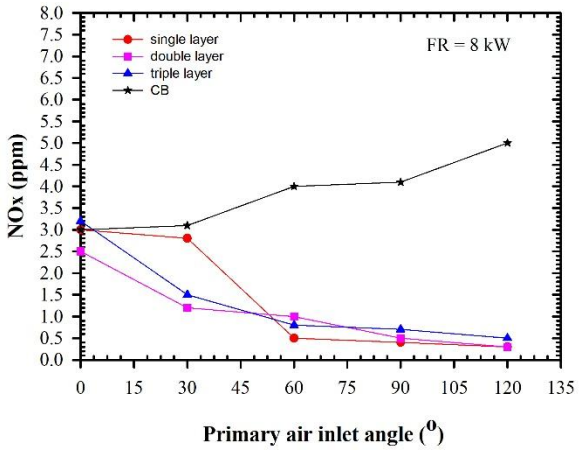
รูปที่ 9 แสดงปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ CO ของหัวเผาวัสดุพรุน เป็นการทดสอบกรณีที่ FR เท่ากับ 8 kW โดยมีการปรับเปลี่ยนมุม θ เท่ากับ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° ผลที่ได้พบว่า กรณีหัวเผาแบบสองชั้น ให้ค่า CO เพิ่มขึ้นตามค่ามุม θ มีค่าอยู่ในช่วง 101 ถึง 241 ppm โดยมีค่าใกล้เคียงกับหัวเผาแบบสามชั้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มมุม θ ทำให้เปลวไฟเริ่มขยับเข้าไปติดภายในชั้นวัสดุพรุนไม่ได้สัมผัสหรือผสมกับอากาศส่วนที่สองที่อยู่ด้านบนภายนอกรอบๆ หัวเผา ซึ่งจะให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า แต่อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษ CO (ต่ำกว่า 1,000 ppm) ในขณะเดียวกันหัวเผาวัสดุพรุนแบบชั้นเดียว ปลดปล่อยมลพิษ CO อยู่ในช่วง 431 ถึง 1,830 ppm ซึ่งมากกว่ากรณีหัวเผาแบบสองชั้นและแบบสามชั้น เนื่องจากหัวเผาแบบชั้นเดียวเกิดเปลวไฟไม่เสถียร เปลวไฟไหลย้อนกลับไปติดด้านล่างชั้นวัสดุพรุน ส่งผลให้เปลวไฟอยู่ห่างจากอากาศภายนอกที่อยู่ด้านบนภายนอกรอบๆ หัวเผาเป็นอย่างมาก ดังนั้นอากาศจึงไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ พบว่าค่า CO ที่ปลดปล่อยมีค่าสูงมากและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (มากกว่า 1,000 ppm) ดังนั้น หัวเผาแบบสามชั้น จึงเหมาะสำหรับเลือกนำไปใช้งาน



รูปที่ 9 การปล่อยมลพิษ CO ของหัวเผา

พบว่าหัวเผาแบบดั้งเดิม (CB) ปลดปล่อยมลพิษ CO ต่ำกว่าหัวเผาวัสดุพรุน เนื่องจากหัวเผาวัสดุพรุนมีเม็ดอะลูมินาบรรจุเต็มภายในห้องเผาไหม้ จึงส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมภายในหัวเผาสูง ดังนั้นอากาศส่วนแรกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติที่บริเวณปากทางเข้าท่อผสมจะเข้ามาได้ยากขึ้น ทำให้อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

การปลดปล่อยมลพิษ NOx ของหัวเผาวัสดุพรุนแสดงดังรูปที่ 10 เป็นการทดสอบที่ FR เท่ากับ 8 kW มีการปรับเปลี่ยนมุมองศาช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ (θ) คือ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° ผลที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มมุมองศาทางเข้าของอากาศมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ NOx ลดลง เนื่องจากเป็นสภาวะที่เปลวไฟย้อนกลับและติดด้านล่างหัวเผา ทำให้อุณหภูมิเปลวไฟต่ำ ดังนั้นปริมาณ Thermal NOx หรือ Zeldovich-NOx (NOx ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง) จึงมีปริมาณที่ลดต่ำลงตามไปด้วย พบว่ามลพิษ NOx ที่ปลดปล่อยมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 3.2 ppm ซึ่งทั้งสามหัวเผาให้ค่า NOx แตกต่างกันน้อยมากไม่เกิน 1.5 ppm และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างหัวเผาแบบ CB กับหัวเผาวัสดุพรุน พบว่าหัวเผาแบบ CB ให้ค่า NOx สูงกว่าหัวเผาวัสดุพรุน เนื่องจากหัวเผา CB จุดติดไฟง่ายและมีอากาศส่วนที่สองช่วยในกระบวนการเผาไหม้ทำให้มีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูง



รูปที่ 10 ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ NOx

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของโครงสร้างหัวเผาวัสดุพรุนแบบชั้นเดียว แบบสองชั้น และแบบสามชั้น ร่วมกับการควบคุมมุมช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิที่ 0°, 30°, 60°, 90° และ 120° ภายใต้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 8 kW โดยประเมินการกระจายอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ CO และ NOx สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. โครงสร้างของวัสดุพรุนมีอิทธิพลโดยตรงต่อตำแหน่งและเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยหัวเผาแบบชั้นเดียวไม่สามารถรักษาเปลวไฟภายในชั้นวัสดุพรุนได้อย่างเสถียร เมื่อมุมช่องทางเข้าอากาศต่ำเปลวไฟติดเหนือหัวเผาเนื่องจากอากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอ ขณะที่มุมตั้งแต่ 60° ขึ้นไปมีแนวโน้มเกิดการไหลย้อนกลับของเปลวไฟไปยังบริเวณใต้ชั้นวัสดุพรุน

2. หัวเผาแบบสองชั้นสามารถป้องกันการไหลย้อนกลับและตรึงเปลวไฟภายในชั้นวัสดุพรุนได้ดีกว่าแบบชั้นเดียว โดยที่มุม 120° ตำแหน่งเปลวไฟอยู่บริเวณ y = 8 cm เนื่องจากเม็ดอะลูมินาขนาดเล็กในชั้นล่างช่วยป้องกันเปลวไฟไหลย้อนกลับ

3. หัวเผาแบบสามชั้นให้เสถียรภาพของการเผาไหม้ดีที่สุด โดยโครงสร้างแบบไล่ระดับความพรุน ช่วยให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างแต่ละชั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ที่มุม 120° เปลวไฟสามารถคงตัวภายในชั้นวัสดุพรุนบริเวณ y = 10 cm และมีอุณหภูมิสูงสุด 828.90°C

4. มุมช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนคือ 30° เนื่องจากสามารถเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ได้เพียงพอโดยไม่ทำให้เปลวไฟไหลย้อนกลับ หัวเผาแบบสามชั้นให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 57.67% รองลงมาคือหัวเผาแบบสองชั้น 56.63% และแบบชั้นเดียว 54.58% ตามลำดับ นอกจากนี้ หัวเผาวัสดุพรุนยังให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าหัวเผาแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะที่มุม 30°

5. การจัดเรียงวัสดุพรุนแบบหลายชั้นช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษ CO ได้อย่างชัดเจน โดยหัวเผาแบบ

สองชั้นและสามชั้นมีค่า CO อยู่ในช่วงประมาณ 101–241 ppm ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่า 1,000 ppm) ขณะที่หัวเผาแบบชั้นเดียวมีค่า CO อยู่ในช่วง 431–1,830 ppm และไม่ผ่านเกณฑ์ในบางเงื่อนไข เนื่องจากความไม่เสถียรของเปลวไฟและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

6. การปลดปล่อยมลพิษ NOx ของหัวเผาวัสดุพรุนทั้งสามรูปแบบมีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย โดยมีค่าแตกต่างกันไม่เกินประมาณ 1.5 ppm และหัวเผาแบบดั้งเดิมให้ค่า NOx สูงกว่าหัวเผาวัสดุพรุน เนื่องจากมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า ทั้งนี้ ค่า NOx มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มมุมช่องทางเข้าอากาศปฐมภูมิ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยนวัตกรรมและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Howell, J. R., Hall, M. J. and Ellzey, J. L. (1996). “Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media.” Progress in Energy and Combustion Science. 22(2): 121–145.

[2] Oliveira, A. A. M. and Kaviany, M. (2001). “Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media.” Progress in Energy and Combustion Science. 27(5): 523–545.

[3] Mujeebu, M. A., Abdullah, M. Z., Mohamad, A. A. and Bakar, M. Z. A. (2010). “Trends in modeling of porous media combustion.” Progress in Energy and Combustion Science. 36(6): 627–650.

[4] Weclas, M. (2010). “Potential of Porous-Media Combustion Technology as Applied to Internal Combustion Engines.” Journal of Thermodynamics. 2010: 1–39.

[5] Kamal, M. M. and Mohamad, A. A. (2006). “Combustion in Porous Media. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A:” Journal of Power and Energy. 220(5): 487-508.

[6] Herrera, B., Cacua, K. and Villalba, L. O. (2015). “Combustion stability and thermal efficiency in a porous media burner for LPG cooking in the food industry using Al_2O_3 particles coming from grinding wastes.” Applied Thermal Engineering. 91: 1127–1133.

[7] Pantangi, V. K., Kumar, A. S. S. R. K., Mishra, S. C. and Sahoo, N. (2007). “Performance Analysis of Domestic LPG Cooking Stoves with Porous Media.” International Energy Journal. 8(2): 139-144.

[8] Muthukumar, P. and Shyamkumar, P. I. (2013). “Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications.” Fuel. 112: 562–566.

[9] Hayashi, T. C., Malico, I. and Pereira, J. C. F. (2007). “Influence of the preheating layer characteristics in a two-layer porous burner.” International Journal of Energy for a Clean Environment. 8(2): 125-143.

[10] Liao, M., Zhu, H., Liang, X., Li, Y. and Xu, X. (2023). “Effect of the Cross-Section of a Porous Burner on the Combustion Stability Limit of Premixed Oxy-Methane Flames.” ACS Omega. 8(50): 48258–48268.

[11] Matthujak, A., Wichangarm, M., Sriveerakul, T., Sucharitpwatskul, S. and Phongthanapanich, S. (2021). “Numerical investigation on the influences of swirling flow to thermal efficiency enhancement of an LPG-energy saving burner.” Case Studies in Thermal Engineering. 28: 1-14.

[12] Wichangarm, M., Matthujak, A., Sriveerakul, T., Sucharitpwatskul, S. and Phongthanapanich, S. (2020). “Investigation on thermal efficiency of LPG cooking burner using computational fluid dynamics.” Energy. 203: 117849.

[13] Alrashidi, A., Elsemary, I. M. M., Abdel-Rehim, A. A., Abdellatif, O. E. and Rabbo, M. F. A. (2024). “Effect of Porosity on Combustion Performance in Packed Bed Porous Media. Engineering,” Technology & Applied Science Research. 14(3): 14594–14599.

[14] Liu, Y., Deng, Y., Shi, J., Liu, Y., Wang, X., Ge, B. and Min, Z. (2023). “Experimental investigation on flame stability and emissions of lean premixed methane–air combustion in a developed divergent porous burner.” Journal of Cleaner Production. 405: 137070.

[15] German Standards and Technical Rules. (1997). DIN EN 203-2: Gas-heated catering equipment. p. 17.

อิทธิพลของความพรุนเม็ดอะลูมินาต่อสมรรถนะหัวเผาเส้นใยโลหะ

Effect of Alumina Particle Porosity on the Performance of a Metal Fiber Burners

จักราวุธ หอมมาลา[1], อำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1], ทรงสุภา พุ่มชุมพล[1], ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์[1], วีระพันธ์ สีหานาม[1], ปฐมพงศ์ เกษตรสิงห์[1], อริสรา อิสระ[1], กานต์ กอมณี[2] และ อภินันต์ นามเขต[1,*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม 48000
*ผู้ติดต่อ: apinunt.n@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

ปริมาณการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความจำเป็นในการพัฒนาหัวเผาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนในหัวเผาถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะหัวเผาเส้นใยโลหะที่ใช้เชื้อเพลิง LPG โดยบรรจุเม็ดอะลูมินาเป็นชั้นอุ่นส่วนผสมล่วงหน้า ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน DIN EN 203-2 โดยใช้เม็ดอะลูมินาที่ความพรุนเท่ากับ 0.41, 0.44 และ 0.46 ตามลำดับ ซึ่งกำหนด FR เท่ากับ 4, 6 และ 8 kW กำหนด dj เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร และ H เท่ากับ 2 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ CO ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิภายในหัวเผาเพิ่มขึ้นตาม Axial distance อย่างต่อเนื่อง ขณะที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงสุด 64.34% กรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 ในด้านมลพิษพบว่า CO มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 55 ppm กรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการออกแบบหัวเผาที่ผสานวัสดุพรุนทั้งสองโครงสร้างอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดมลพิษ CO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาหัวเผาวัสดุพรุนในอนาคต

คำสำคัญ: หัวเผาเส้นใยโลหะ, เม็ดอะลูมินา, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, การปลดปล่อยมลพิษ

Abstract

The increasing consumption of liquefied petroleum gas (LPG) in Thailand has created a need for more efficient burners to reduce energy consumption. This study investigated the performance of an LPG-fueled metal fiber burner incorporating Alumina particles as a preheating layer. Experiments were conducted in accordance with DIN EN 203-2 using Porosity values of 0.41, 0.44, and 0.46. FR was varied at 4, 6, and 8 kW, while dj and H were fixed at 1.0 mm and 2 cm, respectively. Temperature distribution, Thermal efficiency, and CO emissions were evaluated. The results showed that Temperature distribution increased continuously with axial distance. The maximum Thermal efficiency of 64.34% and the lowest CO emission of 55 ppm were achieved at FR = 8 kW with a Porosity of 0.46. The improved performance was attributed to enhanced air–fuel mixture preheating. These findings demonstrate that integrating metal fiber and packed-bed porous structures can effectively enhance Thermal efficiency and reduce CO emissions, providing useful guidance for future porous media burner development.

Keywords: metal fiber burner, alumina ball, thermal efficiency, pollutant emissions.

1. บทนำ

เตาแก๊สหุงต้มเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในครัวเรือน ร้านอาหาร และอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากให้ความร้อนรวดเร็ว ควบคุมการเผาไหม้ได้ง่าย และมีต้นทุนการใช้งานต่ำ โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยจากคุณสมบัติด้านค่าความร้อนสูงและการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการใช้ LPG ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้การพัฒนาหัวเผาประสิทธิภาพสูงกลายเป็นประเด็นสำคัญเพื่อลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการประยุกต์ใช้วัสดุพรุน โดยเฉพาะวัสดุพรุนโครงสร้างเส้นใยโลหะ (Metal Fiber) ซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน รักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ลดการย้อนกลับของเปลวไฟ และลดการปล่อยมลพิษ ความร้อนที่สะสมภายในโครงสร้างวัสดุพรุนยังสามารถถ่ายเทกลับเพื่ออุ่นส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่บริเวณเผาไหม้ ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น และการกระจายตัวของเปลวไฟสม่ำเสมอ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ Leonardi และคณะ [1] ศึกษาหัวเผาเส้นใยโลหะแบบการแผ่รังสี พบว่าโครงสร้างแบบสองชั้นช่วยเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวและประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนได้สูงกว่าแบบชั้นเดียว ขณะที่ Leonardi และคณะ [2] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และศึกษาผลการทดลองว่าหัวเผาเส้นใยโลหะแบบสองชั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะการเผาไหม้ได้ดีกว่าแบบชั้นเดียว Barra และ Ellzey [3] ศึกษาการหมุนเวียนความร้อนในหัวเผาวัสดุพรุน พบว่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีภายในวัสดุพรุนช่วยอุ่นสารตั้งต้นก่อนการเผาไหม้ ส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น ขณะที่ Golombok และคณะ [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของเปลวไฟและการกระจายอุณหภูมิภายในหัวเผา Haolin Yang และคณะ [5] ศึกษาการเผาไหม้ในวัสดุพรุนแบบเซรามิก พบว่าความพรุนและสภาวะการไหลมีผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Fabio Schiro และ Anna Stoppato [6] พบว่าหัวเผาเส้นใยโลหะสามารถลดการปลดปล่อย NOx และเพิ่มเสถียรภาพการเผาไหม้ได้ดีกว่าหัวเผาแบบดั้งเดิม Hui Mei และคณะ [7] พัฒนาวัสดุพรุน SiC สำหรับงานเผาไหม้ พบว่าสามารถเพิ่มการกักเก็บความร้อน ลดการสูญเสียพลังงาน และลดการปลดปล่อยมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Christoph Wieland และคณะ [8] ศึกษาโครงสร้างวัสดุพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพการแผ่รังสีของหัวเผา Maznoy และคณะ [9] พบว่าการออกแบบการไหลภายในหัวเผาวัสดุพรุนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ เพิ่มประสิทธิภาพการแผ่รังสี และลดการปลดปล่อยมลพิษ ขณะที่ Ri Wang และคณะ [10] ศึกษาอุณหภูมิสูงสุดเกิดภายในชั้นวัสดุพรุนและขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนพลังงานความร้อน รวมถึงตำแหน่งการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟ ต่อมา Haidong Xu และคณะ [11] ศึกษาหัวเผาเส้นใยโลหะสำหรับการเผาไหม้ก๊าซความเข้มข้นต่ำ พบว่าความพรุนและความหนาของวัสดุพรุนมีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพเปลวไฟ ช่วงการทำงาน และการลดการปลดปล่อย CO อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมายังคงมีช่องว่างองค์ความรู้ที่สำคัญเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนในหัวเผา โดยวัสดุพรุนโครงสร้างเส้นใยโลหะมีข้อจำกัดด้านความหนาของชั้นวัสดุ ส่งผลให้ความสามารถในการอุ่นส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงล่วงหน้ามีจำกัด ขณะที่วัสดุพรุนโครงสร้างแบบฐานอัดแน่นชนิดอะลูมินา (Al_2O_3) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและสามารถกักเก็บความร้อนได้ดี แต่มีข้อจำกัดด้านลักษณะการไหลและเสถียรภาพของเปลวไฟ นอกจากนี้ยังขาดการศึกษาที่เปรียบเทียบและบูรณาการข้อดีของวัสดุพรุนทั้งสองโครงสร้างภายในหัวเผาเดียวกัน ภายใต้สภาวะการจ่ายอากาศแบบเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะหัวเผาเส้นใยโลหะที่ติดตั้งอะลูมินาบริเวณด้านล่างของชั้นเส้นใยโลหะ เพื่อเพิ่มการอุ่นส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนเข้าสู่บริเวณเผาไหม้ โดยดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการจ่ายอากาศแบบเหนี่ยวนำโดยธรรมชาติ ตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [12] ใช้เม็ดอะลูมินา (Al_2O_3) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10, 15 และ 20 mm ซึ่งมีค่าความพรุน (ε) เท่ากับ 0.41, 0.44 และ 0.46 ตามลำดับ กำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR) เท่ากับ 4, 6 และ 8 kW เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดคงที่ (dj) เท่ากับ 1.0 mm และระยะห่างหัวเผากับก้นหม้อคงที่ (H) เท่ากับ 2 cm เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการปลดปล่อยมลพิษ CO ผลการศึกษาที่ได้จะพัฒนาหัวเผาประสิทธิภาพสูงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ

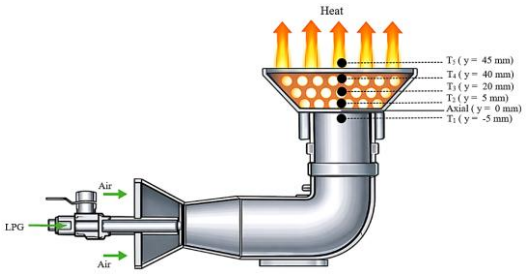
หัวเผาที่ใช้ในการศึกษาถูกออกแบบเป็นหัวเผาเส้นใยโลหะร่วมกับวัสดุพรุนแบบฐานอัดแน่นชนิดอะลูมินา (Al_2O_3) โดยบรรจุเม็ดอะลูมินาไว้เหนือแผ่นตะแกรงภายในหัวเผา ค่าความพรุน (Porosity, ε) ของชั้นวัสดุพรุนถูกกำหนดด้วยวิธีการแทนที่ปริมาตรน้ำ (Water displacement method) โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างภายในชั้นวัสดุพรุน (Void-space volume, V_s) ต่อปริมาตรรวมของชั้นวัสดุพรุน (Bulk volume, V_t) ดังแสดงในสมการ (1) ผลการวัดพบว่าชั้นวัสดุพรุนที่ใช้เม็ดอะลูมินาขนาดต่างกันมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.41, 0.44 และ 0.46 ตามลำดับ

$$\text{Porosity } (\varepsilon) = \frac{V_s}{V_T} \tag{1}$$

การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR) เท่ากับ 4, 6 และ 8 kW ซึ่งควบคุมโดยการปรับอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สเชื้อเพลิง และสามารถคำนวณค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้ตามสมการที่ (2)

$$FR = \dot{m}_{LPG} \times LHV \tag{2}$$

เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาเส้นใยโลหะ ได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 5 ตำแหน่งตามแนวแกนกลางของหัวเผา (Axial centerline) แสดงดังรูปที่ 1 เนื่องจากเป็นแนวที่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการเผาไหม้ได้อย่างเหมาะสม พร้อมทั้งลดอิทธิพลจากผนังหัวเผาและความไม่สม่ำเสมอของการไหล ตำแหน่ง T1 ติดตั้งที่ y = −5 cm เพื่อวัดอุณหภูมิของส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ชั้นวัสดุพรุน ขณะที่ตำแหน่ง T2, T3 และ T4 อยู่ที่ y = 5, 20 และ 40 mm ตามลำดับ สำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหัวเผา ส่วนตำแหน่ง T5 อยู่ที่ y = 45 mm เหนือผิวหัวเผาเพื่อวัดอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟ การจัดวางตำแหน่งการวัดดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่บริเวณก่อนการเผาไหม้ ภายในโครงสร้างวัสดุพรุนจนถึงบริเวณเปลวไฟได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินการอุ่นส่วนผสมล่วงหน้า การถ่ายเทความร้อนย้อนกลับ และเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลให้เหมือนกันทุกเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 1 แผนผังการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ ของหัวเผา

การวัดประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาดำเนินการตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [12] เพื่อทดสอบสมรรถนะของหัวเผา โดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Boiling test) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสมรรถนะของหัวเผาแก๊สภายใต้สภาวะการดูดอากาศตามธรรมชาติ เนื่องจากสามารถสะท้อน

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสู่ภาระใช้งานจริงได้โดยตรง ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับกับพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง โดยทำการให้ความร้อนแก่น้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นใกล้เคียงอุณหภูมิแวดล้อมจนถึงประมาณ 90°C เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการระเหย พลังงานที่น้ำได้รับคำนวณจากมวลน้ำและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ส่วนพลังงานจากเชื้อเพลิงคำนวณจากอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนต่ำ (LHV) และระยะเวลาการทดสอบ ดังแสดงในสมการ (3)

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{water} C_{p,water} \left(T_{water,f} - T_{water,i}\right)}{\dot{m}_{LPG} \times LHV \times t} x100 \qquad (3)$$

เมื่อ

η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, (%)

$\dot{m}_{water}$ คือ มวลของน้ำทดสอบ, (kg)

$C_{p,water}$ คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg.K)

$T_{water,i}$ คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (°C)

$T_{water,f}$ คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย (°C)

$\dot{m}_{LPG}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (kg/s)

LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s)

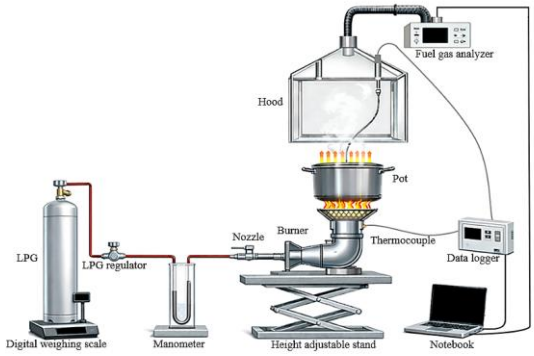
3. วิธีดำเนินการวิจัย

หัวเผาที่ใช้ในการศึกษาถูกออกแบบเป็นหัวเผาเส้นใยโลหะร่วมกับวัสดุพรุนแบบฐานอัดแน่นที่ทำจากเม็ดอะลูมินา โดยแก๊สเชื้อเพลิง LPG ถูกฉีดผ่านหัวฉีดเพื่อเหนี่ยวนำอากาศเข้าสู่ท่อผสมและเกิดส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิง จากนั้นส่วนผสมจะไหลผ่านชั้นวัสดุพรุนแบบเส้นใยโลหะและเกิดการเผาไหม้ สำหรับกรณีที่มีวัสดุพรุนแบบฐานอัดแน่น เม็ดอะลูมินาจะทำหน้าที่สะสมและถ่ายเทความร้อนย้อนกลับ ส่งผลให้ส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงได้รับการอุ่นล่วงหน้า ช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของการเผาไหม้และเสถียรภาพของเปลวไฟ

อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิง LPG ชุดควบคุมการไหล มานอมิเตอร์แบบปรอท และเครื่องชั่งดิจิทัลสำหรับคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิถูกตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล Midi logger GL220 (Graphtec Corporation, Japan) ขณะที่การปลดปล่อยมลพิษถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 (Testo SE & Co. KGaA, Germany) ซึ่งผ่านการสอบเทียบก่อนการทดลอง

ตารางที่ 1 ตัวแปรและเงื่อนไขสำหรับการทดสอบสมรรถนะ

หมวด	ตัวแปร	ค่า
ตัวแปรอิสระ	ค่าความพรุน (ε)	0.41, 0.44 และ 0.46
	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (FR)	4, 6 และ 8 kW
ตัวแปรควบคุม	วัสดุพรุน	เม็ดอลูมินา
	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (dj)	1.0 mm
	ระยะห่างหัวเผากับก้นหม้อ (H)	2 cm
	เชื้อเพลิง	LPG
	โหมดการจ่ายอากาศ	Natural draft
	มาตรฐานการทดสอบ	DIN EN 203-2 [12]
ตัวแปรตาม	การกระจายตัวอุณหภูมิ	T (°C)
	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	η_{th} (%)
	การปลดปล่อยมลพิษ	CO (ppm, dry basis)



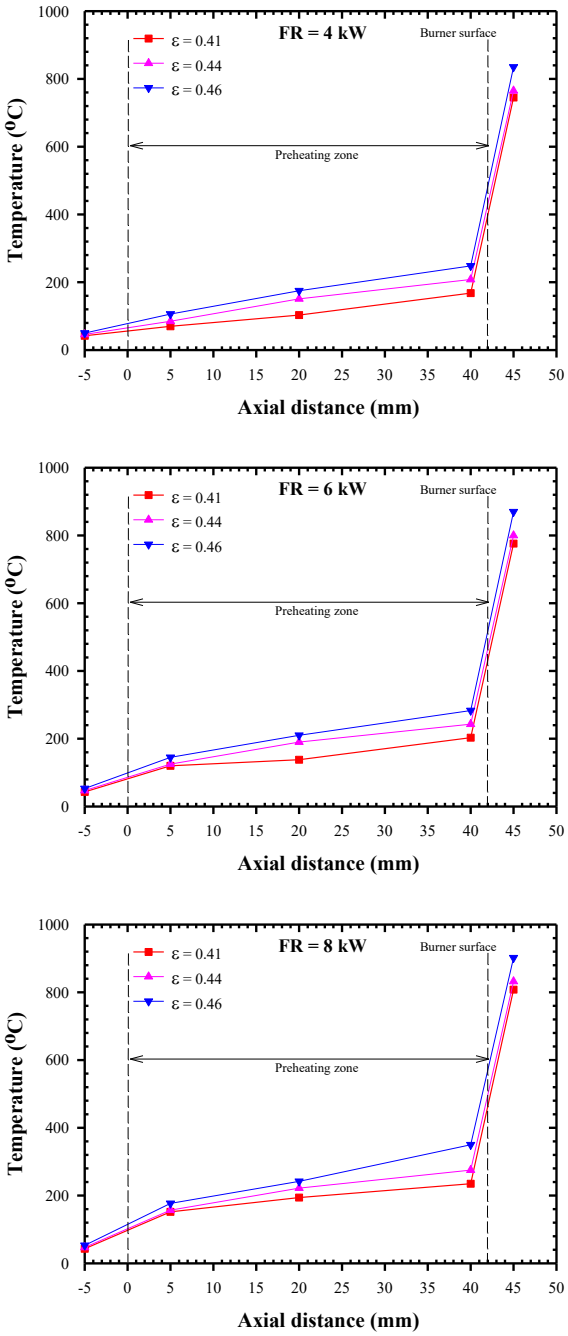
รูปที่ 2 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองแสดงดังรูปที่ 2 เริ่มจากการอุ่นหัวเผาจนเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นติดตั้งหม้อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 cm บรรจุน้ำ 30.6 kg แล้วจุดหัวเผาภายใต้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงตามเงื่อนไขการทดลอง เมื่ออุณหภูมิน้ำถึงประมาณ 50°C จึงทำการตรวจวัดก๊าซไอเสีย และดำเนินการต้มน้ำต่อจนถึง 90°C ตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 [12] ก่อนบันทึกเวลาและหยุดการทดลอง การทดลองแต่ละเงื่อนไขดำเนินการซ้ำอย่างน้อยสามครั้ง และนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยก่อนการวิเคราะห์

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การกระจายอุณหภูมิภายในหัวเผา

รูปที่ 3 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิภายในหัวเผา ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุกกรณี โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตาม Axial distance อย่างต่อเนื่องในตำแหน่ง Axial distance = -5 mm พบว่าเป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดของหัวเผามีค่าเท่ากับ 42 °C ที่กรณี FR เท่ากับ 4 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.41 จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่ง Axial distance = 5, 20 และ 40 mm กล่าวได้ว่ากรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 มีอุณหภูมิสูงสุดในทุกตำแหน่ง Axial distance นอกจากนี้ตำแหน่ง Axial distance = 45 mm เป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดของหัวเผามีค่าเท่ากับ 902 °C กรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 ในขณะที่กรณี FR เท่ากับ 4 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.41 จะมีอุณหภูมิต่ำสุดในทุกตำแหน่งตาม Axial distance โดย Axial distance = 45 mm มีอุณหภูมิเท่ากับ 835 °C

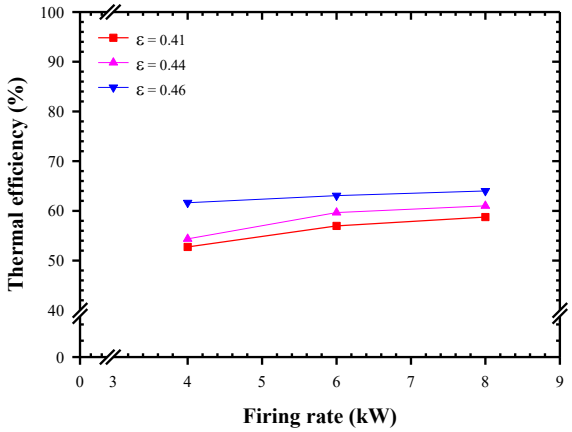


รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิภายในหัวเผา

4.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

รูปที่ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจากประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาเส้นใยโลหะ

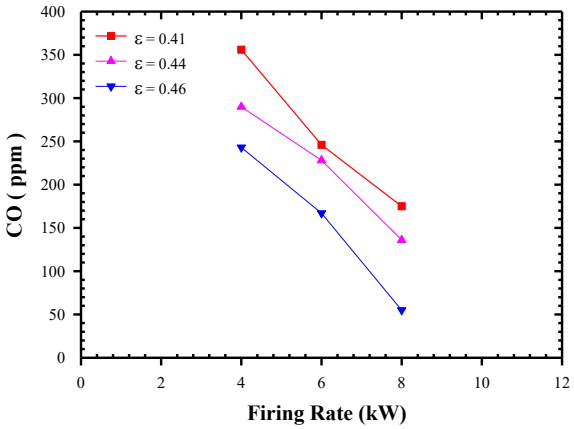
ภายใต้มาตรฐาน DIN EN 203-2 [12] พบว่ากรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 64.34% เนื่องจากค่าความพรุนสูงขึ้นพื้นที่การไหลจะมากจะช่วยลดความดันตกคร่อม ทำให้อากาศเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงได้ดี เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และรักษาสมดุลการถ่ายเทความร้อนได้อย่างเหมาะสม ในทางกลับกันกรณี FR เท่ากับ 4 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.41 จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 52.75% เพราะพื้นที่การไหลน้อยลงทำให้เกิดความต้านทานสูง อากาศเข้าผสมไม่เพียงพอจนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้อุณหภูมิและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสู่ระบบลดต่ำลงตามไปด้วย



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการเชิงความร้อน

4.3 การปลดปล่อยมลพิษ CO

รูปที่ 5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยมลพิษ CO กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง พบว่ากรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 สามารถลดการปลดปล่อยมลพิษ CO ได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 55 ppm เนื่องจากพื้นที่การไหลที่กว้างขึ้นช่วยให้อากาศถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงได้ดี เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และมีอุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในการเปลี่ยนก๊าซ CO ให้กลายเป็น CO_2 ในทางตรงกันข้ามกรณี FR เท่ากับ 4 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.41 จะมีการปล่อยมลพิษ CO สูงสุดเท่ากับ 356 ppm เนื่องจากพื้นที่การไหลน้อยลง ทำให้เกิดความต้านทานสูง อากาศเข้าผสมไม่เพียงพอจนเกิดสภาวะเชื้อเพลิงหนา นำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 5 การปลดปล่อยมลพิษ

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมคือกรณี FR = 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 ซึ่งให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 64.34% โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 902 °C บริเวณผิวหัวเผา และปล่อยมลพิษ CO ต่ำสุดเท่ากับ 55 ppm กรณีดังกล่าวเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงและความสามารถในการดึงอากาศเข้าผสม กล่าวคือเมื่อป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 8 kW ระบบจะต้องการอากาศเข้ามาผสมในปริมาณมาก ซึ่งการใช้ความพรุนสูงเท่ากับ 0.46 จะช่วยเพิ่มพื้นที่การไหล ลดแรงเสียดทานและความต้านทานการไหล ทำให้ความดันตกคร่อมลดลง อากาศจึงถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงปริมาณมากได้อย่างเหมาะสม ช่วยลดการเกิดสภาวะเชื้อเพลิงหนา ประกอบกับคุณสมบัติของเม็ดอะลูมินาที่ช่วยสะสมและถ่ายเทความร้อนย้อนกลับเพื่ออุ่นส่วนผสมล่วงหน้า (Preheating) ทำให้รักษาสมดุลระหว่างการคายความร้อนและการสูญเสียความร้อนได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และให้อุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิที่สูงนี้ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในการเปลี่ยนก๊าซ CO ให้เป็น CO_2 ได้อย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกัน หากใช้

ความพรุนเท่ากับ 0.41 ซึ่งมีพื้นที่การไหลจำกัดร่วมกับการใช้ FR = 4 kW ความต้านทานการไหลและระดับความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นจะทำให้อากาศไหลเข้าผสมไม่เพียงพอ จึงเกิดสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงลดต่ำลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดต่ำสุดเท่ากับ 52.75% และก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษ CO สูงมีค่าเท่ากับ 356 ppm ดังนั้นกรณี FR เท่ากับ 8 kW ที่ความพรุนเท่ากับ 0.46 จึงเป็นการผสานอัตราการให้พลังงานเข้ากับโครงสร้างความพรุนต่อพลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทความร้อนได้อย่างเหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Leonardi, S.A., Viskanta, R. and Gore, J.P. (2002). “Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner.” Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 73, (August): 491 - 501.

[2] Leonardi, S.A., Viskanta, R. and Gore, J.P. (2003). “Analytical and experimental study of combustion and heat transfer in submerged flame metal fiber burners/heaters.” Journal of Heat Transfer 125, (February): 118 - 125.

[3] Barra, J.A. and Ellzey, L.J. (2004). “Heat recirculation and heat transfer in porous burners.” Combustion and Flame 137, (February): 230 - 241.

[4] Golombok, M., Prothero, A., Shirvill L.C. and Small L.M. (2007). “Surface combustion in metal fiber burners.” Combustion Science and Technology 77, (April): 203 - 223.

[5] Yang, H., Minaev, S., Geynce, E., Nakamura, H. and Maruta K. (2009)). “Filtration combustion of methane in high - porosity micro - fibrous media.” Combustion Science and Technology 181, (March): 654 - 669.

[6] Schiro, F. and Stoppato, A. (2018). “Experimental investigation of emissions and flame stability for steel and metal fiber cylindrical premixed burners.” Combustion Science and Technology 191, (August) 2018: 453 - 471.

[7] Mei, H., Mao, M., Han, D., Xu, Y. and Cheng, L. (2019). “Tailoring fibre lengths to fabricate a highly permeable SiC fibre porous medium for more efficient combustion.” Composites Part 169, (August): 29 - 36.

[8] Wieland, C., Weis, C., Habisreuther, P. and Trimis, D. (2022). “3D direct pore level simulations of radiant porous burners.” Combustion and Flame 245, (March): 1 - 10.

[9] Maznoy, A., Yakovlev, I., Pichugin, N., Zambalov, S. and Tcoi, K. (2022). “Performance characteristics of a thin - layered radial porous burner with different strategies for fuel - air mixture supply.” Case Studies in Thermal Engineering 38, (August): 1 - 11.

[10] Wang, R., Qi, B., Zhou, Y., Rong, A and Dong, S. (2023). “Numerical investigation on combustion and heating characteristics of metal fiber burner.” Energies (April): 1 - 17.

[11] Xu, H., Wang, B., Zhang, Y., Ren, R., Zhang, G. and Huang, X. (2024). “Combustion characteristics of low - concentration coal mine gas with metal fiber burners.” Case Studies in Thermal Engineering 63 (April): 1 - 12.

[12] German Standards and Technical Rules, DIN EN 203-2, Gas-heated Catering Equipment, (1997), 17. Thailand Industrial Standard, Domestic gas stoves for use with liquefied petroleum gas, TIS 2312-2549 (2006).

ESTACON 2026 | 17th

การศึกษาและพัฒนาหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากแผงโซลาร์พาเนล

The Study and Development of Solar Irradiance Probe from Solar Panel

นาย ธีรภัทร ทองดี[1], และ อาจารย์ ดร.ภูชิสส์ ตันวานิชกุล[1,*]

[1] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น (มทร.อีสาน วขก.) ตั้งอยู่เลขที่ 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

*ผู้ติดต่อ: dr.bhuchiss@gmail.com , 0897778623

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำจากแผงโซลาร์พาเนลขนาดเล็ก เพื่อเป็นทางเลือกทดแทนเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีราคาสูง ระบบใช้แผงโซลาร์พาเนลขนาดเล็กเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณต่อตรงเข้าสู่ระบบประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล การประเมินประสิทธิภาพเชิงทดลองดำเนินการโดยติดตั้งอุปกรณ์ร่วมกับเครื่องมือวัดอ้างอิงมาตรฐาน (Pyranometer) ในพื้นที่เปิดโล่งเพื่อจัดเก็บข้อมูล จากการนำข้อมูลแรงดันเอาต์พุตของแผงโซลาร์พาเนล (V) และค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จริง (W/m^2) มาวิเคราะห์สถิติด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อสร้างฟังก์ชันการสอบเทียบ พบว่าสมการเชิงประจักษ์คือ $y = 30,834x + 24.461$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.816 (ค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น $R = 0.903$) บ่งชี้ว่าแบบจำลองเชิงเส้นสามารถอธิบายความแปรผันของแสงแดดธรรมชาติได้ถูกต้องสูงถึงร้อยละ 81.6 โดยมีสัดส่วนความแปรปรวนที่แบบจำลองยังไม่สามารถอธิบายได้ร้อยละ 18.4 จากการประเมินประสิทธิภาพความคลาดเคลื่อนทางสถิติพบว่า หัววัดที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 53.3867 (W/m^2) และค่ารากที่สองของเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) เท่ากับ 83.032 (W/m^2) อย่างไรก็ตาม ผลทดลองยืนยันได้ว่าหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นนี้ มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพียงพอในการนำไปใช้งานตรวจวัดและประเมินแนวโน้มพลังงานแสงอาทิตย์ภาคอุตสาหกรรมเกษตรขนาดกลางและขนาดเล็กอย่างยอมรับได้ในเชิงวิชาการ

คำสำคัญ: เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ, แผงโซลาร์พาเนล, การถดถอยเชิงเส้น, การสอบเทียบ, ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

Abstract

This research presents the study and development of a low-cost solar irradiance probe utilizing a miniature solar panel as a cost-effective alternative to expensive standard meteorological instruments. The system employs a small solar panel as the radiation detector, directly interfaced with a data acquisition and processing system without external circuitry. To evaluate its performance experimentally, the developed device was deployed alongside a reference pyranometer in an unobstructed open area for field data collection. The recorded output voltage from the solar panel (V) and the actual global solar irradiance (W/m^2) were statistically analyzed using linear regression to establish the system calibration function, yielding the empirical equation: $y = 30,834x + 24.461$. The regression results demonstrated a coefficient of determination (R^2) of 0.816 (corresponding to a correlation coefficient $R = 0.903$), indicating that the developed model successfully accounts for 81.6% of natural solar irradiance variations, leaving 18.4% of the variance unexplained. The experimental evaluation demonstrated a Mean Absolute Error (MAE) of 53.3867 (W/m^2) and a Root Mean Square

Error (RMSE) of 83.032 (W/m^2). Nevertheless, the experimental findings confirm that the developed low-cost solar irradiance probe possesses sufficient efficiency and accuracy, rendering it academically acceptable for practical applications in monitoring and assessing solar energy trends for small and medium-sized agricultural industries.

Keywords: Low-cost pyranometer, Solar panel, Linear regression, Calibration, Solar irradiance

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและสภาวะโลกร้อน ทำให้ ภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องปรับตัวสู่การใช้ พลังงานสะอาด โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) คือ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับวัดความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์รวม (Global Solar Irradiance) ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวระนาบ โดยทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีหน่วยวัดมาตรฐานเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้เซนเซอร์แบบเทอร์โมไพล์ (Thermopile) หรือโฟโตไดโอดคุณภาพสูงมักมีราคาสูงมาก การติดตั้งและบำรุงรักษามีความซับซ้อน ส่งผลให้ผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมการเกษตรขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs) เข้าถึงได้ยาก และ ขาดข้อมูลที่แม่นยำในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในพื้นที่ใช้งานจริง

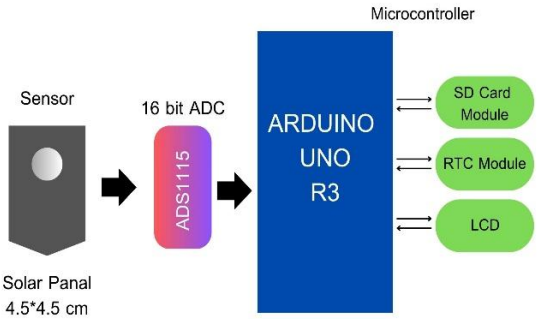
จากข้อจำกัดด้านต้นทุนของเครื่องมือวัดมาตรฐาน จึงมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาและพัฒนาเครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำโดยใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น เช่น การใช้ทรานซิสเตอร์ไวแสง หรือการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ต้นแบบประยุกต์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้โมดูลเพลเทียร์ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีราคาประหยัด บำรุงรักษาง่าย และใช้วัสดุโครงสร้างที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น โดยนำเทคโนโลยีของแผงโซลาร์เซลล์ชนิดผลึกซิลิคอนขนาดเล็ก (Miniature Solar Panel) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์โอเพ่นซอร์สความละเอียดสูง (16-bit ADC) เพื่อเป็นทางเลือกในการวัดค่าและเก็บข้อมูลสภาพอากาศที่มีความถูกต้องและคุ้มค่ามากที่สุด เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมการเกษตรขนาดกลางและขนาดเล็กเข้าถึงได้ง่าย

ในการทดลองนี้ได้ทำการจัดเก็บข้อมูลเพื่อสร้างสมการสอบเทียบเป็นเวลา 5 วัน ณ สถานีตรวจวัดสภาพอากาศของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น โดยจัดเก็บข้อมูลคู่ขนานทุกๆ 1 นาที ตั้งแต่เวลา 07.00 น. ถึง 18.00 น.(รวมทั้งสิ้น 2,500 ชุดข้อมูล)โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ (Calibration Set) จำนวน 70% และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ (Validation Set) จำนวน 30% เพื่อตรวจสอบความแม่นยำทั่วไปของหัววัด

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

ในส่วนของการออกแบบและสร้างชุดหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดัง **รูปที่ 1**

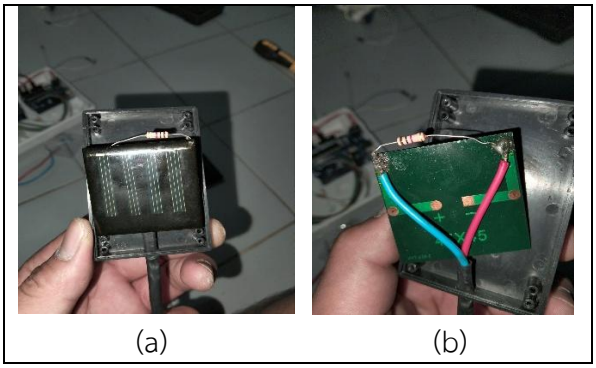


รูปที่ 1 แผนผังการต่อวงจรเชิงฟังก์ชันของชุดหัววัดความเข้มรังสีอาทิตย์

2.1 หัววัดความเข้มรังสีจากแผงโซลาร์พาแนล

ผู้จัดทำได้ประยุกต์ใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดผลึกซิลิคอนขนาดเล็ก (Miniature Solar Panel) ขนาด 4.5x4.5 เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่มีการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ซึ่งมีราคาที่ถูกมาก และมีการต่อ Load Resistor ขนานไว้ จะช่วยดึงให้โซลาร์เซลล์ทำงานในโหมดกระแสลัดวงจร

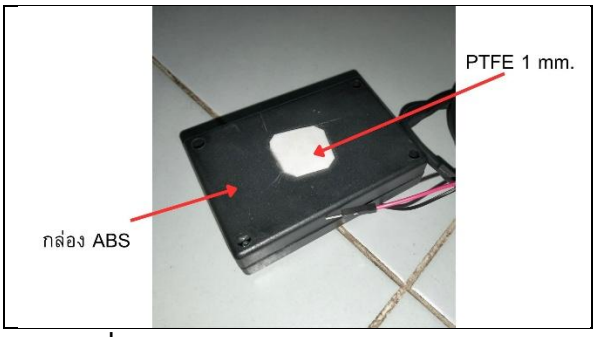
(Short-Circuit Current) ซึ่งเป็นโซนที่กระแสไฟฟ้าจะแปรผันเป็นเส้นตรง (Linear) ตามความเข้มแสงได้อย่างแม่นยำที่สุด



(a) (b)

รูปที่ 2 แผงโซลาร์เซลล์ชนิดผลึกซิลิคอนขนาดเล็ก ขนาด 4.5x4.5 เซนติเมตร (a)ด้านหน้า (b)ด้านหลัง

ในส่วนของโครงสร้างภายนอกที่ใช้ปกป้องชุดเซนเซอร์วัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ เลือกใช้กล่องอเนกประสงค์ที่ผลิตจากพลาสติก ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ซึ่งเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เจาะรูขนาด 10.4 มิลลิเมตร และใช้แผ่น เทปล่อน (PTFE) ขุ่น ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ปิดทับด้านในและด้านนอก เพื่อกรองแสงเข้าสู่แผงโซลาร์พาแนล ดัง**รูปที่** 3



รูปที่ 3 โครงสร้างภายนอกของชุดเซนเซอร์

2.2 ระบบประมวลผลและการบันทึกข้อมูล

โมดูล ADS1115 (16-bit ADC) เนื่องจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่ติดมากับบอร์ด Arduino มีความละเอียดเพียง 10 bit ซึ่งไม่ละเอียดพอสำหรับการวัดค่าแรงดันที่แปรผันเล็กน้อยจากหัววัดความเข้มแสงประยุกต์ ทีมผู้จัดทำจึงได้เพิ่มชิปแปลงสัญญาณภายนอก ADS1115 ที่มีความละเอียดสูงถึง 16 bit เข้ามาช่วยแปลงค่าแรงดันส่งต่อให้บอร์ดควบคุมผ่านโปรโตคอล I2C

Arduino Uno R3 ทำหน้าที่เป็นสมองกลหลักในการรับค่าดิจิทัลจากโมดูล ADS1115 จากนั้นนำค่าแรงดัน (V) ที่อ่านได้เข้าสู่โปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อคำนวณแปลงค่าแรงดัน (V) ให้กลายเป็นค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการปรับเทียบ

ระบบการแสดงผลและบันทึกข้อมูล ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่คำนวณได้จะแสดงผลแบบเรียลไทม์ บนหน้าจอ LCD และในขณะเดียวกันจะทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 1นาที ลงใน microSD Card เป็นระบบ CSV. ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ใน Excel เพื่อเก็บรวบรวมเป็นฐานข้อมูลสภาพอากาศที่สามารถนำไปวิเคราะห์ภายหลังได้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการต่อวงจรต้นแบบชุดหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้แผงโซลาร์พาแนล

กลุ่มอุปกรณ์	ขาอุปกรณ์	ขา Arduino
1.ไฟเลี้ยง (Power)	VCC / 5V / Vin GND	5V (ต่อพ่วงกันทุกตัว) GND (ต่อพ่วงกันทุกตัว)
2.จอ LCD & RTC (I2C Bus)	SDA SCL	A4 A5
3.SD Card Module	CS MOSI MISO SCK	10 11 12 13
4.LED แสดงสถานะ	Green LED Red LED	6 7
5.หัววัดความเข้มรังสี (ต้นแบบ)	VCC GND	A1(ADS1115) GND

6.ปุ่มกด	VCC OUT GND	5V 2 GND
7. ADS1115	SDA SCL VCC GND	A4 A5 5V GND



รูปที่ 4 ชุดเครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

3. การปรับเทียบและการทดสอบประสิทธิภาพ

เครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ถูกนำไปติดตั้งและวางไว้ในพื้นที่เปิดโล่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวางควบคู่ไปกับไพราโนมิเตอร์ รุ่น CMP3 ดัง**รูปที่** 5 โดยเครื่องมือทั้งสองระบบนี้ได้ทำการบันทึกข้อมูลจาก Data Logger ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เครื่องเดียวกัน ซึ่งทำให้ได้ค่าการตอบสนองเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในหน่วยโวลต์ (V) เพื่อดูการตอบสนองของเซนเซอร์จากแผงโซลาร์พาแนล

ในการทดลองนี้ได้ทำการจัดเก็บข้อมูลเพื่อสร้างสมการสอบเทียบเป็นเวลา 3 วัน ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น โดยจัดเก็บข้อมูลคู่ขนานทุก ๆ 1 นาที ตั้งแต่เวลา 07.00 น. ถึง 18.00 น. (รวมทั้งสิ้นประมาณ 2,500 ชุดข้อมูล) โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ (Calibration Set) จำนวน 70% และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ (Validation Set) จำนวน 30% เพื่อตรวจสอบความแม่นยำทั่วไปของหัววัด



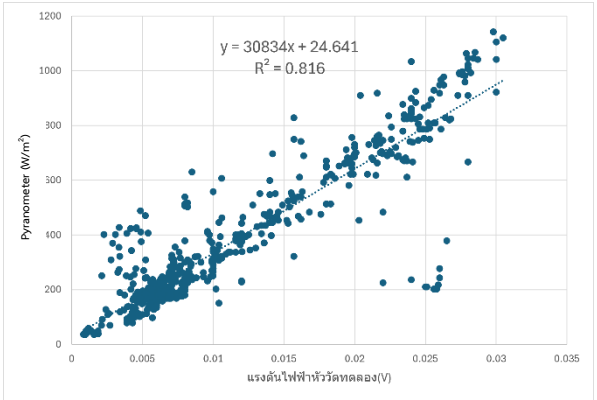
รูปที่ 5 ไพราโนมิเตอร์และหัววัดความเข้มแสงประยุกต์

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทั้งสองเซนเซอร์ได้ถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งได้เส้นแนวโน้มที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$y=mx+c \quad (1)$$

ดัง**รูปที่** 6 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกในระดับที่สูง และยืนยันว่าหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ประยุกต์สามารถติดตามความแปรผันของรังสีดวงอาทิตย์ตามธรรมชาติได้อย่างถูกต้อง จากการวิเคราะห์ทำให้ได้รับสมการเชิงประจักษ์(Empirical equation) เพื่อใช้ในการแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่องวัดความเข้มแสงประยุกต์ที่พัฒนาขึ้น ให้กลายเป็นค่าเทียบเท่าในหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) จากสมการ

$$Solar\ Irradiance\ (W/m^2) = (m \times V)+c \quad (2)$$

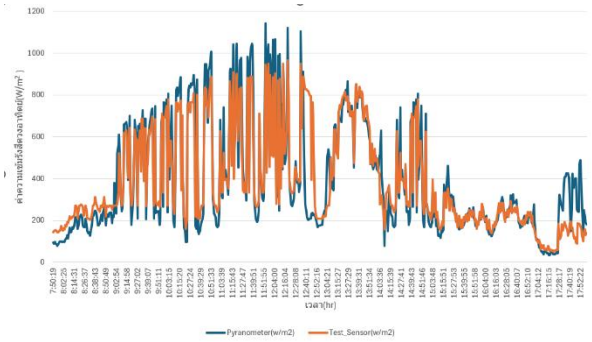


รูปที่ 6 กราฟ Linear Regression ของแรงดันไฟฟ้าหัววัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และ Pyranometer

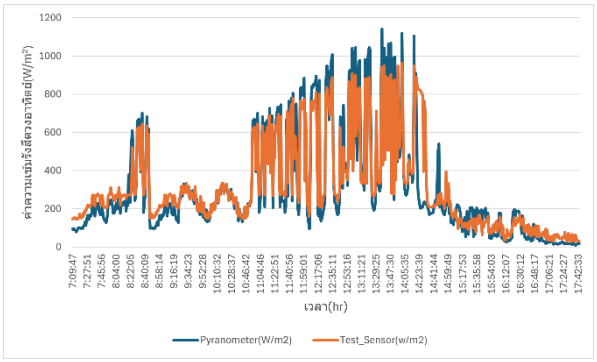
4. ผลการดำเนินงาน

ในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพเครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ ดำเนินการโดยติดตั้งอภิปรายผลร่วมกับเครื่องมือวัดอ้างอิงมาตรฐาน (Pyranometer) ในพื้นที่เปิดโล่งเพื่อจัดเก็บข้อมูลคู่ขนานกันตลอดช่วงเวลากลางวัน จากการนำค่าแรงดันเอาต์พุตจากหัววัดความเข้มแสงประยุกต์ (V) และค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จริง (W/m^2) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) กราฟพล็อตที่ได้จากข้อมูลแสดงไว้ในรูปที่ 7, 8 และ 9 ซึ่งเส้นกราฟเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้ม (Trend) และรูปแบบความแปรผัน (Variation pattern) ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

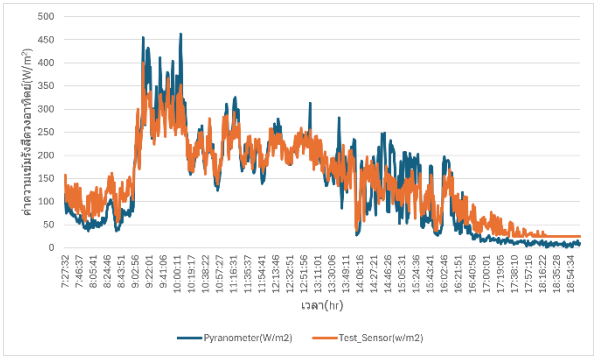
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าระบบให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.816 (คิดเป็นค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น R = 0.903) ซึ่งบ่งชี้ว่าแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดความเข้มรังสีประยุกต์สามารถอธิบายความแปรผันของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามธรรมชาติได้ถูกต้องสูงถึง 81.6% และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องไปกับเครื่องมือวัดมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์(วันที่ 22 พฤษภาคม 2569)



รูปที่ 8 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์(วันที่ 25 พฤษภาคม 2569)



รูปที่ 9 กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์(วันที่ 26 พฤษภาคม 2569)

ทั้งนี้ จากกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 7, 8 และ 9 พบว่าหัววัดประยุกต์มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาเช้าตรู่และช่วงเย็น เนื่องจากเป็นช่วงที่แสงตกกระทบทำมุมเอียงสูงกับพื้นผิวหัววัด (มีค่า Cosine Error สูง) ประกอบกับข้อจำกัดทางกายภาพของแผ่นกระจายแสงเทปล่อน (PTFE) ที่มีความหนา ส่งผลให้การหักเหแสงในช่วงมุมต่ำมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ในอนาคตโดยการลดความหนาหรือปรับรูปทรงของตัวกระจายแสง

5. สรุปผลการทดลอง

เครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีค่าความไว (Sensitivity) อยู่ที่ 30,834 $W/m^{-2}V^{-1}$ โดยมีค่าปัจจัยแก้ไข (Correcting factor) เท่ากับ 24.461 W/m^{-2} ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบสอบเทียบมาตรฐานร่วมกับเครื่องมือวัดอ้างอิงมาตรฐาน

(Pyranometer) หลังจากผ่านกระบวนการสอบเทียบและนำอุปกรณ์ไปทดลองจัดเก็บข้อมูลภาคสนาม พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันเป็นอย่างดีกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน โดยมีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น (Correlation :R) สูงถึง 0.903 (คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2= 0.816) อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงมีข้อจำกัดเล็กน้อยในการตอบสนองต่อสภาวะความเข้มแสงต่ำในช่วงเช้าตรู่และช่วงเย็น ส่งผลให้สัดส่วนความแปรปรวนที่แบบจำลองยังไม่สามารถอธิบายได้อยู่ที่ร้อยละ 18.4 ซึ่งหัววัดที่พัฒนาขึ้นยังคงให้ความแม่นยำสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) อยู่ที่ 52.3867 (W/m^2) และค่า RMSE อยู่ที่ 83.032 (W/m^2)

ทั้งนี้ ผลการทดลองโดยรวมสามารถยืนยันได้ว่าเครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและประสิทธิภาพที่น่าเชื่อถือเพียงพอ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจวัดและประเมินแนวโน้มความแปรผันของพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ในภาคอุตสาหกรรมเกษตรขนาดกลางและขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพและยอมรับได้ในเชิงวิชาการ

6. กิตติกรรมประกาศ

ทั้งนี้ จากกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 7, 8 และ 9 พบว่าหัววัดประยุกต์มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาเช้าตรู่และช่วงเย็น เนื่องจากเป็นช่วงที่แสงตกกระทบทำมุมเอียงสูงกับพื้นผิวหัววัด (มีค่า Cosine Error สูง) ประกอบกับข้อจำกัดทางกายภาพของแผ่นกระจายแสงเทปล่อน (PTFE) ที่มีความหนา ส่งผลให้การหักเหแสงในช่วงมุมต่ำมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ในอนาคตโดยการลดความหนาหรือปรับรูปทรงของตัวกระจายแสง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Nwankwo, S. N., Nnabuchi, M. N., and Ekpe, J. E. (2012).“Construction and Characterization of a Pyranometer Using Locally Available Materials for Global Solar Radiation Measurement.” *Asian Transactions on Basic and Applied Sciences* 2, 4: 35–41.

[2] Sengupta, M., Gotseff, P., and Stoffel, T. (2012). “Evaluation of Photodiode and Thermopile Pyranometers for Photovoltaic Applications.” *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* 27, 1 (September): 24–28.

[3] Martínez, Miguel A., Andújar, José M., and Enrique, Juan M. (2009). “A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range.” *Sensors* 9, 6 (June): 4615–4634.

[4] Vishay Telefunken. (1999). “BPX43: Silicon NPN Phototransistor Datasheet.” *Vishay Semiconductor GmbH* 4, 1 (May): 1–6.

[5] Tohsing, K., Phaisathit, D., Pattarapanitchai, S., Masiri, I., Buntoung, S., Aumporn, O., and Wattan, R. (2019). “A development of a low-cost pyranometer for measuring broadband solar radiation.” *Journal of Physics: Conference Series* 1380, 1 (November): 012045.

[6] Osinowo, M. O., Willoughby, A. A., Ewetumo, T., and Kolawole, L. B. (2019). “Development of a Low-Cost Pyrometer using Locally Sourced Materials.” *International Journal for Scientific Research & Development* 7, 5 (July): 129–133.

[7] Taha, M., Mughal, M. O., Khan, S., and Usman, M. (2023). "A Low-Cost IoT-Enabled Pyranometer; Based on the Peltier Element." *International Journal of Engineering Trends and Technology* 71, 2 (February): 334–340.

[8] Van der Burgt, Peter. (2020). "Designing a Low-Cost Autonomous Pyranometer." *Bachelor thesis, Creative Technology, University of Twente* 1, 1 (July): 1–106.

[9] John, C. I., Mahmood, M. K., Abubakar, B., Lawal, O. K., Nakorji, H. U., and Kabir, S. D. (2019). "Design and Implementation of an Electronic Pyranometer." *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering* 14, 3 (May-June): 24–30.

[10] Oyelami, S., Azeez, N. A., Adedigba, S. A., Akinola, O. J., and Ajayi, R. M. (2020). "A Pyranometer for Solar Radiation Measurement-Review." *Adeleke University Journal of Engineering and Technology* 3, 1 (January): 61–68.

การจำลองการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวที่ใช้เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5

Numerical Simulation of Hot Gas Flow and Temperature Distribution Around a Noodle-Boiling Pot Equipped with a KB-5 High-Pressure Gas Burner

พงษ์กิต โพธิ์งาม[1], อภิวัฒน์ เพชรวงศ์[2], ไมตรี พลสงคราม[3], ติณกร ภูวดิน[3] และ ปรีชา ขันติโกมล[3,*]

[1] สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ

[2] สาขาวิศวกรรมยานยนต์

[3]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

*ผู้ติดต่อ: preecha@rmuti.ac.th, 0804705287

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวที่ใช้เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5 โดยดำเนินการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มและกรณีติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวชนิดวัสดุทึบที่ความสูง 20 cm ด้วยระเบียบวิธีการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ภายใต้อัตราการป้อนพลังงาน 3 ระดับ ได้แก่ 3.68, 7.36 และ 11.04 kW ผลการวิจัยพบว่า การติดตั้งแผ่นหุ้มสามารถช่วยควบคุมทิศทางการไหลของก๊าซร้อนและกักเก็บความร้อนให้อยู่บริเวณใต้ก้นหม้อและไหลแนบไปตามผนังด้านข้างของภาชนะได้นานขึ้น ส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และสามารถลดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกรณีติดตั้งแผ่นหุ้มความสูง 20 cm ร่วมกับอัตราการป้อนพลังงาน 11.04 kW ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 73 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแผ่นหุ้มหม้อในฐานะแนวทางเชิงวิศวกรรมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิง LPG และยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคธุรกิจอาหารรายย่อยได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: การจำลองเชิงตัวเลข, การกระจายอุณหภูมิ, ก๊าซร้อน, หม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยว, เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5, แผ่นหุ้มวัสดุทึบ

Abstract

This research aims to investigate the flow behavior and temperature distribution of hot gas around a noodle-boiling pot equipped with a KB-5 high-pressure gas burner. A comparative analysis was conducted between the case without a heat shield and the case with a solid heat shield installed around the noodle-boiling pot at a height of 20 cm. The study employed a numerical simulation method using SolidWorks Flow Simulation under three levels of energy input, namely 3.68, 7.36, and 11.04 kW. The results showed that the installation of the heat shield helped control the flow direction of the hot gas and retain heat beneath the pot bottom and along the side wall of the vessel for a longer period.

This resulted in a more uniform temperature distribution and effectively reduced heat loss to the surrounding environment. The case with the 20 cm high heat shield combined with an energy input of 11.04 kW achieved the highest thermal efficiency of 73%. The findings demonstrate the potential of the pot heat shield as an engineering approach for designing energy-saving devices, which can reduce LPG fuel costs and enhance energy-use efficiency in small-scale food businesses in a practical manner.

Keywords: Numerical simulation, Temperature distribution, Hot gas, Noodle-boiling pot, KB-5 high-pressure gas burner, Opaque heat shield.

1. บทนำ

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว หรือ LPG เป็นเชื้อเพลิงสำคัญที่ใช้ในกระบวนการประกอบอาหารทั้งในครัวเรือน ร้านอาหาร และอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากให้ค่าความร้อนสูง ควบคุมการเผาไหม้ได้ง่าย และเหมาะกับอุปกรณ์ให้ความร้อนหลายชนิด อย่างไรก็ตาม เตาแก๊สแบบเปลวเปิดยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน เพราะพลังงานจากการเผาไหม้จำนวนหนึ่งสูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน การแผ่รังสี และการไหลหนีของก๊าซร้อนด้านข้าง ส่งผลให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มต้นทุนการใช้งาน [1], [2]

ร้านก๋วยเตี๋ยวในประเทศไทยนิยมใช้เตาแก๊สแรงดันสูง KB-5 ร่วมกับหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวขนาดใหญ่ เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำซุปในปริมาณมากและต่อเนื่องเป็นเวลานาน หากไม่มีอุปกรณ์ช่วยควบคุมการไหลของก๊าซร้อน ความร้อนจากเปลวไฟและไอเสียจะกระจายออกด้านข้างก่อนถ่ายโอนสู่ก้นหม้อและผนังหม้ออย่างเต็มที่ ทำให้ต้องใช้ LPG มากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำ ดังนั้น การลดการสูญเสียความร้อนรอบหม้อต้มจึงเป็นประเด็นสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและลดต้นทุนเชื้อเพลิง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของเตาแก๊สหลายวิธี เช่น การปรับปรุงหัวเผา การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวเผากับภาชนะ การใช้การไหลแบบหมุนวน การใช้วัสดุพรุน และการติดตั้งแผ่นบังลมหรือแผ่นหุ้มความร้อน Boggavarapu และคณะ [3] แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถใช้วิเคราะห์การไหล การเผาไหม้ และการถ่ายเทความร้อนของเตาแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Wichangarm และคณะ [4] ใช้ CFD ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตา LPG และพบว่าสามารถอธิบายความเร็วการไหลและการกระจายอุณหภูมิได้ดี นอกจากนี้ Matthujak และคณะ [5] พบว่าการไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มการผสมของก๊าซร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพของหัวเตา LPG

การใช้วัสดุพรุนเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน Pantangi และคณะ [6], [7] รายงานว่าวัสดุพรุนและหัวเผาแบบ porous radiant burner สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเตา LPG ได้ ขณะที่ Muthukumar และคณะ [8] พบว่าหัวเผาแบบแผ่รังสีผ่านวัสดุพรุนช่วยลดการสูญเสียพลังงาน อย่างไรก็ตาม วัสดุพรุนอาจมีข้อจำกัดด้านโครงสร้าง การสะสมเขม่า และการทำความสะอาด จึงอาจไม่เหมาะกับการใช้งานต่อเนื่องในร้านอาหาร

ด้วยเหตุนี้ แผ่นหุ้มวัสดุทึบรอบหม้อต้มจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างง่าย ต้นทุนไม่สูง และติดตั้งกับเตาเดิมได้สะดวก แผ่นหุ้มช่วยลดการไหลหนีของก๊าซร้อนด้านข้าง ทำให้ก๊าซร้อนสัมผัสผิวหม้อได้นานขึ้น ส่งผลให้การพาความร้อนสู่ภาชนะเพิ่มขึ้นและการสูญเสียความร้อนลดลง Gohil และคณะ [2] พบว่า flame shield ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา LPG ได้อย่างชัดเจน ส่วน Wichangarm และ Kaewpho [9] พบว่าแผ่นบังลมมีผลต่อฟลักซ์ความร้อนและประสิทธิภาพของเตา KB-5 โดยตรง

นอกจากนี้ ระยะห่างระหว่างหัวเผากับภาชนะ รูปทรงภาชนะ และการปรับปรุงพื้นผิวรับความร้อนยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน Wae-Hayee และคณะ [10] รายงานว่าระยะหัวเผากับแผ่นรับความร้อนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ส่วน Wang และคณะ [11] พบว่าการเพิ่มครีบบนหม้อช่วยเพิ่ม

การรับความร้อน และ Gao และคณะ [12] สรุปว่าการควบคุมการไหลของก๊าซร้อนและการลดการสูญเสียความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊ส

แม้งานวิจัยก่อนหน้าได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สหลายรูปแบบ แต่การศึกษาการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มน้ำก๋วยเตี๋ยวที่ใช้เตา KB-5 โดยเปรียบเทียบกรณีไม่ติดตั้งและติดตั้งแผ่นหุ้มวัสดุทึบยังมีความจำเป็นโดยเฉพาะข้อมูลอุณหภูมิบริเวณก้นหม้อและด้านข้างหม้อ ซึ่งมีผลต่อการออกแบบแผ่นหุ้มให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง การจำลองด้วย CFD จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล ความเร็วไอเสีย และการกระจายอุณหภูมิในบริเวณที่การทดลองวัดได้ยาก

2. ทฤษฎี

2.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามมาตรฐาน DIN-EN 203-2 ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินความคุ้มค่าและความเหมาะสมในการใช้พลังงาน (Rational energy use) ของอุปกรณ์ประกอบอาหารที่ให้ความร้อนด้วยแก๊ส เช่น หัวเตาแบบเปิดและหม้อต้ม ในการทดลองนี้ น้ำในปริมาณที่กำหนดจะถูกเติมลงในหม้อ และทำการบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (T_i) โดยจะมีการชั่งน้ำหนักถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ก่อนเริ่มการทดสอบ จากนั้นจึงจุดหัวเตาเพื่อเพิ่มความร้อนให้แก่น้ำจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงเกณฑ์สิ้นสุดหรือถึงจุดเดือด (T_f) ภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ จะทำการชั่งน้ำหนักถัง LPG อีกครั้งเพื่อคำนวณหามวลของแก๊ส LPG ที่ถูกบริโภคไป (m_{LPG})

หลักการคำนวณประเมินผลจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความร้อนที่มีประสิทธิผล (Useful heat) ซึ่งน้ำดูดกลืนไว้ กับพลังงานความร้อนรวมทั้งหมดที่ป้อนเข้าจากการเผาไหม้ของแก๊ส LPG โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{m_w C_p \left(T_f - T_i\right)}{m_{LPG}\left(LHV\right)} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ กำหนดไว้ดังนี้

η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)

m_w คือ มวลของน้ำ (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ มีค่าประมาณ 4.186 $\mathrm{kJ/kg \cdot ^\circ C}$

$T_f - T_i$ คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ

m_{LPG} คือ มวลของแก๊ส LPG ที่ใช้ไป (kg)

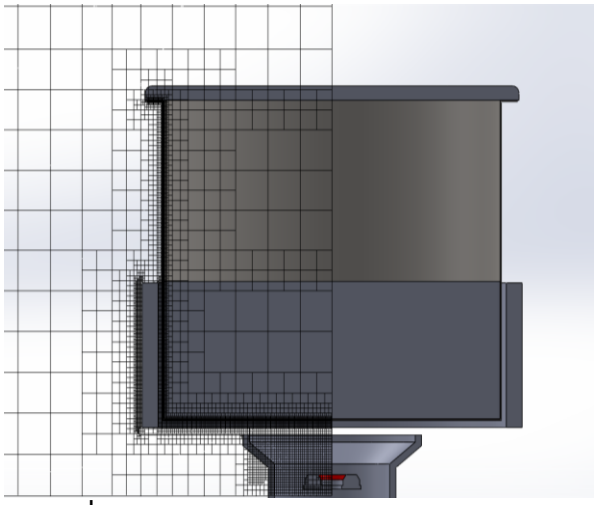
LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของแก๊ส LPG (Lower Heating Value, หน่วย kJ/kg)

ทั้งนี้ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้น ย่อมบ่งชี้ถึงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีเยี่ยมจากหัวเตาไปยังน้ำ และสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณการสูญเสียความร้อนสู่สภาวะแวดล้อมที่ลดลง

2.2 การจำลองการกระจายความร้อน

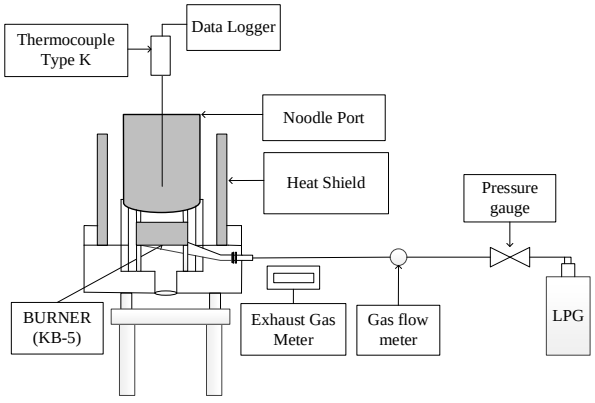
การวิเคราะห์เชิงจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินการกระจายความร้อนของระบบหม้อต้มก๋วยเตี๋ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ดำเนินการผ่านระเบียบวิธีกลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation โดยเริ่มต้นจากการแบ่งตาข่ายชิ้นงาน (Meshing) บนแบบจำลองเรขาคณิตสามมิติของหม้อต้มที่บรรจุน้ำปริมาตรควบคุม 30 ลิตร และแผ่นหุ้มวัสดุทึบวัสดุทึบ

ที่มีการแปรผันความสูงที่ระดับ 10, 20 และ 30 cm ภายใต้ระยะห่างจากผนังหม้อคงที่ 1 cm สำหรับการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เชิงตัวเลขที่สำคัญ ประกอบด้วย การป้อนภาระความร้อน (Thermal Load) บริเวณผิวสัมผัสด้านล่างของก้นหม้อ สอดคล้องตามสมรรถนะของหัวเตาแก๊สแรงดันสูงขนาด KB-5 ซึ่งแปรผันตามอัตราการป้อนพลังงานจากเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) 3 ระดับ คือ 3.68, 7.36 และ 11.04 kW โดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำคงที่เท่ากับ 90 °C และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในหม้อ ร่วมกับเงื่อนไขการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อมภายนอก บริเวณผนังหม้อและแผ่นหุ้มวัสดุทึบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองและโครงข่ายตาข่ายหาการกระจายความร้อน

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm และทำการทดลองตามมาตรฐาน DIN EN 203-2 ดังรูปที่ 2 โดยอุปกรณ์หลักๆ ของการทดลองหลักๆ ประกอบด้วย หม้อก๋วยเตี๋ยว ถังแก๊ส LPG ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส เครื่องชั่งน้ำหนัก เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว วิธีการทดลองต้มน้ำเริ่มต้นจากการบันทึกมวลของถังแก๊สก่อนใช้งานและอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (40 °C) จากนั้นทำการจุดหัวเตาแก๊สแรงดันสูง KB-5 เพื่อป้อนความร้อนจนกระทั่งน้ำในหม้อต้มมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงเกณฑ์สิ้นสุดหรือจุดเดือด (90 °C) เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองจะทำการชั่งมวลแก๊สอีกครั้งเพื่อคำนวณมวลแก๊สสุทธิที่ใช้ไป ปริมาณความร้อนที่มีประสิทธิผลซึ่งน้ำดูดกลืนไว้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนรวมจากการเผาไหม้เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อไป



รูปที่ 2 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

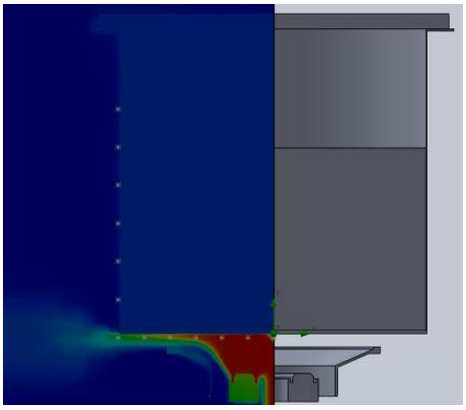
3. การทดลอง

ในการทดลองมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง โดยการศึกษาครั้งทำการทดลองกับความสูงของแผ่นหุ้มหมอก๋วยเตี๋ยว (แผ่นป้องกันไอเสีย) ที่ความสูง 20 cm ใช้หม้อก๋วยเตี๋ยวตัวอย่าง

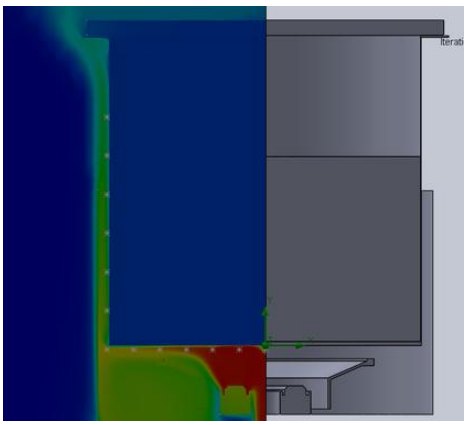
4. ผลการศึกษา

รูปที่ 3 แสดงการจำลองการกระจายอุณหภูมิรอบหม้อก๋วยเตี๋ยว (a) กรณีไม่ติดตั้ง และ (b) กรณีติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแก๊สร้อนที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิง 11.04 kW

กรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มพบว่า บริเวณอุณหภูมิสูงกระจุกตัวเฉพาะใต้ก้นหม้อ และก๊าซร้อนส่วนหนึ่งไหลออกด้านข้างอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมและการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ขณะที่กรณีติดตั้งแผ่นหุ้ม ก๊าซร้อนถูกบังคับให้ไหลขึ้นตามผิวด้านข้างของหม้อ ทำให้พื้นที่อุณหภูมิสูงขยายตัวต่อเนื่องจากก้นหม้อสู่ผนังหม้อ เพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซร้อนกับพื้นผิว และส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภาชนะอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



(a)



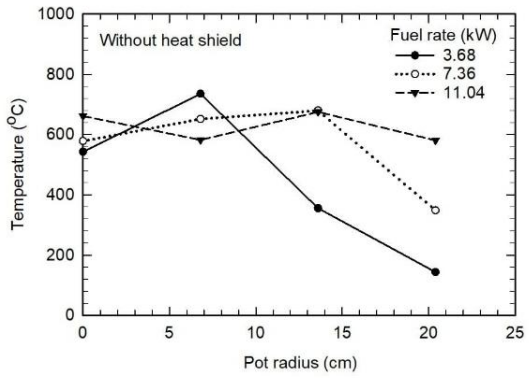
(b)

รูปที่ 3 การจำลองการกระจายอุณหภูมิรอบหม้อก๋วยเตี๋ยว (a) กรณีไม่ติดตั้ง และ (b) กรณีติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว

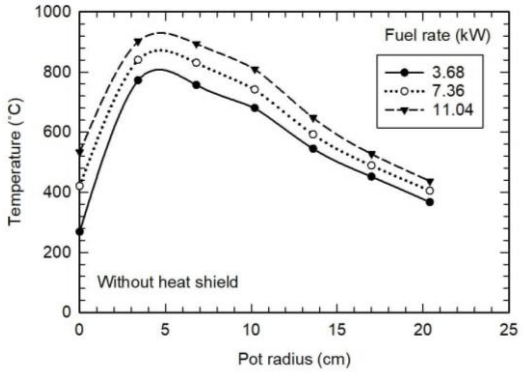
รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิก้นภาชนะของหม้อก๋วยเตี๋ยว กรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อ (แผ่นกันความร้อน) สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แนวโน้มของการกระจายความร้อนจะลดลงตามแนวรัศมีอย่างมาก และต่ำสุดที่ขอบหม้อ แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิมีความไม่สม่ำเสมอสูง โดยความร้อนจะกระจุกตัวหนาแน่นและมีค่าสูงสุดบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางของหัวเตา และลดลงอย่างรวดเร็วตามแนวรัศมีของหม้อต้ม (Pot radius) เนื่องจากการไหลหนีของก๊าซร้อนออกสู่สภาวะแวดล้อมด้านข้างผ่านกลไกการพาความร้อนและการแผ่รังสีโดยไม่มีอุปกรณ์ควบคุมทิศทาง แม้ว่าการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเป็น 11.04 kW จะช่วยยกระดับอุณหภูมิโดยรวมให้สูงขึ้น แต่ลักษณะโครงสร้างการกระจายอุณหภูมิก็ยังคงมีความลาดชันและไม่สม่ำเสมอเช่นเดิม กรณีเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลอง พบว่าแนวโน้มในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำจะมีลักษณะเดียวกัน และแตกต่างกันบ้างในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ซึ่งการกระจายอุณหภูมินี้มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการถ่ายโอนพลังงานสู่น้ำในหม้อก๋วยเตี๋ยวอย่างมีนัยสำคัญ

รูปที่ 5 แสดงการกระจายอุณหภูมิก้นหม้อกรณีติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยววัสดุทึบความสูง 20 cm จากก้นหม้อ ทั้งผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า มีการกระจายอุณหภูมิก้นหม้อค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยอุณหภูมิยังคงมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มวัสดุทึบ แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นหุ้ม มีผลต่อการรักษาอุณหภูมิก้นหม้อได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้งอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามจาก

ผลการศึกษาพบว่า ความร้อนยังคงกระจุกอยู่ตรงกึ่งกลางก้นหม้อ ซึ่งเป็นผลมาจากรัศมีหม้อมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับหัวเตาแก๊สขนาด KB-5

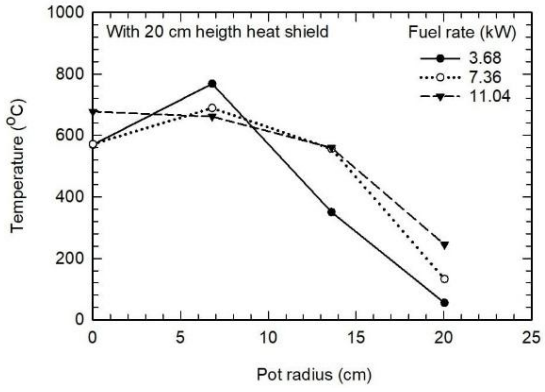


(a) ทดลอง

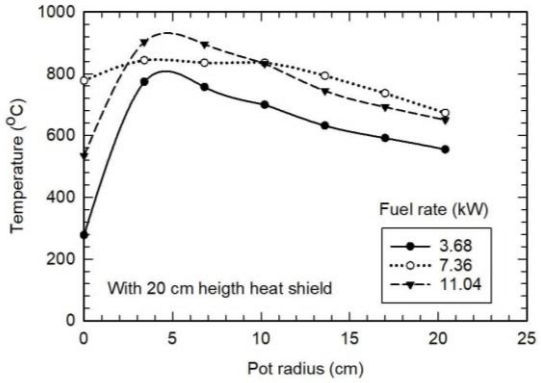


(b) จำลอง

รูปที่ 4 อุณหภูมิก้นภาชนะกรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว (a) การทดลอง และ (b) การจำลอง



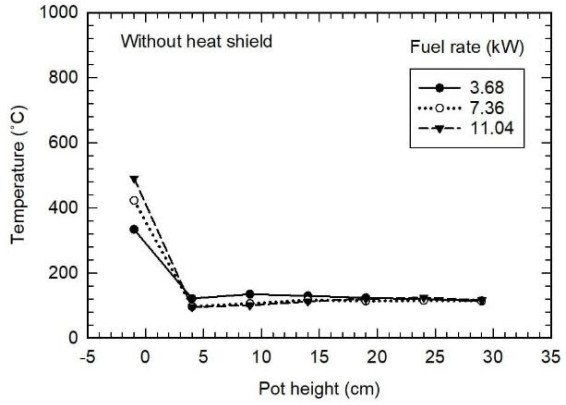
(a)



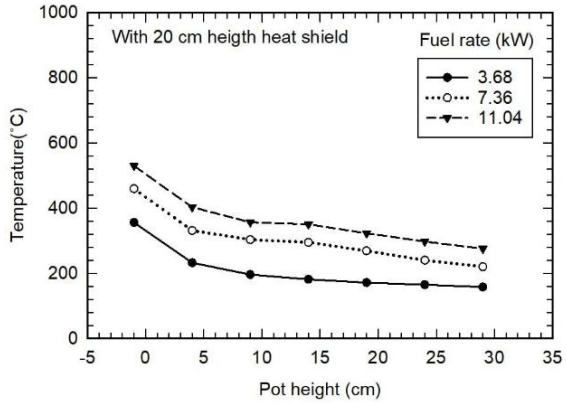
(b)

รูปที่ 5 โครงสร้างของอุณหภูมิก้นภาชนะกรณี ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยววัสดุทึบ ความสูง 20 cm (a) การทดลอง และ (b) การจำลอง

รูปที่ 6 แสดงจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซร้อนบริเวณผนังด้านข้างหม้อต้มก๋วยเตี๋ยว ในกรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว อุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบผนังหม้อมีค่าต่ำและลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระแสก๊าซร้อนจากการเผาไหม้แพร่กระจายและไหลหนีออกสู่สภาวะแวดล้อมอย่างอิสระทันทีที่พ้นจากขอบก้นหม้อ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกด้านข้างในปริมาณสูง ในทางตรงกันข้าม เมื่อติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยววัสดุทึบ ความสูง 20 cm พบว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบผนังหม้อเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง เนื่องจากแผ่นครอบทำหน้าที่เป็นช่องแกนแคบ บังคับทิศทางให้ก๊าซไอเสียไหลแนบไปกับผิวผนังหม้อต้ม ช่วยยืดระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างอุณหภูมิด้านข้างหม้อมีความเสถียรและหนุนให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของระบบเตาแก๊สสูงขึ้นอย่างเด่นชัดตามหลักพลศาสตร์ความร้อน

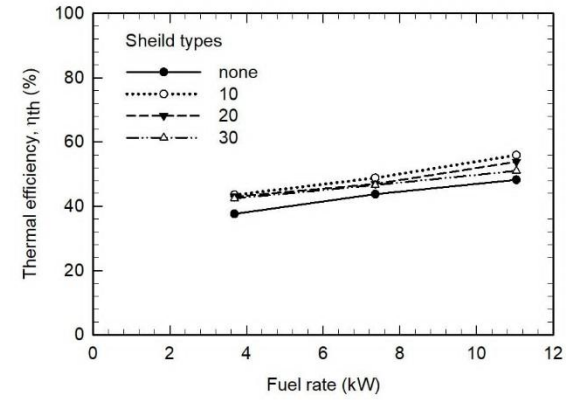


(a)



(b)

รูปที่ 6 การจำลองการกระจายอุณหภูมิด้านข้างหม้อก๋วยเตี๋ยว (a) ไม่ติดตั้ง และ (b) ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยววัสดุทึบ ความสูง 20 cm



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

รูปที่ 7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความของเตาแก๊สขนาด KB-5 สำหรับหม้อก๋วยเตี๋ยวกรณีไม่ติดตั้งและติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยววัสดุทึบความสูง 20 cm จากการเปรียบเทียบเทียบพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกรณีติดตั้งแผ่นหุ้มวัสดุทึบมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลมาจากก้นหม้อก๋วยเตี๋ยวมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรับความร้อนจากเตาสู่น้ำในหม้อได้ดี อย่างไรก็ตาม กรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อ มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดร้อนมากกว่าจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่า

6. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นหุ้มวัสดุทึบต่อพฤติกรรมการไหลและการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนรอบหม้อต้มก๋วยเตี๋ยวขนาด 40 cm ที่ใช้หัวเตาแก๊สแรงดันสูง KB-5 โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ความสูงของแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว 20 cm ภายใต้อัตราการป้อนพลังงานความร้อน 3.68, 7.36 และ 11.04 kW ผลการวิเคราะห์พบว่า การติดตั้งแผ่นหุ้มช่วยปรับปรุงโครงสร้างอุณหภูมิบริเวณก้นภาชนะให้มีลักษณะราบเรียบและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นตลอดแนวรัศมี เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มที่ความร้อนมักกระจุกตัวเฉพาะจุดศูนย์กลาง นอกจากนี้ แผ่นหุ้มยังทำหน้าที่เป็นช่องแกนแคบควบคุมทิศทางการไหล บังคับให้กระแสก๊าซไอเสียไหลแนบไปกับผนังด้านข้างภาชนะ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเร็วและการถ่ายเทความร้อนเชิงพา ควบคู่กับการยืดระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและลดการสูญเสียความร้อนออกด้านข้าง ส่งผลให้ระบบเตา

แก๊สที่ติดตั้งแผ่นหุ้มมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งแผ่นหุ้มหม้อก๋วยเตี๋ยว เป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับสมรรถนะและการประหยัดพลังงานในระบบหุงต้มอย่างมีนัยสำคัญ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Pantangi, V. K., Karuna Kumar, A. S. S. R., Mishra, S. C., & Sahoo, N. (2007). Performance analysis of domestic LPG cooking stoves with porous media. International Energy Journal, 8, 139–144.

[2] Gohil, P. P., Dwivedi, G., Shukla, A. K., & Verma, P. (2022). Experimental investigation of heat conservation through novel flame shield arrangement for domestic LPG gas stove. Materials Today: Proceedings, 49(2), 223–229. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.667

[3] Boggavarapu, P., Ray, B., & Ravikrishna, R. V. (2014). Thermal efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies. Fuel, 116, 709–715. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.054

[4] Wichangarm, M., Matthujak, A., Sriveerakul, T., Sucharitpwatskul, S., & Phongthanapanich, S. (2020). Investigation on thermal efficiency of LPG cooking burner using computational fluid dynamics. Energy, 203, 117849. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117849

[5] Matthujak, A., Wichangarm, M., Sriveerakul, T., Sucharitpwatskul, S., & Phongthanapanich, S. (2021). Numerical investigation on the influences of swirling flow to thermal efficiency enhancement of an LPG-energy saving burner. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101466. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101466

[6] Ali, S. M. (2014). Performance of domestic LPG cooking stove with porous media. Open Access Library Journal, 1, 1–5. https://doi.org/10.4236/oalib.1100864

[7] Pantangi, V. K., Mishra, S. C., Muthukumar, P., & Reddy, R. (2011). Studies on porous radiant burners for LPG cooking applications. Energy, 36(10), 6074–6080. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.008

[8] Muthukumar, P., Anand, P., & Sachdeva, P. (2011). Performance analysis of porous radiant burners used in LPG cooking stove. International Journal of Energy and Environment, 2(2), 367–374.

[9] Wichangarm, M., & Kaewpho, P. (2023). Effect of wind shield on heat transfer to pot of KB-5 cooking stove by computational fluid dynamics. RMUTSB Academic Journal, 11(1), 92–109.

[10] Wae-Hayee, M., Yeranee, K., Suksuwan, W., & Nuntadusit, C. (2021). Effect of burner-to-plate distance on heat transfer rate in a domestic stove using LPG. Case

Studies in Thermal Engineering, 28, 101418. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101418

[11] Wang, J., Zhang, W., Yang, T., Yu, Y., Liu, C., & Li, B. (2022). Numerical and experimental investigation on heat transfer enhancement by adding fins on the pot in a domestic gas stove. Energy, 239, 122439.

[12] Gao, W., Zhang, X., Li, X., & Chen, H. (2023). Comprehensive review on thermal performance enhancement of domestic gas stoves. ACS Omega, 8(30), 26663–26684. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01628

การวิเคราะห์สมรรถนะของตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด

Performance Evaluation of Infrared-Dried Smoked Tilapia

พงศ์สกุล พรมชู, สิทธิโชค เจริญสุวรรณคีรี, อารยันต์ วงษ์นิยม,[1] ผศ.วีรยุทธ จี้เพชร และ อัปสรรัชย์ น้ำทรง*[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ตั้งอยู่เลขที่ 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: อัปสรรัชย์ น้ำทรง E-mail Apsornrat.nu@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 084-4480815

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิลด้วยตู้อบแห้งรังสีอินฟราเรด และประยุกต์ใช้แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying model) เพื่ออธิบายและทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ ตู้อบแห้งที่พัฒนาขึ้นใช้หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดขนาด 800 W จำนวน 2 ชุด รวมกำลังไฟฟ้า 1,600 W เป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น อัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้นของปลานิล โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและระยะเวลาในการลดความชื้นลดลง การอบที่อุณหภูมิ 80 °C สามารถลดความชื้นจากเริ่มต้นประมาณ 59% เหลือ 5.0% ภายใน 8 ชั่วโมง ขณะที่อุณหภูมิ 70 °C สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้ประมาณ 7.5% และให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยรวมดีที่สุด ส่วนการอบที่ 60 °C มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 10.8% ตู้อบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 12.8 kWh ต่อรอบการอบ 8 ชั่วโมง คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 56.59 บาทต่อรอบ

เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งด้านการลดความชื้น อัตราการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า อุณหภูมิ 70 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการอบแห้งปลานิลด้วยตู้อบอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางสามารถนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการลดความชื้นและเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและวิสาหกิจชุมชน

คำสำคัญ: ตู้อบปลานิลย่างรมควัน, รังสีอินฟราเรด, อัตราการอบแห้ง, การอบแห้งแบบชั้นบาง

Abstract

This research aimed to investigate the drying behavior of Nile tilapia using an infrared drying cabinet and to apply thin-layer drying models to describe and predict changes in the moisture content of the product. The developed dryer was equipped with two 800 W infrared lamps, providing a total heating power of 1,600 W. Drying experiments were conducted at temperatures of 60, 70, and 80 °C for 8 hours. Changes in moisture content, drying rate, energy consumption, and product quality after drying were investigated.

The experimental results showed that drying temperature significantly affected the moisture reduction rate of Nile tilapia. As the drying temperature increased, the drying rate tended to increase, while the time required to reduce the moisture content decreased. Drying at 80 °C reduced the initial moisture content from approximately 59% to 5.0% within 8 hours. At 70 °C, the final moisture content was approximately 7.5%, and this condition provided the best overall product quality. In contrast, drying at 60 °C resulted in a final moisture content of approximately 10.8%. The infrared dryer consumed approximately 12.8 kWh of electrical energy per 8-hour drying cycle, corresponding to an electricity cost of approximately 56.59 THB per cycle.

Considering moisture reduction, drying rate, and product quality together, a drying temperature of 70 °C was identified as the most suitable operating condition for drying Nile tilapia using the developed infrared dryer. Thin-layer drying models can be effectively applied to describe the moisture reduction behavior and provide fundamental information for the design and optimization of drying processes for aquatic products at the small-scale industrial and community enterprise levels.

Keywords: smoked grilled Nile tilapia dryer, infrared radiation, drying rate, thin layer drying

1. บทนำ (Introduction)

ปลานิลย่างรมควันเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีรสชาติและกลิ่นเฉพาะตัว รวมทั้งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง [1] อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ยังคงมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การอบแห้งจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการลดความชื้น ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเพิ่มความปลอดภัยในการเก็บรักษา [2]-[4]

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนโดยตรงเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง ลดการใช้พลังงาน และช่วยรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัสของอาหารได้ดีกว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนากระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ

นอกจากนี้ การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-Layer Drying Model) มีบทบาทสำคัญในการอธิบายและทำนายพฤติกรรมการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์[5] ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ การควบคุม และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด โดยประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของปลานิลย่างรมควัน ซึ่งผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารและวิสาหกิจชุมชนได้อย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.75–1000 ไมโครเมตร สามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่วัสดุได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ข้อดีของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ได้แก่ ลดระยะเวลาในการอบแห้ง, ลดการใช้พลังงาน, เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน, รักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์, และลดการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการตากแดดด้วยคุณสมบัติดังกล่าว การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจึงได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารและการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ

2.2 สมรรถนะของระบบอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะของตู้อบเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาจากตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการอบแห้ง, อัตราการอบแห้ง (Drying Rate), ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า, การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC), ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบ (Thermal Efficiency), และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบ โดยที่สมรรถนะที่ดีควรสามารถลดความชื้นได้รวดเร็ว ใช้พลังงานต่ำ และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

1). การคำนวณหาความชื้นฐานเปียก : เป็นการคำนวณปริมาณน้ำเทียบกับน้ำหนักรวมของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$MC_{wb} = \frac{W_i - W_d}{W_i} \quad (1)$$

โดยที่ MC_{wb} คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

W_d คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบจนแห้ง (g)

2). อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio (MR) หรืออัตราส่วนความชื้น เป็นตัวแปรที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) และการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-Layer Drying Models) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในผลิตภัณฑ์ตามเวลา สมการมาตรฐานของ Moisture Ratio คือ

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

โดยที่ M_R คือ อัตราส่วนความชื้น (%)

M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (kg water/kg dry matter)

M_t คือ ปริมาณความชื้น ณ เวลา t

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล

3. การสร้างต้นแบบตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด

ต้นแบบตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรดที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 และข้อมูลทางเทคนิคแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ต้นแบบตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางเทคนิคของตู้อบปลานิลย่างรมควันด้วยรังสีอินฟราเรด

ขนาด	805x1208mm.
แรงดันไฟฟ้า	110, 220, 380V, 50Hz
หลอดรังสีอินฟาเรด	2x800W
ความร้อนสูงสุด	120°C
ระบบควบคุมอุณหภูมิ	Type-K Thermocouple

4. การทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 วัตถุดิบและการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นปลานิลสด ขนาดใกล้เคียงกันโดยมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 285 กรัมต่อตัว นำปลานิลสดที่ได้จากการสุ่มจำนวน 24 ตัว จำนวน 3 ครั้ง ต่อ 1 อุณหภูมิ วัดขนาดความยาว และชั่งน้ำหนักปลานิลสด โดยนำปลานิลสดที่ยังไม่ได้แล่มาชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกทำการทดสอบ จากนั้นทำการแล่ปลาโดยผ่าตามแนวหลัง ควักไส้ ทำความสะอาดดังรูปที่ 2



(a)



(b)

รูปที่ 2 น้ำหนักปลานิล (a) ก่อน, (b) หลังการแล่เนื้อ

4.2 การทดลองอบแห้งด้วยตู้อบรังสีอินฟาเรด

ทำการทดลองอบที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 60°C, 70°C และ 80°C เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของปลานิล พร้อมบันทึกอุณหภูมิภายในตู้อบตลอดการทดลอง ข้อมูลน้ำหนักที่ได้ถูกนำมาคำนวณค่าความชื้น (Moisture Content) และอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และบันทึกผลการทดลองในตารางที่ 2 - ตารางที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 60°C

ชั่วโมง	น้ำหนักปลา (g)	ความชื้นของเนื้อปลา (%)
1	275	59.23
2	253	56.47
3	228.26	52.13
4	200.5	43.81
5	178.9	34.31
6	160.4	25.8
7	144.98	18.3
8	131.67	10.8

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 70°C

ชั่วโมง	น้ำหนักปลา (g)	ความชื้นของเนื้อปลา (%)
1	288	59.5
2	248	51.0
3	218	42.5
4	190	33.0
5	172	25.0
6	155	17.0
7	142	11.5
8	134	8.5

และข้อมูลในตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 80°C

ชั่วโมง	น้ำหนักปลา (g)	ความชื้นของเนื้อปลา (%)
1	280	58.0
2	245	44.0
3	205	34.0
4	180	25.0
5	155	17.0
6	138	11.0
7	125	7.5
8	118	5.0

ตารางที่ 5 สรุปข้อมูลทางกายภาพของปลานิล

อุณหภูมิ	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%)	คุณภาพ
60°C	131.67	10.80	เนื้อนุ่ม สีอ่อน
70°C	124.00	7.50	สมดุลดีที่สุด
80°C	116.00	5.00	แห้งเร็ว สีเข้ม อาจแข็ง

ข้อมูลผลการทดสอบ ตารางที่2 - ตารางที่ 5 การทดลองความชื้นเริ่มต้นประมาณ 59% สำหรับอุณหภูมิ 80°C มีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 5% ดังนั้น

$$MR = \frac{5.0}{5.9}$$

$$MR \approx 0.085$$

แสดงว่าหลังการอบแห้ง 8 ชั่วโมง ปริมาณความชื้นคงเหลือประมาณ 8.5% ของความชื้นเริ่มต้น การลดความชื้นสามารถพิจารณาอัตราความชื้นเฉลี่ยจาก Moisture reduction rate = $\frac{M_0 - M_{t0}}{t}$ ดังนั้น

ที่ 80°C $\frac{59-5.0}{8} \approx 6.75\%/h$

ที่ 70°C $\frac{59-7.5}{8} \approx 6.44\%/h$

ที่ 60°C $\frac{59-10.8}{8} \approx 6.03\%/h$

แนวโน้มการลดความชื้น $R_{80} > R_{70} > R\ 60$ แสดงว่าอุณหภูมิสูงทำให้ลดความชื้นได้เร็วขึ้น

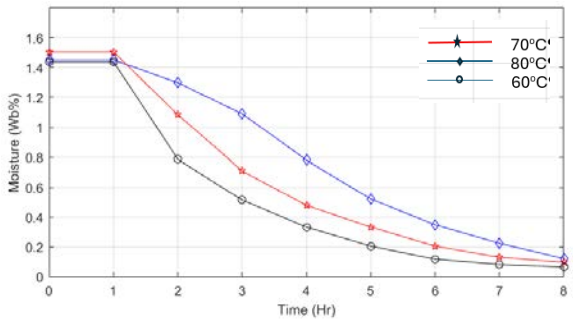
ตารางที่ 6 เปรียบเทียบน้ำหนัก ก่อน-หลังการอบแห้ง

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)		ความชื้น (wb%)
	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	107	47	56.07
2	173	71	58.96
3	159	68	60.38
4	136	59	56.62
5	157	61	61.15
6	138	54	60.87
7	147	57	61.22
8	158	62	60.75
9	135	52	61.48
ค่าเฉลี่ย	145	59.11	59.23

5. สรุปและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

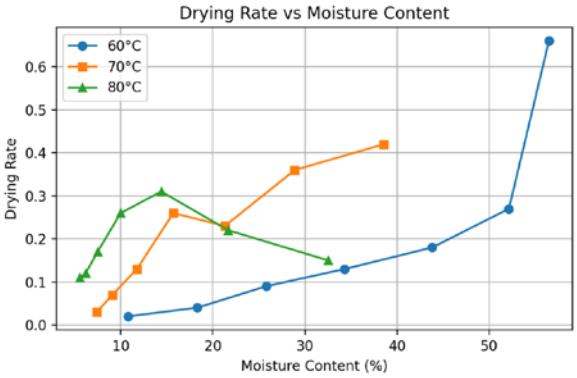
5.1 ผลสรุปข้อมูลทางกายภาพและน้ำหนัก

ลักษณะทางกายภาพของปลานิล ก่อน-หลังอบแห้ง แสดงข้อมูลดังตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7 ตามลำดับ

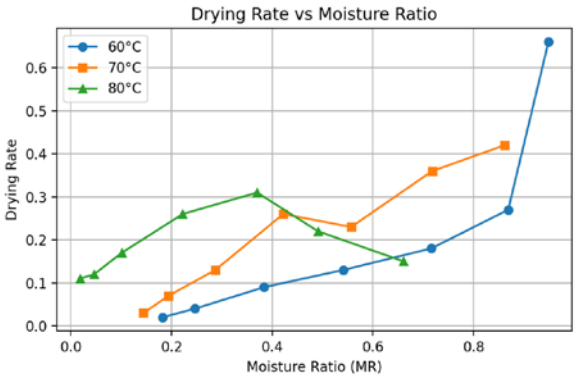


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความชื้นและระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 - 80°C

จากรูปที่ 3 การอบแห้งปลานิลด้วยรังสีอินฟาเรดที่อุณหูมิ 60°C, 70°C,80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าอุรหภูมิมีผลต่อการลดความชื้นและอัตราการอบแห้งอย่างชัดเจน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Drying Rate และ Moisture content ที่อุณหภูมิ 60 - 80°C



รูปที่ 5 อัตราส่วนระหว่าง Drying rate และ Moisture ratio ที่อุณหภูมิ 60 - 80°C

และรูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้นของเนื้อปลาลดลง ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งปลานิลมีปริมาณน้ำอิสระอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การระเหยน้ำเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Drying rate และอัตราการอบแห้ง Moisture Ratio แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการระเหยน้ำของปลานิลลดลงตามปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ภายในเนื้อปลา

การอบแห้งแบบชั้นบางเหมาะสมสำหรับใช้อ้างอิงพฤติกรรมการอบแห้งซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิล [6] อย่างไรก็ตาม การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมไม่ควรพิจารณาเฉพาะ

ความเร็วในการอบแห้งเท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ 80°C สามารถลดความชื้นได้ต่ำที่สุดแต่ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้งมาก สีเข้มและอาจเกิดลักษณะคล้ายการไหม้ ในขณะที่อุณหภูมิ 70°C สามารถลดความชื้นได้ถึงประมาณ 7.5% และคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยรวมดีที่สุด ดังนั้นที่อุณภูมิ 70°C จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้ง ปลานิลด้วยตู้อบแห้งรังสีอินฟาเรดที่พัฒนาขึ้น ด้านพลังงาน ตู้อบแห้งรังสีอินฟาเรดใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 12.8 kWh ต่อรอบการอบ 8 ชั่งโมง หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 56.59 บาทต่อรอบ ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพในการนำระบบไปประยุกต์ใช้กับการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำในระดับครัวเรือน วิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักวิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด . (2553). การเพาะเลี้ยงปลานิล. เข้าถึงเมื่อ 9 มีนาคม. เข้าถึงได้จาก https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200415152840_1_file.pdf.

[2] ณฐพล พลวิบูลย์. (2558). “พฤติกรรมการคายน้ำของปลานิลบดแผ่นที่อุณหภูมิต่างๆ.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเสอนผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 34 จัดโดย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ อาคารเรียนรวมคณะแพทย์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 27 มีนาคม.

[3] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2565). “ผลของการเก็บรักษาในน้ำแข็งต่อคุณภาพโปรตีนและลิพิดของปลาและเนื้อปลาบดล้างน้ำที่เตรียมจากปลาเกร็ดเงิน.” 28 มกราคม.

[4] สำนักงานจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. (2552). ปลาย่างลมควัน. เข้าถึงเมื่อ 22 ธันวาคม. เข้าถึงได้จาก https://news.ayutthaya.go.th/otop/detail/46.

[5] ณฐพล พลวิบูลย์, ธนากร โรจนกร. (2558). “พฤติกรรมการคายน้ำของปลานิลบดแผ่นที่อุณหภูมิต่างๆ.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเสอนผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 34 จัดโดย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ อาคารเรียนรวมคณะแพทย์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 27 มีนาคม.

[6] ประทีบ ตุ้มทอง, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และ ธนกร หอมจำปา. (2555). การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิล Tilapia nilotica (ด้วยลมร้อน).วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 43(3)(Suppl.), 115 -118.

การปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีตซิงก์ด้วยกระบวนการกัดไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมแรงดันในสภาวะการไหลปั่นป่วน: การศึกษาเชิงทดลอง

Voltage-Controlled Electrochemical Etching for Heat Transfer Enhancement of AA5052 Aluminum Heat Sinks under Turbulent Flow: An Experimental Investigation

ชาลิษา กอบกาญจนพฤติ, กนกวรรณ สุรินทร์, ภัทรพล สีมา, นนทวัฒน์ ดวงกระโทก, พิพัฒน์ น้อยกลาง, อภิสิทธิ์ มาปะโท, โสภณ สินสร้าง, นิติศักดิ์ หนูมาน้อย, ปฏิวัติ วรามิตร, ชนวีร์ พรหมเอื้อ และ รตินันท์ เหลือมพล*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: ratinun.lu@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงและระบบยานยนต์ไฟฟ้าในยุคปัจจุบันมีความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น ทำให้เกิดความต้องการระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์กระบวนการกัดไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching: ECE) ในการปรับปรุงพื้นผิวของฮีตซิงก์อะลูมิเนียม โดยมุ่งสร้างความขรุขระเพื่อกระตุ้นกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบพา ในกระบวนการ ECE ฮีตซิงก์ถูกแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl-น้ำ (อัตราส่วน 400:1,000 กรัม) เป็นเวลา 6 นาที ภายใต้แรงดันไฟฟ้า 3 ระดับ ได้แก่ 6 12 และ 18 V ดำเนินการทดลองในอุโมงค์ลมแบบท่อสี่เหลี่ยมภายใต้สภาวะการไหลปั่นป่วนเต็มตัว (Re = 8,000–23,000) ที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ 4,761.9 W/m² ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้ Nusselt number (Nu) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต้านทานทางความร้อน (R) ลดลง สำหรับเงื่อนไข 18 V ได้ค่า Nu สูงสุดที่ 508.65 คิดเป็น 2.07 เท่าของฮีตซิงก์ผิวเรียบ และค่า Thermal Enhancement Factor (TEF) สูงสุดที่ 6.21 โดยกระบวนการ ECE แทบไม่เพิ่มความดันลดของระบบ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ ECE ในฐานะเทคนิคการปรับปรุงพื้นผิวที่ต้นทุนต่ำ ขยายระดับการผลิต และนำไปใช้งานจริงในระบบระบายความร้อนได้

คำสำคัญ: การกัดผิวด้วยไฟฟ้าเคมี; ฮีตซิงก์; การถ่ายเทความร้อน; เลขนัสเซิลต์; การส่งเสริมความร้อน; การไหลปั่นป่วน

Abstract

The escalating thermal flux densities in high-power electronics and electric-vehicle systems demand more capable yet cost-effective cooling challenge. This study presents the application of electrochemical etching (ECE) to the fin surfaces of aluminum heat sink, aiming to augment forced convective heat transfer. The ECE process immersed the heat sink as the anode in a NaCl–water electrolyte (400:1,000 g) for 6 minutes under three applied voltages: 6, 12 and 18 V. The experimental was conducted inside a square-duct wind tunnel under fully turbulent conditions (Re = 8,000–23,000)

at a constant base heat flux of 4,761.9 W/m². Results show that the 18 V condition achieves a maximum Nusselt number of 508.65, representing a 2.07-fold enhancement over the unmodified baseline, while the Thermal Enhancement Factor (TEF) peaks at 6.21. Crucially, all conditions confirm that ECE-induced roughness does not measurably raise system pressure drop. These findings establish ECE as a scalable, low-cost surface-modification strategy for next-generation electronic thermal management.

Keywords: Electrochemical etching; Heat sink; Heat transfer enhancement; Nusselt number; Thermal Enhancement Factor; Turbulent flow

1. บทนำ

ความก้าวหน้าของวงจรรวมกำลังสูง (Power IC) ชิปปัญญาประดิษฐ์ และโมดูลแรงดันไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Density) ในอุปกรณ์เหล่านี้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์ความร้อนสะสม (Thermal Accumulation) ภายในอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีกำลังสูงไม่เพียงแต่ลดประสิทธิภาพการทำงาน หากยังนำมาซึ่งความเสื่อมสภาพของวัสดุและอายุการใช้งานที่สั้นลง (Cengel & Ghalar, 2015) Heat sink ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นของไหล (Air-Cooled Heat Sink) ยังคงเป็นวิธีการหลักสำหรับการจัดการความร้อน เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือสูง ต้นทุนต่ำ และบำรุงรักษาง่าย (Remsburg, 2001)

แนวคิดในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement: HTE) ใน Heat sink คือการลดความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance, R) ระหว่างผิว Heat sink กับอากาศที่ไหลผ่าน เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น ซึ่งปัจจุบันมีแนวทางแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มที่ 1 การปรับเปลี่ยนรูปทรง (Geometric Modification) เช่น การออกแบบครีบรูป Y (Kim, 2014) การเพิ่มซี่ร่อง (Rib) บนครีบ (Ahmed, 2016) และการตัดแต่งรูปทรงครีบในรูปแบบต่าง ๆ (Khudhur et al., 2022) และกลุ่มที่ 2 การปรับสภาพผิวระดับจุลภาค (Micro-Scale Surface Modification) เช่น การสร้างความขรุขระด้วยกระบวนการ Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (Ventola et al., 2014) อย่างไรก็ตาม แนวทางกลุ่มแรกมักทำให้ Friction factor (f) หรือ ความดันลด (Pressure Drop) ของระบบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งต้องใช้พลังงานพัดลมหรือ Blower มากขึ้น ในขณะที่กระบวนการ DMLS ในกลุ่มที่สองมีต้นทุนสูงและต้องการอุปกรณ์เฉพาะทาง จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้วิธีการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันลดจะต้องถูกพิจารณาร่วมกัน (trade-off) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของตัวแปร Thermal enhancement factor (TEF) ที่งานวิจัยที่ผ่านได้มีการนำเสนอ (Kim, 2014) (Ahmed, 2016) (Khudhur et al., 2022)

กระบวนการกัดไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching: ECE) เป็นเทคนิคการปรับสภาพผิวโลหะที่ใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Redox Reaction) ที่ขับเคลื่อนด้วยสนามไฟฟ้า เพื่อละลายวัสดุออกจากพื้นผิว สร้างโครงสร้างความขรุขระที่ควบคุมได้

(Bagotsky, 2006) Nguyen et al. (2020) รายงานว่า ECE สามารถปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อน-ไฮดรอลิกของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Chevron ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาใดที่ประยุกต์ ECE กับ Heat sink ครีบโดยตรง ซึ่งถือเป็นช่องว่างสำคัญในองค์ความรู้ด้านการถ่ายเทความร้อน

จากการทบทวนวรรณกรรมสามารถสรุปได้ว่า (1) เทคนิค HTE เชิงรูปทรงมักเพิ่มความดันลด ลดประสิทธิภาพพลังงานสุทธิ (2) DMLS มีต้นทุนสูงและขยายระดับการผลิตได้ยาก (3) ECE มีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย แต่ยังไม่เคยถูกนำมาประยุกต์กับ Heat sink แบบครีบโดยตรง และ (4) ยังขาดข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับผลของแรงดันไฟฟ้า ECE ต่อ Nu f R และ TEF ของ Heat sink ภายใต้การไหลปั่นป่วน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างเหล่านี้ด้วยการออกแบบและดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบ ภายใต้วัตถุประสงค์คือ การปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีตซิงก์ด้วยกระบวนการกัดไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมแรงดันในสภาวะการไหลปั่นป่วน

โดยนำเสนอผลการทดลอง 3 ประการ ได้แก่ (1) การแสดงให้เห็นว่า ECE สามารถเพิ่มสมรรถนะ HTE ของ Heat sink ได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรง (2) การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้า ECE ที่ระยะเวลากัดคงที่ 6 นาที ต่อ Nu f R และ TEF ในช่วง Re = 8,000–23,000 และ (3) การยืนยันว่า ECE ไม่เพิ่มความดันลดของระบบ ซึ่งแสดงถึงความได้เปรียบเชิงพลังงานที่โดดเด่นเหนือเทคนิค HTE เชิงโครงสร้างอื่น ๆ

2. ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical Etching: ECE)

กระบวนการ ECE ขับเคลื่อนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่ผิวโลหะและอิเล็กโทรไลต์ โดยมี Heat sink อะลูมิเนียม 5052 เป็นขั้วแอโนด (+) และแผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วแคโทด (–) ดังแสดงในรูปที่ 1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ ขั้วแอโนดคือการออกซิเดชันของอะลูมิเนียม:

ปฏิกิริยาแอโนด:

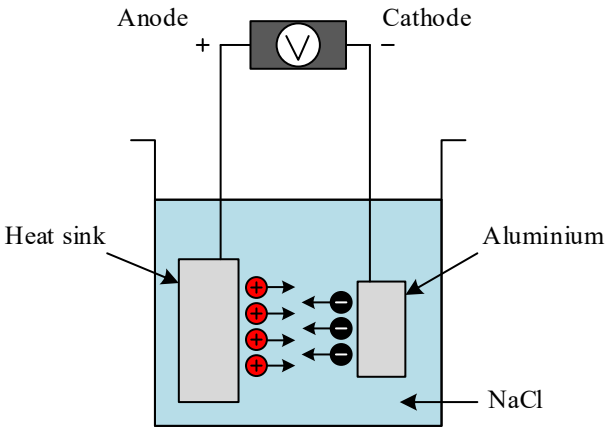
$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-} \qquad (1)$$

และ ณ ขั้วแคโทดเกิดการรีดักชันของน้ำพร้อมปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจน:

ปฏิกิริยาแคโทด:

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2(g) + 2OH^{-} \qquad (2)$$

ไอออน Cl^- จากสารละลาย NaCl ทำหน้าที่เพิ่มอัตราการละลายของ Al^{3+} ออกจากพื้นผิว เนื่องจาก Cl^- ทำลายชั้น Oxide ของอะลูมิเนียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Frankel, 1998) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) ที่ขั้วแอโนดซึ่งขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ จะกำหนดอัตราการกัดกร่อนและโครงสร้างความขรุขระของผิวที่ได้



รูปที่ 1 การกัดผิววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

2.2 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจะได้รับอิทธิพลจากการพามากกว่าการนำและการแผ่ เนื่องจากการไหลของของไหลอยู่ในช่วงปั่นป่วนเต็มตัว (Fully developing turbulent flow) ดังนั้นสมดุลของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบจะพิจารณาจาก ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (Q_{air}) เท่ากับ ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายโอนผ่านการพาความร้อน (Q_{conv}) แสดงดังสมการที่ 3

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (3)$$

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_b) \quad (4)$$

$$Q_{air} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (5)$$

จากสมการที่ (3)-(5) จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ดังสมการที่ (6)

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_s(T_s - T_b)} \quad (6)$$

ความต้านทานทางความร้อน (R) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการถ่ายเทความร้อนผ่านวัตถุ คำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$R = \frac{T_s - T_b}{Q_{input}} \quad (7)$$

Nusselt Number (Nu) เป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (8)$$

Reynolds Number (Re) เป็นตัวแปรไร้มิติของความเร็วและใช้ในการแบ่งรูปแบบการไหลของของไหล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (9)$$

ตัวประกอบการส่งเสริมเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) (Krittacom et al., 2022) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวเรียบ (h_0) ซึ่งพิจารณาที่กำลังขับเดียวกัน แสดงได้ดังสมการที่ 10

$$TEF = \left.\frac{h}{h_0}\right|_{pp} = \left.\frac{Nu}{Nu_0}\right|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1/3} \quad (10)$$

โดยที่

R = ความต้านทานทางความร้อน (K/W)

Q_{input} = ความร้อนที่ให้กับ Heat sink (W)

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m²·K)

A_s = พื้นที่ผิวที่ถ่ายเทความร้อน (m²)

T_s = อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

T_o = อุณหภูมิขาออกของของไหล (K)

T_i = อุณหภูมิขาเข้าของของไหล (K)

T_b = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล (K)

$\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/m^3)

c_p = ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (J/kg·K)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

v = ความเร็วของของไหล (m/s)

D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (m)

μ = ความหนืดแบบพลศาสตร์ของของไหล (Pa·s)

k = สภาพการนำความร้อนของของไหล (W/m·K)

Nu = เลขนัสเซิลท์หลังการ ECE

Nu_0 = เลขนัสเซิลท์ของ Smooth fin

f = ตัวประกอบความเสียดทานหลังการ ECE

f_0 = ตัวประกอบความเสียดทานของ Smooth fin

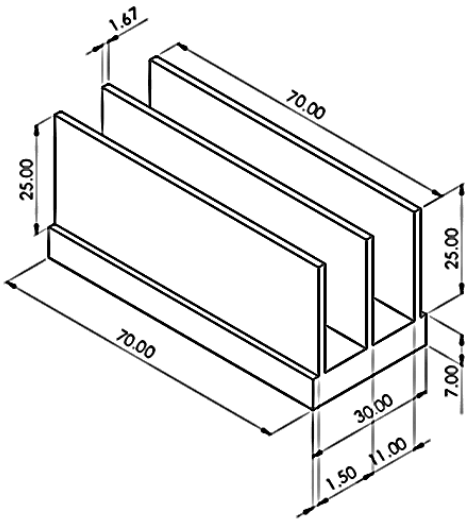
3. วิธีการดำเนินการ

3.1 คุณลักษณะทางกายภาพของ Heat sink

Heat sink ที่ใช้ในการทดลองผลิตจากอะลูมิเนียมโลหะผสม 5052 (Al–2.5Mg) ซึ่งมีสภาพนำความร้อน 138 W/(m·K) ความหนาแน่น 2,680 kg/m³ และความจุความร้อนจำเพาะ 880 J/(kg·K) (ASM International, 1990) คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ AA5052 เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในระบบระบายความร้อน รูปแบบครีบเป็นแบบ Straight Plate-Fin จำนวน 3 ครีบ ซึ่งแต่ละครีบมีความหนา 1.67 mm ความสูง 25 mm ความยาว 70 mm ช่องว่างระหว่างครีบ 11 mm และฐานมีขนาด 30×70×7 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ Heat sink ได้รับการออกแบบให้พอดีกับช่องทดสอบขนาด 30×30 mm ทำให้อากาศไหลผ่านบนครีบเท่านั้น

3.2 ขั้นตอนการเตรียมผิวและกระบวนการ ECE

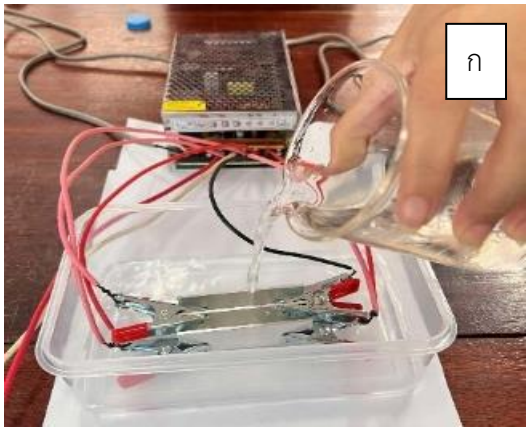
ก่อนดำเนินกระบวนการ ECE Heat sink ทุกชิ้นผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิวตามลำดับดังนี้ ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) เพื่อกำจัดไขมันและน้ำมัน ตามด้วยเมทานอล (Methanol) เพื่อลบสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์ และสุดท้ายด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol: IPA) เพื่อขจัดคราบที่เหลือ จากนั้นทำแห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (Nguyen et al., 2020) ขั้นตอนการทำความสะอาดนี้มีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนบนผิวจะขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทำให้การกัดผิวไม่สม่ำเสมอ

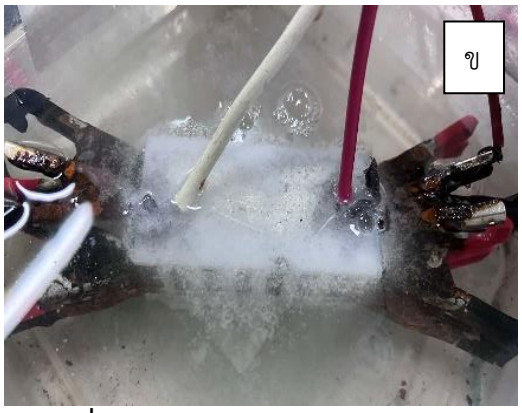


รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของ Heat sink (หน่วย: mm)

กระบวนการ ECE ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้: เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยละลายเกลือ NaCl ในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 400:1,000 กรัม ให้ความร้อนสารละลายจนถึง 100 °C เพื่อให้เกลือละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นปล่อยให้เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง (~25°C) นำ Heat sink ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยกำหนดให้ Heat sink เป็นขั้วแอโนด (+) และแผ่นอะลูมิเนียมอีกแผ่นหนึ่งเป็นขั้วแคโทด (–) จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ (6 12 หรือ 18 V) เป็นเวลา 6 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1

หลังกระบวนการ ECE Heat sink ถูกล้างทันทีด้วยน้ำกลั่น (Deionized Water) เพื่อหยุดปฏิกิริยาตามด้วยการล้างด้วยอะซีโตนเพื่อกำจัดเศษตะกอนที่อาจหลงเหลือ และอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 40°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าพื้นผิวแห้งสนิทก่อนการทดสอบการถ่ายเทความร้อน (Nguyen et al., 2020)

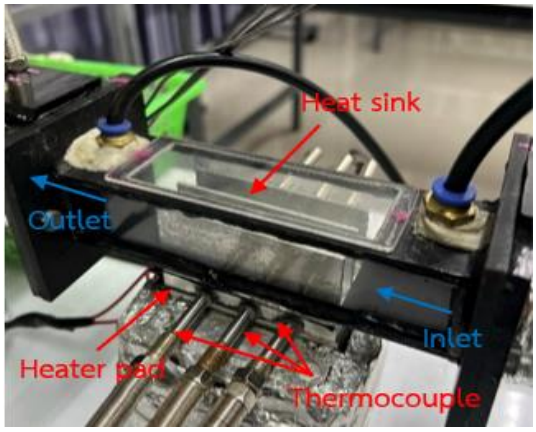




รูปที่ 3 กระบวนการ ECE Heat sink :
ก) การแช่ Heat sink ในสารละลาย
ข) Heat sink ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ ECE ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า/รายละเอียด
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	NaCl + น้ำกลั่น (400:1,000 g/L)
อุณหภูมิสารละลาย	อุณหภูมิห้อง (~25°C)
ขั้วแอโนด	Heat sink
ขั้วแคโทด	แผ่นอะลูมิเนียม
แรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบ	6 V 12 V 18 V (DC)
ระยะเวลากัดผิว	6 นาที (คงที่)
อุณหภูมิอบแห้ง	40 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ส่วนของ Test section ที่มี Heat sink

3.3 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4 และ 5 แสดงส่วนประกอบของ Test section และชุดทดสอบ ตามลำดับ ประกอบไปด้วย 1) Blower 2) Developing flow duct 3) Test section 4) Flow straightener 5) Anemometer 6) Manometer 7) Thermocouple 8) Data logger และ 9) Variac

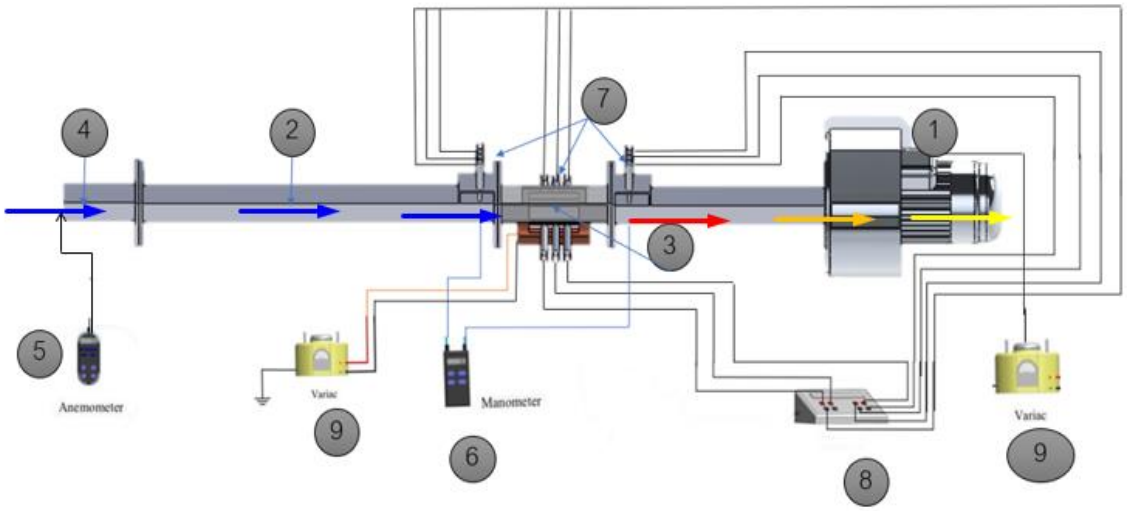
โดยที่ชุดทดสอบนี้จะเป็นอุโมงค์ลม (Wind Tunnel) แบบท่อสี่เหลี่ยม 30×30 mm ซึ่งออกแบบมาสำหรับการทดสอบ Heat sink ที่มีความกว้างพอดีกับช่องทาง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักที่สำคัญคือ

(1) ส่วนทำให้การไหลตรง (Airflow Straightener) ความยาว 100 mm (หมายเลข 1) เพื่อลดการหมุนวนและทำให้โปรไฟล์ความเร็วสม่ำเสมอ

(2) ส่วนพัฒนาการไหล (Developing Flow Duct) ความยาว 500 mm (หมายเลข 2) เพื่อให้การไหลและ Thermal Boundary Layer พัฒนาอย่างเต็มตัวก่อนถึง Test Section

(3) ส่วนทดสอบ (Test Section) ความยาว 150 mm (หมายเลข 3) ซึ่งเป็นตำแหน่งติดตั้ง Heat sink

ในการทดลองอากาศจะถูกดูดเข้าระบบด้วย Blower ขนาด 3,700 W ที่ปลายท่อ ทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนเต็มตัว (Fully Turbulent Flow) ในช่วง Re = 8,000–23,000 ที่ฐานของ Heat sink ติดตั้ง Heater Plate ที่จ่ายฟลักซ์ความร้อนคงที่ 4,761.9 W/m² การวัดอุณหภูมิใช้ Thermocouple ชนิด K ที่ผ่านการสอบเทียบ โดยติดตั้ง ณ ตำแหน่งดังต่อไปนี้: ทางเข้า Test Section 3 จุด ทางออก Test Section 3 จุด ฐาน Heat sink 6 จุด และอากาศโดยรอบ 1 จุด แสดงดังรูปที่ 5 ข้อมูลทั้งหมดบันทึกด้วย Data Logger ที่ความถี่ 1 Hz จนระบบเข้าสู่สภาวะ Steady-State ซึ่งกำหนดเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่า ±0.2 °C ในเวลา 5 นาที



รูปที่ 5 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อน

3.4 การออกแบบการทดลอง

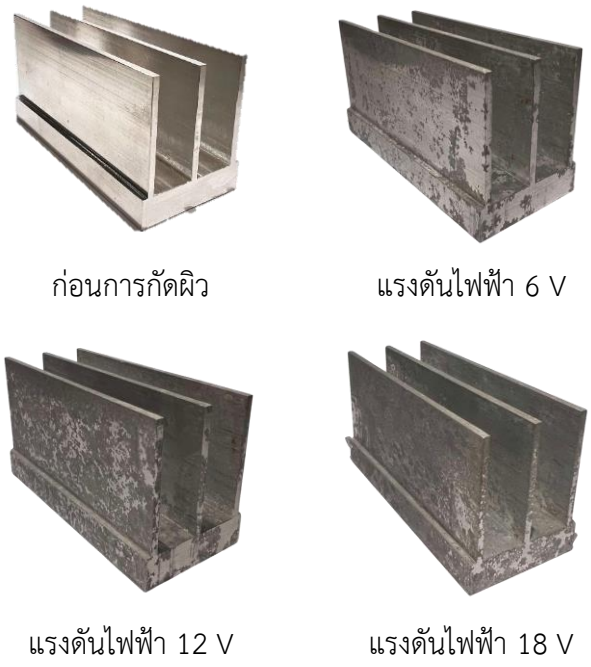
การทดลองออกแบบครอบคลุมตัวแปรต้น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1: แรงดันไฟฟ้า ECE (6 12 และ 18 V) และกลุ่มที่ 2: เลขเรย์โนลด์ (Re ≈ 8,700 15,800 22,900) รวมเป็น 9 เงื่อนไขทดลอง รวมกับ 1 เงื่อนไขอ้างอิง (Smooth fin) ตัวแปรควบคุมได้แก่ ฟลักซ์ความร้อน (4,761.9 W/m²) ระยะเวลากัดผิว (6 นาที) องค์ประกอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (NaCl:น้ำ = 400:1,000 กรัม) และรูปทรง Heat sink ตัวแปรตามที่วัดและวิเคราะห์ ได้แก่ T_s R Nu และ TEF ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในทุกเงื่อนไข

4. ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะผิวหลังกระบวนการ ECE

จากรูปที่ 6 การสังเกตด้วยตาเปล่าหลังกระบวนการ ECE พบว่าพื้นผิวของ Heat sink ทุกเงื่อนไขแสดงความขรุขระที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผิวเรียบก่อนการกัด โดยระดับความขรุขระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ Heat sink ที่กัดที่ 18 V แสดงรอยกัดและความขรุขระที่หนาแน่นและลึกที่สุด อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของรอยกัดบนพื้นผิวมีความไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณใกล้ขั้วแอโนดแสดงการกัดที่รุนแรงกว่า ซึ่งเป็นผลจากการกระจายตัวของไอออน Al^{3+} ที่ไม่สม่ำเสมอใน

สารละลายและการไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Schlesinger & Paunovic, 2010)



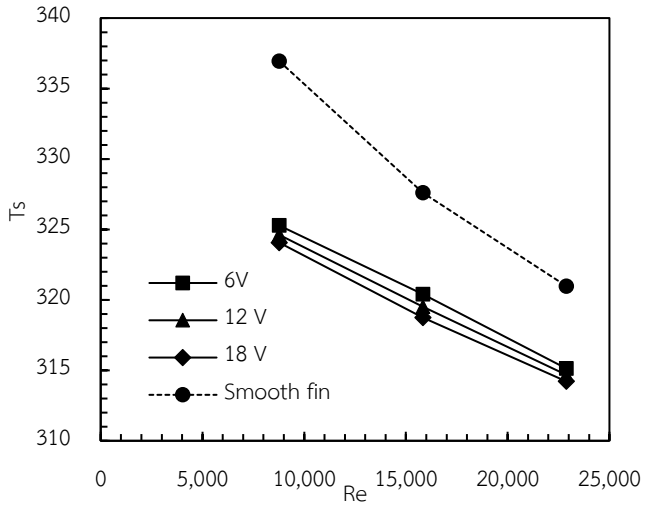
ก่อนการกัดผิว | แรงดันไฟฟ้า 6 V

แรงดันไฟฟ้า 12 V | แรงดันไฟฟ้า 18 V

รูปที่ 6 ลักษณะผิวของ Heat sink ที่ผ่าน ETE

4.2 อุณหภูมิฐาน Heat sink (T_s)

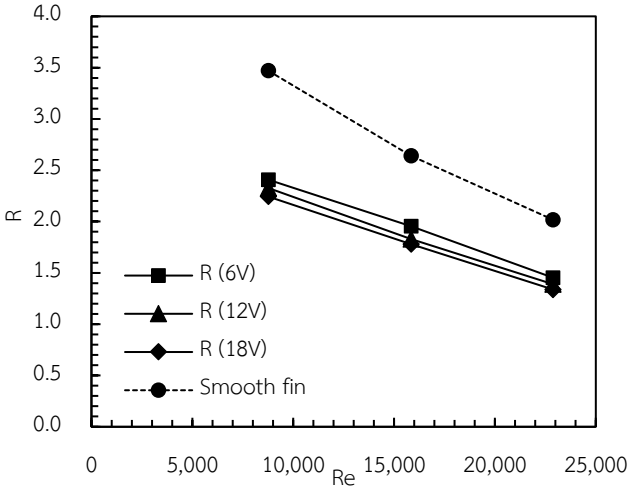
อุณหภูมิฐาน Heat sink ของทุกเงื่อนไขทดลองต่ำกว่า Heat sink ผิวเรียบในทุกค่า Re ที่ทดสอบ โดย T_s มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ Re เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในการไหลปั่นป่วนที่ชั้นขอบเขตความร้อนบางลงเมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้น (Dixit & Ghosh, 2015) สำหรับเงื่อนไข 18 V ซึ่งสร้างความขรุขระสูงสุด ให้ค่า T_s ต่ำที่สุดในทุกช่วง Re โดยลด T_s ได้สูงสุดประมาณ 10–11.5 °C เมื่อเทียบกับ Heat sink ผิวเรียบที่ Re เดียวกัน ผลดังกล่าวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของการถ่ายเทความร้อนจากฐานสู่ของไหล



รูปที่ 7 อุณหภูมิของฐาน Heat sink

4.3 ความต้านทานทางความร้อน (R)

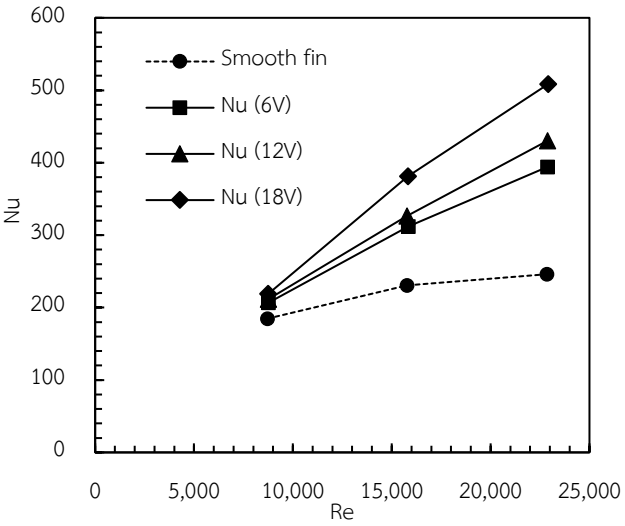
ค่าความต้านทานทางความร้อน R ลดลงอย่างสม่ำเสมอตามแรงดันไฟฟ้า ECE ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 Heat sink ผิวเรียบมีค่า R ในช่วง 2.02-3.47 K/W ในขณะที่ Heat sink ที่กัดที่ 18 V มีค่า R เพียง 1.34-2.24 K/W คิดเป็นการลดลงสูงสุดประมาณ 35.35% การลดลงของ R ยืนยันว่าความขรุขระที่สร้างโดย ECE ช่วยลดความต้านทานในการถ่ายโอนความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลได้จริง



รูปที่ 8 ความต้านทานทางความร้อน

4.4 เลขนัสเซิลต์ (Nu)

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 9 และตารางที่ 2 และ 3 ค่า Nu เพิ่มขึ้นตาม Re ในทุกเงื่อนไขทดลอง และเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้า ECE ที่สูงขึ้นเมื่อ Re คงที่ ที่เงื่อนไข 18 V, Re ≈ 22,918 ได้ Nu = 508.65 ซึ่งสูงกว่า Heat sink ผิวเรียบ (Nu = 246.04) คิดเป็น 2.07 เท่า ในขณะที่เงื่อนไข 6 V และ 12 V ที่ Re สูงสุดให้ Nu เพิ่มขึ้น 1.60 และ 1.75 เท่า ตามลำดับ โดยค่า f ในทุกเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน ซึ่งยืนยันว่าความดันลดของระบบไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ Re

ตารางที่ 2 ผลการทดลองของ Heat sink แบบ Smooth fin

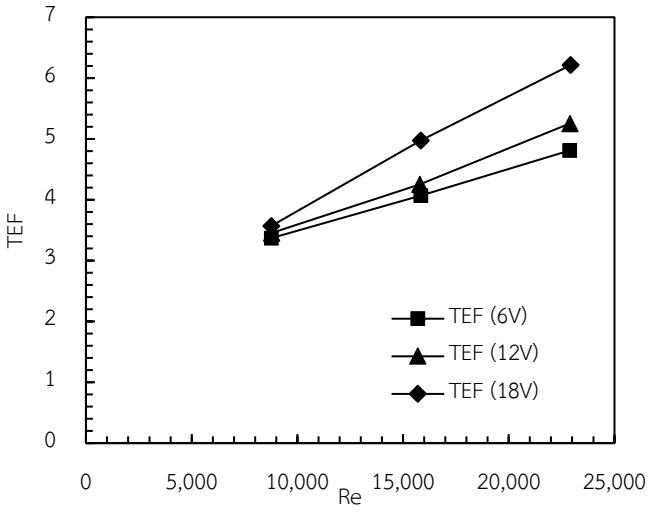
Re	Smooth fin		
	Nu	f	R
8713.56	184.71	0.22	3.47
15782.75	230.52	0.07	2.64
22848.70	246.04	0.03	2.02

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง Heat sink หลัง ECE

Re	6 V				12 V				18 V			
	Nu	f	R	TEF	Nu	f	R	TEF	Nu	f	R	TEF
8713.56	206.70	0.22	2.41	3.37	211.78	0.22	2.33	3.45	219.02	0.22	2.24	3.57
15782.75	311.96	0.07	1.95	4.07	326.70	0.07	1.83	4.25	381.48	0.07	1.78	4.97
22848.70	394.18	0.03	1.45	4.81	430.44	0.03	1.39	5.25	508.65	0.03	1.34	6.21

4.5 Thermal Enhancement Factor (TEF)

รูปที่ 10 แสดงค่า TEF ของทุกเงื่อนไข ECE สูงกว่า 1.0 อย่างมีนัยสำคัญ (Shen et al., 2018) บ่งชี้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย ECE ให้ผลประโยชน์สุทธิทางพลังงาน TEF เพิ่มขึ้นทั้งตาม Re และแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดย TEF สูงสุดที่ 6.21 ได้ที่เงื่อนไข 18 V, Re ≈ 22,918 ค่านี้สูงกว่า TEF ของเงื่อนไข 6 V (TEF = 4.81) และ 12 V (TEF = 5.25) อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นให้ผลตอบแทนด้านสมรรถนะที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง TEF และ Re

5. การอภิปรายผลและการวิเคราะห์เชิงลึก

5.1 กลไกการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน

จากผลการทดลองพบว่าค่า Nu เพิ่มขึ้นตาม Re ในทุกเงื่อนไขทดลอง และเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้า ECE ที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนด้วยความขรุขระที่ผิว heat sink ได้ 2 ประการ ดังนี้

1) การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ECE จะทำให้ความขรุขระบนผิว Heat sink มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Layer Disruption) โดยความขรุขระบนพื้นผิวนี้ก่อให้เกิด Micro-Vortices และการไหลที่รบกวนในชั้นขอบเขต ส่งผลให้ความหนาของ Thermal Boundary Layer ลดลง และอัตราการถ่ายโอนพลังงานระหว่างผิวกับของไหลเพิ่มขึ้น (Moffat, 1988) (Kandlikar et al., 2003) กลไกนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ventola et al. (2014) ที่ยืนยันว่าพื้นผิวขรุขระ Ra ≈ 43 μm สร้าง Vortices ที่เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 73%

2) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีประสิทธิผล (Enhanced Effective Surface Area) ซึ่งเมื่อสังเกตจากรูปที่ 6 พบว่ารอยกัดหรือความขรุขระที่สร้างโดย ECE ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่แท้จริง (Real Surface Area) ของครีบ แม้ว่าลักษณะทางกายภาพของ Heat sink จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นจากรอยขรุขระนี้ช่วยกระจายการถ่ายเทความร้อนออกไปในพื้นที่กว้างขึ้น ลดความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่ [15] และลด T_s โดยรวมได้

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า ECE และ Nu ที่ Re ≈ 22,900 แสดงการเพิ่มขึ้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นจาก 6 V เป็น 12 V และ 18 V เมื่อเทียบกับ Smooth fin จะเพิ่มขึ้น 1.60 1.75 และ 2.07 เท่า ตามลำดับ โดยการก้าวกระโดดจาก 12 V เป็น 18 V ให้การเพิ่มขึ้นของ Nu ที่ใหญ่กว่าจาก 6 V เป็น 12 V ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นตามแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากมีการก่อตัวของฟิล์ม Oxide ที่ขั้วแอโนดในช่วงแรง ซึ่งจำกัดกระแสไฟฟ้าที่แรงดันต่ำ แต่ถูกทำลายอย่างรุนแรงที่แรงดันสูง (Frankel, 1998) (Malen et al., 2011)] ส่งผลให้การกัดกร่อนที่ 18 V ลึกและหนาแน่นกว่า

5.3 การเปรียบเทียบ ECE กับเทคนิคการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนอื่น

ข้อเปรียบเทียบที่สำคัญที่สุดระหว่าง ECE กับเทคนิค HTE อื่นคือ ค่า f ที่ไม่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ ข้อมูลนี้แตกต่างอย่างสิ้นเชิงจาก

งานวิจัยที่ใช้การปรับเปลี่ยนรูปทรงเชิงมหภาค เช่น Khudhur et al. (2022) ที่รายงาน Pressure Drop ที่สูงขึ้นจากการเพิ่มเนื้อครีบ ซึ่งหมายความว่า ECE ให้ Nu ที่เพิ่มขึ้น 2.07 เท่าโดยไม่ต้องการพลังงาน Blower เพิ่มเติม ส่งผลให้ TEF สูงถึง 6.21 ซึ่งสูงกว่าค่าที่รายงานในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้การปรับรูปทรงครีบ ในแง่ต้นทุนและความสามารถในการผลิต ECE ใช้เพียงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สารละลาย NaCl และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต้นทุนอุปกรณ์ต่ำกว่า DMLS หลายร้อยเท่า และสามารถดำเนินการกับชิ้นงานหลายชิ้นพร้อมกันได้ ทำให้เหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 แนวทางการประยุกต์และข้อจำกัดของการวิจัย

ผลการวิจัยมีนัยสำคัญที่ตรงต่อความต้องการด้านวิศวกรรมความร้อนในหลายภาคส่วน เช่น

1) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการประมวลผล Heat sink ที่ปรับปรุงด้วย ECE สามารถลด T_s ของ CPU GPU และ Power Module ได้โดยตรง (Naphon et al., 2009) ส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ยาวขึ้นและประสิทธิภาพที่เสถียรกว่าภายใต้โหลดสูง (Kays & Crawford, 2005) (Ndao et al., 2009)

2) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EV) การลดความต้านทานทางความร้อนของโมดูลกำลังในระบบ Inverter และ On-Board Charger ช่วยเพิ่มความหนาแน่นกำลังและลดน้ำหนักระบบระบายความร้อน (Lienhard, J. H., IV, & Lienhard, J. H., V, 2020)

3) ECE สามารถนำไปประยุกต์กับ Heat sink ที่ผลิตแล้วได้โดยตรง (Retrofit Application) โดยไม่ต้องออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งลดต้นทุนการอัพเกรดระบบระบายความร้อนที่มีอยู่

4) กระบวนการ ECE สามารถดำเนินการในถังที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขนาดใหญ่ที่แช่ Heat sink ได้หลายชิ้นพร้อมกัน เหมาะสำหรับการผลิตแบบ Batch ในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม ประการสุดท้าย เนื่องจาก ECE ไม่เพิ่มความดันลด การนำไปใช้จึงไม่ต้องการพลังงาน Blower เพิ่มเติม ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพพลังงานรวมของระบบระบายความร้อน (Bejan & Kraus, 2003)

แต่งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นเพียงการสังเกตด้วยตาเปล่า ยังไม่มีการวัดค่าความขรุขระเชิงปริมาณ (Ra, Rz) ด้วย Profilometer หรือการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งจำกัดความสามารถในการเชื่อมโยงพารามิเตอร์ผิวกับสมรรถนะ HTE เชิงกลไก

2) การศึกษาทดสอบเฉพาะ Heat sink แบบ 3 ครีบตรง ผลสรุปอาจไม่ครอบคลุม Heat sink ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น Pin-Fin หรือ Cross-Cut Fin

3) ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เพียงชนิดเดียว (NaCl-น้ำ) ยังไม่ได้เปรียบเทียบกับสารละลายชนิดอื่น ๆ ที่อาจให้ผลการกัดผิวที่แตกต่างหรือดีกว่า

4) งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาความทนทาน (Durability) และเสถียรภาพระยะยาวของพื้นผิวที่ผ่านการ ECE ในสภาวะการทำงานจริง

6.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต

เพื่อขยายและยืนยันผลการวิจัยนี้ แนะนำแนวทางการวิจัยในอนาคต 7 ประการ ดังนี้

(1) การวิเคราะห์พื้นผิวเชิงปริมาณ: ใช้ Surface Profilometer เพื่อวัด Ra, Rz และพารามิเตอร์ผิวอื่น ๆ และ SEM เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลัง ECE เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่าง Ra และ Nu

(2) การจำลอง CFD: สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนรอบผิวขรุขระจุลภาค เพื่อทำความเข้าใจกลไก Vortex Generation และ Local Boundary Layer Disruption

(3) การทดสอบกับ Heat sink รูปแบบอื่น เช่น ทดสอบ ECE กับ Pin-Fin, Cross-Cut Fin, Louvered Fin และ Offset Strip Fin

(4) การศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์หลายชนิด: เปรียบเทียบ NaCl, NaOH, KOH และ H_2SO_4 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อหาสูตรที่ให้ความขรุขระและสมรรถนะ HTE ที่ดีที่สุด

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์กระบวนการกัดไฟฟ้าเคมี (ECE) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิว Heat sink อะลูมิเนียม 5052 แบบ 3 ครีบตรง โดยทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้า 3 ระดับ (6 12 และ 18 V) ที่ระยะเวลากัดผิวคงที่ 6 นาที และประเมินสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในอุโมงค์ลม 30×30 mm ภายใต้ Re = 8,000–23,000 ผลสรุปหลักมีดังนี้:

(1) กระบวนการ ECE สร้างความขรุขระบนพื้นผิว Heat sink โดยระดับความขรุขระเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้

(2) ความขรุขระดังกล่าวส่งผลให้ T_s และ R ลดลง ในขณะที่ h และ Nu เพิ่มขึ้น

(3) ค่า f ไม่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไข ซึ่งยืนยันว่า ECE ไม่เพิ่มความดันลดของระบบอย่างมีนัยสำคัญ

(4) สมรรถนะสูงสุดได้ที่เงื่อนไข 18 V โดย Nu = 508.65 (2.07 เท่าของ Heat sink แบบ Smooth fin) และ TEF = 6.21 ที่ Re ≈ 22,918

ข้อค้นพบเหล่านี้วางรากฐานสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีระบายความร้อนโดยใช้ ECE เป็นแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวที่ต้นทุนต่ำ ขยายระดับการผลิตได้ และไม่เพิ่มน้ำหนักหรือความซับซ้อนทางโครงสร้าง ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงและยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย DiTo-Lab (Development in Technology of Porous Material Research Laboratory) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และทรัพยากรสำหรับการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Ahmed, H. E. (2016). Optimization of thermal design of ribbed flat-plate fin heat sink. Applied Thermal Engineering, 102, 1422–1432. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.078

ASM International. (1990). ASM handbook: Volume 2. Properties and selection:

Nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International.

Bagotsky, V. S. (2006). Fundamentals of electrochemistry (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Bejan, A., & Kraus, A. D. (Eds.). (2003). Heat transfer handbook. John Wiley & Sons.

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (5 th ed.). McGraw-Hill Education.

Dixit, T., & Ghosh, I. (2015). Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 1298–1311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.024

Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals: A review of the critical factors. Journal of The Electrochemical Society, 145(6), 2186–2198. https://doi.org/10.1149/1.1838615

Kandlikar, S. G., Joshi, S., & Tian, S. (2003). Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes. Heat Transfer Engineering, 24(3), 4–16. https://doi.org/10.1080/01457630304069

Kays, W. M., & Crawford, M. E. (2005). Convective heat and mass transfer (4th ed.). McGraw-Hill.

Khudhur, D. S., Al-Zuhairy, R. C., & Kassim, M. S. (2022). Thermal analysis of heat transfer with different fin geometry through straight plate-fin heat sinks. International Journal of Thermal Sciences, 174, Article 107443. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107443

Kim, D. (2014). Thermal optimization of branched-fin heat sinks subject to a parallel flow. International Journal of Heat and Mass Transfer, 77, 278-287. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.010

Krittacom, B., Bunchan, S., & Luampon, R. (2022). Heat transfer enhancement of a solar collector by placing wire mesh stainless porous material on the solar absorber plate of an indirect forced convection solar dryer. Thermal Science and Engineering Progress, 32, Article 101304. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101304

Lienhard, J. H., IV, & Lienhard, J. H., V. (2020). A heat transfer textbook (5 th ed.). Phlogiston Press.

Malen, J. A., Baheti, K., Tong, T., Zhao, Y., Hudgings, J. A., & Majumdar, A. (2011). Optical measurement of thermal conductivity using fiber aligned frequency domain thermoreflectance. Journal of Heat Transfer, 133(8), Article 081601. https://doi.org/10.1115/1.4003545

Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. Experimental Thermal and Fluid Science, 1(1), 3–17. https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X

Naphon, P., Klangchart, S., & Wongwises, S. (2009). Numerical investigation on the heat transfer and flow in the mini-fin heat sink for CPU. International Communications in Heat and Mass Transfer, 36(8), 834–840. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.002

Ndao, S., Peles, Y., & Jensen, M. K. (2009). Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(19–20), 4317–4326. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.069

Nguyen, D. H., Kim, K. M., Shim, G. H., Kim, J. H., Lee, C. H., Lim, S. T., & Ahn, H. S. (2020). Experimental study on the thermal-hydraulic performance of modified chevron plate heat exchanger by electrochemical etching method. International Journal of Heat and Mass Transfer, 155, Article 119857. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119857

Remsburg, R. (2001). Thermal design of electronic equipment. CRC Press.

Schlesinger, M., & Paunovic, M. (Eds.). (2010). Modern electroplating (5th ed.). John Wiley & Sons.

Shen, H., Wang, C.-C., & Xie, G. (2018). A parametric study on thermal performance of microchannel heat sinks with internally vertical fins in laminar liquid flow. International Journal of Heat and Mass Transfer, 126, 209–220. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.071

Ventola, L., Robotti, F., Dialameh, M., Calignano, F., Manfredi, D., Chiavazzo, E., & Asinari, P. (2014). Rough surfaces with enhanced heat transfer for electronics cooling by direct metal laser sintering. International Journal of Heat and Mass Transfer, 75, 58–74.

https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstra
nsfer.2014.03.037

การปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอริแฟกชันด้วยวิธีทากูชิ

Enhancement of Corncob Fuel Properties via Taguchi Optimization of Torrefaction Parameters

ณัฐพงษ์ ประภาการ, กฤษฎา ทาสันเทียะ, ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ คณิต มานะธุระ*

สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
*E-mail: kanit.ma@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอร์รีแฟกชันสำหรับซังข้าวโพดโดยวิธีทากูชิ (Taguchi method) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยใช้ตารางออร์โทโกนัลแอร์เรย์แบบ L9 เพื่อประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในกระบวนการ อัตราการให้ความร้อน และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่มีต่อผลผลิตเชิงมวล (Mass yield; MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield; EY) ค่าความร้อนสูง (Higher heating value; HHV) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption; SEC) และดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงาน-มวล (Energy-mass co-benefit index; EMCI) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อตัวชี้วัดทั้งหมด โดยผลการศึกษาพบสภาวะที่เหมาะสม 2 รูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ได้แก่ เพื่อทำให้ได้ค่า MY และ EY สูงสุด ในขณะที่ค่า SEC ต่ำที่สุด: สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 200 °C, เวลา 15 min, อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.1 l/min ซึ่งช่วยส่งเสริมการกักเก็บมวลของชีวมวลในระดับสูงและมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อทำให้ค่า HHV และ EMCI ขึ้นสู่จุดสูงสุด (โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 17.51%): จะต้องใช้สภาวะที่รุนแรงขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิ 300 °C, เวลา 35 min, อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.3 l/min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงความหนาแน่นของพลังงานนั้นให้ผลลัพธ์ที่คุ้มค่ากว่าเมื่อเทียบกับการสูญเสียมวลที่เกิดขึ้น การใช้อุณหภูมิต่ำจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการรักษามวลและพลังงานโดยใช้พลังงานป้อนเข้าน้อยที่สุด ในขณะที่การใช้อุณหภูมิสูงจะช่วยยกระดับคุณภาพเชื้อเพลิงและดัชนีผลประโยชน์ร่วมโดยรวมได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ทอร์รีแฟกชัน, วิธีทากูชิ, ซังข้าวโพด, ดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงาน-มวล, อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

Abstract

This study optimizes the torrefaction of corncob biomass using the Taguchi method to improve fuel properties and energy efficiency. An L9 orthogonal array was used to evaluate the effects of four parameters including temperature, residence time, heating rate, and nitrogen flow rate on mass yield

(MY), energy yield (EY), higher heating value (HHV), specific energy consumption (SEC), and the energy-mass co-benefit index (EMCI). Signal-to-noise (S/N) ratio analysis showed that temperature is the most critical factor across all evaluated metrics. The results established two distinct optimal scenarios. To maximize MY and EY while minimizing SEC, the ideal conditions were 200 °C, 15 min, 10 °C/min, and 0.1 l/min, promoting high biomass retention and efficient energy use. Alternatively, peaking the HHV and EMCI (achieving a maximum of 17.51%) required harsher conditions: 300 °C, 35 min, 10 °C/min, and 0.3 l/min, demonstrating that the improvement in energy density surpasses the mass loss penalty. Ultimately, this research reveals a clear trade-off: lower temperatures optimize energy and mass retention with minimal input, whereas higher temperatures significantly upgrade fuel quality and the overall co-benefit index.

Keywords: Torrefaction, Taguchi method, Corncob, Energy-mass co-benefit index, Signal-to-noise ratio

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

พลังงานจากชีวมวลได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะแหล่งพลังงานหมุนเวียนและพลังงานที่ยั่งยืน เนื่องจากมีศักยภาพในการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ในบรรดาวัตถุดิบชีวมวลหลากหลายประเภท วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด ถือเป็นแหล่งพลังงานชีวภาพที่มีต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ง่ายในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วชีวมวลดิบมักมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีความชื้นสูง มีค่าความร้อนต่ำ และยากต่อการบดใช้งาน ซึ่งส่งผลให้การนำไปใช้งานโดยเฉพาะการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) หรือการเผาไหม้ร่วม (Co-firing) ขาดประสิทธิภาพ [1] ข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการปรับปรุงสภาพเบื้องต้น (Pre-treatment) เช่น การทอร์รีแฟกชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ช่วยปรับปรุงความหนาแน่นของพลังงาน ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และความเสถียรทางความร้อนของชีวมวล [2] ดังนั้น การหาสภาวะที่เหมาะสม ตัวแปรที่มีผลต่อระบบสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟกชัน จะสามารถช่วยยกระดับประสิทธิภาพและศักยภาพในการนำชีวมวลไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทางเลือกได้อย่างมีนัยสำคัญ

การทอร์รีแฟกชันเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical process) ที่ปรับสมบัติทางโครงสร้างและทางเคมีของชีวมวลโดยการกำจัดสารระเหยง่าย (Volatile compounds) บางส่วนออกไปและช่วยเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) กระบวนการนี้ ซึ่งโดยทั่วไปมักดำเนินการในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200 °C ถึง 300 °C จะช่วยยกระดับค่าความร้อนสูง (HHV) ประสิทธิภาพการคาร์บอไนซ์ (Carbonization efficiency) และสมบัติการเผาไหม้ของชีวมวล [3] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการทอร์รีแฟกชันนั้นได้รับอิทธิพลจากตัวแปรของกระบวนการหลายประการ ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในกระบวนการ อัตราการให้ความร้อน และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมานี้ล้วนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดคุณภาพของเชื้อเพลิงในขั้นสุดท้าย [4]

แม้กระบวนการทอร์รีแฟกชันจะมีข้อดีหลายประการ แต่การหาสภาวะของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดนั้นยังคงเป็นความท้าทาย เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการ โดยทั่วไปแล้ว อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูง (HHV) เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดการสูญเสียมวลที่มากขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield) โดยรวมลดลง [5] ในทำนองเดียวกัน เวลาที่ใช้ในกระบวนการที่นานขึ้นและอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้น จะมีส่วนช่วยเพิ่มการกักเก็บคาร์บอน (Carbon retention) แต่หากผ่านกระบวนการที่รุนแรงหรือยาวนานจนเกินไป ก็อาจนำไปสู่การสลายตัวที่ไม่พึงประสงค์และเกิดความไม่คุ้มค่าทางพลังงาน (Energy inefficiencies) [6] ความได้อย่างเสียอย่าง (Trade-offs) ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้จำเป็นต้องมีวิธีการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเพื่อหาแนวทางในการจัดชุดพารามิเตอร์ของการทอร์รีแฟกชันที่ดีที่สุด เพื่อสร้างสมดุลระหว่างคุณภาพของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

เพื่อแก้ปัญหาความท้าทายดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีทากูชิ (Taguchi method) ซึ่งเป็นเทคนิคการหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

มาประยุกต์ใช้ โดยเทคนิคนี้จะช่วยลดความซับซ้อนในการทดลองแต่ยังคงให้ความแม่นยำสูงสุด การออกแบบการทดลองแบบทากูชินั้นอาศัยตารางออร์โทโกนัลแอร์เรย์ (Orthogonal arrayซึ่งทำให้สามารถศึกษาตัวแปรหลายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยจำนวนครั้งของการทดลองที่ลดลง [7] ร่วมกับการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio; S/N ratio) วิธีการนี้จะสามารถระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดและช่วยลดความผันผวนของกระบวนการ ซึ่งช่วยสร้างความมั่นใจในความสม่ำเสมอของคุณภาพเชื้อเพลิงชีวภาพได้ [8]

งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีทากูชิธีเนื่องจากสามารถลดจำนวนการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการออกแบบแบบ Full Factorial ซึ่งต้องการการทดลองถึง 81 ครั้ง (3^4) ในขณะที่ L9 ใช้เพียง 9 ครั้ง โดยยังคงความสามารถในการประเมินผลของพารามิเตอร์หลักได้อย่างครบถ้วน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมอย่างเป็นระบบสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟกชันของชีวมวลจากซังข้าวโพด โดยมุ่งเน้นประเมินผลผลิตมวล (MY) ค่าความร้อนสูง (HHV) ผลผลิตเชิงพลังงาน (EY) ดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงาน-มวล (EMCI) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ซึ่งในท้ายที่สุดจะเป็นการช่วยยกระดับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปใช้ในการผลิตพลังงานชีวภาพอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วิธีการวิจัย

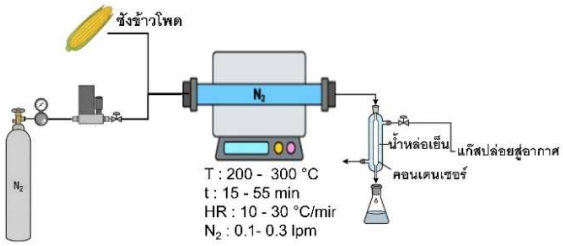
2.1 การเตรียมวัสดุ

ซังข้าวโพดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากไร่ข้าวโพดในจังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ซึ่งถูกเก็บรวบรวมในฐานะวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซังข้าวโพดถูกคัดแยกด้วยมือเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรก นำซังข้าวโพดที่ทำความสะอาดแล้วไปผึ่งลมให้แห้งภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นที่พื้นผิว เพื่อให้วัสดุมีความสม่ำเสมอ ซังข้าวโพดที่แห้งแล้วจึงถูกนำไปบดด้วยเครื่องบด และนำไปร่อนด้วยเครื่องร่อนตะแกรงแบบใช้มือเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาค 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำซังข้าวโพดที่ผ่านการร่อนเก็บรักษาไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C) เพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นกลับคืน ก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดลองกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

2.2 กระบวนการทอร์รีแฟกชัน

ซังข้าวโพดจะถูกปรับสภาพด้วยการทำทอร์รีแฟกชันดำเนินการโดยใช้เตาเผาแบบเบดนิ่งขนาด 2 กิโลวัตต์ที่ออกแบบมาให้ทำงานภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิอย่างแม่นยำด้วยเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปฏิกิริยา และระบบไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง (99.9%) อย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 0.1-0.3 ลิตรต่อนาที เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดสภาวะเฉื่อยที่ปราศจากออกซิเจนซึ่งช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ก่อนการทดลองแต่ละรอบเครื่องปฏิกรณ์จะถูกอุ่นเครื่อง (preheat) ก่อนจะเพิ่มความร้อนให้ได้อุณหภูมิทอร์รีแฟกชันที่กำหนดไว้ ตัวอย่างที่เตรียมไว้น้ำหนัก 10 กรัมถูกบรรจุในถ้วยครูซิเบิลสเตนเลสและวางไว้บริเวณกึ่งกลางของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ การทดลองแต่ละชุดดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง

และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานถูกใช้เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของข้อมูล



รูปที่ 1 ระบบทอร์รีแฟกชัน

2.3 การวิเคราะห์ทากูชิสำหรับการออกแบบการทดลอง

วิธีทากูชิ (Taguchi method) ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางเชิงสถิติสำหรับการออกแบบการทดลอง นอกจากช่วยให้สามารถประเมินพารามิเตอร์หลายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แล้วยังลดจำนวนครั้งในการทดลองลงให้เหลือน้อยที่สุด [4] แผนการทดลองแบบตารางเชิงฉาก (Orthogonal array) ชนิด L9 (4^3) ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา อัตราการให้ความร้อน และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยแต่ละพารามิเตอร์มี 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 และสำหรับการออกแบบการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio: S/N) ถูกดำเนินการเพื่อหาค่าเชิงปริมาณสำหรับความทนทาน (Robustness) ของพารามิเตอร์ โดยใช้เกณฑ์ 2 ประการ ได้แก่ ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better: LB) และค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better: SB) เกณฑ์ LB ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าสูงสุดของ MY, EY HHV และ EMCI ในขณะที่เกณฑ์ SB ถูกนำมาใช้เพื่อลดค่า SEC (การใช้พลังงานจำเพาะ) ให้เหลือน้อยที่สุด ดังที่แสดงในสมการที่ (1) และ (2):

$$\text{LB: } S/N = -10 \log (1/y^2) \quad (1)$$

$$\text{SB: } S/N = -10 \log (y^2) \quad (2)$$

โดย y คือ ค่าที่ต้องการประเมิน ได้แก่ MY, EY, HHV EMCI และ SEC

ตารางที่ 1 ทอร์ริแฟกชันพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทากูชิ

พารามิเตอร์	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3
อุณหภูมิ: T (°C)	200	250	300
ระยะเวลา: t (min)	15	35	55
อัตราการให้ความร้อน: HR (°C/min)	10	20	30
อัตราการไหลของ N_2 : N_2 (l/min)	0.1	0.2	0.3

ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองเชิงฉากของทากูชิ L9 (4^3)

ครั้ง	T (°C)	t (min)	HR (°C/min)	N_2 (l/min)
1	200	15	10	0.1
2	200	35	20	0.2
3	200	55	30	0.3
4	250	15	20	0.3
5	250	35	30	0.1
6	250	55	10	0.2
7	300	15	30	0.2

8	300	35	10	0.3
9	300	55	20	0.1

2.4 สมรรถนะของกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

ประสิทธิภาพของกระบวนการถูกประเมินโดยใช้ผลผลิตเชิงมวล (Mass yield: MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield: EY) ค่าความร้อนสูง (Higher heating value: HHV) ดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงานและมวล (Energy-mass co-benefit index: EMCI) และการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC)

ผลผลิตเชิงมวลเป็นการวัดสัดส่วนร้อยละของชีวมวลที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ค่าที่ต่ำกว่าบ่งชี้ถึงระดับการสลายตัวที่สูงกว่าและมีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy densification) ที่มากกว่า:

$$MY\ (\%) = M_{tor}/M_0 \times 100 \quad (3)$$

ผลผลิตเชิงพลังงานใช้ประเมินการกักเก็บพลังงานในชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน:

$$EY\ (\%) = MY \times HHV_{tor}/HHV_0 \times 100 \quad (4)$$

การใช้พลังงานจำเพาะแสดงถึงปริมาณพลังงานที่ต้องการต่อหนึ่งหน่วยมวลของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ค่าที่ต่ำกว่าบ่งชี้ถึงกระบวนการที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงกว่า:

$$SEC\ (kWh/kg)\} = E_{process}/M_{tor} \quad (5)$$

ดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงานและมวล (EMCI) แสดงถึงความสัมพันธ์ร่วมระหว่างประโยชน์ที่ได้รับจากความหนาแน่นของพลังงานที่เพิ่มขึ้นและผลเสียจากการสูญเสียมวล ซึ่งทำหน้าที่เป็นเกณฑ์ชี้วัดเดียวที่ใช้ในการรักษาสมดุลระหว่างการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงกับการคงอยู่ของมวลชีวมวล:

$$EMCI\ (\%) = EY - MY \quad (6)$$

โดย M และ HHV คือ น้ำหนัก (กรัม) และค่าความร้อนสูง (MJ/kg) ของตัวอย่างซังข้าวโพด ตัวห้อย 0 และ tor หมายถึง ชีวมวลในสภาวะดิบและสภาวะที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ตามลำดับ และ $E_{process}$ คือ พลังงานรวมทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (kWh)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

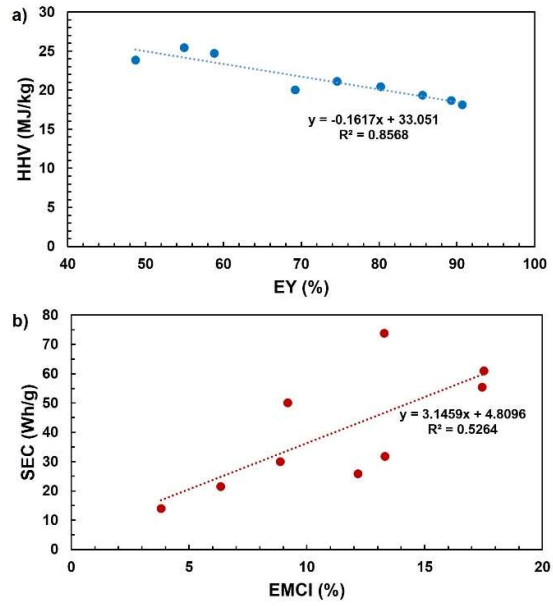
3.1 ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรรถนะทอร์รีแฟกชัน

ประสิทธิภาพกระบวนการทอร์รีแฟกชันของซังข้าวโพดได้รับอิทธิพลที่แตกต่างกันสำหรับอุณหภูมิ (T) ระยะเวลา (t) อัตราการให้ความร้อน (HR) และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N2) ในบรรดาพารามิเตอร์เหล่านี้ อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 °C เป็น 300 °C จะสังเกตเห็นการลดลงอย่างชัดเจนของ EY ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการลดลงของความชื้น การระเหยของสารระเหย (Devolatilization) และการแตกตัวของโครงสร้างชีวมวล แม้ว่าสิ่งนี้จะนำไปสู่การสูญเสียมวลที่มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ช่วยส่งเสริมให้ค่า HHV เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความหนาแน่นของพลังงานที่ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น

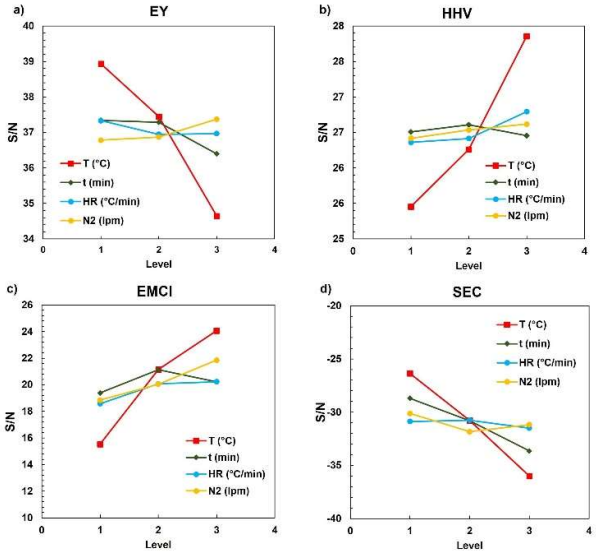
ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิที่นานขึ้น ทำให้เกิดการสลายตัวที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้ MY และ EY ลดลง แต่ช่วยเพิ่มค่า HHV ผ่านการกำจัดสารระเหยออกอย่างต่อเนื่องและการเพิ่มความเข้มข้นของสัดส่วนคาร์บอน โดยต้องแลกมากับการใช้พลังงานที่สูงขึ้น

อัตราการให้ความร้อนระดับปานกลาง (20 °C/min) ช่วยเพิ่มค่า HHV อย่างสมดุลโดยไม่ก่อให้เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อัตราที่สูงขึ้น (30 °C/min) จะทำให้ค่า SEC สูงขึ้น แม้ว่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนจะมีผลกระทบค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์อื่น แต่ก็มีส่วนช่วยในการรักษาสภาพแวดล้อมที่เป็นก๊าซเฉื่อย

เพื่อประเมินความคุ้มค่าระหว่างการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพลังงานกับการสูญเสียมวล ดัชนีผลประโยชน์ร่วมทางพลังงานและมวล (EMCI) จึงถูกนำมาพิจารณาร่วมกับ SEC ดังแสดงในรูปที่ 2b ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนค่า EMCI อย่างชัดเจน ที่อุณหภูมิต่ำ (200 °C) ค่า EMCI อยู่ในระดับต่ำ (เช่น 3.8% ในการทดลองที่ 1) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชื้อเพลิงยังมีน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อุณหภูมิสูงถึง 300 °C ค่า EMCI พุ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าถึง 17.51% (ในการทดลองที่ 8) สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าผลตอบแทนที่ได้จากความหนาแน่นของพลังงาน ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีน้ำหนักมากกว่าและสามารถชดเชยผลเสียจากการสูญเสียมวลได้อย่างคุ้มค่า



รูปที่ 2 a) EY ต่อ HHV และ b) EMCI ต่อ SEC จากการออกแบบทากูชิ



รูปที่ 3 S/N ของ a) EY, b) HHV, c) EMCI และ d) SEC

3.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio analysis)

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิ (T) ระยะเวลา (t) อัตราการให้ความร้อน (HR) และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่มีต่อสมรรถนะของกระบวนการ ได้แก่ EY, HHV, EMCI และ SEC ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้เกณฑ์ "ค่ายิ่งมากยิ่งดี" (Larger-the-better; LB) สำหรับการประเมินค่า EY, HHV และ EMCI และใช้เกณฑ์ "ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี" (Smaller-the-better; SB) สำหรับค่า SEC จากผลการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบสูงสุดต่อตัวชี้วัดทั้งหมดอย่างชัดเจน สำหรับผลผลิตเชิงพลังงาน (EY, รูปที่ 3a) การเพิ่มอุณหภูมิจากระดับที่ 1 (200 °C) เป็นระดับที่ 3 (300 °C) ทำให้ค่า S/N ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งบ่งชี้ถึงการสลายตัวของโครงสร้างชีวมวลที่ถูกเร่งให้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บพลังงานลดลง

ในทางตรงกันข้าม กราฟของค่า HHV (รูปที่ 3b) และ EMCI (รูปที่ 3c) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่า S/N อย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิ แนวโน้มที่สอดคล้องกันนี้สะท้อนให้เห็นว่าความร้อนที่สูงขึ้นช่วยส่งเสริมกระบวนการคาร์บอไนเซชันและการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานซึ่งสอดคล้องกับงานของ Manatura et al. [4] ที่ศึกษาเปลือกมะพร้าว ซึ่งพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักต่อ HHV เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มนี้เป็นคุณสมบัติร่วมของชีวมวลทางการเกษตรโดยทั่วไป นอกจากนี้ผลประโยชน์ที่ได้จากค่าความร้อนที่สูงขึ้นนี้ มีน้ำหนักมากพอที่จะขับเคลื่อนให้ดัชนีผลประโยชน์ร่วม (EMCI) เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC, รูปที่ 3d) ค่า S/N มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว (มีค่าติดลบมากขึ้น) เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในกระบวนการเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันเชิงสถิติว่า การใช้ความร้อนที่รุนแรงขึ้นและการเปิดรับความร้อนเป็นเวลานานขึ้นทำให้การใช้พลังงานของระบบพุ่งสูงขึ้น ในขณะที่ปัจจัยด้านอัตราการให้ความร้อน (HR) และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N_2) แสดงแนวโน้มที่ค่อนข้างราบเรียบและคงที่ในทุกตัวชี้วัด ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวแปรทั้งสองนี้มีบทบาทรองเมื่อเทียบกับอุณหภูมิและระยะเวลา

เพื่อยืนยันนัยสำคัญทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงในตารางที่ 3 พบว่าโมเดลมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในทุกตัวชี้วัด โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญหลักสำหรับ HHV (R^2 = 0.9551), EY (R^2 = 0.9341), EMCI (R^2 = 0.809) และ SEC (R^2 = 0.9916) ซึ่งสำหรับ SEC นั้น ระยะเวลาเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญร่วมด้วย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ S/N ratio ที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 3 ANOVA ของ Taguchi - responses

Response	HHV	EY	EMCI	SEC
Model F-value	63.89	42.53	12.71	117.7
p-value	< 0.0001	0.0003	0.007	0.0002
Factors ($p < 0.05$)	T	T	T	T, t
R^2	0.9551	0.9341	0.809	0.9916
Adj.R^2	0.9402	0.9121	0.7454	0.9832

3.3 สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N ratio) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับผลลัพธ์เป้าหมายที่ต้องการ ค่า EY สูงสุด

ทำได้ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 °C, เวลา 15 นาที, อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.1 l/min ซึ่งการสลายตัวที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ณ สภาวะนี้ ช่วยให้สามารถกักเก็บชีวมวลและพลังงานไว้ได้มากกว่าโดยใช้ปริมาณก๊าซน้อยที่สุด นอกจากนี้ ค่า SEC ที่ต่ำที่สุดก็พบที่อุณหภูมิ 200 °C เช่นกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการพลังงานป้อนเข้าที่ต่ำที่สุดภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาถึงการยกระดับคุณภาพเชื้อเพลิงอย่างเต็มที่ ควบคู่ไปกับการสร้างสมดุลเชิงผลประโยชน์ร่วมผ่านดัชนี EMCI สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะเปลี่ยนไปใช้อุณหภูมิ 300 °C โดยสภาวะที่ทำให้ค่า HHV และค่า EMCI ขึ้นสู่จุดสูงสุด (17.51%) คือการทำงานที่อุณหภูมิ 300 °C ควบคู่กับการใช้เวลา 35 นาที, อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.3 l/min ณ สภาวะนี้ กระบวนการคาร์บอไนเซชันที่เพิ่มขึ้นได้ช่วยยกระดับคุณภาพของเชื้อเพลิงจนสามารถชดเชยการสูญเสียมวลได้อย่างคุ้มค่าที่สุด

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด (MY, EY, HHV, EMCI และ SEC) ผลการวิจัยได้กำหนดแนวทางที่เหมาะสม 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) เพื่อทำให้ผลได้มวลและพลังงาน (MY และ EY) สูงสุด โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำที่สุด สภาวะที่เหมาะสมคือ 200 °C, 15 นาที, 10 °C/min และ 0.1 l/min ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้พลังงานป้อนเข้าต่ำที่สุด และ 2) การทำให้คุณภาพเชื้อเพลิง (HHV) และดัชนีผลประโยชน์ร่วม (EMCI ซึ่งทำได้สูงสุดถึง 17.51%) มีค่าสูงสุดนั้น ต้องใช้สภาวะที่รุนแรงขึ้น ได้แก่ 300 °C, 35 นาที, 10 °C/min และ 0.3 l/min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูง การเพิ่มขึ้นอย่างมากของความหนาแน่นพลังงานสามารถชดเชยผลเสียจากการสูญเสียมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร. นภัส แก้วตระกูลชัยจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (KAPI) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการอนุเคราะห์ผลการทดลองมา ณ ที่นี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Huang, C. W., Li, Y. H., Xiao, K. L., & Lasek, J. (2019). Cofiring characteristics of coal blended with torrefied Miscanthus biochar optimized with three Taguchi indexes. Energy, 172, 566–579.

[2] Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., & Liu, H. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. Progress in Energy and Combustion Science, 82, 100887.

[3] Manatura, K. (2020). Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. Case Studies in Thermal Engineering, 19, 100623.

[4] Manatura, K., Samsalee, N., & Kaewtrakulchai, N. (2025). Optimization of torrefaction parameters for coconut shell using the Taguchi method: Impact on

torrefaction performances, combustion characteristics, and thermal stability. Thermal Science and Engineering, 57, 103137.
[5] Chen, W. H., Biswas, P. P., Kwon, E. E., & Lin, K. Y. A. (2024). Optimizing bone and biomass co-torrefaction parameters: High-performance arsenic removal from wastewater via co-torrefied bone char. Environmental Research, 252, 118990.
[6] Saidur, R., Islam, M. R., & Rahim, N. A. (2023). Recent developments in torrefaction of biomass for energy applications: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 412, 136045.
[7] Ganesan, S. R., Joseph, P. S., & Patel, M. (2022). The application of the Taguchi method for optimizing biomass torrefaction process. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 14(5), 1–12.
[8] Nguyen, T. A., Lee, D. Y., & Kim, J. W. (2023). Process optimization and kinetic analysis of biomass torrefaction using the Taguchi method. Applied Energy, 322, 119693

การออกแบบและการสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110

Design and Development of a Prototype Electric Motorcycle Converted from a Honda Wave 110

ประจักษ์ ประเสริฐชาติ[1*], มนัส ปักเขมะยา[2], ชวฤทธิ์ ศิริทาน[3], ธีระพล บุญธรรม[4] และ สันติ ทรัพย์มาก[5]

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 ที่อยู่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000

[2] ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 ที่อยู่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000

[3] ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 ที่อยู่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000

[4] ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 ที่อยู่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000

[5] ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3 ที่อยู่ 460 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000

*ประจักษ์ ประเสริฐชาติ : prajakauto@gmail.com, 086-238-6337

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 และเพื่อทดสอบสมรรถนะในด้านความเร็วสูงสุดและระยะทางในการขับขี่จริงของรถต้นแบบที่สร้างขึ้น

ผลการวิจัยพบว่า รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบมีขนาดมิติความกว้าง 70 เซนติเมตร ความยาว 190 เซนติเมตร และความสูง 110 เซนติเมตร ระบบขับเคลื่อนใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แห้งจำนวน 6 ลูก ขนาด 12V 25Ah ต่ออนุกรมรวมแรงดันกระแสตรง 72 โวลต์ ส่งกำลังผ่านชุดควบคุมไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าดัดแปลงชนิดดุมล้อ (Hub Motor) ขนาด 3,000 วัตต์ ขนาดวงล้อ 17 นิ้ว โดยมีระบบเบรกเกอร์ควบคุมการเปิด-ปิดระบบไฟฟ้า ผลการทดสอบสมรรถนะในด้านความเร็วสูงสุดและระยะทางในสภาพการใช้งานจริงจำนวน 3 รอบการทดลอง โดยผู้ขับขี่มีมวลอยู่ที่ 60 กิโลกรัม พบว่ารถต้นแบบสามารถทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ 59.47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถขับขี่ได้ระยะทางรวมสูงสุดเฉลี่ย 59.77 กิโลเมตรต่อการประจุไฟฟ้าเต็ม 1 ครั้ง โดยใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าเฉลี่ย 3 ชั่วโมง 54 นาที ทั้งนี้ ตัวรถต้นแบบยังคงระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบไฟสัญญาณเตือนเพื่อความปลอดภัยในการขับขี่ได้อย่างครบถ้วน และมีโครงสร้างตัวถังที่สามารถรองรับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ารถต้นแบบมีสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเดินทางในเมือง ตลอดจนสามารถนำไปเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการดัดแปลงยานพาหนะในระดับการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่ในอนาคต

คำสำคัญ: รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง, มอเตอร์ชนิดดุมล้อ, การทดสอบสมรรถนะ

Abstract

This research aimed to design and construct a prototype electric motorcycle by modifying a Honda Wave 110 motorcycle, and to evaluate its performance regarding top speed and actual driving range.

The research findings indicated that the prototype converted electric motorcycle measures 70 cm in width, 190 cm in length, and 110 cm in height. The propulsion system is powered by six 12V 25Ah dry-cell batteries connected in series, providing a total DC voltage of 72 volts. Power is transmitted via a controller to a 3,000-watt electric hub motor mounted a 17-inch wheel, with a circuit breaker system managing the electrical power supply. Performance testing under actual usage conditions across three experimental trials, with a rider mass of 60 kg, revealed that the prototype vehicle achieves an average top speed of 59.47 km/h and an average maximum driving range of 59.77 km per full charge. The average charging time required is 3 hours and 54 minutes. Furthermore, the prototype fully retains its functional lighting and warning signal systems for driving safety, and features a chassis structure capable of supporting the electric drive system efficiently and safely. Experimental results demonstrated that the prototype offers suitable operational performance for urban commuting and can serve as a guideline for developing vehicle conversion technology at a commercial production level. However, improving battery efficiency remains a critical factor that needs further development to extend the driving range in the future.

Keywords: Electric Motorcycle Conversion, Hub Motor, Performance Testing

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศและแนวโน้มการขาดแคลนพลังงานฟอสซิล ส่งผลให้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นทางเลือกเพื่อขับเคลื่อนการคมนาคมขนส่งที่ยั่งยืน สำหรับประเทศไทย ตลาดยานยนต์ไฟฟ้ามีอัตราการเติบโตอย่างก้าวกระโดด สะท้อนจากข้อมูลสถิติของสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2568 มียานยนต์ไฟฟ้าประเภทแบตเตอรี่ (BEV) จดทะเบียนใหม่สะสมสูงถึง 147,522 คัน เติบโตขึ้นจากปีก่อนหน้าถึงร้อยละ 52.74 และส่งผลให้ยอดจดทะเบียนสะสมรวมของยานยนต์ไฟฟ้า 100% ในประเทศมีจำนวนมากกว่า 370,000 คัน อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาจำแนกตามประเภทพบว่าสัดส่วนหลักของการเติบโตยังคงกระจุกตัวอยู่ในกลุ่มรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ในขณะที่กลุ่มรถจักรยานยนต์ไฟฟ้ามียอดจดทะเบียนใหม่เพียง 24,163 คัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในที่วิ่งใช้งานอยู่บนท้องถนนนับสิบล้านคันในปัจจุบัน

ESTACON 2026 | 17th

ในอุตสาหกรรมรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าปัจจุบัน พบว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำเร็จรูปที่จำหน่ายในท้องตลาดมักประสบปัญหาสำคัญ 2 ประการ คือ กลุ่มรถที่มีสมรรถนะดีและระยะทางวิ่งไกลมักมีราคาสูงเกินกว่าที่ผู้บริโภคทั่วไปจะเข้าถึงได้ ขณะที่กลุ่มรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าราคาประหยัดมักมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างตัวถังที่ไม่ได้มาตรฐาน ความทนทานต่ำ และระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ามีสมรรถนะค่อนข้างจำกัด อีกทั้งการเปลี่ยนผ่านไปสู่ยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันยังเน้นไปที่การซื้อรถคันใหม่ ซึ่งส่งผลให้เกิดขยะทางอุตสาหกรรมจากซากรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์เดิมที่ถูกทิ้งเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้ การวิจัยพัฒนาเทคโนโลยี การดัดแปลงรถจักรยานยนต์เก่า (EV Conversion) ให้กลายเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า จึงเป็นแนวทางสำคัญในการอุดช่องว่างดังกล่าว เนื่องจากสามารถช่วยลดต้นทุนการครอบครองยานยนต์ไฟฟ้า ช่วยยืดอายุการใช้งานโครงสร้างตัวถังเดิม และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

คณะผู้วิจัยจึงได้เลือกพัฒนาชุดดัดแปลงระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้ รถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 (Honda Wave 110) เป็นรถต้นแบบ ด้วยเหตุผลสำคัญเชิงวิศวกรรมและเชิงพาณิชย์ 3 ประการ ประการแรก รถจักรยานยนต์ตระกูลฮอนด้าเวฟถือเป็นรถประเภทครอบครัวที่มียอดจำหน่ายสะสม และมีปริมาณการใช้งานสูงที่สุดในประเทศไทย ทำให้มีฐานโครงสร้างตัวถังเก่าที่พร้อมนำมาดัดแปลงเป็นจำนวนมาก ประการที่สอง โครงสร้างเฟรมรถ (Underbone Chassis) ของรถรุ่นนี้มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา และมีพื้นที่ว่างใต้เบาะและบริเวณห้องเครื่องยนต์เดิมที่กว้างขวาง เหมาะสมต่อการออกแบบจัดวางโครงเหล็กเพื่อติดตั้งถาดแบตเตอรี่และชุดควบคุมได้อย่างลงตัวโดยไม่ต้องตัดต่อตัวถังหลัก และประการสุดท้าย ระบบกลไกช่วงล่าง ระบบบังคับเลี้ยว และระบบเบรกมาตรฐานเดิมของรถรุ่นนี้ได้รับการออกแบบมาอย่างสมดุล ทำให้เมื่อทำการดัดแปลงติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อ (Hub Motor) ขนาด 3,000 วัตต์ เข้ากับวงล้อขนาด 17 นิ้วเดิมแล้ว ตัวรถยังคงสามารถรักษารูปทรงทางเรขาคณิตและการกระจายน้ำหนักที่ปลอดภัยไว้ได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างและทดสอบสมรรถนะในด้านความเร็วสูงสุดและระยะทางวิ่งใช้งานจริง เพื่อเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงที่มีสมรรถนะคุ้มค่าและปลอดภัยต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน และสามารถใช้เป็นแนวทางมาตรฐานในการพัฒนาเชิงพาณิชย์หรือเป็นสื่อการเรียนการสอนในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110

2.2 เพื่อทดสอบและประเมินสมรรถนะตัวแปรด้านความเร็วสูงสุดเฉลี่ย ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบที่สร้างขึ้น

2.3 เพื่อทดสอบและประเมินสมรรถนะตัวแปรด้านระยะทางขับขี่สูงสุดและเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ต่อการประจุไฟฟ้าเต็ม 1 ครั้ง

3. สมมติฐาน การวิจัย

3.1 รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากโครงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อขนาด 3,000 วัตต์ สามารถทำ

ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2 รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบที่ใช้ระบบพลังงานจากแบตเตอรี่ชนิดแห้ง (Lead-Acid) ขนาดแรงดันรวม 72 โวลต์ สามารถขับขี่ใช้งานบนเส้นทางแนวราบได้ระยะทางรวมสูงสุดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 50 กิโลเมตรต่อการประจุไฟฟ้าเต็ม 1 ครั้ง

4. ขอบเขตการวิจัย

4.1 ตัวรถต้นแบบ ดัดแปลงจากโครงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 โดยตัดระบบเครื่องยนต์สันดาปเดิมออก แล้วทดแทนด้วยระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า

4.2 ระบบต้นกำลังและระบบขับเคลื่อน ใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ชนิดแห้ง (Lead-Acid) จำนวน 6 ลูก ขนาด 12V 25Ah ต่ออนุกรมรวมแรงดันกระแสตรง 72 โวลต์ และใช้มอเตอร์ชนิดดุมล้อ (Hub Motor) ขนาดกำลังไฟฟ้า 3,000 วัตต์ ขนาดวงล้อขนาด 17 นิ้ว

4.3 สภาวะควบคุมในการทดสอบ โหลดน้ำหนักคงที่ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะโหลดน้ำหนักผู้ขับขี่คงที่อยู่ที่ 60 กิโลกรัม สภาพเส้นทาง ทดสอบขับขี่บนเส้นทางแนวราบทางวิศวกรรม (ไม่มีความชัน) และสภาพพื้นผิวถนนลาดยางคอนกรีตแห้งปกติ จำนวนการเก็บข้อมูล ทำการทดสอบวิ่งและเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 3 รอบการทดลอง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ

4.4 ตัวแปรที่มุ่งศึกษา มุ่งศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพเชิงกลเชิงกายภาพ 3 ด้านหลัก ได้แก่ ความเร็วสูงสุด (กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ระยะทางที่วิ่งได้ไกลสุด (กิโลเมตร) และเวลาการประจุไฟฟ้าเฉลี่ย (ชั่วโมง:นาที) เท่านั้น โดยไม่ได้ครอบคลุมการวัดค่ามลพิษทางไอเสียเชิงเคมี (Emission) แรงสั่นสะเทือน (Vibration) หรือการยศาสตร์ (Ergonomics) ของผู้ขับขี่

5. ทฤษฎี

5.1 ทฤษฎีระบบยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง (EV Conversion Theory) กระบวนการดัดแปลงยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในเดิม (ICE) ให้เป็นยานยนต์ไฟฟ้า (EV Conversion) มีกลไกทางวิศวกรรมหลักคือการถอดระบบขับเคลื่อนเดิมอันได้แก่ เครื่องยนต์ ถังน้ำมัน และท่อไอเสียออก แล้วแทนที่ด้วยระบบส่งกำลังไฟฟ้าหลัก 4 ส่วน คือ (1) แบตเตอรี่ (2) ชุดควบคุมมอเตอร์ (3) มอเตอร์ไฟฟ้า และ (4) ระบบโครงสร้างรองรับ แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแบตเตอรี่จะส่งผ่านไปยังอินเวอร์เตอร์/ชุดควบคุม (Controller) เพื่อสลับและปรับสัญญาณกระแสไฟฟ้าตามการสั่งการจากคันเร่งก่อนส่งกำลังขับเคลื่อนกลไกเชิงกลไปยังเพลาหรือดุมล้อเพื่อขับเคลื่อนตัวรถ

5.2 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อ (Hub Motor / In-Wheel Motor) งานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC) ชนิดดุมล้อ (Hub Motor) เนื่องจากมีข้อดีเชิงโครงสร้างวิศวกรรมยานยนต์สูงที่สุดสำหรับการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ แกนหมุนของมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเพลาล้อโดยตรง ทำให้สามารถตัดระบบส่งกำลังขั้นที่สอง เช่น โซ่ สเตอร์ หรือสายพานออกไปได้ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังทางกล (Mechanical Transmission Efficiency: η_m) มีค่า

เข้าใกล้ 1.0 (หรือประมาณ 95-98%) ลดการสูญเสียพลังงานในระบบขับเคลื่อนลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.3 ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) ระบบ BMS ถือเป็นสมองกลควบคุมความปลอดภัยของระบบพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการจัดวางแบตเตอรี่ชนิดแห้ง (Lead-Acid) ต่ออนุกรมร่วมกันจำนวน 6 ลูก เพื่อให้ได้แรงดันรวม 72 โวลต์ หน้าที่หลักของ BMS เชิงวิศวกรรมประกอบด้วย:

5.3.1 Voltage Protection ป้องกันการประจุแรงดันเกิน (Over-voltage) และป้องกันการใช้งานจนแรงดันต่ำเกินกำหนด (Under-voltage) เพื่อรักษาอายุการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่

5.3.2 Current Control ควบคุมไม่ให้เกิดกระแสลัดวงจรหรือการดึงกระแสเกินขีดจำกัด (Over-current) ขณะเร่งความเร็วสูงสุด

5.4 การคำนวณกำลังมอเตอร์ และประสิทธิภาพพลังงาน (Power and Energy Efficiency Calculations) ตามหลักกลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics) กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงขณะวิ่งด้วยความเร็วคงที่บนทางราบ สามารถคำนวณได้จากสมรรถนะการเอาชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ (Total Resistance Force: F_t) ดังนี้

$$F_t = F_{rr} + F_{ad}$$

โดยที่

F_{rr} คือ แรงต้านทานการกลิ้งของยาง (Rolling Resistance) คำนวณจาก $F_{rr} = f_r \cdot m \cdot g$

เมื่อ f_r คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการกลิ้ง

m คือ มวลรวมของรถและผู้ขับขี่ 60 กก.

g คือ แรงโน้มถ่วง

F_{ad} คือ แรงต้านทานของอากาศ (Aerodynamic Drag) คำนวณจาก

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

ρ คือ *ความหนาแน่นอากาศ*

C_d คือ *สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ*

A คือ *พื้นที่หน้าตัดหน้ารถ*

v คือ *ความเร็วรถ)*

กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องใช้จริงในการขับเคลื่อนเชิงกล (P_{out}) ณ ความเร็วใดๆ คือ

$$P_{out} = Ft \cdot v$$

และประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบรวม (η_{sys}) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานกลที่ส่งออกไปยังล้อ เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ดึงมาจากแบตเตอรี่ ($P_{in} = I \cdot V$)

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\ \%$$

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสกสรร และคณะ (2565) ได้ศึกษาการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ขนาด 110 ซีซี เป็นระบบไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ BLDC ขนาด 3,000 วัตต์ แหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่แรงดัน 72 โวลต์ ดำเนินการวิจัยโดยสร้างรถต้นแบบและกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบตัวแปรความเร็วสูงสุดและอัตราสิ้นเปลืองพลังงาน ผลการทดสอบบนทางราบพบว่าทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ 62.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องและช่วยสนับสนุนวิธีวิจัยเชิงทดลองบนทางราบในงานวิจัยนี้

กิตติพงษ์ และประจักษ์ (2566) ได้เผยแพร่บทความในวารสารวิชาการสายเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยศึกษาผลของน้ำหนักบรรทุกและประเภทแบตเตอรี่ต่อระยะทางการวิ่งของ

รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง ใช้วิธีดำเนินการวิจัยควบคุมโหลดน้ำหนักผู้ขับขี่คงที่ในการวิ่งทดสอบ 3 รอบการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะทางสูงสุดต่อการชาร์จ 1 ครั้ง ซึ่งเป็นที่มาของเกณฑ์ระบุขอบเขตการควบคุมน้ำหนักผู้ขับขี่ที่ 60 กิโลกรัมในงานวิจัยปัจจุบัน

ธีรวัฒน์ (2567) วิทยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมยานยนต์และพลังงาน (มีกรรมการลงนามสมบูรณ์) เรื่อง "การวิเคราะห์โครงสร้างแชสซีรถจักรยานยนต์แบบ Underbone สำหรับติดตั้งชุด EV Kit ได้สรุปผลเชิงการทดลองว่า โครงสร้างของรถจักรยานยนต์ตระกูล Honda Wave 110 มีค่าความเค้น (Yield Strength) ของเฟรมรถที่สามารถรองรับมวลสะสมของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจำนวน 6 ลูกที่มีน้ำหนักรวมกว่า 40 กิโลกรัมได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ทำให้ศูนย์ถ่วงเรขาคณิตผิดเพี้ยนไปจากการควบคุมทิศทางเดิม

7. วิธีการดำเนินงานวิจัย

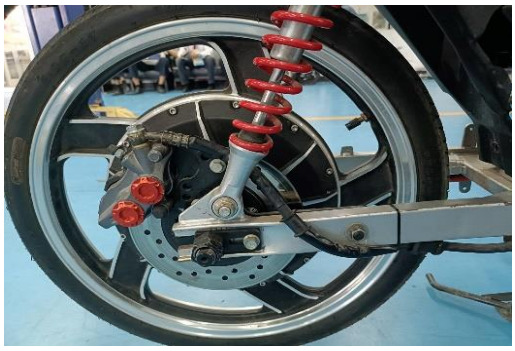
ในการวิจัยออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 คณะผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

7.1 เลือกโครงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 รถจักรยานยนต์ฮอนด้า ตระกูล Wave ถือกำเนิดขึ้นในไทยเมื่อปี พ.ศ. 2540 และในปี พ.ศ. 2542 ฮอนด้าได้ขยายความจุเครื่องยนต์เป็น 110 ซีซี เพื่อให้มีอัตราเร่งที่ดีขึ้น ในขณะนั้นใช้ระบบจ่ายน้ำมันแบบคาร์บูเรเตอร์ โดยมีรุ่นที่เป็นที่จดจำอย่าง Wave 110 และรุ่นดัดแปลงไฟหน้าอย่าง Wave 110 ปัจจุบันยังมีการผลิตอยู่ แต่มีการปรับใช้ระบบหัวฉีด PGM-FI ทำให้มีโครงรถเก่าขายจำนวนมาก และราคาถูก รวมถึงอะไหล่ต่างๆ หาซื้อง่าย ทั้งมือ 1 และมือ 2



รูปที่ 1 แสดงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ

7.2 การเลือกอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อน การเลือกขนาดชิ้นส่วนและอุปกรณ์หลักในระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า มุ่งเน้นการใช้ชุดอุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีจำหน่ายแพร่หลายในท้องตลาด หาซื้อง่าย มีอะไหล่แท้ อะไหล่มือสองราคาถูกเปลี่ยน และเป็นอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในการจัดการแข่งขันทักษะวิชาชีพช่างยนต์ ทักษะงานจักรยานยนต์ไฟฟ้า ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) เพื่อความสะดวกในการจัดหาเชิงพาณิชย์และการต่อยอดองค์ความรู้ โดยเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อ (Hub Motor) เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านชนิดดุมล้อสำเร็จรูป 17 นิ้ว ขนาดกำลัง 3,000 วัตต์ แรงดัน 72 โวลต์



รูปที่ 2 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อ (Hub Motor) ขนาด 3,000 วัตต์

แบตเตอรี่ (Battery) เลือกใช้แบตเตอรี่แห้งชนิดตะกั่ว-กรด (Deep Cycle Lead-Acid) สำเร็จรูป ขนาด 12 โวลต์ ความจุ 25 แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah)

จำนวน 6 ลูก นำมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันรวม กระแสตรง 72 โวลต์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบขับเคลื่อนได้อย่างเสถียร และประหยัดต้นทุน

การออกแบบโครงสร้างรองรับ ออกแบบสร้างถาดเหล็กยึดแบตเตอรี่ (Battery Tray) โดยใช้เหล็กฉากหนา 3 มิลลิเมตร ยึดด้วยสลักเกลียวเข้ากับจุดหูยึดเครื่องยนต์เดิมของรถฮอนด้าเวฟ 110 จัดวางตำแหน่งแบตเตอรี่ทั้ง 6 ลูกให้มีจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity) ต่ำและอยู่กึ่งกลางรถ เพื่อรักษาสมดุลและการกระจายน้ำหนักหน้า-หลังให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างเดิมโรงงาน

รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 ดำเนินการถอดเครื่องยนต์ชุดเดิมออกจากโครงรถจากนั้นทำการออกแบบและติดตั้งถาดรองรับด้วยโครงเหล็กเชื่อมยึดแน่นหนาเพื่อใช้เป็นพื้นที่จัดวางแบตเตอรี่แห้งจำนวน 6 ลูก และเพิ่มความปลอดภัยด้วยการรัดด้วยสายรัดแบน ตัวล็อกแบบฟันเฟืองที่ตัวแบตเตอรี่เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เคลื่อนที่หลุดออกจากถาดรอง



รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งแบตเตอรี่ในโครงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110

7.3 เครื่องมือวัด ความแม่นยำและการสอบเทียบ เพื่อความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลตัวเลขสมรรถนะ คณะผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือวัดระบบดิจิทัลที่มีเกณฑ์การสอบเทียบมาตรฐานดังนี้

เครื่องวัดความเร็วและระยะทาง ใช้ระบบบันทึกพิกัดดาวเทียมร่วมกับเซนเซอร์ล้อ (Digital GPS Odometer/Speedometer) ความละเอียดในการวัดความเร็ว 0.1 km/h และวัดระยะทางละเอียด 0.01 km โดยผ่านการสอบเทียบความเที่ยงตรงเทียบกับระยะทางอ้างอิงจริงของทางราชการ

นาฬิกาจับเวลา ใช้ระบบดิจิทัลสต็อปวอทช์ (Digital Stopwatch) ความละเอียด 0.01 วินาที

เครื่องวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ติดตั้งจอมอนิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Battery Monitor) หน้าจอร่วมกับเซนเซอร์ Shunt ความแม่นยำสูง (Accuracy ± 0.5%) เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้ารวม (V) และกระแสไฟฟ้า (A) จากแบตเตอรี่ขณะใช้งานแบบ Real-time

7.4 การควบคุมตัวแปร สภาพแวดล้อม และเงื่อนไขการทดสอบ (Experimental Controls)

การทดสอบสมรรถนะความเร็วสูงสุดและระยะทางขับขี่จริง กระทำภายใต้การควบคุมสภาวะอย่างเข้มงวดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง ดังนี้

7.4.1 ตัวแปรด้านกายภาพและน้ำหนักบรรทุก มวลผู้ขับขี่ ควบคุมโหลดน้ำหนักผู้ขับขี่คงที่อยู่ที่ 60 กิโลกรัม (รวมอุปกรณ์ป้องกันและหมวกนิรภัย) น้ำหนักรวมรถ น้ำหนักตัวรถดัดแปลงเปล่ารวมชุดแบตเตอรี่เท่ากับ 85 กิโลกรัม ทำให้น้ำหนักรวมขณะทดสอบ (Total Test Mass) คงที่อยู่ที่ 145 กิโลกรัม แรงดันลมยาง ควบคุมแรงดันลมยางหน้าและหลังคงที่ที่ 29 PSI (ล้อหน้า) และ 33 PSI (ล้อหลัง) โดยตรวจสอบด้วยเกจวัดแรงดันดิจิทัลก่อนเริ่มการทดลองทุกรอบ



รูปที่ 4 แสดงหน้าจอบอกค่าต่างๆ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง ฯ

7.4.2 ตัวแปรด้านสภาพแวดล้อมและเส้นทาง เส้นทางทดสอบ ทดสอบขับขี่บนเส้นทางราบแนวตรงไม่มีความลาดชัน ($\theta = 0°$) พื้นผิวถนนลาดยางคอนกรีตแห้งและเรียบสนิท ณ พื้นที่ปิดรอบวิทยาลัยฯ

สภาพอากาศและความเร็วลม ทดสอบในช่วงเวลา 09.00 - 11.00 น. อุณหภูมิเฉลี่ย 34 $\pm$2 ควบคุมสภาวะลมสงบ โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยไม่เกิน 1.5 m/s (ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม Anemometer ก่อนเริ่มทดลอง)

เงื่อนไขสิ้นสุดการทดสอบ (Termination Criteria) จุดตัดแรงดันแบตเตอรี่ (Cut-off Voltage) ระบบควบคุมถูกตั้งค่าจุดตัดเมื่อแรงดันต่ำ (Low-voltage Cut-off) ไว้ที่ 63.0 โวลต์ เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหายจากการคายประจุเกิน (Over-discharge)

เงื่อนไขสิ้นสุดการวิ่ง การทดสอบในแต่ละรอบจะสิ้นสุดลงทันทีเมื่อ

1. แรงดันไฟลดลงถึงจุดตัดคัตออฟ 63.0 โวลต์
2. ตัวรถไม่สามารถทำความเร็วได้เกินกว่า 15 km/h บนคันเร่งสูงสุดเนื่องจากกระแสไฟหมด
3. จำนวนการทดลอง ทำการทดสอบวิ่งและเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 3 รอบการทดลอง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยทางสถิติที่เชื่อถือได้

8. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการทดลองภาคสนาม จำนวน 3 รอบการทดลอง โดยใช้สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) ในการสรุปผลและรายงานผลการทดลอง ดังนี้

8.1 การหาค่าเฉลี่ย (Arithmetic Mean : $\bar{x}$) ใช้สำหรับการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุด ระยะทางขับขี่รวม และเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า จากการทดลองทั้ง 3 รอบ เพื่อให้ได้ค่าตัวแทนสมรรถนะที่เป็นกลางและน่าเชื่อถือ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

คำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean) ของผลการประเมินโดยการใช้สูตร

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

เมื่อ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ΣX = ผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด

N = จำนวนรอบของการทดลอง ($N = 3$)

8.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับสมมติฐาน (Percentage Error / Relative Comparison) นอกจากการหาค่าเฉลี่ยแล้ว คณะผู้วิจัยจะนำค่าเฉลี่ยที่ได้จริงไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเกณฑ์สมมติฐานที่ตั้งไว้ (ความเร็วไม่น้อยกว่า 50 km/h และระยะทางไม่น้อยกว่า 50 km) โดยสรุปผลออกมาในรูปแบบของค่าร้อยละที่เพิ่มขึ้นเพื่อแสดงประสิทธิภาพที่เกินเป้าหมายของรถต้นแบบ

8.3 การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : S.D.) ใช้สำหรับการวัดการกระจายตัวของข้อมูลตัวเลขผลการทดลองในแต่ละรอบ เพื่อพิสูจน์และยืนยันเสถียรภาพ (Stability) รวมถึงความคงเส้นคงวาในการทำงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าและระบบแบตเตอรี่ดัดแปลงต้นแบบ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n-1}}$$

เมื่อ

$S.D.$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X = ค่าของข้อมูลในแต่ละรอบการทดลอง

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

N = จำนวนรอบของการทดลอง (N = 3)

9. ผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 คณะผู้วิจัยได้จำแนกผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 แสดงรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110

9.1 ผลการออกแบบและสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบตัวรถต้นแบบ ผลการดำเนินการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 เครื่องยนต์สันดาปภายในเดิมมาเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า 100% พบว่า รถต้นแบบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มีรายละเอียดลักษณะทางกายภาพเชิงวิศวกรรม ดังนี้

ขนาดความกว้าง 70 เซนติเมตร ความยาว 190 เซนติเมตร และความสูง 110 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากับมิติตัวรถมาตรฐานเดิม ทำให้ยังคงความคล่องตัวในการขับขี่ใช้งาน

ระบบแหล่งจ่ายพลังงาน ติดตั้งแบตเตอรี่แห้งชนิดตะกั่ว-กรด (Deep Cycle Lead-Acid) ขนาด 12V 25Ah จำนวน 6 ลูก จัดวางบนถาดรองรับเหล็กฉากบริเวณห้องเครื่องยนต์เดิม โดยทำการต่ออนุกรมรวมแรงดันกระแสตรงได้ 72 โวลต์ มีน้ำหนักรวมของระบบแบตเตอรี่ประมาณ 42 กิโลกรัม

ระบบขับเคลื่อนและควบคุม ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านชุดควบคุม (Controller) ไปยังมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านชนิดดุมล้อ (BLDC Hub Motor) ขนาดกำลัง 3,000 วัตต์ ขนาด 17 นิ้ว โดยมีระบบเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์หลักในการควบคุมการเปิด-ปิดและการตัดต่อกระแสไฟของระบบไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อความปลอดภัย

ระบบไฟฟ้า และไฟสัญญาณ ตัวรถต้นแบบยังคงสามารถรักษาและใช้งานระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (ไฟหน้า-ไฟท้าย) และระบบไฟสัญญาณเตือน (ไฟเลี้ยว-แตร) เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่ตามกฎจราจรได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์

9.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการขับขี่จริง (Performance Testing Results)



รูปที่ 6 แสดงการทดสอบขับขี่จริงในพื้นที่ปิดบริเวณวิทยาลัยฯ

ผลการทดสอบสมรรถนะในด้านความเร็วสูงสุด ระยะทางในการขับขี่ และเวลาในการประจุไฟฟ้าภายใต้สภาวะควบคุม (ผู้ขับขี่มีมวลคงที่ 60 กิโลกรัม ขับขี่บนเส้นทางราบแนวตรงรอบวิทยาลัย ฯ แรงดันลมยางหน้า 29 PSI หลัง 33 PSI และสิ้นสุดการทดสอบเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ลดลงถึงจุดคัตออฟ 63.0 โวลต์) จากการทดสอบซ้ำจำนวน 3 รอบการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมรรถนะการขับขี่จริงของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบ จำนวน 3 รอบการทดลอง

รอบการทดลองที่	ความเร็วสูงสุด (km/h)	ระยะทางขับขี่รวม (km)	เวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า (นาที)
1	59.50	59.80	235
2	59.40	59.70	232
3	59.51	59.81	235
ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	**59.47**	**59.77**	**234**
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	**0.06**	**0.06**	**1.73 นาที**

จากตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถนะเชิงปริมาณในการขับขี่จริงจำนวน 3 รอบการทดลอง แสดงให้เห็นว่า

ด้านความเร็วสูงสุด (Top Speed) รถต้นแบบทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ย ($\bar{x}$) ได้ 59.47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.06 ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพในการจ่ายกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าดุมล้อ 3,000 วัตต์ ที่ทำความเร็วได้สม่ำเสมอในทุกรอบการทดสอบ

ด้านระยะทางขับขี่สูงสุด (Driving Range) รถต้นแบบขับขี่ได้ระยะทางรวมสูงสุดเฉลี่ย ($\bar{x}$) ได้ 59.77 กิโลเมตร ต่อการประจุไฟฟ้าเต็ม 1 ครั้ง โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.06 ชี้ให้เห็นว่าระบบแบตเตอรี่แห้งตะกั่ว-กรด 72V 25Ah มีอัตราการคายประจุที่คงที่สูงเมื่อควบคุมตัวแปรน้ำหนักบรรทุกและเส้นทางราบ

ด้านเวลาในการประจุไฟฟ้า (Charging Time): การประจุไฟฟ้ากลับจนเต็ม 100% จากจุดตัดแรงดันต่ำ (63.0 โวลต์) ใช้เวลาเฉลี่ย ($\bar{x}$) ได้ 234 นาที (หรือคิดเป็น 3 ชั่วโมง 54 นาที) โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 1.73 นาที สะท้อนให้เห็นถึงความสม่ำเสมอในการรับกระแสชาร์จของระบบประจุไฟฟ้าร่วมกับชุดแบตเตอรี่ดัดแปลง

10. สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบจากโครงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 คณะผู้วิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

10.1 ด้านการออกแบบและสร้าง คณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ฮอนด้าเวฟ 110 เครื่องยนต์สันดาปเดิม ให้เป็นระบบไฟฟ้า 100% โดยใช้ชุดอุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีจำหน่าย

ESTACON 2026 | 17th

ในท้องตลาด ตัวรถมีมิติกว้าง 70 ซม. ยาว 190 ซม. สูง 110 ซม. ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดดุมล้อ (BLDC Hub Motor) ขนาด 3,000 วัตต์ 72 โวลต์ แหล่งจ่ายพลังงานใช้แบตเตอรี่แห้งชนิดตะกั่ว-กรด (Deep Cycle Lead-Acid) ขนาด 12V 25Ah จำนวน 6 ลูกต่ออนุกรม จัดวางบนแชสซีเดิมได้อย่างสมดุลและปลอดภัย โดยโครงสร้างตัวถังยังคงระบบไฟแสงสว่าง และสัญญาณเตือนภัยมาตรฐานไว้ได้อย่างครบถ้วน

10.2 ด้านสมรรถนะความเร็วสูงสุด จากการทดสอบขับขี่จริงในพื้นที่ปิด บริเวณรอบวิทยาลัยฯ ภายใต้สภาวะควบคุมโหลดน้ำหนักผู้ขับขี่คงที่ 60 กิโลกรัม บนเส้นทางราบแนวตรง พบว่ารถต้นแบบสามารถทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ 59.47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (S.D. = 0.06) ซึ่งสูงกว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

10.3 ด้านระยะทางและเวลาในการประจุไฟฟ้า รถต้นแบบสามารถขับขี่ได้ระยะทางรวมสูงสุดเฉลี่ย 59.77 กิโลเมตร (S.D. = 0.06) ต่อการประจุไฟฟ้าเต็ม 1 ครั้ง ซึ่งสูงกว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ที่ 50 กิโลเมตร โดยใช้เวลาในการประจุไฟฟ้ากลับจนเต็มเฉลี่ย 234 นาที หรือ 3 ชั่วโมง 54 นาที (S.D. = 1.73) จากจุดตัดแรงดันต่ำ (Low-voltage Cut-off) ที่ 63.0 โวลต์

11. การอภิปรายผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงต้นแบบ คณะผู้วิจัยมีประเด็นสำคัญที่จะนำมาอภิปรายผลเชิงวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยียานยนต์ ดังนี้

11.1 ด้านสมรรถนะความเร็วสูงสุด จากการที่รถต้นแบบสามารถทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ถึง 59.47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ตั้งไว้ในสมมติฐานนั้น อภิปรายได้ว่าเกิดจากการเลือกใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านชนิดดุมล้อ (BLDC Hub Motor) ขนาดกำลัง 3,000 วัตต์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ดุมล้อโดยตรง โครงสร้างนี้ช่วยตัดการสูญเสียกำลังงานเชิงกลในระบบส่งกำลังแบบเดิม เช่น โซ่ สเตอร์ หรือสายพานออกไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งกำลัง (Transmission Efficiency) สูงขึ้น กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงถูกเปลี่ยนเป็นโมเมนตัมการหมุนของล้อได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ *เสกสรร และคณะ (2565)* ที่พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ขับตรงชนิดดุมล้อจะให้แรงบิดและอัตราเร่งในช่วงความเร็วต้นถึงความเร็วปานกลางได้ดีกว่าระบบส่งกำลังผ่านโซ่

11.2 ด้านระยะทางขับขี่สูงสุดต่อการประจุไฟฟ้า ผลการทดลองที่รถต้นแบบสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 59.77 กิโลเมตร สูงกว่าเป้าหมาย 50 กิโลเมตร อภิปรายผลได้ว่าเกิดจากการควบคุมตัวแปรในการทดลองอย่างรัดกุม โดยเฉพาะการควบคุมน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่ 60 กิโลกรัม และการทดสอบบนเส้นทางราบแนวตรงในพื้นที่ปิด ซึ่งเป็นการลดแรงต้านทานการกลิ้งของยาง (F_{rr}) และตัดความลาดชันของเส้นทาง ($\theta = 0^0$) ทำให้มอเตอร์ไม่ต้องดึงกระแสไฟฟ้าสูง (Peak Current) จากแบตเตอรี่เพื่อเอาชนะแรงต้านความชัน แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 72V 25Ah จึงสามารถคายประจุได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน สอดคล้องกับทฤษฎีกลศาสตร์ยานยนต์เรื่องแรงต้านทานการเคลื่อนที่ และสอดรับกับผลการวิจัยของ *กิตติพงษ์ และประจักษ์ (2566)* ที่ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมความเร็วให้คงที่บนทางราบและคุมน้ำหนัก

บรรทุก จะช่วยยืดระยะทางขับขี่ของแบตเตอรี่ชนิดแห้งได้สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

11.3 ด้านเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า เวลาในการชาร์จเฉลี่ย 234 นาที (3 ชั่วโมง 54 นาที) นั้น อภิปรายได้ว่าเป็นผลมาจากคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดแห้งตะกั่ว-กรด (Deep Cycle Lead-Acid) ที่ทนทานต่อการคายประจุลึก แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถรองรับกระแสชาร์จในปริมาณสูงมากในระยะเวลาอันสั้นได้ (ต้องชาร์จแบบสม่ำเสมอเพื่อป้องกันความร้อนสะสมและแรงดันบวม) ซึ่งเวลาเกือบ 4 ชั่วโมงนี้ถือเป็นค่ามาตรฐานปกติของระบบการชาร์จแบบปกติ (Normal Charge) สำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้ สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ของ *ธีรวัฒน์ (2567)* ที่ระบุไว้ว่าการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดระบบ 72V ให้เต็มกระแสอย่างปลอดภัยและถนอมอายุการใช้งานเซลล์ จะต้องใช้เวลาอยู่ในช่วง 3-5 ชั่วโมง

12. ข้อเสนอแนะ

12.1 ควรศึกษาและทดลองเปลี่ยนไปใช้แบตเตอรี่ประเภทลิเธียมไอออน (Lithium-ion) แทนแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เพื่อลดน้ำหนักรวมของตัวรถ (Gross Vehicle Weight) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานและขยายระยะทางการขับขี่ต่อการชาร์จได้ไกลยิ่งขึ้น

12.2 ควรมีการวิจัยพัฒนาและทดสอบระบบการชาร์จไฟแบบเร็ว (Fast Charger) เพื่อลดเวลาในการประจุไฟฟ้าจากเดิมเฉลี่ย 3 ชั่วโมง 54 นาที ให้สั้นลง เพิ่มความสะดวกในการใช้งานเชิงพาณิชย์

12.3 ในงานวิจัยครั้งต่อไปควรเพิ่มขอบเขตการทดสอบภายใต้สภาวะโหลดน้ำหนักบรรทุกโดยมีผู้โดยสารนั่งด้านหลัง (เช่น บรรทุกน้ำหนัก 120 กิโลกรัม) และทดสอบบนเส้นทางที่มีความลาดชันเพื่อให้ได้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะครอบคลุมการใช้งานในทุกภูมิประเทศ

13. เอกสารอ้างอิง

[1] เสกสรร นรภูมิ, อภิชาต อนุกูลประเสริฐ, และ ธนพงษ์ พลหาญ. (2565). “การออกแบบสร้างและทดสอบสมรรถนะรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงขนาด 3,000 วัตต์ สำหรับใช้งานในชุมชน.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย.

[2] Larsson, M., and Andersson, P. (2023). "Performance Analysis of Brushless DC Hub Motors in Electric Two-Wheeler Conversions." *International Journal of Automotive Technology* 24, 3: 412-425.

[3] กิตติพงษ์ มีพลาย, และ ประจักษ์ ประเสริฐชาติ. (2566). “ผลของน้ำหนักบรรทุกและประเภทแบตเตอรี่ต่อระยะทางการวิ่งของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง.” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 19, 2: 145-158.

[4] ธีรวัฒน์ ศิริบูรณ์. (2567). *การวิเคราะห์โครงสร้างแชสซีรถจักรยานยนต์แบบ Underbone สำหรับติดตั้งชุด EV Kit.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[5] Zhang, Y., and Wang, L. (2024). "Battery Management System and State of Charge Estimation for Lead-Acid Battery Packs in Light Electric Vehicles." *Journal of Energy Storage and Conversion* 38, 1: 77-89.

การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขจัดคราบคาร์บอนบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์การออกแบบการทดลอง

Optimization of Carbon Deposit Removal on Engine Components base on Design of Experiment (DOE) Method

อัมรินทร์ วงศ์เศรษฐี[1], อนันต์ชัย คติธรรม์กุล[2*], ทัศนีย์ ศรีสุวัจรีย์[2],
รศ.ดร.สมเกียรติ บุญณสะ[3], รศ.กิตติ เกื้อสกุล[3] และ รศ.ดร. ปรีดา จันทวงษ์[3]

[1] สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 1771/1 ซ.พัฒนาการ 37 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250
[2] สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
[3] วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*ผู้ติดต่อ: advisor2600@gmail.com, 0909744114

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบคาร์บอนบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยใช้สารละลายด่างที่มีค่า pH 11 ± 0.5 ในรูปของเปอร์เซ็นต์มวลคราบคาร์บอนที่ถูกขจัด (% Removal) ในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลการขจัดคราบคาร์บอนด้วยวิธี Full Factorial Design ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลจากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาดคือ อุณหภูมิ 70 °C และระยะเวลาในการแช่ 40 นาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพการขจัดคราบสูงสุดที่ร้อยละ 57.26 ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในภาคอุตสาหกรรมเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการล้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์สันดาปภายในและยืดอายุการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คราบคาร์บอน การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ประสิทธิภาพการขจัดคราบ

Abstract

This research aims to study the factors affecting the efficiency of carbon deposit removal on internal combustion engine parts using an alkaline solution with a pH of 11 ± 0.5, expressed as the percentage of carbon deposits removed (%Removal). In designing experiments and analyzing the factors influencing carbon removal using the Full Factorial Design method, the experimental results showed that temperature and soaking time were the main factors significantly influencing the removal efficiency at a statistical significance level of 95%. The experiment showed that the optimal cleaning conditions were a temperature of 70 °C and a soaking time of 40 minutes, which achieved the highest stain removal efficiency of 57.26%. This research can be applied as a guideline in the industrial sector to determine

optimal conditions for cleaning internal combustion engine components and effectively extend their lifespan.

Keywords: Carbon deposits, Factorial design, Removal efficiency

1. บทนำ

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบขับเคลื่อนยานยนต์และเครื่องจักรอุตสาหกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพและความเสถียรภาพในภาคการขนส่งและอุตสาหกรรม [1] อย่างไรก็ตาม การใช้งานระยะยาวก่อให้เกิดการสะสมคราบคาร์บอนบริเวณหัวลูกสูบ วาล์ว ท่อร่วมไอดี และห้องเผาไหม้ ส่งผลให้สมรรถนะเครื่องยนต์ลดลง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานชิ้นส่วนลดลง [2]

อุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีการใช้วิธีการทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องจักร ซึ่งจำแนกออกได้เป็นหลายแนวทาง ได้แก่การทำความสะอาดเชิงกล การทำความสะอาดด้วยสารเคมี และกระบวนการขั้นสูง เช่น การขัดผิว การสั่นสะเทือน อัลตราโซนิก และการพ่นละออง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิว [3] จากการศึกษากระบวนการขัดผิวแบบหมุน (rotary abrasive cleaning) พบว่าชนิดของวัสดุขัดมีอิทธิพลโดยตรงต่อการขจัดคราบและสภาพพื้นผิวหลังการทำความสะอาด [4] ขณะเดียวกันแนวทางการทำความสะอาดด้วยสารเคมี นิยมใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างและกรดเพื่อฟื้นฟูอัตราการไหลและขจัดตะกรันตกค้าง [5-7] อย่างไรก้ตามการใช้สารเคมีเหล่านี้ก่อให้เกิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและการบำบัดก่อนปล่อยคืนสู่แหล่งน้ำ [8-9] เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีการพัฒนาเทคนิคการทำความสะอาดขั้นสูง เช่นการทำความสะอาดด้วยการไหลแบบพัลส์ร่วมกับการสั่นสะเทือน การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเสริมการทำความสะอาดเมมเบรน และการศึกษาพลศาสตร์ของการทำความสะอาดด้วยการพ่นละอองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหลุดลอกของสิ่งปนเปื้อนโดยไม่พึ่งมาสารเคมีที่รุนแรง [10-12]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยหลักคืออุณหภูมิของสารละลายและระยะเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ด้วยวิธีการแช่ในสารละลายด่างต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เพื่อหาสภาวะที่ให้ผลการขจัดคราบออกไปได้มากที่สุดภายใต้ค่าความเป็นด่าง (pH) ที่ 11 ±0.5 ของสภาวะอุณหภูมิที่ทำการทดลอง เนื่องจากเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพการขจัดคราบไขมันเหนียวและคราบไหม้ติดแน่นสูงที่สุด สอดคล้องกับช่วงบัฟเฟอร์ pH 10–11.2 ของ Bonnechere และ Mertens [13] อีกทั้งยังเป็นระดับที่ปลอดภัย ไม่กัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะผสมที่เป็นสารแอมโฟเทอริก และง่ายต่อการบำบัดน้ำเสียในภาคอุตสาหกรรม

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทีมผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการทำความสะอาดด้วยวิธีการแช่สารละลายด่างพบว่าในปี 2024 Nguiamba, Yanu และ Belibi [5] ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูอัตราการไหลของเมมเบรนโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูอัตราการไหล

คือ ความเข้มข้นของสสารละลาย อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสัมผัส ต่อมาในปี 2012 Bonnechere และ Mertens [13] ได้มีการอธิบายสารทำความสะอาดชนิดด่างที่มีประสิทธิภาพในการขจัดคราบไหม้ติดแน่นหรือคราบที่ถูกอบติด รวมถึงคราบไขมัน โดยสารทำความสะอาดดังกล่าวประกอบด้วยระบบบัฟเฟอร์ซึ่งประกอบด้วยเบสแก่ร่วมกับกรดอินทรีย์ เพื่อควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงประมาณ 10 ถึง 11.2 นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอวิธีการสำหรับการกำจัดคราบไหม้ติดแน่นหรือคราบไขมันดังกล่าวอีกด้วย ต่อมาในปี 2015 Olufemi & Akajagbor [14] ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตต่อประสิทธิภาพของสารขจัดคราบไขมันที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ โดยสารที่ใช้ในการเตรียมประกอบด้วยOctadecylbenzenesulphonic acid, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมเมตาซิลิเกต, Carboxyl Methyl Cellulose (CMC), ฟอร์มัลดีไฮด์ สารแต่งกลิ่น สี และน้ำกลั่นได้มีการเตรียมตัวอย่างสารขจัดคราบโดยปรับสัดส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกัน และทำการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญทางสถิติของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) รวมถึงประเมินประสิทธิภาพการทำความสะอาดโดยใช้การทดสอบระดับสีเทา (Gray Scale Test) และการทดสอบกับพื้นผิวที่มีคราบน้ำมันดิบสะสมผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการขจัดคราบจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสารขจัดคราบที่มีประสิทธิภาพและควบคุมคุณสมบัติได้ในต้นทุนที่เหมาะสม และในปี 2020 Ben, Mohamed, &Muduli [15] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ระยะเวลาในการแช่ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในกระบวนการล้างขวดแก้วหมุนเวียนสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องล้างขวด พบว่า แม้จะควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่กำหนด แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยสะท้อนผ่านอัตราการคัดทิ้งของขวดที่ลดลงผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลาในการแช่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาด นอกจากนี้ในปี 2004 Chateau, Galet, Soudais, & Fages [16] มีการพัฒนาวิธีทดสอบใหม่เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการทำความสะอาดพื้นผิวแข็งโดยไม่ใช้แรงเช็ดถู (no-wiping cleaning) โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบความสามารถของสารทำความสะอาดในการขจัดคราบไขมัน ภายใต้เงื่อนไขที่ลดอิทธิพลของแรงทางกลให้น้อยที่สุด เพื่อให้สามารถศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารละลายทำความสะอาดกับคราบสกปรกได้อย่างชัดเจนในการทดลองได้เลือกใช้วิธีการทำความสะอาดแบบแช่ (immersion cleaning) โดยใช้แผ่นสแตนเลสเคลือบเป็นพื้นผิวตัวอย่าง และใช้น้ำมันผสมสีเป็นตัวแทนคราบไขมัน มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ภายในช่วงที่กำหนดโดยใช้การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) และการเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบผลการทดลองแสดง

ให้เห็นว่าวิธีทดสอบดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือสูงในการประเมินประสิทธิภาพการขจัดคราบไขมัน และเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสูตรสารทำความสะอาด โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่แตกตัว (nonionic surfactants) นอกจากนี้ ยังสามารถบันทึกลักษณะพื้นผิวหลังการทำความสะอาดได้ด้วยการถ่ายโอนร่องรอยลงบนกระดาษจากผลการศึกษา พบว่าอุณหภูมิและการกวนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อประสิทธิภาพมากกว่าค่า pH อีกทั้งยังพบว่าโซเดียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการรักษาสมดุล (buffering effect) สูงกว่าโซเดียมเมตาซิลิเกตเพนตะไฮเดรต วิธีการทดสอบนี้มีความง่ายในการใช้งาน มีความไวสูง และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อคัดเลือกสูตรสารทำความสะอาดที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสรุปได้ว่าการออกแบบการทดลองนั้นสามารถวิเคราะห์ และกำหนดปัจจัยการทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ในแต่ละงานวิจัยนั้นมีความแตกต่างกันไปในแต่ละอุตสาหกรรม ทีมผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดจากงานวิจัยข้างต้นที่ได้ทำการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ด้วยวิธีการแช่ในสารละลายด่างที่ควบคุมอุณหภูมิ และเลือกที่จะนำวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) มาประยุกต์ใช้ กับงานวิจัยนี้ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่ให้เปอร์เซ็นต์ขจัดสูงที่สุดในค่า pH ที่ 11±0.5 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิของสารละลาย และระยะเวลาในการแช่ ต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบสกปรกในรูปแบบเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกขจัด

3. การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลอง ทีมผู้วิจัยได้ได้นำท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะที่มีคราบคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้เป็นวัตถุชิ้นงานทดลองและใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยทีมผู้วิจัยได้แบ่งตัวแปรออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ตัวแปรต้น

ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ทีมผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ เพื่อที่จะกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบ ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่ได้จำแนกปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการขจัด ซึ่งในการกำหนดปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นทีมผู้วิจัยได้นำแนวคิดของงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบันของแต่ละอุตสาหกรรมที่ใช้สารละลายด่างในการทำความสะอาดและการทำความสะอาดด้วยการแช่มาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ด้วยวิธีการแช่สารละลายด่างที่ควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับปัจจัย (Lavel)
อุณหภูมิของสารละลาย	60 °C
	70 °C
	80 °C
ระยะเวลาในการแช่	20 นาที
	30 นาที
	40 นาที

3.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในงานวิจัยนี้คือเปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกขจัด (Y) ของแต่ละการทดลอง ทีมผู้วิจัยจะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม ของทั้ง 2 ปัจจัย พร้อมกันและทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 27 การทดลองซึ่งชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบการขจัดคราบด้วยวิธีการแช่สารละลายด่าง จึงได้นำท่อร่วมไอเสียมาตัดตามความเหมาะสม

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1) การตัดชิ้นงาน ตัดท่อไอเสียที่มีคราบคาร์บอนสะสมหนาแน่นสม่ำเสมอเป็นชิ้นงานทดสอบจำนวน 27 ชิ้น ให้มีขนาดและมวลใกล้เคียงกัน

2) การไล่ความชื้น นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อขจัดความชื้น จากนั้นพักให้เย็นในโหลดูดความชื้น

3) การชั่งมวลเริ่มต้น (M_1) ชั่งน้ำหนักชิ้นงานแต่ละชิ้นด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 4 ตำแหน่ง เพื่อบันทึกมวลก่อนทดสอบ

4) การคำนวณสัดส่วนการขจัดคราบ นำชิ้นงานหลังแช่สารละลายด่างตามสภาวะที่กำหนด ไปอบแห้งและชั่งมวลหลังทดสอบ (M_2) เพื่อคำนวณตามสมการ:

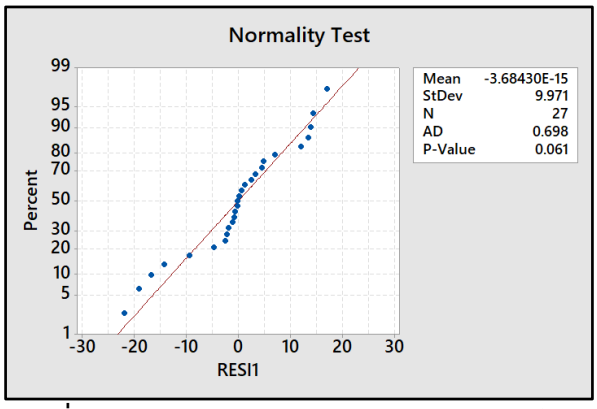
$$\%\text{Removal} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

4. ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

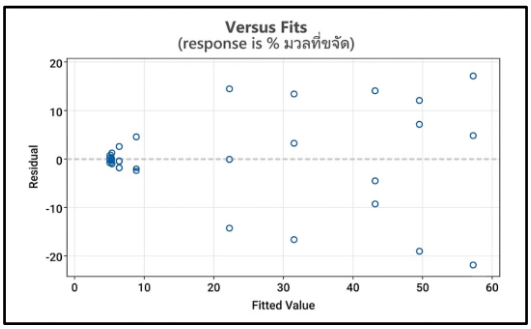
4.1 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลควรจะตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือจะต้องเป็นไปตามหลักการต่อไปนี้ 1) ค่าส่วนตกค้าง (Residual) 2) ค่าส่วนตกค้างต้องเป็นอิสระต่อกัน 3) ความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างต้องมีค่าคงที่ [18] จากการตรวจสอบข้อมูลจากการทดลอง



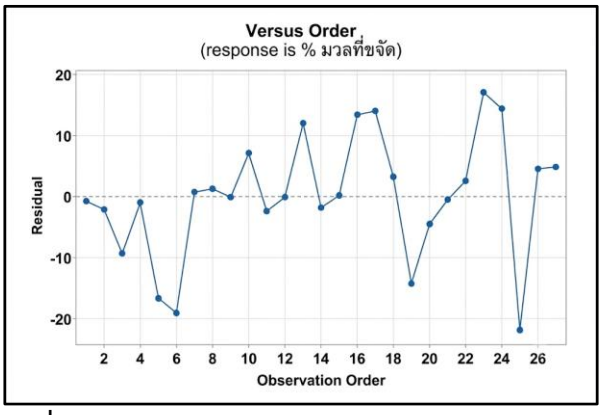
รูปที่ 1 การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal Distributed) ของค่าส่วนตกค้าง จากรูปที่ 1 พบว่าค่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์มีการกระจายตามแนวเส้นตรงจึงสามารถอนุมานได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 2 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง Fitted Value

2) การตรวจสอบความสเถียรของความแปรปรวน (σ^2) จากรูปที่ 2 พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (Fitted Value) มีความเสถียรและมีแนวโน้มที่จะมีการกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบที่มีลักษณะผิดปกติ จึงสามารถอนุมานได้ว่าค่าความแปรปรวนของการทดลองมีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจและไม่พบว่าการทดลองมีสิ่งผิดปกติ



รูปที่ 3 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง

3) จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง จากรูปที่ 3 พบว่าการกระจายตัวค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับลำดับการทดลองไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม จึงสามารถอนุมานได้ว่าการทดลองเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 1 ถึง 3 ทีมผู้วิจัยพบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นตามหลักการที่กล่าวมาข้างต้นทุกประการ ข้อมูลเหล่านี้จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง

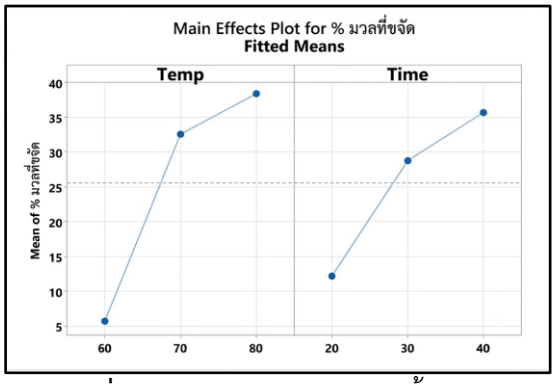
งานวิจัยนี้ใช้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ ด้วยโปรแกรม Minitab 22.4.0 ผลการวิเคราะห์ที่ทีมผู้วิจัยได้แสดงในรูปที่ 4 พบว่าทุกปัจจัยล้วนส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การขจัดคราบเมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมของทั้ง 2 ปัจจัยพบว่าทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การขจัดคราบอย่างมีนัยสำคัญ

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	25.51	2.31	11.06	0.000	
Temp					
60	-19.86	3.26	-6.09	0.000	1.33
70	7.03	3.26	2.15	0.045	1.33
Time					
20	-13.35	3.26	-4.09	0.001	1.33
30	3.22	3.26	0.99	0.337	1.33
Temp*Time					
60 20	13.10	4.61	2.84	0.011	1.78
60 30	-3.79	4.61	-0.82	0.422	1.78
70 20	-10.34	4.61	-2.24	0.038	1.78
70 30	-4.25	4.61	-0.92	0.369	1.78

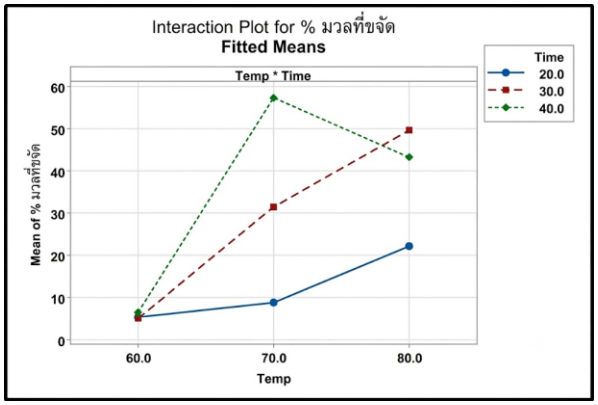
รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง

S =11.9835 R-sq =79.83% R-sq(adj) =70.86% R-sq (Pred) = 54.61%



รูปที่ 5 กราฟแสดงอิทธิพลของทั้ง 2 ปัจจัย

จากรูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของปัจจัยทั้ง 2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการขจัดคราบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิประมาณ 80°C ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้สมบัติของสารละลายเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง รูปที่ 5 (ซ้าย) อิทธิพลด้านเวลาแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการขจัดคราบจะเพิ่มขึ้น โดยช่วงเวลาประมาณ 40 นาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ขจัดคราบสูงที่สุด



รูปที่ 6 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้ง 2

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยอุณหภูมิและระยะเวลามีปฏิสัมพันธ์กัน โดยเส้นกราฟที่ไม่ขนานกันบ่งชี้ถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบ ผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลามีอิทธิพลร่วมกันอย่างชัดเจน โดยการเพิ่มขึ้นพร้อมกันของทั้งสองปัจจัยส่งผลให้เปอร์เซ็นต์มวลที่ถูกขจัดเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยสรุป อุณหภูมิและระยะเวลาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบ และมีอิทธิพลร่วมกัน เมื่อพิจารณาจากกรูปที่ 6 พบว่าผลกระทบจากอิทธิพลร่วมดังกล่าวไม่ได้ส่งผลให้การสรุปผลแตกต่างจากรูปที่ 5 แต่อย่างใด

จากรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์มวลคาร์บอนที่ถูกขจัด (Y) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \beta_i T_i + \gamma_j t_j + \delta_{ij}(T_i \times t_j)$$

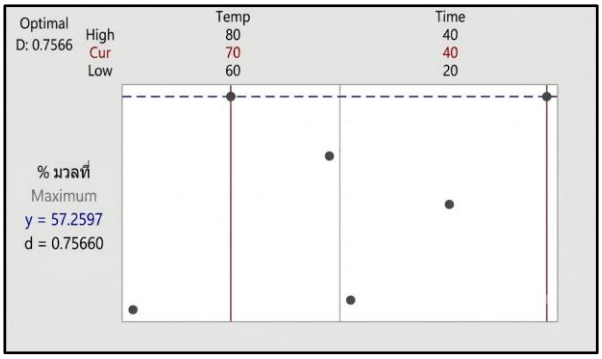
โดยกำหนดให้ T_i แทนระดับอุณหภูมิ และ t_j แทนระยะเวลาในการแช่ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพยากรณ์การขจัดคราบคาร์บอน

ปัจจัยทดสอบ	ระดับปัจจัย	ค่าสัมประสิทธิ์
ค่าคงที่ (β_0)	-	+25.51
อุณหภูมิ (T_i)	60 °C	-19.86
	70 °C	+7.03
	80 °C	+12.83
เวลา (t_j)	20 นาที	-13.35
	30 นาที	+3.22
	40 นาที	+10.13
ปฏิสัมพันธ์ร่วม (T_i x t_j)	60 °C x 20 นาที	+13.10
	60 °C x 30 นาที	-3.79
	60 °C x 40 นาที	-9.32
	70 °C x 20 นาที	-10.34
	70 °C x 30 นาที	-4.25
	70 °C x 40 นาที	+14.60
	80 °C x 20 นาที	-2.76
	80 °C x 30 นาที	+8.04
	80 °C x 40 นาที	-5.28

5. การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์หาสภาวะอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม สำหรับการขจัดคราบด้วยวิธีการแช่ในสารละลายด่างให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ทีมผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab 22.4.0 เมื่อกำหนดค่าเป้าหมายของเปอร์เซ็นต์การขจัดที่สูงสุดจะได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่แสดงในรูปที่ 7 พบว่าการใช้อุณหภูมิที่ 70°C เวลา 40 นาทีในการขจัดคราบคาร์บอนโดยให้เปอร์เซ็นต์ขจัดคราบสูงสุดที่ 57.26%



รูปที่ 7 สภาวะอุณหภูมิกับระยะเวลาในการแช่ที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับสารละลายด่างที่ค่า pH 11±0.5

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำความสะอาดคราบบนชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรด้วยสารละลาย NaOH โดยแบ่งเป็น 2 ปัจจัยหลักได้แก่อุณหภูมิของสารละลายและระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ โดยใช้การออกแบบ ฟูลแฟกทลอเรียล (Full factorial Design) โดยผลการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักคืออุณหภูมิกับเวลา ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพการขจัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่าสภาวะอุณหภูมิที่ 70 °C และ ระยะเวลาในการแช่ 40 นาที จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการขจัดเหมาะสมที่สุด งานวิจัยฉบับนี้เป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยหลักคืออุณหภูมิกับระยะเวลาในการแช่ต่อประสิทธิภาพการขจัดคราบบนชิ้นส่วนยานยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ในการใช้ร่วมกับสารละลายด่างที่ค่า pH 11 ±0.5

7. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและกรรมการจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือทุกๆท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและขอขอบพระคุณอาจารย์จากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการเคมีเตรียมสารเคมี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Bhaskara. (2023). Advanced combustion strategies for improving ic engine efficiency and emissions. World Journal of Advanced Research and Reviews, 17(2), 905–916.

[2] Shu, G., Dong, L., & Liang, X. (2012). A review of experimental studies on deposits in the combustion chambers of internal combustion engines. International Journal of Engine Research, 13(4), 315–332.

[3] LEADRP Engineering Department. (2022, September 29). A basic guide to manufactured parts cleaning: Importance and methods. LEADRP. https://leadrp.net/blog/a-

basic-guide-to-manufactured-parts-cleaning-importance-and-methods/

[4] Korga, S., Zyła, K., & Józwik, J. (2020). Analysis of the abrasive-type influence on the effectiveness of rotary cleaning of machine parts with complex geometric features. Materials, 13(22), Article 5182.

[5] Nguiamba, N., Yanu, C. A., & Belibi Belibi, P. D. (2024). Application of Box-Behnken experimental design in the optimization of cleaning microfiltration ceramic filters using sodium hydroxide. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 12(12), 80–87.

[6] Tyborski, T. (2015). Alkaline cleaner for cleaning aluminum surfaces (U.S. Patent No. 9,222,176 B2). U.S. Patent and Trademark Office.

[7] Du, Y. (2014). Sulfamic acid composite cleaning agent for condensers of thermal power plants (Chinese Patent No. CN103509653A). China National Intellectual Property Administration.

[8] โรงพยาบาลจุฬารัตน์ 3 อินเตอร์. (2565). โรคผิวหนังอักเสบจากสารก่อการระคาย. https://www.chularat3inter.com/th/contents/occupational-irritant-contact-dermatitis

[9] https://www.nchasia.com/basic-knowledge-of-metal-cleaning-acid-cleaners-vs-alkaline-cleaners / (Accessed on 19 April 2026).

[10] Hordieiev, A., Kalda, G., Prus, A., Tkachuk, V., Hordieiev, O., & Kupiec, B. (2023). Analytical determination of the productivity of a vibrating machine for cleaning parts contamination with a submersed pulsating two-phase flow of liquid. Advances in Science and Technology Research Journal, 17(6), 108–115.

[11] Alventosa-deLara, E., Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M. I., & Iborra-Clar, M. I. (2014). Study and optimization of the ultrasound-enhanced cleaning of an ultrafiltration ceramic membrane through a combined experimental–statistical approach. Ultrasonics Sonochemistry, 21(3), 1222–1234.

[12] Lallart, A., Cartellier, A. H., Garnier, P., Charlaix, E., & Lorenceau, E. (2024). The fluid mechanics of spray cleaning: When the stress amplification at the contact lines of impacting droplets nano-scraps particles. Journal of Fluid Mechanics, 1000, A31. https://doi.org/10.1017/jfm.2024.988

[13] Bonnechere, G., & Mertens, B. (2012). Alkaline cleaning compositions (U.S. Patent No. 8,282,743 B2). U.S. Patent and Trademark Office.https://patents.google.com/patent/US8282743B2/en

[14] Olufemi, B. A., & Akajagbor, E. (2015). Parametric effect of sodium hydroxide and sodium carbonate on the potency of a

degreaser. Journal of Science and Technology, 7(1), 21–30.

[15] Ben, J., Mohamed, A., & Muduli, K. (2020). Optimizing bottle washer performance in cleaning returnable glass bottles for reuse in beverage packaging. International Journal of Advanced Science and Technology, 29(7), 8149–8159.

[16] Chateau, M.-E.,Galet, L., Soudais, Y., & Fages, J. (2004). A new test for cleaning efficiency assessment of cleaners for hard surfaces. Journal of Surfactants and Detergents, 7(4), 355–362. https://doi.org/10.1007/s11743-004-0318-6

[17] D. C. Montgomery (2009). Design and Analysis of Experiments, 5th edition. John Wiley & Sons, Inc. USA.

การปรับอุณหภูมิห้องอัตโนมัติ เพื่อการประหยัดพลังงาน

Automatic Room Temperature Control for Energy Conservation

ทัศนีย์ ศรีสุวัจรีย์[1], อนันต์ชัย คติธรรม์กุล[1,*], อัมรินทร์ วงศ์เศรษฐี[1],
รศ.ดร.สมเกียรติ บุญณสะ[2], รศ.กิตติ เกื้อสกุล[2] และ รศ.ดร. ปรีดา จันทวงษ์[2]

[1] สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
[2] วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*ผู้ติดต่อ: advisor2600@gmail.com, 0909744114

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (split type) เป็นหนึ่งในระบบที่นิยมติดตั้งภายในที่อยู่อาศัย ซึ่งอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อ ความเย็น โดยทั่วไป งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดใช้พลังงานของระบบปรับอากาศโดยยังคงรักษาความสบายของผู้ใช้งาน โดยใช้ โดยใช้ข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point) ร่วมกับ แผนภูมิไซโครเมตริกชาร์ท (Psychrometric Chart) ซึ่งงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้ คำนวณอุณหภูมิจุดน้ำค้างภายในห้องพักที่อยู่อาศัย การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา วิเคราะห์สภาวะของอุณหภูมิ ด้วยแผนภูมิไซโครเมตริกชาร์ท (Psychrometric Chart) จำลองการเปรียบเทียบอุณหภูมิคงที่ กับ แบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ ปรับตามพยากรณ์ เพื่อกำหนดแทนการใช้อุณหภูมิคงที่ จากทดลองพบว่าสามารถช่วยให้ประหยัดค่าไฟลดลงร้อยละ 8.2 และค่าพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนลดลงร้อยละ 13.52 เมื่อเทียบกับระบบอุณหภูมิคงที่ งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นและอุณหภูมิจุดน้ำค้าง เพื่อประหยัดค่าไฟของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (split type) ในที่อยู่อาศัย

คำสำคัญ: เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน, อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, แผนผังก้างปลา

Abstract

Currently, Split-type air conditioners are widely used in residential buildings, where temperature and humidity greatly affect cooling performance. This research aims to reduce the energy consumption of such systems while maintaining user comfort, using temperature, relative humidity, and dew point data together with a Psychrometric Chart. The methodology involves forecasting the indoor dew point temperature through time-series analysis, analyzing thermal conditions on the chart, and simulating a comparison between fixed-temperature control and automatic temperature adjustment based on the forecast. Experimental results show that the proposed approach reduces electricity costs by 8.2% and lowers the energy consumption of split-type air conditioners by 13.51% compared to fixed speed

temperature . This research offers an approach for controlling temperature, humidity, and dew point to save electricity costs of residential split-type air conditioning systems.

Keywords: Split type, Dew point, Fishbone Diagram

1. บทนำ

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) เป็นเครื่องปรับอากาศที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยคุณสมบัติที่ติดตั้งง่าย ใช้พื้นที่น้อย จึงถูกนำไปใช้งานในที่พักอาศัยอย่างไรก็ตาม เครื่องปรับอากาศเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานในสัดส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆโดยในประเทศไทยมีผู้ใช้งานเครื่องปรับอากาศเป็นเวลานานในแต่ละวัน ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศมีสูงจากผู้ใช้งาน จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการปรับปรุงระบบปรับอากาศส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ เช่น ระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ และการควบคุมการทำงานของ Compressor ให้เหมาะสมกับภาระความเย็น อย่างไรก็ตาม การควบคุมอุณหภูมิของระบบปรับอากาศโดยทั่วไปยังคงอาศัยข้อมูลสภาวะอากาศในปัจจุบันเป็นหลัก โดยยังมีการศึกษาที่จำกัดเกี่ยวกับการนำข้อมูลอุณหภูมิที่พยากรณ์ล่วงหน้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์คุณสมบัติของอากาศ เช่น อุณหภูมิจุดน้ำค้าง อัตราส่วนความชื้น) เพื่อใช้ในการตัดสินใจปรับอุณหภูมิการทำงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ การศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างระบบปรับอากาศแบบควบคุมอุณหภูมิคงที่ และระบบปรับอุณหภูมิอัตโนมัติแบบแปรผัน จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงค้นหาวิธีการตัดสินใจเลือกใช้ระบบปรับอากาศที่เหมาะสมทั้งในด้านการประหยัดพลังงาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดร.คาโอรุ อิชิกาว่า ได้พัฒนาเครื่องมือทางวิศวกรรมและการจัดการคุณภาพที่เรียกว่า "แผนผังอิชิกาว่า" หรือ "แผนผังก้างปลา" ขึ้นมา เพื่อเป็นแนวทางในการระดมความคิด วิเคราะห์โครงสร้างปลาและค้นหาทางแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ โดยผังนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวปัญหาและปัจจัยที่เป็นต้นเหตุ โมเดลนี้เลียนแบบลักษณะของโครงกระดูกปลา ซึ่งจะวาง ปัญหาหรือผลลัพธ์ไว้ที่ส่วนหัวปลาและแยก สาเหตุย่อย ๆ ออกไปเป็นก้างปลาแต่ละซี่ ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อให้การจำแนกสาเหตุมีความถี่ถ้วนและเป็นระบบระเบียบ จึงได้มีการนำแนวคิด 4M 1E มาใช้จัดกลุ่มปัจจัยหลัก 5 ด้าน ได้แก่ บุคลากร (Man), เครื่องจักร (Machine), วัตถุดิบ (Material), กระบวนการทำงาน (Method) และสิ่งแวดล้อม (Environment) ซึ่งช่วยให้เราสามารถจำแนกและแยกแยะต้นตอของปัญหาได้อย่างครอบคลุมที่สุด[1]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการตั้งค่าอุณหภูมิ (Setpoint) ในเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) ที่มีต่อการใช้พลังงานโดยใช้สารทำความเย็น R32ซึ่งเป็นที่นิยมในอาคารพักอาศัยทั่วไปผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ตั้งไว้เพียงหนึ่งองศาเซลเซียสจะช่วยลดการใช้พลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปรับจาก 21 ถึง 22 องศาเซลเซียสที่สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 13.5 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้การวิเคราะห์คุณสมบัติของอากาศและการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนผ่าน Psychrometric Chart ยังชี้ให้เห็นว่าหากสภาพแวดล้อมไม่มีการควบคุมความชื้นความต้องการพลังงานโดยรวมของระบบปรับอากาศจะพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้และการตั้งค่าอุณหภูมิให้เหมาะสมกับภาระความร้อนจึงเป็นกุญแจสำคัญอย่างยิ่งในการลดการทำงานหนักของคอมเพรสเซอร์พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระยะยาวได้อย่างเป็นรูปธรรม [2]

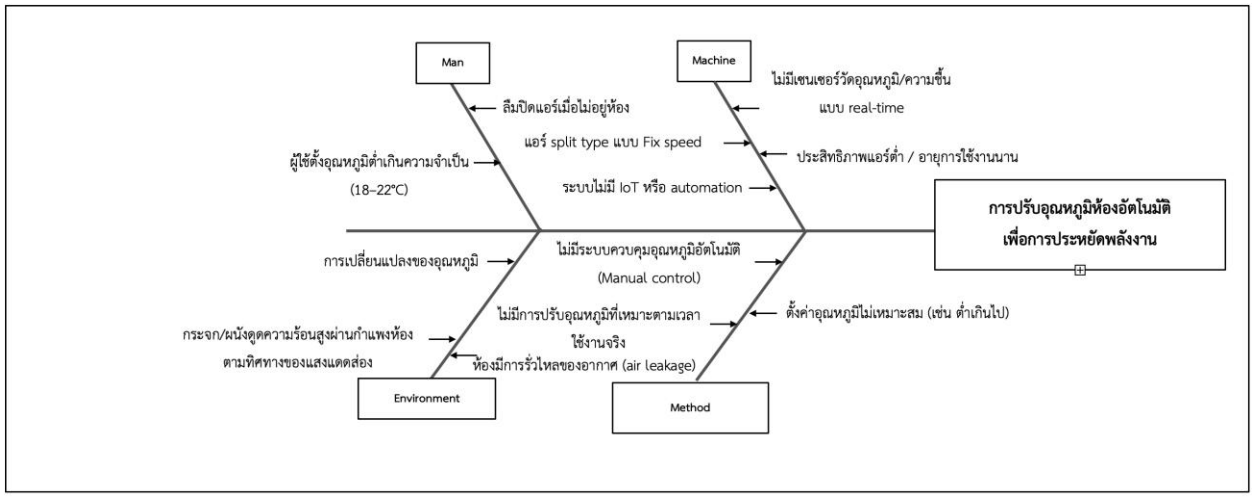
Moreno-Carbonell et al. (2020) เสนอวิธีการพยากรณ์อุณหภูมิอากาศภายนอกโดยใช้ Time Series Decomposition เพื่อแยกข้อมูลออกเป็น Trend, Seasonal และ Residual ก่อนสร้างแบบจำลองพยากรณ์ ผลการศึกษาพบว่าการพิจารณาองค์ประกอบของอนุกรมเวลาช่วยเพิ่มความสามารถในการคาดการณ์อุณหภูมิ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านพลังงานที่มีอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ เช่น การวิเคราะห์ภาระทำความเย็นของระบบปรับอากาศ [3]

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการพยากรณ์อุณหภูมิเพื่อแยกข้อมูลอนุกรมเวลาออกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น Trend, Seasonal และ Residual จากนั้นสร้างแบบจำลองพยากรณ์ในแต่ละองค์ประกอบ เพื่อลดความซับซ้อนของข้อมูลและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิ [4]

งานวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลอุณหภูมิที่ผ่านการพยากรณ์มาประกอบการตัดสินใจปรับอุณหภูมิ เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างระบบควบคุมอุณหภูมิคงที่และระบบปรับอุณหภูมิ พบว่าการปรับค่าอุณหภูมิและสภาวะการทำงานของระบบส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำความเย็นและการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ [5]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ปัญหาการใช้พลังงานแอร์เกินความจำเป็น เกิดจากหลายปัจจัย คือ ปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้ และปัจจัยด้านระบบ/อุปกรณ์ของเครื่องปรับอากาศ จึงเริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหา จึงระดมความคิดจากผู้เกี่ยวข้อง ด้วยแผนผังก้างปลา ดังรูปที่ 1 และจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุได้ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 แผนผังก้างปลาของการปรับอุณหภูมิห้องอัตโนมัติเพื่อการประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 1 ระดับคะแนนและเกณฑ์เพื่อการให้คะแนน

คะแนน	พฤติกรรมของมนุษย์	ผลกระทบต่อการประหยัดพลังงาน	ความยากง่ายในการแก้ไข
1	เกิดขึ้น 1 ครั้งต่อเดือน หรืออาจไม่เกิดขึ้น	กระทบการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (≤10%)	สามารถแก้ไขด้วยตนเองได้
2	เกิดขึ้น 2–15 ครั้งต่อเดือน	กระทบการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นปานกลาง (10–25%)	ต้องเรียกผู้เชี่ยวชาญมาดำเนินการแก้ไข
3	เกิดขึ้น ≥ 16 ครั้งต่อเดือน	กระทบการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมาก (≥25%)	ต้องทำการซ่อมแซมหรือ

การให้คะแนนได้กำหนดระดับคะแนนไว้ทั้งหมด 3 ระดับ เพื่อให้ผู้ประเมินมีความเข้าใจไปในทิศทางเดียวกัน และสามารถประเมินผลได้อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกันตลอดทั้งชุดข้อมูล โดยระดับคะแนนดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการพิจารณาความเหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมิน ทั้งนี้ การกำหนดเกณฑ์คะแนนและค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัจจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสะท้อนระดับความสำคัญและผลกระทบของปัจจัยที่แตกต่างกัน ทำให้ผลการประเมินมีความชัดเจน ลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้ดุลยพินิจของผู้ประเมิน และสามารถนำผลคะแนนที่ได้ไปใช้ในการเปรียบเทียบและจัดลำดับความเหมาะสมของทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรายละเอียดของเกณฑ์การประเมินค่าถ่วงน้ำหนัก และระดับคะแนนของแต่ละเกณฑ์แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ประเมินและค่าถ่วงน้ำหนัก

เกณฑ์การประเมิน	ความหมาย	ค่าถ่วงน้ำหนัก
พฤติกรรมของมนุษย์	ความถี่ของพฤติกรรมที่ก่อให้เกิดปัญหา	0.6
ผลกระทบต่อการประหยัดพลังงาน	% การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น หรือ กิโลวัตต์-ชั่วโมงที่สูญเสีย	0.3
ความยากง่ายในการแก้ไข	ระดับความยากง่ายในการดำเนินการแก้ไขปัญหา พิจารณาจากที่ต้องลงมือแก้ไข	0.1

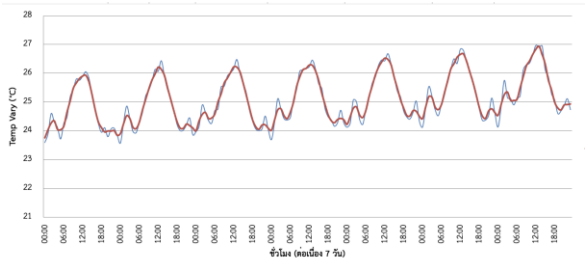
จากตารางที่ 3 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา การปรับอุณหภูมิห้องอัตโนมัติเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยรวบรวมสาเหตุที่เป็นไปได้ 12 สาเหตุ แล้วให้คะแนนตาม 3 เกณฑ์ถ่วงน้ำหนัก ได้แก่ พฤติกรรมของมนุษย์ ผลกระทบต่อการประหยัดพลังงาน และความยากง่ายในการแก้ไข เพื่อจัดลำดับความสำคัญในการแก้ไขปัญหาผลการวิเคราะห์พบว่า แอร์ split type แบบ Fix speed มีคะแนนสูงสุด (14.3) รองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและผู้ใช้ตั้งอุณหภูมิต่ำเกินความจำเป็น ซึ่งควรได้รับการแก้ไขเป็นลำดับแรกเพราะให้ผลกระทบต่อการประหยัดพลังงาน ส่วนสาเหตุที่มีคะแนนต่ำสุด เช่น

การไม่มีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ real-time และระบบไม่มี IoT/automation จากการระดมสมองของผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้เฉพาะด้านเกี่ยวกับระบบปรับอากาศ โดยตรง ในการเลือกสาเหตุของปัญหาที่มีคะแนนมากที่สุดเพื่อนำมาแก้ไขในการประยุกต์ใช้จำลองการพยากรณ์เพื่อจำลองเปรียบเทียบจำลองการเปรียบเทียบระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิคงที่และระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ

ตารางที่ 3 การให้คะแนนรายละเอียดของสาเหตุเพื่อการจัดลำดับความสำคัญ

รายละเอียดของสาเหตุ	พฤติกรรมของมนุษย์ (9)	ผลกระทบต่อการประหยัดพลังงาน (4.5)	ความยากง่ายในการแก้ไข (1.5)	คะแนนรวม (15)	ลำดับการแก้ไขปัญหา
ผู้ใช้ตั้งอุณหภูมิต่ำเกินความจำเป็น (18–22°C)	8.4	4.2	1.3	13.9	3
ลืมปิดแอร์เมื่อไม่อยู่ห้อง	9.0	3.6	1.0	13.6	5
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	8.4	4.2	1.4	14.0	2
กระจก/ผนังดูดความร้อนสูงผ่านกำแพงห้องตามทิศทางของแสงแดดส่อง	7.8	4.2	1.4	13.4	6
ห้องมีการรั่วไหลของอากาศ (air leakage)	7.8	4.2	1.3	13.3	7
ไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Manual control)	7.2	3.9	1.2	12.3	8
ไม่มีการปรับอุณหภูมิที่เหมาะตามเวลา ใช้งานจริง	6.6	3.9	1.2	11.7	10
ตั้งค่าอุณหภูมิไม่เหมาะสม (เช่น ต่ำเกินไป)	7.2	3.6	1.1	11.9	9
ไม่มีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ/ความชื้นแบบ real-time	6.0	3.3	0.9	10.2	12
ประสิทธิภาพแอร์ต่ำ / อายุการใช้งานนาน	8.6	4.2	1.0	13.8	4
ระบบไม่มี IoT หรือ automation	7.2	3.0	1.3	11.5	11
แอร์ split type แบบ Fix speed	8.4	4.5	1.4	14.3	1

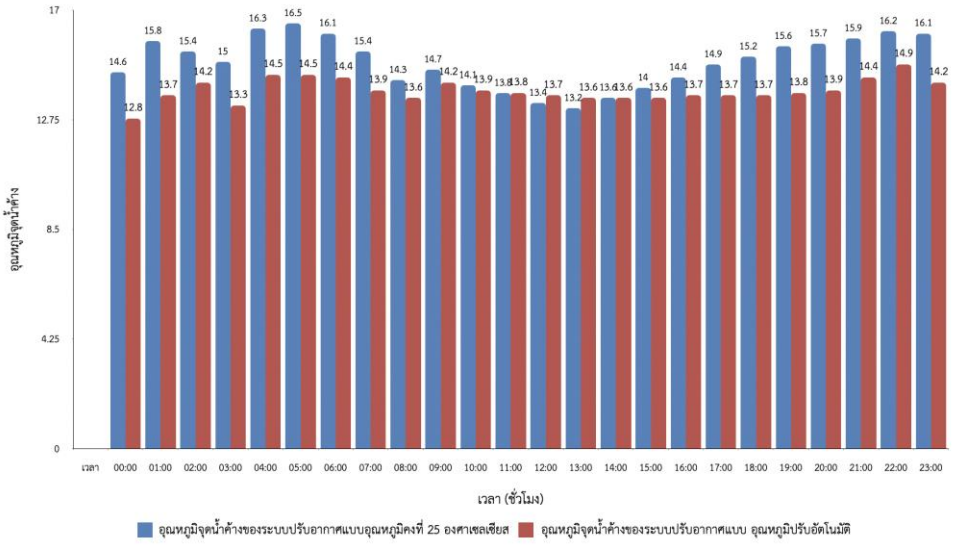
จากรูปที่ 2 กราฟแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิปรับอัตโนมัติมี แนวโน้ม เพิ่มขึ้น และมี รูปแบบฤดูกาล ที่เกิดซ้ำทุก 24 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิ ต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 23.6–24.0°C และ สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 26.8–27.0°C ตลอดช่วงการวัด 7 วัน ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วง 24–27°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงนำมาใช้ในการหาอุณหภูมิน้ำค้าง ของระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ



รูปที่ 2 การพยากรณ์แนวโน้มอุณหภูมิของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3 พบว่าระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติมีอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ต่ำกว่าระบบอุณหภูมิคงที่เกือบตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิจุดน้ำค้างของทั้งสองระบบมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน คือเพิ่มสูงขึ้นในช่วงกลางคืนและลดลงในช่วงกลางวัน ทั้งนี้ระบบอุณหภูมิคงที่มีอุณหภูมิจุดน้ำค้าง สูงสุด 16.5°C ขณะที่ระบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติมีค่าสูงสุด 14.9°C และมีความแตกต่างระหว่างระบบประมาณ 0.4–2.8°C ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิอัตโนมัติสามารถควบคุมสภาวะความชื้นและอุณหภูมิจุดน้ำค้างให้อยู่ในระดับต่ำกว่า ส่งผลให้สามารถลดภาระด้านความชื้นของระบบปรับอากาศและช่วยลดการใช้พลังงานได้ดีกว่าระบบอุณหภูมิคงที่

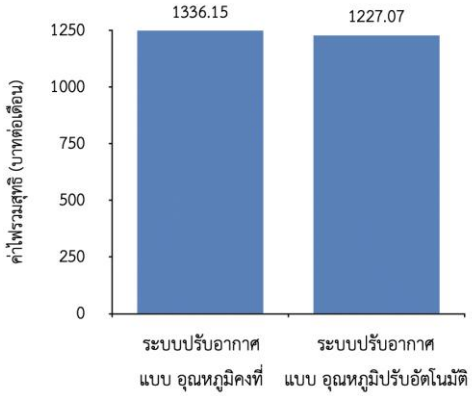


รูปที่ 3 เปรียบเทียบ อุณหภูมิจุดน้ำค้างของระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิคงที่ และ อุณหภูมิจุดน้ำค้างของระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการคำนวณค่าไฟฟ้าระหว่าง ระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิคงที่กับระบบปรับอากาศแบบ อุณหภูมิปรับอัตโนมัติ

รายการ	ระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิคงที่	ระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ
พลังงานแอร์ต่อวัน (kWh)	6.1	5.275
พลังงานแอร์ต่อเดือน (kWh)	183	158.25
อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในบ้าน (kWhต่อเดือน)	120	120
หน่วยไฟรวมต่อเดือน (kWh)	303	278.25
ค่าไฟ บาทต่อเดือน	1107.47	1017.08
ค่า Ft (บาท)	141.27	129.71
รวมก่อน VAT (บาท)	1,248.74	1146.79
VAT 7% (บาท)	87.41	80.28
ค่าไฟสุทธิ (บาทต่อเดือน)	1,336.15	1,227.07

เมื่อนำไปคำนวณค่าไฟฟ้ารวมพบว่าอุณหภูมิปรับอัตโนมัติแบบ มีค่าไฟสุทธิ 1,227.07 บาทต่อเดือน ต่ำกว่าอุณหภูมิคงที่แบบ Fix Speed ที่มีค่าไฟ 1,336.15 บาทต่อเดือน คิดเป็นการประหยัดค่าไฟฟ้า 109.08 บาทต่อเดือนหรือคิดเป็นร้อยละ 8.2 ดังรูปที่ 4 และจากตารางที่ 4 การคำนวณพลังงานไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ สามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศจาก 183 kWh ต่อเดือน เหลือ 158.25 kWh ต่อเดือน เมื่อเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิคงที่แบบ โดยกำหนดให้โหลดอื่นภายในบ้านมีค่าคงที่ 120 kWh ต่อเดือน เพื่อควบคุมตัวแปรในการทดลอง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้ารวมของบ้านลดลงจาก 303 kWh ต่อเดือน เป็น 278.25 kWh ต่อเดือน



รูปที่ 4 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าของอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ

5. สรุปผลงานวิจัย

จากการเก็บข้อมูลพบว่า ระบบปรับอากาศแบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติช่วยลดภาระการทำความเย็นเมื่อเทียบกับระบบอุณหภูมิคงที่ โดยพิจารณาจากค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราส่วนความชื้น จากตารางที่ 5 พบว่าค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของระบบอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 15.01 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 13.90 องศาเซลเซียสในระบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจากร้อยละ 53.97 เหลือร้อยละ 48.70 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงสภาวะสบายตัว และค่าอัตราส่วนความชื้นลดลงจาก 0.01067 เหลือ 0.00991 ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นตัวแปรที่บ่งบอกปริมาณไอน้ำ (Moisture Content) ใน

อากาศเท่านั้น ยังไม่สามารถระบุปริมาณการใช้พลังงานได้โดยตรง แต่การที่ระบบอุณหภูมิปรับอัตโนมัติมีค่าต่ำกว่าในทุกตัวแปรสอดคล้องกับการลดลงของภาระการทำความเย็น ซึ่งสอดคล้องกับการใช้พลังงานแอร์ต่อเดือนที่ลดลงจาก 183 kWh เหลือ 158.25 kWh หรือลดลง 24.75 kWh คิดเป็นร้อยละ 13.52 ส่งผลให้หน่วยไฟรวมต่อเดือนของบ้านลดลงจาก 303 kWh เหลือ 278.25 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานร้อยละ 8.2และทำให้ค่าไฟสุทธิลดลงจาก 1,336.15 บาทต่อเดือน เหลือ 1,227.07 บาทต่อเดือน คิดเป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าร้อยละ 8.2

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความชื้นระหว่างอุณหภูมิคงที่แบบ Fix Speed และอุณหภูมิปรับอัตโนมัติแบบ Variable Speed

ตัวแปร	อุณหภูมิคงที่แบบ Fix Speed	อุณหภูมิปรับอัตโนมัติแบบ Variable Speed
อุณหภูมิจุดน้ำค้าง	15.01	13.9
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	53.97	48.7
อัตราส่วนความชื้น	0.01067	0.00991

7. เอกสารอ้างอิง

[1] นิลญา การัณย์สกุล และ มัณฑนา กลุ่มเหรียญทอง. (2552). การปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพรมโดยใช้ทฤษฎีของ 7 waste ในแผนกเลย์กาว กรณีศึกษาโรงงานอินเตอร์ไกร จำกัด วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[2] Sunardi, C., Hikmat, Y. P., Margana, A. S., Sumeru, K., & Sukri, M. F. (2020). Effect of room temperature set points on energy consumption in a residential air conditioning. AIPConferenceProceedings .https://doi.org/10.1063/5.0018806

[3] Moreno-Carbonell, S., Sánchez-Úbeda, E. F., & Muñoz, A. (2020). Time series decomposition of the daily outdoor air temperature in Europe for long-term energy forecasting in the context of climate change. Energies, 13(7), 1569. https://doi.org/10.3390/en13071569

[4] Estrada-Patiño, E., Castilla-Valdez, G., Frausto-Solis, J., González-Barbosa, J., & Sánchez-Hernández, J. P. (2024). A novel approach for temperature forecasting in climate change using ensemble decomposition of time series. International Journal of Computational Intelligence Systems, 17, 253. https://doi.org/10.1007/s44196-024-00667-6

[5] Thepa, S., & Monyakul, V. (2012). An influence of air volume flow rate and temperature set point on performance of inverter split-type air-conditioner. Experimental Techniques, 36(2), 27–34. https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00720.x

การปรับปรุงผังโรงงานผลิตเครื่องนอนหลายผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการวางผังอย่างเป็นระบบ: กรณีศึกษาโรงงานไพรจิตรเครื่องนอน

Facility Layout Improvement for Multi-Product Bedding Manufacturing Using Systematic Layout Planning: A Case Study of Phraichit Bedding Factory

ชลิตา โคตะลา[1], วรรณรพ ขันธิรัตน์, นรงค์ วิชาผา,ธีระพัฒน์ เหล่านอก, สุดารัตน์ ภูโยฤทธิ์ และ อนุชา ศรีบุรัมย์[1,*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
62/1 ถนน เกษตรสมบูรณ์ ตำบล กาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000
*ผู้ติดต่อ: anucha.sr@ksu.ac.th, โทรศัพท์: 083-4194954, โทรสาร: โทรสาร 043-813070

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ปรับปรุงผังโรงงานไพรจิตรเครื่องนอนสำหรับการผลิตที่นอนท็อปเปอร์ ที่นอนพับ และผ้าห่มนวม โดยเก็บข้อมูลจากการสังเกต จับเวลา และวัดระยะทางการเคลื่อนย้ายของผลิตภัณฑ์หลัก 3 กลุ่ม รวมปริมาณผลิตเฉลี่ย 4,250 ชิ้นต่อวัน จากนั้นประยุกต์ใช้การวางผังอย่างเป็นระบบ (SLP) ร่วมกับแผนผังก้างปลา แผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม AutoCAD และการจำลองด้วย FlexSim 2024 ผังเดิมมีระยะทางการเคลื่อนย้ายรวม 104.75 เมตร และเวลาเฉลี่ยรวม 1,607.77 วินาที จึงออกแบบผังทางเลือก 3 รูปแบบภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่และเครื่องจักรเดิม ผลการประเมินพบว่าผังทางเลือกที่ 3 เหมาะสมที่สุด โดยลดระยะทางเหลือ 53.22 เมตร ลดเวลาเหลือ 1,390.75 วินาที และลดต้นทุนการเคลื่อนย้ายจาก 10,475 บาท เหลือ 5,322 บาท หรือร้อยละ 49.2 ทั้งนี้ ควรติดตามผลหลังปรับผังจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพในระยะยาว

คำสำคัญ: ผังโรงงาน, การผลิตหลายผลิตภัณฑ์, การวางผังอย่างเป็นระบบ, การจำลอง

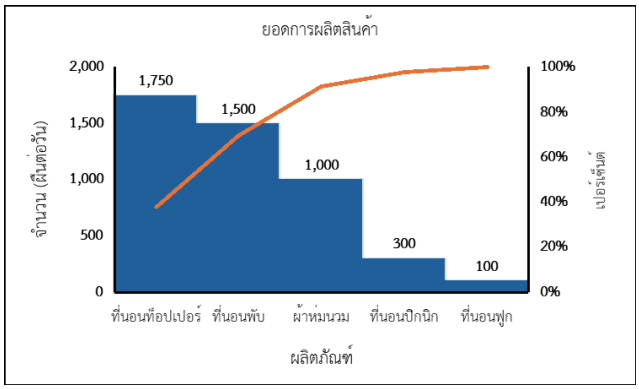
Abstract

This research aims to improve the factory layout of Phraichit Bedding for the production of mattress toppers, foldable mattresses, and duvets. Data were collected through direct observation, time study, and measurement of material-handling distances for three main product groups, with an average total production volume of 4,250 pieces per day. The study applied Systematic Layout Planning (SLP) in combination with a fishbone diagram, activity relationship chart, AutoCAD, and simulation using FlexSim 2024. The existing layout had a total material-handling distance of 104.75 meters and an average total processing time of 1,607.77 seconds. Therefore, three alternative layouts were designed under the constraints of the existing space and machinery. The evaluation results showed that Alternative Layout 3 was the most suitable option, reducing the material-handling distance to 53.22 meters, decreasing the total time to 1,390.75 seconds, and lowering the material-handling cost from 10,475 baht to 5,322 baht, representing a reduction of 49.2%. However, post-implementation monitoring is recommended to confirm the long-term effectiveness of the improved layout.

Keywords: facility layout, multi-product production, SLP, simulation

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องนอนมีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายมากขึ้น โรงงานไพรจิตรเครื่องนอนจึงต้องผลิตสินค้าหลักหลายชนิด ได้แก่ ที่นอนท็อปเปอร์ ที่นอนพับ และผ้าห่มนวม ภายใต้พื้นที่และทรัพยากรเดิม อย่างไรก็ตาม ผังโรงงานที่ใช้อยู่เดิมถูกออกแบบเพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวเป็นหลัก เมื่อต้องผลิตหลายผลิตภัณฑ์พร้อมกันจึงเกิดปัญหาพื้นที่แออัด การไหลของวัสดุไม่ต่อเนื่อง เส้นทางขนย้ายซ้ำซ้อน และจุดคอขวดในบางขั้นตอน ส่งผลให้เวลาและต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 แผนภูมิพาเรโตยอดการผลิตสินค้าเฉลี่ยต่อวัน

การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning: SLP) ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกิจกรรม พื้นที่ และการไหลของวัสดุ เพื่อจัดตำแหน่งงานหรือเครื่องจักรให้เหมาะกับลักษณะการผลิต [1], [3]-[5] งานวิจัยล่าสุดเสนอให้บูรณาการ SLP กับการจำลอง การประเมินหลายเกณฑ์ และเทคนิคเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อรองรับระบบการผลิตที่หลากหลาย [10]-[14] งานวิจัยนี้จึงใช้ SLP ร่วมกับการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผังทางเลือกและคัดเลือกผังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตหลายผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์การวิจัย

1) ศึกษาสภาพผังโรงงานปัจจุบันและปัญหาการไหลของวัสดุในการผลิตผลิตภัณฑ์หลัก 3 กลุ่ม 2) ออกแบบผังทางเลือกด้วยหลักการ SLP ภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่และเครื่องจักรเดิม และ 3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของผังเดิมกับผังทางเลือกด้านเวลา ระยะทาง อัตราการผลิต คะแนนประเมินผัง และต้นทุนการเคลื่อนย้าย

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยครอบคลุมเฉพาะพื้นที่ผลิตหลักของโรงงานไพรจิตรเครื่องนอน ขนาดประมาณ 70 × 45 เมตร ตามผัง AutoCAD โดยพิจารณาผลิตภัณฑ์หลัก 3 กลุ่ม ได้แก่ ที่นอนท็อปเปอร์ ที่นอนพับ และผ้าห่มนวม การปรับปรุงจำกัดอยู่ที่การจัดตำแหน่งพื้นที่ทำงานและเส้นทางขนย้ายภายในพื้นที่เดิม ไม่รวมการก่อสร้างอาคารใหม่ การซื้อเครื่องจักรใหม่ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแรงงาน ข้อมูลเก็บจากการสังเกต วัดระยะทางจริง และจับเวลาตามหลักการศึกษางาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ

การวางผังโรงงานมีเป้าหมายเพื่อจัดตำแหน่งคน เครื่องจักร วัตถุดิบ พื้นที่สนับสนุน และเส้นทางการไหลของงานให้เหมาะสม โดยมุ่งลดระยะทาง ใช้พื้นที่คุ้มค่า ปลอดภัย และยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลง [1], [4], [6] วิธี SLP เริ่มจากรวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์ ปริมาณ ลำดับการผลิต กิจกรรมสนับสนุน และเวลา จากนั้นวิเคราะห์การไหลและความสัมพันธ์ของ

กิจกรรม เพื่อจัดทำและประเมินผังทางเลือก แล้วคัดเลือกผังที่เหมาะสมที่สุด [3], [5]

2.2 เครื่องมือวิเคราะห์และการจำลองสถานการณ์

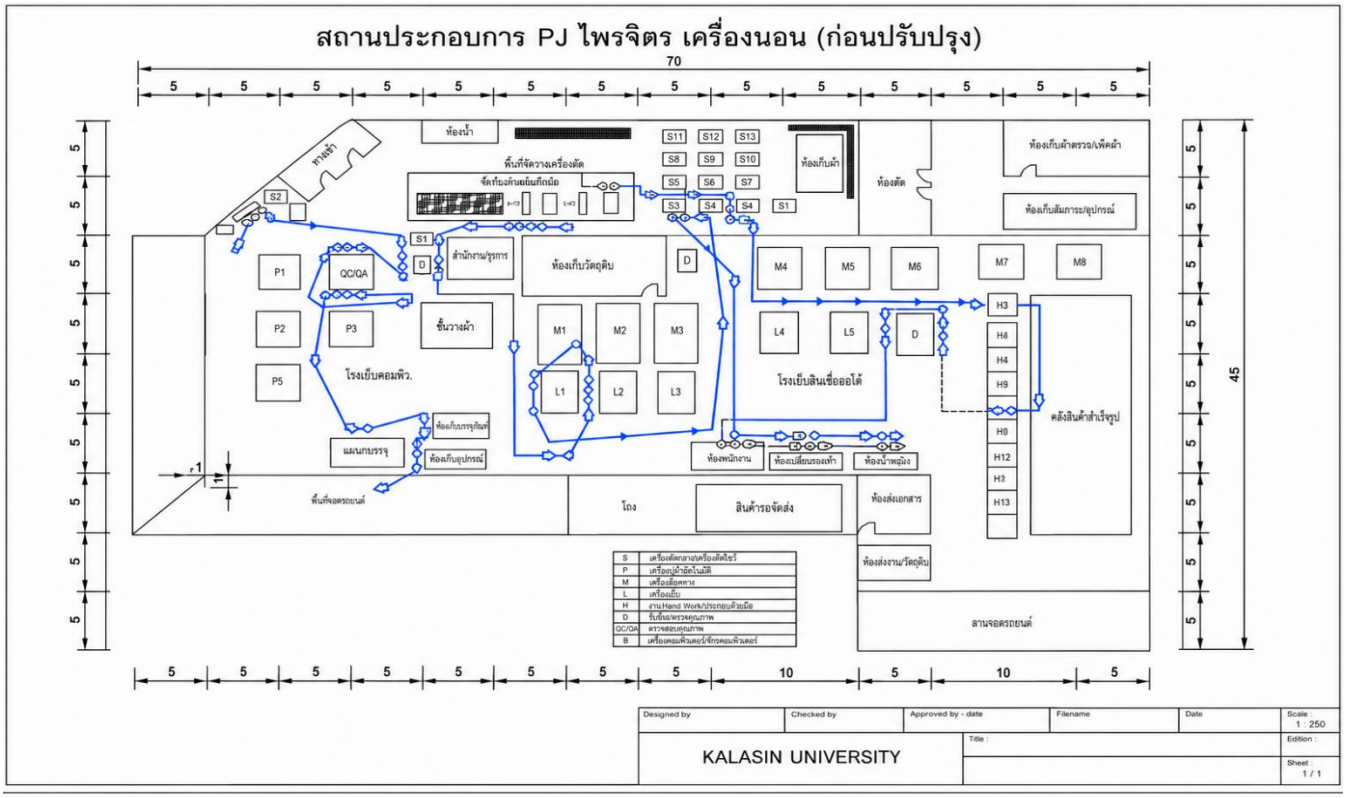
แผนผังก้างปลาใช้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ส่วนแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมใช้กำหนดระดับความใกล้ชิดของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ขณะที่การศึกษางานช่วยให้การเก็บข้อมูลเวลาและวิธีปฏิบัติงานเป็นระบบ [2] สำหรับการออกแบบผัง ใช้ AutoCAD กำหนดตำแหน่งและระยะทางเชิงพื้นที่ และใช้ FlexSim จำลองการไหลของวัสดุ เวลา และอัตราการผลิตก่อนนำไปใช้จริง [7], [8]

งานวิจัยระหว่างปี 2021–2026 ชี้ว่าการวางผังโรงงานนิยมใช้ SLP ร่วมกับการจำลองสถานการณ์และเทคนิคเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อช่วยลดการเคลื่อนย้ายวัสดุ เพิ่มความแม่นยำในการเลือกผัง และประเมินผลก่อนนำไปใช้จริง ตัวอย่างเช่น การผสาน SLP กับแนวคิดลีน CORELAP อัลกอริทึมพันธุกรรม และการจำลองในระบบการผลิตหรือคลังสินค้า [10]–[14] แนวทางดังกล่าวทำให้การตัดสินใจไม่ได้พิจารณาเฉพาะระยะทางหรือความใกล้ชิดของหน่วยงานเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมเวลา การไหลของงาน การใช้พื้นที่ และข้อจำกัดของระบบการผลิตจริงด้วย โดยเฉพาะในโรงงานที่ผลิตหลายผลิตภัณฑ์ ซึ่งมักมีเส้นทางการเคลื่อนย้ายซับซ้อนและมีการใช้พื้นที่ร่วมกันหลายกระบวนการ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้ SLP ร่วมกับ FlexSim เพื่อประเมินผังทางเลือกด้วยข้อมูลเชิงปริมาณ เปรียบเทียบผลภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน และสนับสนุนการเลือกผังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงานผลิตหลายผลิตภัณฑ์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเริ่มจากศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโรงงานและกระบวนการผลิตหลัก 3 ชนิด ได้แก่ ที่นอนท็อปเปอร์ ที่นอนพับ และผ้าห่มนวม พร้อมเก็บข้อมูลเวลา ระยะทาง จำนวนสถานีงาน และจำนวนพนักงานตามหลักการศึกษางาน [2] จากนั้นวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลาและแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม แล้วออกแบบผังทางเลือก 3 แบบ คือ (1) เน้นการไหลของกระบวนการผลิต (2) เน้นความใกล้ชิดในการเข้าถึง และ (3) ผังแบบสมดุล

การดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ (1) ศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานและจัดทำผังเดิมตามรูปที่ 2 เพื่อระบุตำแหน่งสถานีงานและเส้นทางการไหลของวัสดุ (2) เก็บข้อมูลปริมาณการผลิต เวลา ระยะทาง และทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์หลัก 3 กลุ่ม (3) วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลาในรูปที่ 3 โดยพิจารณาปัจจัยด้านคน วิธีการ เครื่องจักร วัตถุดิบ การจัดการ และสภาพแวดล้อม (4) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกิจกรรมด้วยแผนภูมิความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 เพื่อกำหนดระดับความจำเป็นในการจัดวางหน่วยงานใกล้กัน (5) ออกแบบผังทางเลือก 3 แบบด้วย AutoCAD และ (6) จำลองสถานการณ์ด้วย FlexSim 2024 เพื่อประเมินเวลาเฉลี่ย อัตราการผลิต และจุดคอขวดของแต่ละผัง ก่อนนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและคัดเลือกผังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงาน



รูปที่ 2 ผังโรงงานก่อนปรับปรุงของสถานประกอบการ

จากนั้นเปรียบเทียบผังทางเลือกด้วยตัวชี้วัดหลัก 4 ด้าน ได้แก่ เวลาในการผลิต ระยะทางการเคลื่อนย้าย อัตราการผลิต และต้นทุนการเคลื่อนย้าย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแต่ละผังอย่างรอบด้าน ทั้งในมิติของการไหลของงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเวลาในการผลิตสะท้อนความรวดเร็วของกระบวนการ ระยะทางการเคลื่อนย้ายใช้พิจารณาความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุ อัตราการผลิตแสดงศักยภาพในการรองรับปริมาณงาน และต้นทุนการเคลื่อนย้ายใช้แสดงผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดผังในแต่ละรูปแบบ การกำหนดต้นทุนการเคลื่อนย้ายเท่ากับระยะทางรวมคูณค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 100 บาทต่อเมตร ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลด้านต้นทุนของแต่ละทางเลือกได้อย่างเป็นรูปธรรมและอยู่บนเกณฑ์เดียวกัน นอกจากนี้ ยังใช้ FlexSim จำลองสถานการณ์การทำงานของผังแต่ละแบบ เพื่อยืนยันผลด้านเวลาเฉลี่ยต่อหน่วยและอัตราการผลิตภายใต้สภาพการผลิตที่ใกล้เคียงความเป็นจริง รวมทั้งช่วยให้เห็นผลกระทบของการจัดวางต่อการไหลของงาน การใช้ทรัพยากร และความเป็นไปได้ในการเกิดคอขวดในแต่ละทางเลือก ช่วยให้สามารถประเมินข้อดี ข้อจำกัด และความเหมาะสมของแต่ละผังได้ก่อนนำไปใช้จริง [7], [8]

การประเมินต้นทุนการเคลื่อนย้ายในงานวิจัยนี้กำหนดจากสมการ ต้นทุนการเคลื่อนย้าย = ระยะทางรวม × ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเมตร โดยกำหนดค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเท่ากับ 100 บาทต่อเมตร เพื่อใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานเดียวกันในการเปรียบเทียบผังโรงงานแต่ละรูปแบบ ส่วนแบบจำลองด้วย FlexSim ถูกกำหนดลำดับกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับเส้นทางการ

ESTACON 2026 | 17th

ผลิตจริงของผลิตภัณฑ์แต่ละกลุ่ม และตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของผังเดิมกับข้อมูลภาคสนามด้านเวลาและระยะทางก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ผังทางเลือก ทั้งนี้ แบบจำลองยังมีข้อจำกัด เนื่องจากยังไม่ครอบคลุมความแปรปรวนจากการหยุดทำงานของเครื่องจักร การขาดงานของพนักงาน และคำสั่งผลิตเร่งด่วน

ตารางที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานก่อนการปรับปรุงผังโรงงาน

ผลิตภัณฑ์	ผลิตเฉลี่ย (ชิ้น/วัน)	เวลา (วินาที/ผืน)	ระยะทาง (เมตร/ผืน)
ที่นอนท็อปเปอร์	1,750	540.20	16.14
ที่นอนพับ	1,500	490.72	38.68
ผ้าห่มนวม	1,000	576.85	49.93
รวม	**4,250**	**1,607.77**	**104.75**

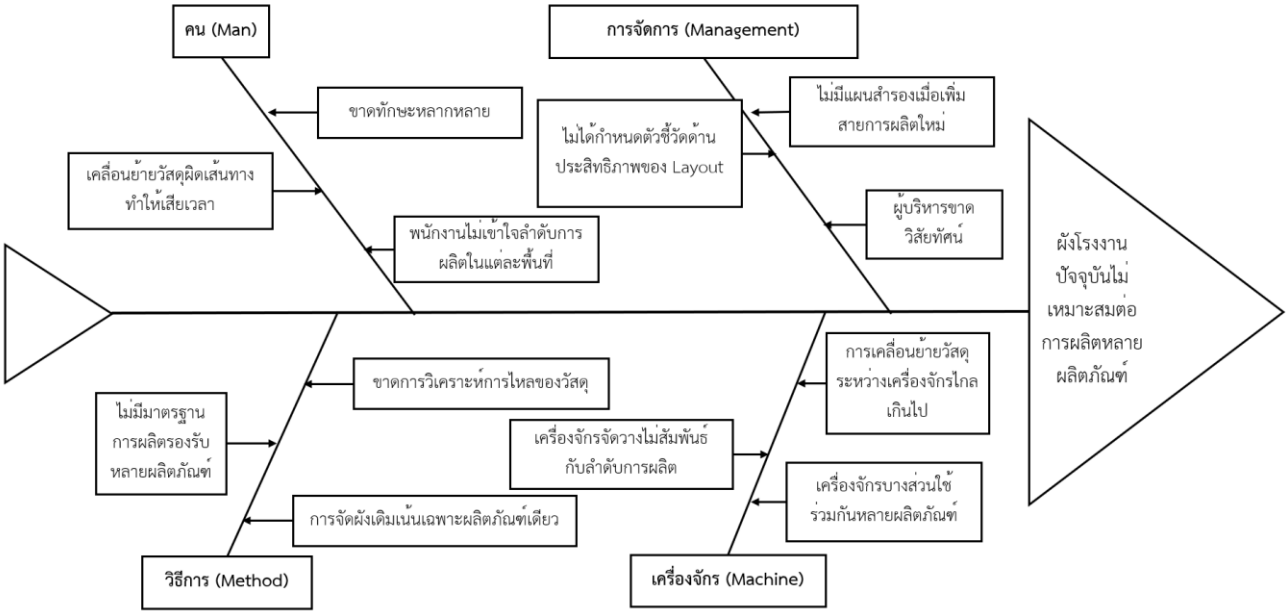
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 สภาพปัจจุบันและปัญหาของผังโรงงาน

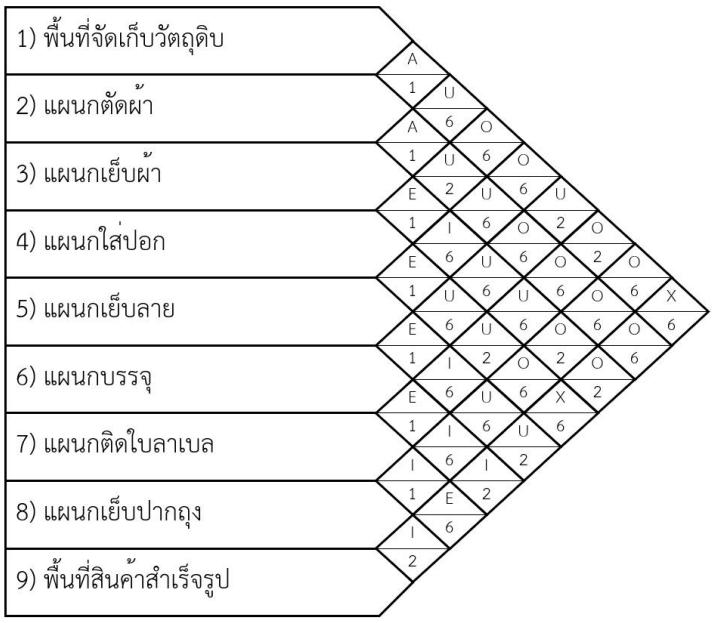
ก่อนปรับปรุง โรงงานมีระยะทางการเคลื่อนย้ายรวม 104.75 เมตร และเวลาเฉลี่ยรวม 1,607.77 วินาที โดยเมื่อพิจารณารายผลิตภัณฑ์พบว่า ผ้าห่มนวมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาและระยะทางมากที่สุด รองลงมาคือที่นอนพับ ขณะที่ที่นอนท็อปเปอร์ใช้ระยะทางและเวลาน้อยกว่า สะท้อนให้เห็นว่าผังเดิมเอื้อต่อการผลิตบางประเภทมากกว่าการผลิตหลายผลิตภัณฑ์พร้อมกัน ปัญหาสำคัญของผังเดิมคือการจัดวางเครื่องจักรและพื้นที่ปฏิบัติงานไม่สอดคล้องกับลำดับขั้นตอนการผลิต ทำให้วัสดุและชิ้นงานต้องเคลื่อนย้ายย้อนกลับหรือผ่านจุดเดิมหลายครั้ง ส่งผลให้เกิดการขนย้ายซ้ำซ้อนและเพิ่มเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า นอกจากนี้ การจัดเก็บวัตถุดิบและชิ้นงานระหว่างกระบวนการยังไม่เป็นระบบ ทำให้การเข้าถึงวัสดุไม่สะดวกและรบกวนการไหลของงานในบางช่วง ส่งผลให้เกิดความล่าช้า พื้นที่ทำงานแออัด และมีโอกาสเกิดคอขวดในบางสถานีงาน โดยเฉพาะกระบวนการที่ต้องใช้พื้นที่ร่วมกันหรือมีการเคลื่อนย้ายวัสดุข้ามพื้นที่หลายครั้ง ปัญหาเหล่านี้ไม่เพียงกระทบต่อประสิทธิภาพของแต่ละสถานีงาน แต่ยังส่งผลต่อการวางแผนการผลิต การควบคุมงานระหว่างกระบวนการ และการใช้แรงงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ภาพรวมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าผังโรงงานเดิมยังไม่เหมาะสมกับลักษณะการผลิตแบบหลายผลิตภัณฑ์ และจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้การไหลของวัสดุมีความต่อเนื่อง ลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พื้นที่ภายในโรงงาน

4.2 ผลการออกแบบผังโรงงานทางเลือก

ผังทางเลือกทั้ง 3 รูปแบบมีจุดเน้นต่างกัน โดยทางเลือกที่ 1 เน้นจัดลำดับสถานีงานตามกระบวนการผลิตเพื่อลดการเคลื่อนย้ายย้อนกลับ ทางเลือกที่ 2 เน้นจัดหน่วยงานที่มีความสัมพันธ์ของกิจกรรมสูงให้อยู่ใกล้กันเพื่อเพิ่มความสะดวกในการประสานงานและการใช้ทรัพยากรร่วมกัน ส่วนทางเลือกที่ 3 เป็นผังแบบสมดุลที่ผสานความต่อเนื่องของการไหลกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยงาน จึงเหมาะกับระบบการผลิตหลายผลิตภัณฑ์มากกว่า แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการจัดการวัสดุและการวางผังโรงงานที่มุ่งลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น [6], [10]–[14] รายละเอียดของแต่ละผังแสดงในตารางที่ 2 และผลการเปรียบเทียบด้านเวลาและระยะทางแสดงในตารางที่ 3



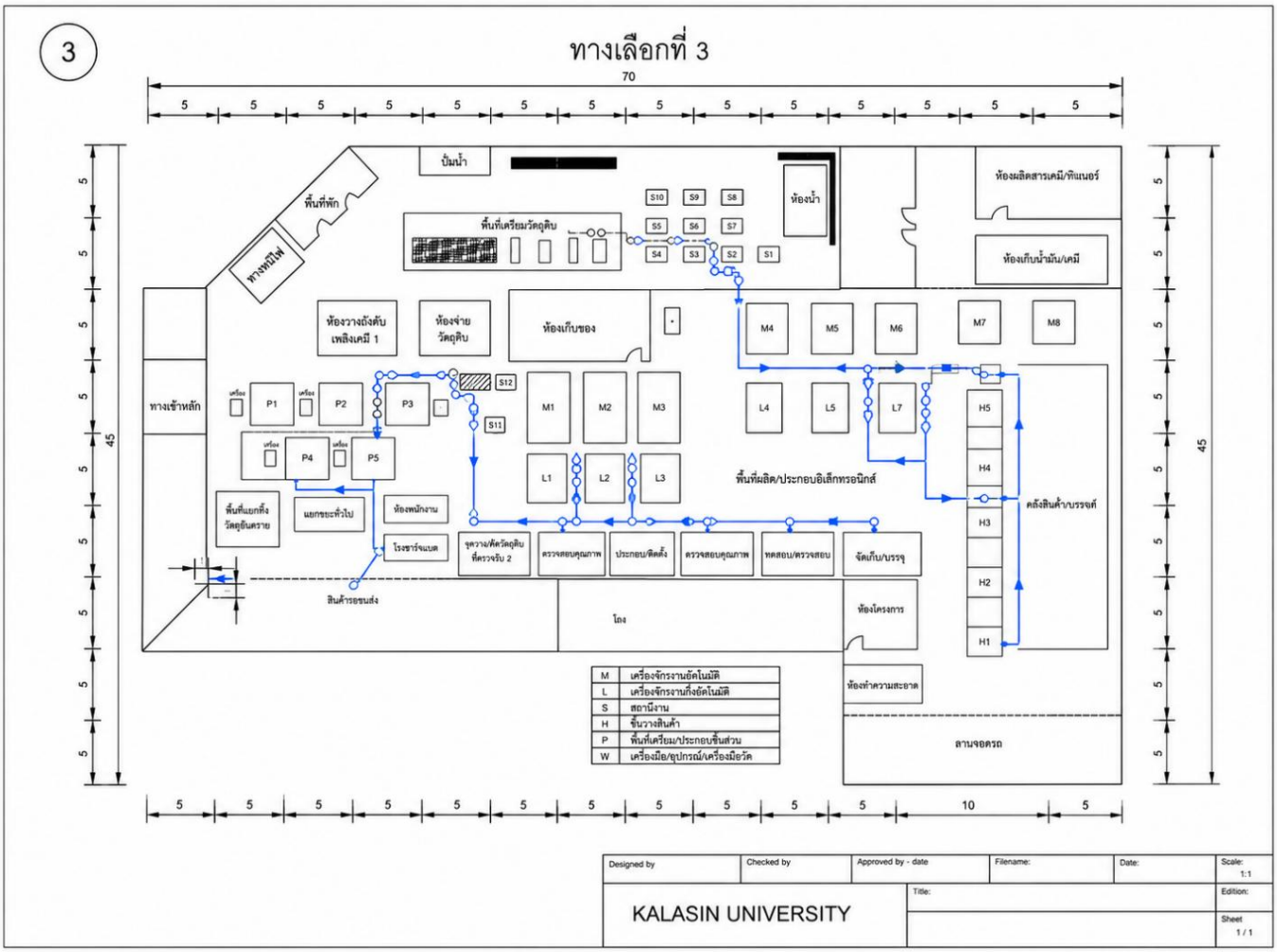
รูปที่ 3 แผนผังก้างปลาแสดงปัญหาในผังโรงงานปัจจุบันของไพรจิตร เครื่องนอน



รหัส	เหตุผลสนับสนุนความสัมพันธ์
1	การไหลของวัสดุ
2	ง่ายต่อการแนะนำควบคุม
3	ใช้อุปกรณ์ร่วมกัน
4	การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์
5	มีการติดต่อกัน
6	ความสะดวก

ค่า	ความสัมพันธ์
A	ต้องติดกัน
E	อยู่ใกล้กันที่สุด
I	ควรอยู่ใกล้กัน
U	ใกล้กันก็ได้
O	ไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กัน
X	ห้ามอยู่ใกล้กัน

รูปที่ 4 แผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรมตามหลักการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ



รูปที่ 5 ผังโรงงานทางเลือกที่ 3 แบบสมดุล

จากรูปที่ 5 ผังทางเลือกที่ 3 เป็นผังแบบสมดุลที่พิจารณาทั้งลำดับการไหลของกระบวนการผลิตและความสัมพันธ์ของพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะเส้นทางของที่นอนพับและผ้าห่มนวมซึ่งเดิมมีระยะทางมากและเกิดการเคลื่อนย้ายย้อนกลับ การปรับผังช่วยให้เส้นทางระหว่างพื้นที่เตรียมวัตถุดิบ พื้นที่เย็บหรือประกอบ และพื้นที่จัดเก็บมีความต่อเนื่องขึ้น ลดการตัดผ่านพื้นที่ร่วมและความหนาแน่นของการขนย้าย จึงลดโอกาสเกิดจุดคอขวดและการรบกวนระหว่างกระบวนการ นอกจากนี้ ผังดังกล่าวยังคงตำแหน่งเครื่องจักรหลักไว้ใกล้เคียงเดิม และปรับเฉพาะพื้นที่สนับสนุน เส้นทางขนย้าย และจุดจัดเก็บระหว่างกระบวนการให้สอดคล้องกับลำดับงานมากขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้จริงภายใต้พื้นที่และทรัพยากรเดิม พร้อมทั้งช่วยลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็นและเพิ่มความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุ

ตารางที่ 2 รายละเอียดแนวคิดและจุดเปลี่ยนของผังทางเลือก

ผังทางเลือก	จุดเน้นการออกแบบ	การเปลี่ยนแปลงสำคัญ	เกณฑ์ที่ใช้พิจารณา
1	เน้นการไหลของกระบวนการผลิต	จัดลำดับสถานีงานให้สอดคล้องกับขั้นตอนการผลิต เพื่อลดการเคลื่อนย้ายย้อนกลับของวัสดุ	ระยะทางรวมและความต่อเนื่องของเส้นทางการไหล
2	เน้นความใกล้ชิดของหน่วยงานที่สัมพันธ์กัน	จัดพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์ของกิจกรรมสูงให้อยู่ใกล้กันตามแผนภูมิความสัมพันธ์ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการประสานงานและการเข้าถึง	ระดับความสัมพันธ์ของกิจกรรม การเข้าถึงพื้นที่และการใช้ทรัพยากรร่วมกัน
3	**ผังแบบสมดุล**	**ผสานความต่อเนื่องของการไหลกับความใกล้ชิดของหน่วยงานที่สัมพันธ์กัน โดยคงข้อจำกัดของพื้นที่และเครื่องจักรเดิมเป็นหลัก**	**เวลา ระยะทาง ความเป็นไปได้ในการปรับใช้จริง และต้นทุนการเคลื่อนย้าย**

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผังโรงงานแต่ละทางเลือก

ผังโรงงาน	เวลารวม (วินาที)	ระยะทางรวม (เมตร)	หมายเหตุ
ก่อนปรับปรุง	**1,607.77**	**104.75**	**ค่าฐาน**
ทางเลือกที่ 1	1,406.28	60.63	เน้นการไหล
ทางเลือกที่ 2	1,416.23	63.27	เน้นความใกล้ชิด
ทางเลือกที่ 3	**1,390.75**	**53.22**	**สมดุลที่สุด**

จากตารางที่ 3 พบว่าผังทางเลือกทั้ง 3 รูปแบบให้ผลการปรับปรุงดีกว่าผังเดิมทั้งด้านเวลาและระยะทางการเคลื่อนย้าย โดยผังเดิมมีเวลารวม 1,607.77 วินาที และระยะทางรวม 104.75 เมตร ขณะที่ผังทางเลือกที่ 1 ลดเวลารวมเหลือ 1,406.28 วินาที และระยะทางรวมเหลือ 60.63 เมตร ส่วนผังทางเลือกที่ 2 ลดเวลารวมเหลือ 1,416.23 วินาที และระยะทางรวมเหลือ 63.27 เมตร เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผังทางเลือก พบว่าผังทางเลือกที่ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากให้เวลารวมต่ำสุด 1,390.75 วินาที และระยะทางรวมต่ำสุด 53.22 เมตร แสดงให้เห็นว่าการจัดผังแบบสมดุลสามารถเพิ่มความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุ ลดการเคลื่อนย้ายย้อนกลับ และลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าได้ดีกว่าผังรูปแบบอื่น นอกจากนี้ ผลลัพธ์ยังสะท้อนว่าการพิจารณาทั้งลำดับกระบวนการผลิตและความสัมพันธ์ของพื้นที่ทำงานช่วยให้การจัดวางมีความเหมาะสมกับลักษณะการผลิตหลายผลิตภัณฑ์มากขึ้น โดยเฉพาะการลดเส้นทางที่ซ้ำซ้อนและการใช้พื้นที่ร่วมกันในบางกระบวนการ ทั้งนี้ ผลการปรับปรุงมีความชัดเจนเป็นพิเศษในผลิตภัณฑ์ที่นอนพับและผ้าห่มนวม ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง ด้วยผังทางเลือกที่ 3

ผลิตภัณฑ์	ตัวชี้วัด	ก่อนปรับปรุง	ทางเลือกที่ 3
ที่นอนท็อปเปอร์	เวลา (วินาที)	540.20	540.20
ที่นอนพับ	ระยะทาง (เมตร)	16.14	16.14
	เวลา (วินาที)	490.72	370.04
ผ้าห่มนวม	ระยะทาง (เมตร)	38.68	25.49
	เวลา (วินาที)	576.85	480.51
ผ้าห่มนวม	ระยะทาง (เมตร)	49.93	11.59

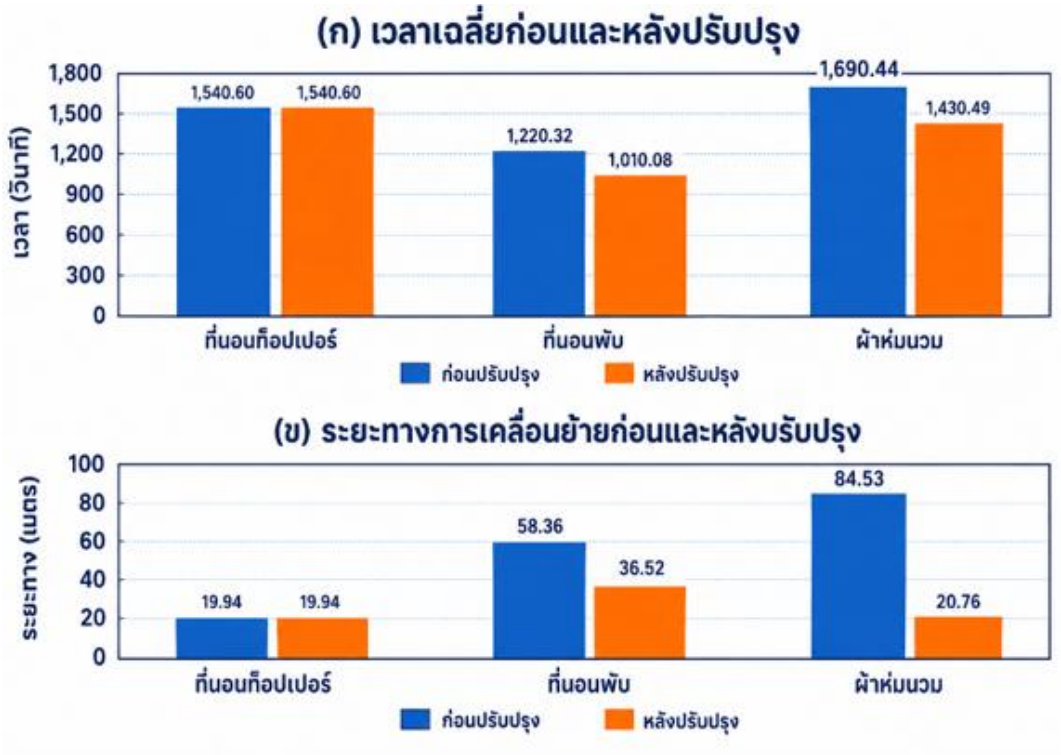
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์และการประเมินผัง

ผลการจำลองด้วย FlexSim สนับสนุนว่าผังทางเลือกที่ 3 ให้ผลดีที่สุด โดยสะท้อนให้เห็นว่าการจัดวางแบบสมดุลช่วยลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็นและทำให้การไหลของงานต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการจำลองสถานการณ์เพื่อประเมินระบบการผลิตก่อนปรับใช้จริง [7], [8] สำหรับที่นอนพับ พบว่าเวลาเฉลี่ยต่อชิ้นอยู่ที่ 10.30 นาที และมีอัตราการผลิต 233 ชิ้นต่อชั่วโมง ขณะที่ผ้าห่มนวมมีเวลาเฉลี่ย 8.97 นาทีต่อชิ้น และมีอัตราการผลิต 180 ชิ้นต่อชั่วโมง ค่าดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการผลิตหลังปรับปรุงมีความเสถียรมากขึ้น สามารถรองรับการผลิตหลายผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง และลดโอกาสเกิดคอขวดในบางสถานีงาน นอกจากนี้ ผลการจำลองยังสะท้อนว่าการจัดวางที่เหมาะสมช่วยให้การใช้พื้นที่ การกระจายภาระงาน และการเคลื่อนย้ายระหว่างสถานีมีประสิทธิภาพมาก ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผังทางเลือกที่ 3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ลดความสูญเปล่า และช่วยให้การใช้พื้นที่และทรัพยากรภายในโรงงานมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

ผลการเปรียบเทียบรายผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าที่นอนพับได้รับผลจากการปรับผังมากที่สุดด้านเวลา โดยลดจาก 490.72 วินาที เหลือ 370.04 วินาที เนื่องจากการจัดพื้นที่เตรียมชิ้นงาน พื้นที่เย็บ และพื้นที่ประกอบให้ต่อเนื่องกันมากขึ้น จึงลดการรอคอยและการเคลื่อนย้ายย้อนกลับ ส่วนผ้าห่มนวมได้รับผลเด่นด้านระยะทาง โดยลดจาก 49.93 เมตร เหลือ 11.59 เมตร เนื่องจากผังใหม่ช่วยลดการเคลื่อนย้ายข้ามโซนและเส้นทางที่ทับซ้อนกับผลิตภัณฑ์อื่น ขณะที่ที่นอนท็อปเปอร์มีค่าเวลาและระยะทางคงเดิม เนื่องจากเส้นทางเดิมมีระยะสั้นและไม่ใช่จุดคอขวดหลักของระบบ โดยภาพรวม ผังทางเลือกที่ 3 ช่วยปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหาการไหลของวัสดุสูงได้ชัดเจน สอดคล้องกับรูปที่ 6 ซึ่งแสดงแนวโน้มการลดลงของเวลาและระยะทางหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 5 ผลการประเมินผังและต้นทุนการเคลื่อนย้ายของผังโรงงานแต่ละทางเลือก

รายการ	ก่อนปรับปรุง	ทางเลือกที่ 1	ทางเลือกที่ 2	ทางเลือกที่ 3
คะแนนประเมินผัง	-	1.40	3.10	4.35
เวลาเฉลี่ยรวม (วินาที)	1,607.77	1,406.28	1,416.23	1,390.75
ระยะทางรวม (เมตร)	104.75	60.63	63.27	53.22
ต้นทุน (บาท)	10,475	6,063	6,327	5,322



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุงด้านเวลาและระยะทาง

จากตารางที่ 5 พบว่าผังทางเลือกที่ 3 มีผลการประเมินโดยรวมดีที่สุด เมื่อพิจารณาทั้งคะแนนประเมินผัง เวลา ระยะทาง และต้นทุนการเคลื่อนย้าย โดยได้รับคะแนนประเมินสูงสุด 4.35 สะท้อนถึงความเหมาะสมด้านความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุ ความสัมพันธ์ของกิจกรรม และความเป็นไปได้ในการนำไปปรับใช้จริง นอกจากนี้ ผังดังกล่าวยังให้เวลาเฉลี่ยรวมต่ำสุด 1,390.75 วินาที และระยะทางรวมต่ำสุด 53.22 เมตร แสดงให้เห็นว่าสามารถลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็นและลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ต้นทุนการเคลื่อนย้ายลดลงเหลือ 5,322 บาท จากเดิม 10,475 บาท หรือ

ลดลง 5,153 บาท คิดเป็นร้อยละ 49.2 เมื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกที่ 1 และ 2 พบว่าทางเลือกที่ 3 แม้ต้องปรับตำแหน่งพื้นที่สนับสนุนบางส่วนมากกว่า แต่สามารถสร้างความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพด้านเวลา ระยะทาง ความคุ้มค่าด้านต้นทุน และความเป็นไปได้ในการปรับใช้ได้ดีกว่า จึงมีหลักฐานเชิงปริมาณรองรับชัดเจนว่าเป็นผังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงโรงงานภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่และเครื่องจักรเดิม

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (SLP) ร่วมกับ AutoCAD และ FlexSim 2024 เพื่อปรับปรุงผังโรงงานไพรจิตรเครื่องนอนสำหรับการผลิตที่นอนท็อปเปอร์ ที่นอนพับ และผ้าห่มนวม ผลการศึกษาพบว่าผังทางเลือกที่ 3 หรือผังแบบสมดุลเหมาะสมที่สุด เนื่องจากผสานความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุกับความสัมพันธ์ของพื้นที่ปฏิบัติงานได้ดีกว่าทางเลือกอื่น ส่งผลให้เวลาเฉลี่ยรวมลดลงจาก 1,607.77 วินาที เหลือ 1,390.75 วินาที ระยะทางการเคลื่อนย้ายรวมลดลงจาก 104.75 เมตร เหลือ 53.22 เมตร และต้นทุนการเคลื่อนย้ายลดลงจาก 10,475 บาท เหลือ 5,322 บาท หรือร้อยละ 49.2 ผลลัพธ์นี้แสดงว่าการจัดพื้นที่และเส้นทางขนย้ายให้สอดคล้องกับลำดับงานช่วยลดการเคลื่อนย้ายย้อนกลับ กิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า และเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังปรับใช้ได้ภายใต้พื้นที่และเครื่องจักรเดิมเป็นส่วนใหญ่

อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยยังมีข้อจำกัด เนื่องจากอ้างอิงจากผังทางเลือกและการจำลองก่อนนำไปใช้จริงเต็มรูปแบบ โดยแบบจำลองยังไม่ครอบคลุมความแปรปรวนจากการหยุดทำงานของเครื่องจักร คำสั่งผลิตเร่งด่วน การเปลี่ยนแปลงจำนวนพนักงาน การรอคอยวัตถุดิบ และพฤติกรรมการทำงานในระยะยาว ดังนั้น หากนำผังทางเลือกที่ 3 ไปใช้จริง ควรติดตามผลด้านเวลา ระยะทาง ปริมาณงานระหว่างกระบวนการ อัตราการผลิต และปัญหาในแต่ละสถานีงานอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งจัดทำมาตรฐานเส้นทางขนย้าย จุดวางวัสดุ คู่มือปฏิบัติงาน และการฝึกอบรมพนักงาน สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรบูรณาการแนวคิดลีน เช่น 5S, Kaizen และ Value Stream Mapping ร่วมกับ Genetic Algorithm, Simulation-based Optimization หรือ Digital Twin เพื่อค้นหาผังที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่ซับซ้อนและประเมินผลในระยะยาวได้แม่นยำยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณโรงงานไพรจิตรเครื่องนอนที่อนุเคราะห์ข้อมูลและเอื้ออำนวยการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมถึงคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] วันชัย ริจิรวนิช. (2541). การออกแบบผังโรงงาน. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2] วัชรินทร์ สิทธิเจริญ. (2547). การศึกษางาน (Work Study). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

[3] R. Muther. (1961). Systematic Layout Planning. Boston: Cahners Books.

[4] J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer, and J. M. A. Tanchoco. (2010). Facilities Planning. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[5] R. L. Francis, L. F. McGinnis, and J. A. White. (1992). Facilities Layout and Location: An Analytical Approach. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

[6] J. M. Apple. (1977). Plant Layout and Material Handling. New York: John Wiley & Sons.

[7] M. P. Groover. (2015). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

[8] H. Shan, Y. Yuan, Y. Zhang, L. Li, and C. Wang. (2018). "Lean simulation and optimization: the case of steering knuckle arm production line," Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, Thailand.

[9] ชูศักดิ์ พรสิงห์ และ สรรชัย อ่ำพุทรา. (2562). "การปรับปรุงผังโรงงานและกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการ กรณีศึกษาโรงงานผลิตหลอดไฟแอลอีดีตัวอย่าง," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 27(6), 1132-1146.

[10] V. Kumar and V. Naga Malleswari. (2022). "Improvement of facility layout design using Systematic Layout Planning methodology," Journal of Physics: Conference Series, 2312, 012089. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2312/1/012089

[11] A. Chakroun, H. Zribi, Y. Hani, A. El Mhamedi, and F. Masmoudi. (2022). "Facility layout design through integration of lean manufacturing in Industry 4.0 context," IFAC-PapersOnLine, 55(10), 798–803. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.507

[12] Z. Yang and W. Lu. (2023). "Facility layout design for modular construction manufacturing: A comparison based on simulation and optimization," Automation in Construction, 147, 104713. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104713

[13] X. Hu and Y.-F. Chuang. (2023). "E-commerce warehouse layout optimization: Systematic layout planning using a genetic algorithm," Electronic Commerce Research, 23(1), 97–114. https://doi.org/10.1007/s10660-021-09521-9

[14] K. Bouramtane, S. Kharraja, J. Riffi, O. El Beqqali, and A. Chraibi. (2024). "A comprehensive review of static and dynamic facility layout problems," Annual Reviews in Control, 58, 100970. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100970

การศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของใบอ้อยและเม็ดโฟมโพลีสไตรีนต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบา

A Study on the Optimal Mixture of Sugarcane Leaves and Polystyrene Foam Beads for the Mechanical Properties of Lightweight Concrete

นางสาวกรกนก นิลจำเริญ[1], นางสาวชนัญชิดา สุวรรณ[1], นายศุภกิจ เศิกศิริ[2,*], นายอุทัย ธารพรศรี[2], นางวราภรณ์ คูเจริญ[2], นายราชันย์ วงษ์ทวี[2], นายไทยทัศน์ สุดสวนสี[2] และนายอามิณฑ์ หล้าวงศ์[2]

[1]นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ 46000

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ 46000

*ผู้ติดต่อ: ensupakit@gmail.com, 080- 2453546

บทคัดย่อ

ใบอ้อยซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเม็ดโฟมโพลีสไตรีนซึ่งเป็นวัสดุน้ำหนักเบาจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้และลดปริมาณของเสีย อย่างไรก็ตาม การศึกษาหาอัตราสัดส่วนผสมของวัสดุต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจึงเป็นประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ใบอ้อย และเม็ดโฟมโพลีสไตรีนต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาตามแนวทางมาตรฐาน มอก. 2601-2556 วิธีการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอน ดังนี้ 1) การออกแบบส่วนผสมแบบ Extreme Vertices Design 2) การทดสอบสมบัติทางกล และ 3) การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอย กราฟเส้นชั้นความสูงของส่วนผสม และการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจ ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่การเพิ่มใบอ้อยในปริมาณสูงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และเม็ดโฟมโพลีสไตรีนจะช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงาน และสูตรที่มีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์:ใบอ้อย:เม็ดโฟมโพลีสไตรีน เท่ากับ 50:15:35 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในช่วงการทดลองเท่ากับ 5.8387 MPa นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับค่าเป้าหมายกำลังรับแรงอัด 2, 3 และ 4 MPa มีค่าความพึงพอใจรวมสูงกว่า 99% ซึ่งงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางเบื้องต้นในการใช้ใบอ้อยร่วมกับเม็ดโฟมโพลีสไตรีนเพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาทางเลือกสำหรับงานก่อสร้างที่ไม่รับน้ำหนักมาก

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบา ใบอ้อย เม็ดโฟมโพลีสไตรีน การออกแบบส่วนผสมแบบ Extreme Vertices Design

Abstract

Sugarcane leaves, which are agricultural waste materials, and polystyrene foam beads, which are lightweight materials from the industrial sector, have potential for use as composite materials mixed with cement to enhance the value of waste materials and reduce waste generation. However, determining the optimal mixing ratio of these materials in relation to the compressive strength of lightweight concrete has become a significant issue in this research. Therefore, this study aimed to investigate the influence of the

mixture proportions of cement, sugarcane leaves, and polystyrene foam beads on the compressive strength of lightweight concrete in accordance with Thai Industrial Standard TIS 2601-2556. The research methodology consisted of three main steps: 1) mixture design using Extreme Vertices Design, 2) mechanical property testing, and 3) data analysis using regression equations, mixture contour plots, and optimization based on the desirability function. The results showed that cement content was the main factor contributing to the increase in compressive strength, whereas a high proportion of sugarcane leaves reduced compressive strength. Polystyrene foam beads helped reduce the weight of the specimens. The mixture ratio of cement: sugarcane leaves: polystyrene foam beads at 50:15:35 provided the highest compressive strength within the experimental range, with a value of 5.8387 MPa. In addition, the optimization results for target compressive strengths of 2, 3, and 4 MPa showed overall desirability values greater than 99%. Overall, this study provides a preliminary approach for using sugarcane leaves together with polystyrene foam beads to develop alternative lightweight concrete for non-load-bearing construction applications.

Keywords: Lightweight concrete, sugarcane leaves, polystyrene foam beads, Extreme Vertices Design

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นภาคการผลิตที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานในปริมาณสูง โดยเฉพาะคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุหลักของอาคารและโครงสร้าง การพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบาประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น คอนกรีตมวลเบาจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่เหมาะสำหรับงานผนังหรือชิ้นส่วนที่ไม่รับน้ำหนักมาก เนื่องจากช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างและอาจช่วยเพิ่มสมรรถนะด้านฉนวนความร้อน อย่างไรก็ตาม ปัญหาการลดน้ำหนักของคอนกรีตมักส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง จึงจำเป็นต้องศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างวัสดุประสาน วัสดุเสริมแรง และวัสดุน้ำหนักเบา [1], [2].

ในบริบทของประเทศไทย วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีปริมาณมากและยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ เช่น ใบอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ซึ่งมักถูกกำจัดด้วยการเผาในพื้นที่เกษตรกรรม ส่งผลต่อปัญหามลพิษทางอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็ก การนำใบอ้อยมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตจึงเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน [3], [4].

ในเชิงวัสดุศาสตร์ ใบอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยธรรมชาติที่อาจช่วยชะลอการขยายตัวของรอยร้าวผ่านกลไกการเชื่อมโยงรอยร้าวของเส้นใยธรรมชาติ (Crack-bridging effect) ขณะเดียวกันเม็ดโฟมโพลีสไตรีน เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสามารถช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม EPS หรือเส้นใยธรรมชาติในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ ลดพื้นที่รับแรงของซีเมนต์เพสต์ และทำให้เส้นใยกระจุกตัว ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง [5], [6].

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการใช้ EPS เป็นมวลรวมน้ำหนักเบา

และการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เถ้าชานอ้อยหรือเส้นใยธรรมชาติในคอนกรีตหลายรูปแบบ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ยังแยกศึกษาวัสดุแต่ละชนิด และยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่พิจารณาอิทธิพลร่วมของใบอ้อยแห้งในฐานะเส้นใยธรรมชาติร่วมกับเม็ดโฟมโพลีสไตรีนภายใต้กรอบการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ โดยเฉพาะการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับกำลังรับแรงอัดภายใต้เงื่อนไขที่ผลรวมของส่วนผสมต้องเท่ากับร้อยละ 100 ดังนั้น การใช้การออกแบบการทดลอง (Extreme Vertices Design) จึงเหมาะสมกับระบบส่วนผสมที่มีข้อจำกัดขั้นต่ำและขั้นสูงของแต่ละองค์ประกอบ [7]-[9].

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ ใบอ้อย และเม็ดโฟมโพลีสไตรีนต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (2) สร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมและค่าตอบสนอง และ (3) วิเคราะห์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับค่ากำลังรับแรงอัดเป้าหมาย เพื่อเสนอแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับวัสดุน้ำหนักเบาในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากวัตถุประสงค์ดังกล่าว งานวิจัยนี้มีส่วนสนับสนุนทางวิชาการ 3 ประการ ได้แก่ (1) เสนอแนวทางการใช้ใบอ้อยแห้งซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับเม็ดโฟมโพลีสไตรีนสำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับน้ำหนัก (2) ประยุกต์ใช้การออกแบบส่วนผสมแบบ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของวัสดุแต่ละชนิดภายใต้ข้อจำกัดของระบบส่วนผสม และ (3) เสนออัตราส่วนผสมเบื้องต้นสำหรับกำลังรับแรงอัดเป้าหมาย ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุหลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใบอ้อยแห้ง เม็ดโฟมโพลีสไตรีน และน้ำสะอาด ปูนซีเมนต์ใช้เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีตมวลเบา ใบอ้อยแห้งใช้เป็นวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติ ส่วนเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้เป็นวัสดุน้ำหนักเบาเพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงาน วัสดุทั้งสามชนิดถูกกำหนดเป็นปัจจัยของระบบส่วนผสม โดยควบคุมผลรวมของสัดส่วนปัจจัยให้เท่ากับร้อยละ 100 ทั้งนี้ งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดเป็นค่าตอบสนองหลัก จึงใช้คำว่า “สมบัติทางกล” ให้สอดคล้องกับตัวแปรตอบสนองที่รายงานในบทความ แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 1) ปูนซีเมนต์ 2) ใบอ้อย และ 3) เม็ดโฟมโพลีสไตรีน

2.2 การเตรียมใบอ้อยและเม็ดโฟมโพลีสไตรีน

ใบอ้อยแห้งถูกนำมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดดิน ฝุ่น และสิ่งปนเปื้อน จากนั้นลดขนาดให้มีความยาวใกล้เคียงกันเพื่อลดปัญหาการจับตัวเป็นก้อนระหว่างการผสม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อควบคุมความชื้นก่อนการชั่งน้ำหนักและผสม เม็ดโฟมโพลีสไตรีนถูกคัดเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกันเพื่อควบคุมการกระจายตัวภายในเนื้อคอนกรีต การผสมควรดำเนินการโดยผสมปูนซีเมนต์กับใบอ้อยให้กระจายตัวก่อน จากนั้นจึงเติมเม็ดโฟมโพลีสไตรีนและน้ำสะอาดอย่างค่อยเป็นค่อยไป เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกตัวหรือการลอยตัวของเม็ดโฟม ทั้งนี้ ควรควบคุมลำดับการผสม เวลาในการผสม และการกระจายตัวของใบอ้อยกับเม็ดโฟมให้สม่ำเสมอ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัด

2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองนี้ใช้แนวคิดการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) ชนิด Extreme Vertices Design เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมภายใต้ข้อจำกัดของแต่ละปัจจัย [8], [9] ปัจจัยในการทดลองมี 3 ปัจจัย ได้แก่ A: ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30-60, B: ใบอ้อย ร้อยละ 10-40 และ C: เม็ดโฟมโพลีสไตรีน ร้อยละ 30-60 โดยผลรวมของ A+B+C เท่ากับร้อยละ 100 จากนั้นนำส่วนผสมแต่ละสูตรมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ตามแผนการทดลองจำนวน 7 สูตรดังตารางที่ 1 ชิ้นงานถูกบ่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวทางการทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 [11] เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น จำนวนสูตรทดลองและจำนวนข้อมูลจึงใช้เพื่อสร้างแนวโน้มและคัดเลือกสัดส่วนผสมที่มีศักยภาพมากกว่าการยืนยันเชิงสถิติขั้นสุดท้าย

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

หลังจากบ่มครบ 28 วัน ชิ้นงานแต่ละสูตรถูกนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงกด(Universal Testing Machine) โดยบันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้ แล้วคำนวณกำลังรับแรงอัดจากแรงกดสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงของชิ้นงาน ผลการทดสอบถูกนำไปใช้เป็นค่าตอบสนองหลักของการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ หากมีการขยายผลในอนาคต ควรทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ชิ้นงานต่อสูตร และรายงานค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

2.5 แบบจำลองทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้แบบจำลองถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนผสมชนิด Quadratic mixture model เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับกำลังรับแรงอัด [10] แบบจำลองประกอบด้วยพจน์เชิงเส้นของแต่ละวัสดุและพจน์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุสองชนิด ดังสมการ

$$\hat{Y} = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (1)$$

โดยที่ $\hat{Y}$ คือค่ากำลังรับแรงอัดที่แบบจำลองทำนาย และ X_1, X_2 และ X_3 คือสัดส่วนของปูนซีเมนต์ ใบอ้อย และเม็ดโฟมโพลีสไตรีน ตามลำดับ β_1, β_2 และ β_3 คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่อธิบายอิทธิพลของวัสดุแต่ละชนิด ส่วน β_{12}, β_{13} และ β_{23} คือค่าสัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ของวัสดุสองชนิด การวิเคราะห์สมการถดถอย กราฟเส้นชั้นความสูงของ

ส่วนผสม และการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจดำเนินการด้วยโปรแกรม Minitab 18 ทั้งนี้ เนื่องจากจำนวนสูตรทดลองมีจำกัด ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในงานนี้จึงใช้เพื่ออธิบายแนวโน้มเบื้องต้นของอัตราส่วนผสมมากกว่าการยืนยันเชิงสถิติขั้นสูง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลของส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบแรงอัด (Compressive Strength)

จากรูปที่ 2 การทดสอบแรงอัดแสดงพฤติกรรมการวิบัติของชิ้นงานทดสอบ โดยกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ทำหน้าที่สร้างเมทริกซ์แข็งสำหรับยึดเกาะอนุภาคและเส้นใยภายในวัสดุ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงหรือเมื่อเพิ่มสัดส่วนของวัสดุน้ำหนักเบามากขึ้น พื้นที่รับแรงจริงของเนื้อคอนกรีตจะลดลง ทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ ผิวของเม็ดโฟมโพลีสไตรีนค่อนข้างเรียบและไม่ดูดซับน้ำ จึงอาจทำให้เกิดเขตยึดเกาะที่อ่อนแอระหว่างเม็ดโฟมกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในคอนกรีตผสม EPS ในกรณีของใบอ้อย การใช้ในปริมาณที่เหมาะสมอาจช่วยชะลอการแตกร้าวผ่านกลไก crack-bridging effect แต่หากใช้ในปริมาณสูงเกินไปอาจทำให้เกิดช่องว่าง การกระจุกตัวของเส้นใย หรือการแย่งน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

3.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

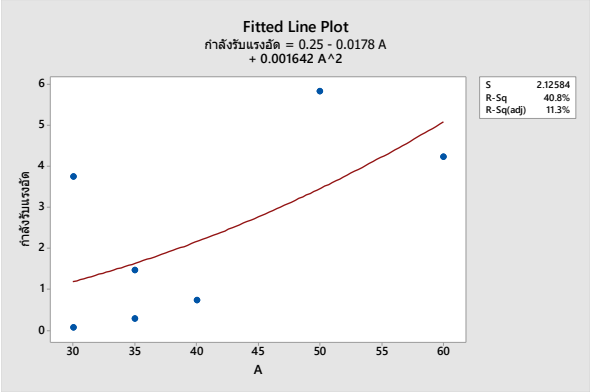
การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดภายใต้ช่วงการทดลองของปัจจัย 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ใบอ้อย และเม็ดโฟมโพลีสไตรีน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของสูตรทดลองตามแผน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองตามแผนการออกแบบแบบ Extreme Vertices Design

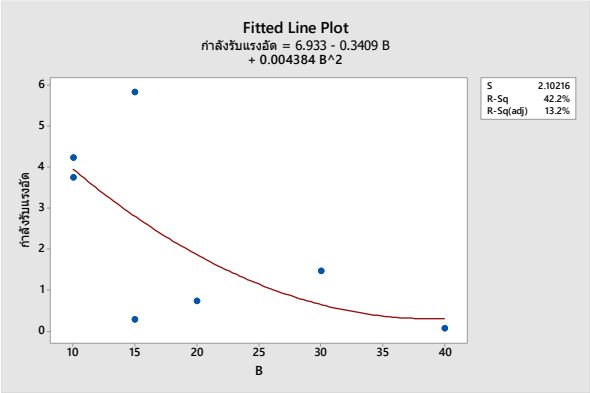
สูตร	A: ปูนซีเมนต์ (%)	B: ใบอ้อย (%)	C: เม็ดโฟม (%)	Y: กำลังรับแรงอัด(MPa)
1	30	40	30	0.0635
2	35	15	50	0.2821
3	35	30	35	1.4621
4	30	10	60	3.7488
5	60	10	30	4.234
6	50	15	35	5.8387
7	40	20	40	0.7412

จากตารางที่ 1 ผลการทดลองจำนวน 7 สูตรถูกนำมาวิเคราะห์แนวโน้มด้วยสมการถดถอย โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับค่ากำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 3-5 และตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนการเพิ่มใบอ้อยจากร้อยละ 10 ไปสู่

ร้อยละ 40 มีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับเม็ดโฟมโพลีสไตรีน ค่าแรงอัดเปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วงที่ศึกษาเมื่อพิจารณาแยกปัจจัย อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวควรตีความเป็นแนวโน้มเบื้องต้น เนื่องจากข้อมูลยังไม่มีการทดลองซ้ำและมีจำนวนสูตรจำกัด



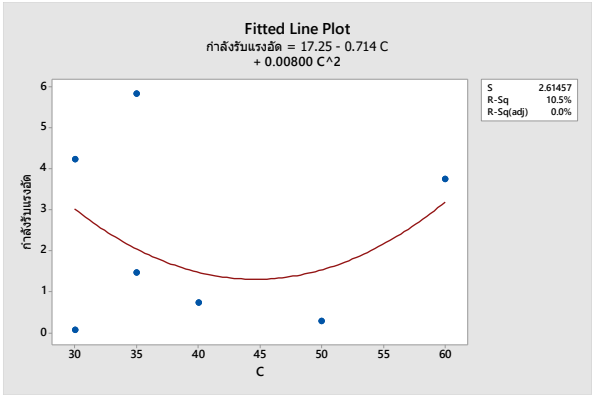
รูปที่ 3 ปัจจัย A:ปูนซีเมนต์ (%) กับ ค่ากำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4 ปัจจัย B:ใบอ้อย (%) กับ ค่ากำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 2 สมการถดถอยของแต่ละปัจจัย

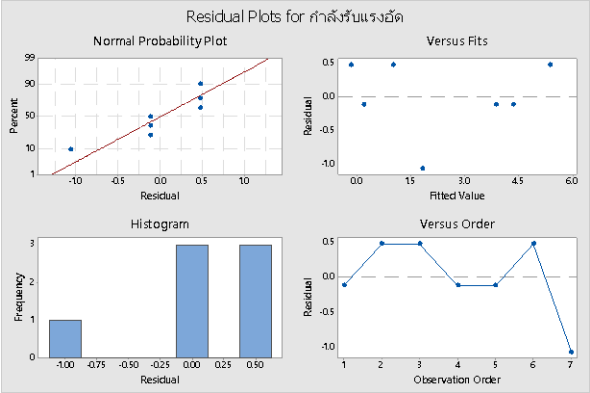
ปัจจัย	สมการถดถอย
A: ปูนซีเมนต์ (%)	$Y_A = 0.25 - 0.0178A + 0.001642A^2$
B: ใบอ้อย (%)	$Y_B = 6.933 - 0.3409B + 0.004384B^2$
C: เม็ดโฟม (%)	$Y_C = 17.25 - 0.714C + 0.00800C^2$



รูปที่ 5 ปัจจัย C: เม็ดโฟม (%) กับ ค่ากำลังรับแรงอัด

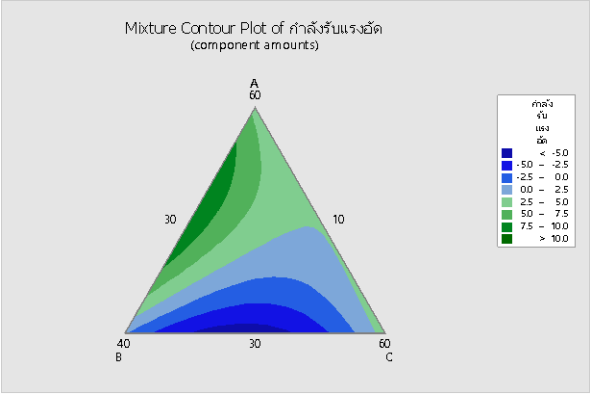
จากตารางที่ 2 เมื่อนำค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัยแทนในสมการถดถอย พบว่า ปัจจัย A: ปูนซีเมนต์ เมื่อ A=30 และ A=60 ให้ค่า Y_{A30} = 1.1938 MPa และ Y_{A60} = 5.0932 MPa ตามลำดับ ปัจจัย B: ใบอ้อย เมื่อ B=10 และ B=40 ให้ค่า Y_{B10} = 3.9624 MPa และ Y_{B40} = 0.3114 MPa ตามลำดับ และปัจจัย C: เม็ดโฟมโพลีสไตรีน เมื่อ C=30 และ C=60 ให้ค่า Y_{C30} = 3.0300 MPa และ Y_{C60} = 3.2100 MPa ตามลำดับ ผลดังกล่าวสนับสนุนแนวโน้มว่าปริมาณปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด ขณะที่ใบอ้อยในระดับสูงมีแนวโน้มลดกำลังรับแรงอัด ส่วนเม็ดโฟมมีผลต่อกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเมื่อพิจารณาแยกปัจจัยภายในช่วงการทดลองนี้ อย่างไรก็ตามค่าทางสถิติของแบบจำลองมีข้อจำกัดเนื่องจากจำนวนการทดลองมีน้อยและไม่มีข้อมูลซ้ำในแต่ละสูตร ดังรูปที่ 6 ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และผลจากกราฟเส้นถดถอยควรใช้เพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูลภายในช่วงการทดลองเท่านั้น ไม่ควรตีความว่าเป็นหลักฐานยืนยันเชิงสถิติที่สมบูรณ์ การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มจำนวนสูตรทดลอง และการทดลองซ้ำเพื่อให้สามารถประเมิน lack-of-fit ความแปรปรวนของการ

ทดลอง และความแม่นยำของแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual plot) ของค่ากำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 6 พบว่า แบบจำลองทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือ และสมมติฐานพื้นฐานของการวิเคราะห์ผ่านเกณฑ์โดยรวม และการวิเคราะห์อัตราส่วนผสมภายในช่วงการทดลอง ดังรูปที่ 7

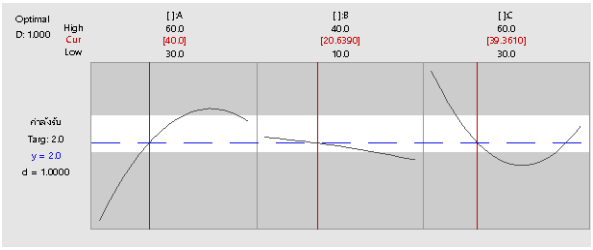


รูปที่ 7 กราฟ Mixture Contour Plot ของค่ากำลังรับแรงอัด

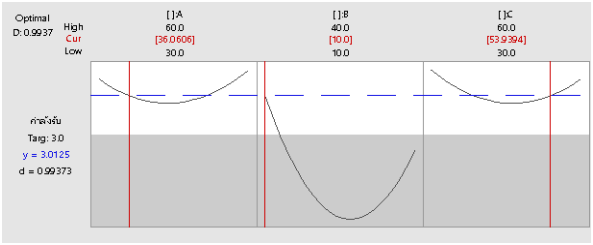
จากรูปที่ 7 กราฟ Mixture Contour Plot แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของ A, B และ C มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด โดยบริเวณที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงอยู่ในพื้นที่ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูงและควบคุมเม็ดโฟมโพลีสไตรีนไม่ให้สูงเกินไป ส่วนบริเวณที่มีปริมาณเม็ดโฟมสูงหรือปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า ผลการทดลองสามารถอธิบายได้จากกลไกของวัสดุผสม กล่าวคือ เม็ดโฟมโพลีสไตรีนช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีตแต่มีข้อจำกัดด้านการรับแรง ใบอ้อยในฐานะเส้นใยธรรมชาติอาจช่วยชะลอการแตกร้าวระดับจุลภาคในระดับที่เหมาะสม และปูนซีเมนต์ยังเป็นวัสดุประสานหลักที่กำหนดความแข็งแรงของเมทริกซ์ซีเมนต์ และผลเฉลยที่เหมาะสมถูกกำหนดจากค่าเป้าหมายของกำลังรับแรงอัด 2, 3 และ 4 MPa ภายใต้ช่วงค่าต่ำสุด 1 MPa ค่าสูงสุด 5 MPa และค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 โดยใช้โปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 8-10 โดยผลดังกล่าวเป็นการหาอัตราส่วนผสมที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเข้าใกล้เป้าหมาย ไม่ใช่สูตรที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ดังนั้น สูตร 50:15:35 ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในข้อมูลทดลอง และผลที่เหมาะสมที่สุดที่มีความค่าความพึงพอใจมากที่สุด Desirability optimization จึงควรพิจารณาตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับแนวคิดของคอนกรีตมวลเบาผสม EPS จะพบว่า การเพิ่มวัสดุน้ำหนักเบาประเภท EPS สามารถช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีต แต่มีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อใช้ในปริมาณสูง ขณะเดียวกันใบอ้อยในระดับที่เหมาะสมอาจช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการแตกร้าวของชิ้นงานได้ แต่เมื่อใช้ในปริมาณสูงอาจทำให้การยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ลดลงและเกิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพอื่น เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน

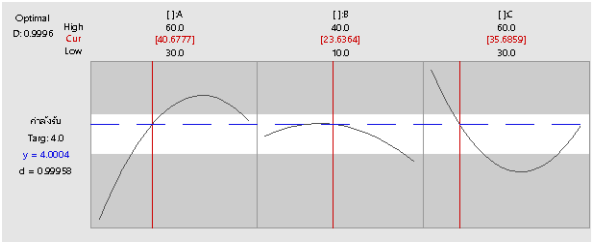
จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานจริง



รูปที่ 8 ผลเฉลยที่เหมาะสม A=40 B=20.64 และ C=39.36 ที่มีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability Function) เท่ากับ 100 %



รูปที่ 9 ผลเฉลยที่เหมาะสม A=36.06 B=10 และ C=53.94 ที่มีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability Function) เท่ากับ 99.37 %



รูปที่ 10 ผลเฉลยที่เหมาะสม A=40.68 B=23.64 และ C=35.69 ที่มีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability Function) เท่ากับ 99.96 %

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ใบอ้อยและเม็ดโฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้การออกแบบส่วนผสมแบบ และการวิเคราะห์สมการถดถอย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับกำลังรับแรงอัด ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ภายใต้ช่วงการทดลองนี้ ปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่มีแนวโน้มเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามากที่สุด เนื่องจากทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ประสานหลักของวัสดุ

2. การเพิ่มใบอ้อยในปริมาณสูงมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากอาจเกิดช่องว่าง การกระจุกตัวของเส้นใย และการลดความต่อเนื่องของเมทริกซ์ซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ใบอ้อยในระดับที่เหมาะสมอาจมีบทบาทต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของชิ้นงาน

3. เม็ดโฟมโพลีสไตรีนมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุน้ำหนักเบาสำหรับคอนกรีตมวลเบา แต่การใช้ในปริมาณสูงอาจลดความสามารถในการรับแรงของชิ้นงาน จึงต้องควบคุมสัดส่วนให้เหมาะสม

4. สูตรที่มีสัดส่วนปูนซีเมนต์:ใบอ้อย:เม็ดโฟมโพลีสไตรีน เท่ากับ 50:15:35 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในช่วงการทดลองนี้เท่ากับ 5.8387 MPa

5. ผลการที่เหมาะสม สำหรับค่าเป้าหมายกำลังรับแรงอัด 2, 3 และ 4 MPa แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่เสนอสามารถให้ค่าความพึงพอใจรวมสูงกว่า 99% จึงสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำหนดสูตรคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานไม่รับน้ำหนักมากภายในช่วงของปัจจัยที่ศึกษา

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือจำนวนสูตรทดลองและจำนวนตัวอย่างยังมีจำกัด อีกทั้งยังไม่ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบา เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ความ

ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความคงทนระยะยาว ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำ ตรวจสอบความเสถียรของแบบจำลอง ทดสอบสมบัติทางกายภาพและความทนทานเพิ่มเติม การปรับปรุงผิวใบอ้อยด้วยวิธีทางเคมีหรือกายภาพเพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ และการประเมินต้นทุนกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการศึกษาของเสียทางการเกษตรที่มีในท้องถิ่นนำมาเป็นวัสดุผสมในวัสดุคอมโพสิตซีเมนต์ [12] โดยสรุปงานวิจัยนี้เสนอกรอบการคัดเลือกอัตราส่วนผสมเบื้องต้นสำหรับการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาพัฒนาผลิตเป็นคอนกรีตมวลสำหรับงานก่อสร้างที่ไม่รับน้ำหนักต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Babu, D. S., and Babu, K. G. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research, 33(5), 755-762.

[2] Kan, A., and Demirboga, R. (2007). Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and density of lightweight concrete. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 14(2), 158-162.

[3] Sathiparan, N. (2015). Role of agricultural waste in the construction industry: A review. Journal of Material Cycles and Waste Management, 17(3), 543-563.

[4] Sales, A., and Lima, S. A. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as a partial replacement of cement. Journal of Materials in Civil Engineering, 22(11), 1114-1122.

[5] Chen, B., and Liu, J. (2013). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and Concrete Research, 52, 125-132.

[6] Sergsiri, S., Lawong, A., Sudsuansee, T., and VongtaVee, R. (2024). The influence in ratio of rice husk and polystyrene foam on the dehumidifying absorbability of lightweight concrete slab. Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation, 3(1), 67-75.

[7] Cornell, J. A. (2002). Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data (3rd ed.). John Wiley & Sons.

[8] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C., and Wold, S. (2000). Design of Experiments: Principles and Applications. Umetrics Academy.

[9] Myers, R. H., Montgomery, D. C., and Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product

Optimization Using Designed Experiments (4th ed.). John Wiley & Sons.

[10] Orji, S. E., Anya, U. C., and Ngwu, C. (2020). Models for predicting the compressive strength and cost of laterite-quarry dust concrete using extreme vertices design. The International Journal of Engineering and Science, 9(1), 1-6.

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2601-2556: คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อสร้าง. กระทรวงอุตสาหกรรม.

[12] Netinger Grubeša, I., Šamec, D., Juradin, S., & Hadzima-Nyarko, M. (2025). Utilizing Agro-Waste as Aggregate in Cement Composites: A Comprehensive Review of Properties, Global Trends, and Applications. Materials, 18(10), 2195. https://doi.org/10.3390/ma18102195

การวิเคราะห์ผลกระทบจากราคาน้ำมันที่ผันผวนต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการไทย กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา

An Analysis of Fuel Price Volatility Impacts on Transportation Mode Choice Decisions of Thai Entrepreneurs: Case Study of AAA Nakhon Ratchasima Community Enterprise

ศุภกฤต พริ้วไธสง*

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
84 หมู่ 4 ถ.มิตรภาพ-หนองคาย ต.บ้านเกาะ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: Chon_ok@hotmail.com, 0922693643

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีต่อต้นทุนและการตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่งของวิสาหกิจชุมชน ตลอดจนเสนอแนวทางบรรเทาผลกระทบด้านโลจิสติกส์ โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณร่วมกับการวิเคราะห์เชิงพรรณนา เก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิจากการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้มีอำนาจตัดสินใจด้านการขนส่ง และข้อมูลทุติยภูมิจากบันทึกการดำเนินงานย้อนหลัง 12 เดือน (เมษายน พ.ศ. 2568 – มีนาคม พ.ศ. 2569) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น และการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล เพื่อประเมินพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการขนส่งภายใต้ความไม่แน่นอนของราคาพลังงาน ผลการวิจัยพบว่า ราคาน้ำมันมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมากกับต้นทุนการขนส่ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.995 และสมการถดถอยเชิงเส้น คือ Y=12000+1075X สะท้อนว่าการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งสูงขึ้นอย่างชัดเจน ผู้ประกอบการจึงปรับกลยุทธ์ด้านโลจิสติกส์ด้วยการลดจำนวนเที่ยวขนส่ง เพิ่มระยะทางเฉลี่ยต่อเที่ยว และเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งจากรถกระบะไปสู่การขนส่งแบบรวมเที่ยวและการใช้บริการขนส่งเอกชน ผลการจำลองสถานการณ์ชี้ให้เห็นว่า การวางแผนเส้นทาง การรวมเที่ยวขนส่ง และการใช้ระบบขนส่งร่วม สามารถช่วยลดผลกระทบจากความผันผวนของราคาน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและบริหารจัดการโลจิสติกส์สำหรับวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการ SMEs ภายใต้ภาวะต้นทุนพลังงานที่ไม่แน่นอน

คำสำคัญ: ราคาน้ำมันผันผวน, การตัดสินใจเลือกระบบขนส่ง, โลจิสติกส์วิสาหกิจชุมชน, การจำลองสถานการณ์

Abstract

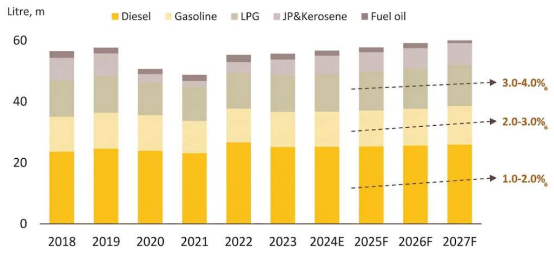
This study examines the impact of fuel price volatility on transportation costs and transport mode choice decisions of a community enterprise, and proposes strategies to mitigate logistics-related impacts. A quantitative research approach combined with descriptive analysis was employed. Primary data were collected through in-depth interviews with key decision-makers responsible for transportation operations, while secondary data were derived from 12-month operational records (April 2025 – March 2026). Data analysis utilized descriptive statistics, Pearson correlation analysis, linear regression, and

Monte Carlo simulation to evaluate transport mode choice behavior under conditions of energy price uncertainty. The findings revealed that fuel prices had a very strong positive relationship with transportation costs ($r = 0.995$, $Y=12000+1075X$), indicating that increases in fuel prices significantly elevated transportation costs. In response, the enterprise adjusted its logistics strategies by reducing delivery frequency, increasing the average delivery distance per trip, and transitioning from pickup truck transportation to freight consolidation and third-party logistics services to reduce operating costs and enhance efficiency. Simulation results further confirmed that route optimization, freight consolidation, and shared transportation systems are effective strategies for mitigating the adverse effects of fuel price volatility. The findings offer practical guidelines for logistics planning and transportation management for community enterprises and SMEs operating under conditions of uncertain energy costs.

Keywords: Fuel Price Volatility, Transport Mode Choice, Community Enterprise Logistics, Simulation

1. บทนำ

วิกฤตการณ์ราคาน้ำมันโลกในปัจจุบันเป็นผลสืบเนื่องจากสมการความขัดแย้งทางภูมิรัฐศาสตร์ที่ซับซ้อน โดยเฉพาะความตึงเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างสหรัฐอเมริกา อิสราเอล และอิหร่าน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเปราะบางของระบบเศรษฐกิจโลกในยุคสมัยนี้ ปรากฏการณ์ที่ราคาน้ำมันดิบพุ่งทะยานขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลายระลอก มิได้เกิดจากภาวะอุปทานที่ขาดแคลนจริงในระบบเสมอไป หากแต่ถูกขับเคลื่อนด้วยความตื่นตระหนกและ “ส่วนเพิ่มความเสี่ยงทางด้านภูมิรัฐศาสตร์” (Geopolitical risk premium) ที่ตลาดทุนได้บวกเพิ่มเข้าไปในสัญญาล่วงหน้าเพื่อป้องกันความเสี่ยงจากภาวะสงคราม [1] ภาวะการณ์ดังกล่าวได้สร้างคลื่นกระแทกที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อประเทศผู้นำเข้าพลังงานทั่วโลก ทำให้เกิดสภาวะเงินเฟ้อ ต้นทุนการผลิตและโลจิสติกส์เพิ่มสูงขึ้นเป็นทวีคูณ ตลอดจนนำไปสู่การชะลอตัวของการเติบโตทางเศรษฐกิจ สำหรับประเทศไทย ภาครัฐได้พยายามบรรเทาผลกระทบโดยการใช้กลไกกองทุนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าอุดหนุนราคามาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2568 อย่างไรก็ตาม ด้วยแนวโน้มราคาน้ำมันในตลาดโลกที่ยังคงปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง รัฐบาลจึงไม่อาจแบกรับภาระทางการคลังได้อีกต่อไป และนำไปสู่การประกาศนโยบายลอยตัวราคาน้ำมันดีเซลในช่วงต้นปี พ.ศ. 2569 ในที่สุด [2] ท่ามกลางวิกฤตด้านราคาพลังงาน ความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงภายในประเทศกลับยังมีทิศทางขยายตัว โดยมีการพยากรณ์ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงว่าในช่วงปี พ.ศ. 2568-2570 ความต้องการใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซินจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.0-2.0 และ 2.0-3.0 ต่อปีตามลำดับ ในขณะที่การใช้น้ำมันอากาศยาน (Jet) จะเติบโตอย่างมีนัยสำคัญเฉลี่ยร้อยละ 5.0-10.0 ต่อปี [3] ดังรูปที่ 1 ทิศทางดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมยังคงต้องพึ่งพาการขนส่งเป็นฟันเฟืองสำคัญในการขับเคลื่อน แต่ต้องเผชิญกับข้อจำกัดด้านต้นทุนพลังงานที่ผันผวน



รูปที่ 1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแยกตามประเภท (หน่วย: ล้านลิตร) [3]

การปรับตัวเพื่อรับมือกับความท้าทายนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในระดับเศรษฐกิจฐานรากและวิสาหกิจชุมชน ซึ่งภาครัฐได้ให้ความสำคัญกับการยกระดับสินค้าเกษตรสู่เกษตรอุตสาหกรรม ในปีงบประมาณ 2568 ศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 6 กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ได้บูรณาการความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล โดยมอบหมายให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ดำเนินกิจกรรมการพัฒนาเทคโนโลยีเกษตรอุตสาหกรรมอัจฉริยะ เพื่อให้คำปรึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้แก่วิสาหกิจชุมชน [4] หนึ่งในกิจการเป้าหมายที่มีศักยภาพสูงคือ "วิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา" ภายใต้กลุ่มอาชีพสหกรณ์ผัดหมี่เมืองปัก เป็นอีกหนึ่งสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดนครราชสีมาที่ได้รับการส่งเสริมสนับสนุนจากภาครัฐ โดยมีสมาชิกทั้งหมด 30 คน ซึ่งก่อตั้งมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ปัจจุบันมีกำลังการผลิตสูงถึง 1,800,000 ห่อต่อปี โดยมีจุดแข็งด้านคุณภาพสินค้าที่เป็นผลิตภัณฑ์ OTOP ชั้นดี รสชาติกลมกล่อม และเก็บรักษาได้นาน ส่งผลให้สามารถขยายตลาดจากระดับท้องถิ่นไปสู่การมีตัวแทนจำหน่ายในวงกว้าง

อย่างไรก็ตาม แม้วิสาหกิจชุมชนแห่งนี้จะมีศักยภาพในการผลิตสูง แต่ปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่สุดในปัจจุบันที่ส่งผลกระทบต่อขีดความสามารถในการแข่งขันคือ "ระบบการขนส่งและโลจิสติกส์" เพื่อกระจายสินค้า ต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นจากการลอยตัวราคาได้กลายเป็นตัวแปรสำคัญที่บีบคั้นกำไรและส่งผลต่อความอยู่รอดทางธุรกิจ จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า งานศึกษาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับผลกระทบของราคาน้ำมันต่อภาคเศรษฐกิจ ภาคขนส่ง และต้นทุนโลจิสติกส์ในระดับมหภาค หรือมุ่งเน้นผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นหลัก ขณะที่การศึกษาผลกระทบของความผันผวนของราคาน้ำมันต่อวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการรายย่อยยังมีอยู่อย่างจำกัด ทั้งที่กลุ่มดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านเงินทุน เทคโนโลยี และอำนาจต่อรองด้านค่าขนส่งมากกว่าธุรกิจขนาดใหญ่ ความผันผวนของราคาน้ำมันจึงอาจส่งผลโดยตรงต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่ง ต้นทุนการกระจายสินค้า กำไร และความสามารถในการแข่งขันของกิจการ ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจพฤติกรรมและการตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่ง (Choice behavior) ของผู้ประกอบการภายใต้ความผันผวนของราคาน้ำมัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยศึกษากรณีวิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา ซึ่งเป็นวิสาหกิจชุมชนที่มีศักยภาพด้านการผลิต มีการขยายตลาดจากระดับท้องถิ่นสู่ตัวแทนจำหน่ายในวงกว้าง และมีความจำเป็นต้องพึ่งพาระบบขนส่งเพื่อกระจายสินค้าอย่างต่อเนื่อง การเลือกกรณีศึกษานี้จึงมีความเหมาะสม เนื่องจากสามารถสะท้อนปัญหาและแนวทางการปรับตัวของผู้ประกอบการรายย่อยภายใต้สถานการณ์ราคาน้ำมันที่ผันผวนได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาความผันผวนของราคาน้ำมันที่มีผลต่อต้นทุนขนส่ง

2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการ

2.3 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนขนส่งภายใต้ระดับราคาน้ำมันต่าง ๆ

2.4 เพื่อเสนอแนวทางลดผลกระทบด้านโลจิสติกส์ให้วิสาหกิจชุมชน

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sriphrabu, P., & Chamnanlor, C. [5] ศึกษาการบริหารปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับธุรกิจ Freight Forwarder พบว่า การพยากรณ์ความต้องการใช้น้ำมันและการควบคุมจุดสั่งซื้อช่วยลดต้นทุนรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นว่าการบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นกลยุทธ์สำคัญต่อธุรกิจขนส่งในช่วงราคาน้ำมันผันผวน

Ayasanond et al. [6] เปรียบเทียบต้นทุนรวมและระยะเวลาขนส่งระหว่างการขนส่งทางอากาศกับระบบขนส่งหลายรูปแบบในประเทศไทย พบว่า การเลือกวิธีขนส่งของผู้ประกอบการขึ้นอยู่กับ ต้นทุนรวม ความรวดเร็ว และมูลค่าสินค้า โดยสินค้าที่ไม่เร่งด่วนมักเลือก multimodal transport เพื่อประหยัดต้นทุน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าผู้ประกอบการจะปรับระบบขนส่งตามแรงกดดันด้านต้นทุน เช่น ราคาน้ำมันที่สูงขึ้น

Siridhara et al. [7] ศึกษาการเลือกรูปแบบการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ของสินค้าเกษตรแปรรูปในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยใช้แบบจำลอง Binary Logit พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเลือกวิธีขนส่ง ได้แก่ ต้นทุน เวลา ความตรงต่อเวลา ความพร้อมด้านตารางขนส่ง และระยะห่างจากโรงงานถึงสถานีรถไฟ งานวิจัยนี้สะท้อนว่าผู้ประกอบการในภาคอีสานให้ความสำคัญกับต้นทุนและความสะดวก ซึ่งสอดคล้องกับกรณีของวิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา

วชิระ วิจิตรพงษา และคณะ [8] ได้ศึกษา การพัฒนาแบบจำลองฟัซซีแรนดอมยูทิลิตี ซึ่งเป็นการขยายผลจากทฤษฎีอรรถประโยชน์แบบสุ่มแบบดั้งเดิม เพื่อจัดการกับความคลุมเครือ (Fuzziness) และความไม่แน่นอนของข้อมูลในการตัดสินใจ การศึกษานี้ให้มุมมองที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ที่ตัวแปรด้านต้นทุน (เช่น ราคาน้ำมัน) มีความผันผวนสูงและยากต่อการพยากรณ์อย่างแม่นยำ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ราคาน้ำมัน ต้นทุนขนส่ง เวลาในการจัดส่ง และความน่าเชื่อถือของระบบขนส่งจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการ โดยเฉพาะธุรกิจ SMEs และวิสาหกิจชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านต้นทุน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสำคัญในการเสนอแนวทางลดต้นทุนโลจิสติกส์และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันอย่างยั่งยืน

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ออกแบบการศึกษาในลักษณะกรณีศึกษาร่วมกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยใช้ข้อมูลปฐมภูมิจากการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้มีอำนาจตัดสินใจ และข้อมูลทุติยภูมิจากฐานข้อมูลการดำเนินงานจริงของวิสาหกิจ เพื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์และสถิติสำหรับพยากรณ์พฤติกรรมการ

ESTACON 2026 | 17th

ตัดสินใจเลือกระบบขนส่งภายใต้ความไม่แน่นอนของต้นทุน

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง (Population and Sample)

ประชากร คือข้อมูลเส้นทางและรอบการจัดส่งสินค้าทั้งหมดของวิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา ไปยังตัวแทนจำหน่ายและร้านค้าต่างๆ และกลุ่มตัวอย่าง ใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง โดยคัดเลือกผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการตัดสินใจด้านขนส่งและต้นทุน จำนวนประมาณ 30 คน

4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เก็บรวบรวมผ่านการสัมภาษณ์ผู้บริหารและผู้ปฏิบัติงานด้านการกระจายสินค้า เพื่อดึงข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับข้อจำกัดและเงื่อนไขในการทำงาน เช่น แบบสอบถามความคิดเห็น การสัมภาษณ์เชิงลึก การสังเกตกระบวนการจัดส่งสินค้า และข้อมูลต้นทุนการขนส่งจากผู้ประกอบการย้อนหลัง 12 เดือน

2) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) รวบรวมจากเอกสารและฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ เช่น ราคาน้ำมันย้อนหลังจาก สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และ ปตท. โออาร์ สถิติการใช้พลังงานจาก สำนักงานกองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง (สกนช.) เอกสารต้นทุนกิจการ งานวิจัย วารสาร และบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) สถิติเชิงพรรณนา ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป ได้แก่ ความถี่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation Coefficient) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างราคาน้ำมันกับต้นทุนขนส่ง

$$r = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \qquad (1)$$

หากค่า r ใกล้ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกสูง โดยที่

Y คือ ต้นทุนขนส่ง

X คือ ราคาน้ำมัน

n คือ จำนวนข้อมูล

3) การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ใช้ทำนายต้นทุนขนส่งจากราคาน้ำมัน

$$Y = a + bX \qquad (2)$$

4.4 การจำลองสถานการณ์ การทวนสอบและการรับรองความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

การจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ใช้ในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของราคาน้ำมันและผลต่อต้นทุน โดยสุ่มค่าราคาน้ำมันในช่วงต่าง ๆ และคำนวณต้นทุนขนส่งซ้ำหลายรอบ เพื่อประเมินความเสี่ยงและแนวโน้มการเปลี่ยนระบบขนส่ง [9] การกำหนดการแจกแจงของตัวแปร เนื่องจากข้อมูลที่ใช้มีจำนวน 12 เดือน และยังไม่มากพอสำหรับการพิสูจน์รูปแบบการแจกแจงที่ซับซ้อน เช่น การแจกแจงปกติหรือ การแจกแจงแบบลอกนอร์มอล งานวิจัยจึงสามารถกำหนดให้ราคาน้ำมันอยู่ในรูปแบบการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ ในช่วงค่าที่กำหนด เหตุผลคือ ราคาน้ำมันมีความไม่แน่นอนและผู้วิจัยต้องการให้ทุกค่าภายในช่วงราคาที่เป็นไปได้มีโอกาสถูกสุ่มเท่าๆ กัน การใช้การแจกแจงแบบสม่ำเสมอ จึงเหมาะสมในกรณีที่ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติอย่างชัดเจน เพื่อให้

แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) การทวนสอบ (Verification) ตรวจสอบความถูกต้องของสูตรคำนวณ ขั้นตอนสุ่มตัวแปร โปรแกรมหรือสมการไม่มีข้อผิดพลาด พร้อมตรวจสอบ Logic การเลือกระบบขนส่งสมเหตุสมผลได้ระหว่างการจำลอง

2) การรับรองความน่าเชื่อถือ (Validation) เปรียบเทียบผลลัพธ์ จากแบบจำลองกับข้อมูลจริงภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สอดคล้องกับทฤษฎีเศรษฐศาสตร์และโลจิสติกส์ โดยการทดสอบทางสถิติ

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตรวจสอบแบบจำลอง

ประเด็นตรวจสอบ	เกณฑ์เชิงปริมาณ	ความหมาย
ความสัมพันธ์ระหว่างราคาน้ำมันกับต้นทุนขนส่ง	Pearson's r ≥ 0.70 และ p-value < 0.05	แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ

4.5 เกณฑ์การเลือกระบบขนส่ง

กำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการตามภาวะราคาน้ำมันดังนี้

ตารางที่ 2 เกณฑ์การตัดสินใจเลือกระบบขนส่ง

ราคาน้ำมัน(บาท)	ระบบที่เลือก
ต่ำกว่า 34	รถกระบะ
34 – 36.9	รถบรรทุกรวมเที่ยว
37 ขึ้นไป	ขนส่งเอกชน

หลักการนี้สะท้อนได้ถึงพฤติกรรมผู้ประกอบการที่ต้องการลดต้นทุนเมื่อราคาน้ำมันสูงขึ้น

5. ผลการดำเนินการ

5.1 ผลจากการเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยในครั้งนี้ มุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนและประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของวิสาหกิจชุมชน AAA ในอำเภอปักธงชัย จ.นครราชสีมา โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิย้อนหลังเป็นระยะเวลา 12 เดือน (ตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2568 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2569) ข้อมูลดังกล่าวถูกรวบรวมอย่างเป็นระบบจากเอกสารหลักฐานการดำเนินงานจริงของกิจการ ประกอบด้วย ใบเสร็จค่าน้ำมัน รายงานการจัดส่งสินค้า สมุดบันทึกการเดินรถ และรายงานต้นทุนรายเดือน ร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการและผู้รับผิดชอบด้านขนส่ง ซึ่งข้อมูลที่เก็บรวบรวมประกอบด้วย ราคาน้ำมันเฉลี่ย จำนวนเที่ยวส่งสินค้า ระยะทางเฉลี่ยต่อเที่ยว ระยะทางรวม ปริมาณสินค้าที่จัดส่ง ปริมาณน้ำมันที่ใช้ ค่าน้ำมัน ค่าแรงคนขับ ค่าซ่อมบำรุง และระบบขนส่งที่เลือกใช้ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อนต้นทุนและประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของกิจการ

เพื่อเป็นหลักประกันด้านความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล (Data Reliability) ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยวิธีการทวนสอบ (Verification) โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันของตัวแปรทางคณิตศาสตร์ 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่

ระยะทางรวม = จำนวนเที่ยวส่งสินค้า x ระยะทางเฉลี่ยต่อเที่ยว

และตรวจสอบค่าน้ำมันจากสูตร

ค่าน้ำมัน = น้ำมันที่ใช้ x ราคาน้ำมันเฉลี่ย

ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลต้นทุนการขนส่งในรอบ 12 เดือนปรากฏดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลต้นทุนการขนส่งย้อนหลัง 12 เดือน

เดือน/ปี	ราคาน้ำมันเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	จำนวนเที่ยวส่งสินค้า	ระยะทางเฉลี่ย/เที่ยว (กม.)	ระยะทางรวม (กม.)	ปริมาณสินค้า (ห่อ)	น้ำมันที่ใช้ (ลิตร)	ค่าน้ำมัน (บาท)	ค่าแรง/คนขับ (บาท)	ค่าซ่อมบำรุง (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)
เม.ย. 68	31.8	19	205	3,895	142,000	705	22,419	9,000	2,300	36,200
พ.ค. 68	32.4	19	210	3,990	145,000	718	23,263	9,200	2,500	37,100
มิ.ย. 68	33.1	18	220	3,960	148,000	742	24,560	9,400	2,600	38,500
ก.ค. 68	34.5	18	225	4,050	151,000	760	26,220	9,700	2,900	42,800
ส.ค. 68	35.2	17	230	3,910	154,000	785	27,632	10,000	3,000	45,200
ก.ย. 68	35.8	17	235	3,995	156,000	802	28,712	10,100	3,200	46,900
ต.ค. 68	36.4	16	245	3,920	159,000	820	29,848	10,300	3,300	49,600
พ.ย. 68	37.1	16	248	3,968	161,000	845	31,350	10,500	3,500	53,200
ธ.ค. 68	37.8	15	252	3,780	165,000	870	32,886	10,800	3,800	55,900
ม.ค. 69	38.2	15	255	3,825	168,000	895	34,189	11,000	4,000	58,100
ก.พ. 69	38.5	15	258	3,870	170,000	910	35,035	11,200	4,100	59,300
มี.ค. 69	39.0	14	260	3,640	173,000	935	36,465	11,500	4,300	61,800

5.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ปัจจุบันด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของราคาน้ำมันที่มีความผันผวนต่อระบบขนส่งของกิจการ เนื่องจากราคาน้ำมันเป็นตัวแปรที่ไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การใช้ข้อมูลจำลองช่วยให้สามารถประเมินสถานการณ์ได้หลายรูปแบบภายใต้ความเสี่ยง แนวคิดของวิธีนี้คือ การกำหนดช่วงค่าของตัวแปรสำคัญ แล้วสุ่มข้อมูลหลายๆ รอบเพื่อสะท้อนความเป็นจริง โดยตัวแปรที่นำมาใช้ในการจำลองจำนวน 20 รอบเนื่องจากเป็นจำนวนที่เหมาะสำหรับการนำเสนอเชิงตัวอย่างหรือการวิเคราะห์เบื้องต้น เพราะสามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน ต้นทุน และระบบขนส่งที่เลือกใช้ได้อย่างเข้าใจง่าย ซึ่งประกอบด้วยราคาน้ำมัน (บาทต่อลิตร), จำนวนรอบจัดส่ง (รอบต่อเดือน), ระยะทางขนส่ง (กิโลเมตร/รอบ), ต้นทุนขนส่ง (บาท/เดือน) และ ระบบขนส่ง (รูปแบบที่เลือก) โดยผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์

รอบที่	ราคาน้ำมัน	จำนวนรอบส่งสินค้า	ระยะทาง	ต้นทุน/เดือน (บาท)	ระบบขนส่ง
1	32.1	18	210	43,200	ก
2	33.4	18	220	45,000	ก
3	35.2	17	230	49,500	บ
4	36.1	16	245	52,300	บ
5	37.4	15	250	55,600	อ
6	38.2	15	255	57,100	อ
7	34.8	17	225	48,100	บ
8	31.9	19	205	42,800	ก
9	33.0	18	215	44,300	ก
10	35.9	17	240	50,900	บ
11	36.7	16	248	53,200	บ
12	37.8	15	252	56,000	อ

13	38.6	15	260	58,400	อ
14	34.2	17	228	47,300	บ
15	32.8	18	214	44,000	ก
16	35.5	17	236	50,200	บ
17	36.3	16	242	52,800	บ
18	37.1	15	250	55,200	อ
19	33.7	18	220	45,700	ก
20	31.5	19	200	41,900	ก

หมายเหตุ: ก=รถกระบะ, บ=รถบรรทุกรวมเที่ยว, อ=ขนส่งเอกชน

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังตารางที่ 4 บ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบแปรผันตาม (Positive Correlation) ระหว่างระดับราคาน้ำมันเชื้อเพลิงและต้นทุนการขนส่งรวม ในขณะเดียวกันกลับพบความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน (Negative Correlation) กับความถี่หรือจำนวนรอบของการจัดส่งสินค้า ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายการเชื่อมโยงของปัจจัยต่าง ๆ ผ่านหลักการบริหารจัดการโลจิสติกส์ได้ดังประเด็นต่อไปนี้

1) แรงกดดันจากต้นทุนพลังงาน

จากการวิเคราะห์ค่าสถิติพื้นฐานพบว่า ค่าเฉลี่ยของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงอยู่ที่ระดับ 35.31 บาทต่อลิตร ซึ่งเป็นอัตราที่สะท้อนถึงภาวะต้นทุนพลังงานในระดับปานกลางถึงสูง ปัจจัยมหภาคนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างต้นทุนของธุรกิจ (Cost Structure) ทำให้ต้นทุนการขนส่งเฉลี่ยขยับตัวไปอยู่ที่ 49,875 บาทต่อเดือน ตัวเลขดังกล่าวถือเป็นสัดส่วนต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของวิสาหกิจชุมชน ซึ่งหากขาดการบริหารจัดการอย่างรัดกุม จะส่งผลกระทบเชิงลบต่ออัตรากำไรสุทธิ (Net Profit Margin) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2) การปรับตัวเชิงกลยุทธ์ด้านการปฏิบัติการ

เพื่อบรรเทาผลกระทบจากความผันผวนของต้นทุน กิจการได้ตอบสนองด้วยการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์การปฏิบัติการอย่างเป็นระบบ โดยพบว่าจำนวนรอบของการส่งสินค้าลดลงเหลือเฉลี่ยเพียง 16.8 รอบต่อเดือน (ลดลงจากภาวะสภาวะปกติที่อยู่ในระดับ 18–20 รอบต่อเดือน) พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงการนำแนวคิด การรวมเที่ยวการจัดส่ง (Freight Consolidation) และ การหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเที่ยววิ่ง (Routing Optimization) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ระวาง (Capacity Utilization) ให้คุ้มค่าสูงสุดในแต่ละรอบการเดินทาง

5.3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ผลการประเมินความถี่ในการเลือกระบบขนส่งสามารถอธิบายความเชื่อมโยงระหว่างรูปแบบการขนส่ง บริบททางธุรกิจ และความผันผวนของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างเป็นระบบ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความถี่ของการเลือกระบบขนส่ง

ระบบขนส่ง	จำนวนครั้ง	ร้อยละ
รถกระบะ	7	35%
รถบรรทุกรวมเที่ยว	8	40%
ขนส่งเอกชน	5	25%
รวม	20	100%

จากตารางที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า รถบรรทุกรวมเที่ยว เป็นระบบขนส่งที่ถูกเลือกใช้มากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 40 ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ตามหลักการประหยัดต่อขนาด (Economies of Scale) ทางด้านโลจิสติกส์ โดยผู้ประกอบการจะตัดสินใจเลือกใช้แนวทางนี้เมื่อราคา

น้ำมันเชื้อเพลิงอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากเป็นกลยุทธ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบรรทุกสูงสุด และสามารถลดต้นทุนการขนส่งต่อหน่วย (Unit Cost) ได้อย่างเป็นรูปธรรม รองลงมาคือการเลือกใช้ รถกระบะ ซึ่งมีสัดส่วนอยู่ที่ร้อยละ 35 การตัดสินใจเลือกใช้ระบบขนส่งประเภทนี้ สะท้อนให้เห็นถึงความต้องการความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงานสูงและความเหมาะสมกับการกระจายสินค้าในปริมาณน้อย (Small-lot Delivery) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในมิติของต้นทุน แนวทางนี้จะให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดก็ต่อเมื่อราคาน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดอยู่ในระดับต่ำเท่านั้น ในขณะที่การใช้บริการขนส่งเอกชน (Third-Party Logistics) เป็นทางเลือกที่มีสัดส่วนน้อยที่สุดคือร้อยละ 25 แต่ทว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงกลยุทธ์การบริหารความเสี่ยง (Risk Management) โดยระบบนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อสถานการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงปรับตัวสูงขึ้นจนถึงระดับวิกฤต ผู้ประกอบการจะใช้กลยุทธ์การถ่ายโอนความเสี่ยงทางต้นทุน ด้วยการเปลี่ยนรูปแบบของต้นทุนผันแปร (Variable Costs) ที่ควบคุมได้ยาก เช่น ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ให้กลายเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed Costs) ในรูปแบบของค่าจ้างเหมาบริการขนส่งภายนอกแทน

5.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์

5.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาน้ำมันกับต้นทุนขนส่ง

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสหสัมพันธ์ (Correlations)

ตัวแปร	Pearson Correlation (r)	Sig. (2-tailed)
ราคาน้ำมัน ↔ ต้นทุนขนส่ง	0.995	< 0.001

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน พบว่า ราคาน้ำมันมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมากกับต้นทุนการขนส่ง (r=0.995) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.001) ข้อมูลดังกล่าวเป็นประจักษ์แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับราคาน้ำมันในตลาดปรับตัวสูงขึ้น ต้นทุนการขนส่งของวิสาหกิจชุมชนก็จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยอย่างชัดเจน

5.4.2 สมการถดถอยเชิงเส้น

เมื่อนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้น(Linear Regression)เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณจะได้สมการดังนี้

Y=12000+1075X

(โดยที่ Y คือ ต้นทุนขนส่งต่อเดือน และ X คือ ราคาน้ำมัน)

จากการแปลผลสมการ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 1,075 ซึ่งอธิบายได้ว่า หากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงปรับตัวสูงขึ้น 1 บาทต่อลิตร จะส่งผลให้วิสาหกิจชุมชนมีภาระต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้นเฉลี่ยถึง 1,075 บาทต่อเดือน

5.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาน้ำมันกับการเลือกขนส่ง

การปรับตัวเชิงกลยุทธ์ในการตัดสินใจเลือกระบบขนส่ง เมื่อนำผลการวิเคราะห์ต้นทุนมาเชื่อมโยงกับพฤติกรรมการเลือกระบบขนส่ง พบว่าผู้ประกอบการมีการปรับตัวเชิงกลยุทธ์ (Strategic Adaptation) เพื่อรับมือกับความผันผวนของต้นทุนพลังงานอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 สภาวะ ดังนี้

1) สภาวะราคาน้ำมันต่ำ ผู้ประกอบการจะเลือกใช้ รถกระบะ ในการดำเนินงานขนส่ง

2) สภาวะราคาน้ำมันปานกลาง ผู้ประกอบการจะเปลี่ยนมาใช้กลยุทธ์ การรวมเที่ยววิ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประหยัดต้นทุนต่อหน่วย

3) สภาวะราคาน้ำมันสูง ผู้ประกอบการจะตัดสินใจถ่ายโอนความเสี่ยง โดยการจ้างบริษัทขนส่งเอกชน (Outsource) แทนการขนส่งด้วยตนเอง

6. สรุปและแนวทางลดผลกระทบ

6.1 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลกระทบจากราคาน้ำมันที่ผันผวนต่อการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของผู้ประกอบการไทย กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชน AAA นครราชสีมา พบว่าราคาน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างต้นทุนด้านโลจิสติกส์และการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งของวิสาหกิจชุมชนอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการเก็บรวบรวมข้อมูลต้นทุนการขนส่งย้อนหลัง 12 เดือน แสดงให้เห็นว่าราคาน้ำมันเฉลี่ยปรับตัวเพิ่มขึ้นจาก 31.8 บาทต่อลิตร เป็น 39.0 บาทต่อลิตร ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งรวมเพิ่มขึ้นจาก 36,200 บาทต่อเดือน เป็น 61,800 บาทต่อเดือนตามลำดับ คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 70.72% นอกจากนี้ ยังพบว่าผู้ประกอบการมีการปรับตัวเชิงกลยุทธ์ด้านการดำเนินงานเพื่อลดผลกระทบจากต้นทุนพลังงาน โดยจำนวนเที่ยวส่งสินค้าลดลงจากระดับเฉลี่ย 19 เที่ยวต่อเดือน เหลือเพียง 14–16 เที่ยวต่อเดือน ขณะที่ระยะทางเฉลี่ยต่อเที่ยวกลับเพิ่มสูงขึ้นจาก 205 กิโลเมตรต่อเที่ยว เป็น 260 กิโลเมตรต่อเที่ยว สะท้อนถึงการนำแนวคิดการรวมเที่ยวขนส่ง (Freight Consolidation) และการวางแผนเส้นทางเดินรถมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พื้นที่บรรทุกและลดต้นทุนเชื้อเพลิงต่อหน่วย

ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีมอนติคาร์โลจำนวน 20 รอบ ยังแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับราคาน้ำมันอย่างเป็นระบบ กล่าวคือ ในช่วงที่ราคาน้ำมันอยู่ในระดับต่ำ ผู้ประกอบการจะเลือกใช้รถกระบะเนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงและเหมาะกับการกระจายสินค้าปริมาณน้อย แต่เมื่อราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นสู่ระดับปานกลาง ผู้ประกอบการจะเปลี่ยนมาใช้รถบรรทุกรวมเที่ยวเพื่อลดต้นทุนต่อหน่วย และเมื่อราคาน้ำมันเข้าสู่ระดับสูง ผู้ประกอบการจะตัดสินใจใช้บริการขนส่งเอกชนเพื่อถ่ายโอนความเสี่ยงด้านต้นทุนไปยังผู้ให้บริการภายนอก

ผลการวิเคราะห์ความถี่ของการเลือกระบบขนส่ง พบว่า รถบรรทุกรวมเที่ยวเป็นระบบที่ถูกเลือกใช้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 40 รองลงมาคือรถกระบะร้อยละ 35 และขนส่งเอกชนร้อยละ 25 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผู้ประกอบการให้ความสำคัญกับการลดต้นทุนต่อหน่วยและการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ภายใต้ภาวะความผันผวนของต้นทุนพลังงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าราคาน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อระบบโลจิสติกส์ของผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าผู้ประกอบการไม่ได้ตอบสนองต่อความผันผวนของราคาน้ำมันเพียงในเชิงต้นทุนเท่านั้น แต่ยังมีการปรับตัวเชิงกลยุทธ์ผ่านการบริหารจัดการเที่ยววิ่ง การรวมเที่ยวขนส่ง และการเลือกใช้ระบบขนส่งที่เหมาะสมกับสถานการณ์ด้านพลังงานในแต่ละช่วงเวลา และการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลยังช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบจากความไม่แน่นอนของราคา

น้ำมันในหลายสถานการณ์ ทำให้การวางแผนด้านโลจิสติกส์มีความแม่นยำและสามารถรองรับความเสี่ยงได้ดียิ่งขึ้น

6.2 แนวทางลดผลกระทบจากราคาน้ำมันในด้านโลจิสติกส์ให้วิสาหกิจชุมชนดำเนินการ สามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทางหลัก ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้กลยุทธ์การรวมเที่ยวการจัดส่ง (Freight Consolidation) และการหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเที่ยววิ่ง (Routing Optimization) ควรวางแผนรวมจุดส่งสินค้าในพื้นที่ใกล้เคียงให้อยู่ในเที่ยววิ่งเดียวกัน เพื่อลดจำนวนเที่ยวขนส่ง ลดการวิ่งรถเปล่า และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่บรรทุก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนเชื้อเพลิงต่อหน่วยได้ด้วย และการนำเทคโนโลยี GPS มาใช้ควบคู่กัน เพื่อเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ลดระยะทางซ้ำซ้อน ลดระยะเวลาการเดินทางและช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

2) การบริหารสินค้าคงคลังเชิงรุกเพื่อลดความถี่ในการจัดส่ง (Proactive Inventory Management) ควรพิจารณาขยายรอบการสั่งซื้อและปรับปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้งให้เหมาะสม เพื่อลดจำนวนเที่ยวส่งสินค้าโดยไม่กระทบต่อระดับการให้บริการแก่ตัวแทนจำหน่าย แนวทางนี้ต้องอาศัยการวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม (Economic Order Quantity) โดยคำนึงถึงต้นทุนการเก็บสินค้าคงคลัง (Holding Cost) ควบคู่กับต้นทุนการขนส่ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ Sriphrabu and Chamnanlor (2022) ที่พิสูจน์แล้วว่าการบริหารปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างเป็นระบบช่วยลดต้นทุนรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) การพัฒนาความร่วมมือเชิงเครือข่ายกับผู้ประกอบการรายอื่น (Logistics Collaboration) วิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ใกล้เคียงควรสำรวจโอกาสในการจัดตั้งพันธมิตรด้านโลจิสติกส์ เพื่อร่วมกันบริหารจัดการการขนส่งสินค้าในเส้นทางที่ทับซ้อนกัน แนวทางนี้จะช่วยเพิ่มอำนาจการต่อรองกับผู้ให้บริการขนส่งเอกชน ลดต้นทุนต่อหน่วยผ่านการประหยัดต่อขนาด และสร้างความยืดหยุ่นในการรับมือกับความผันผวนของราคาพลังงานในระยะยาว

7. ข้อเสนอแนะ

แม้งานวิจัยนี้จะให้ข้อค้นพบที่มีคุณค่าทั้งในเชิงทฤษฎีและการปฏิบัติ แต่มีข้อเสนอแนะที่ควรพิจารณา ดังนี้

7.1 การศึกษาครั้งนี้ใช้กรณีศึกษาจากวิสาหกิจชุมชนเพียงแห่งเดียว ทำให้ผลการวิจัยอาจมีข้อจำกัดในการสรุปอ้างอิงไปยังผู้ประกอบการรายอื่นที่มีโครงสร้างธุรกิจหรือเส้นทางการกระจายสินค้าแตกต่างกัน งานวิจัยในอนาคตควรขยายกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมวิสาหกิจชุมชนหลายแห่งในพื้นที่ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการสรุปอ้างอิงที่สมบูรณ์

7.2 งานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์ตัวแปรเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจของผู้ประกอบการยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยเชิงคุณภาพ เช่น ความสัมพันธ์กับผู้ให้บริการขนส่ง ความไว้วางใจ และประสบการณ์ส่วนตัว การผนวกวิธีวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) เข้าในกรอบการวิจัยจะช่วยเพิ่มความลึกของการอธิบาย

7.3 ควรพัฒนาแบบจำลองที่รองรับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลายมิติพร้อมกัน เช่น การผสานการวิเคราะห์ Binary Logit หรือ Multinomial Logit

ตามแนวทางของ Siridhara et al. (2019) เพื่อประเมินความน่าจะเป็นในการเลือกระบบขนส่งแต่ละประเภทอย่างละเอียดยิ่งขึ้น

7.4 การขยายผลสู่แบบจำลองการตัดสินใจภายใต้ความคลุมเครือ ควรนำ "ทฤษฎีแบบจำลองฟัซซีแรนดอมยูทิลิตี (Fuzzy Random Utility Model)" ตามแนวคิดของ วชิระ วิจิตรพงษา และคณะ (2561) มาประยุกต์ใช้เพิ่มเติม เพื่อรับมือกับตัวแปรที่พยากรณ์ได้ยากหรือมีความไม่แน่นอนสูงในระบบเศรษฐกิจ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2569). สถานการณ์พลังงานปี 2568 และแนวโน้มพลังงานปี 2569. เข้าถึงเมื่อ 3 เมษายน. เข้าถึงได้จาก https://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Forecast/ShorttermForecast/stiulation2568forecast2569.pdf

[2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2569). ปรับโครงสร้างน้ำมันดีเซลใหม่ ผ่านมติ กบง. เข้าถึงเมื่อ 10 เมษายน. เข้าถึงได้จาก https://eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/22638-news-080469-01

[3] Thiumsak, T. (2025). Industry Outlook 2025-2027: Refinery. Accessed March 20. Available from https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/energy-utilities/refinery/io/industry-outlook-refinery-2025-2027

[4] ศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 6. (2568). แผนปฏิบัติราชการรายปี พ.ศ. 2568 (โครงการพัฒนาเทคโนโลยีเกษตรอุตสาหกรรมอัจฉริยะ). กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.

[5] Sriphrabu, P., & Chamnanlor, C. (2022). “Economic order-quantity determination for fuel demand: A case study of a freight forwarder.” RMUTP Research Journal Sciences and Technology.

[6] Ayasanond, C., Jirapongsananuruk, A., Palakawong Na Ayuttaya, N., & Amornruangtrakool, S. (2025). “Cost and value comparison of air cargo and multimodal transportation in Thailand.” Arts of Management Journal.

[7] Siridhara, S., Paonoi, W., Meeyai, S., & Ratanavaraha, V. (2019). “Container transport mode choice analysis with a binary logit model case study: Northeastern Thailand.” Engineering and Applied Science Research, 46(3), 256–266.

[8] วชิระ วิจิตรพงษา, เจษฎา โพธิ์จันทร์, ดลยฤทธิ์ เสฏฐสุวจะ และ นัฐพร นวกิจรังสรรค์. (2561). “การพัฒนาแบบจำลองฟัซซีแรนดอมยูทิลิตีสำหรับการเลือกรูปแบบการเดินทางด้วยระบบรางของนักท่องเที่ยวระหว่างเมืองในประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน: กรณีศึกษารถไฟทางคู่สายเด่นชัย – เชียงราย.” วารสารปาริชาต, 31(3), 185-197

[9] Mun, J. (2006). Modeling risk: Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques (2nd ed.). Wiley.

การวิเคราะห์ต้นทุนรวมและโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู กรณีศึกษาผู้ประกอบการในจังหวัดกาฬสินธุ์

Total Cost and Supply Chain Structure Analysis of Three-Hole Clay Brick Production: A Case Study of a Manufacturer in Kalasin Province

ปภาวรินทร์ โพธิสาร[1], ศรัญญา ปาระมี[1], เนตรชนก ศรีมันตะ[1], นิรชา ผากาเกตุ[1] และ ปิยณัฐ โตอ่อน[1,*]

[1,*] สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และเทคโนโลยีขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

*ผู้ติดต่อ: E-mail: piyanat.tn@ksu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 081-7180180, เบอร์โทรสาร: -

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนรวมและโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รูของบริษัท ABC จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยใช้วิธีการศึกษาเชิงกรณีศึกษาผ่านการลงพื้นที่สำรวจ การสังเกตกระบวนการผลิตจริง และการสัมภาษณ์แบบเจาะจงกับผู้ประกอบการ ข้อมูลที่รวบรวมครอบคลุมกิจกรรมตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การเตรียมดิน การขึ้นรูป การตาก การเผา การคลายความร้อน การจัดเก็บ และการกระจายสินค้า ผลการศึกษาพบว่าโซ่อุปทานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ โดยวัตถุดิบหลักส่วนใหญ่จัดหาในพื้นที่ ซึ่งช่วยลดระยะเวลาและต้นทุนการจัดหา กำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 112,500 ก้อนต่อเดือน ต้นทุนคงที่เท่ากับ 19,084 บาทต่อเดือน ต้นทุนผันแปรเท่ากับ 55,744 บาทต่อเดือน และต้นทุนรวมเท่ากับ 74,828 บาทต่อเดือน ส่งผลให้ต้นทุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.67 บาทต่อก้อน เมื่อเปรียบเทียบกับราคาขาย 3.00–3.50 บาทต่อก้อน กิจการยังมีส่วนต่างกิจการมีส่วนต่างระหว่างราคาขายกับต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยในระดับสูง ก่อนพิจารณาต้นทุนแฝงอื่น ๆ ในระดับสูง งานวิจัยนี้เสนอให้ผู้ประกอบการจัดทำระบบบันทึกต้นทุนตามกิจกรรมโลจิสติกส์ ปรับปรุงการเคลื่อนย้ายวัสดุ และใช้ข้อมูลต้นทุนจริงเป็นฐานในการวางแผนราคาและการผลิต

คำสำคัญ: อิฐมอญ, โซ่อุปทาน, ต้นทุนรวม, ต้นทุนการผลิต, กิจกรรมโลจิสติกส์

Abstract

This study aimed to analyze the total cost and supply chain structure of three-hole clay brick production at ABC Co., Ltd. in Kalasin Province, Thailand. A case-study approach was applied through field surveys, direct observation of the production process, and purposive interviews with the entrepreneur. The collected data covered raw material procurement, soil preparation, molding, drying, firing, cooling, storage, and product distribution. The findings indicate that the supply chain consists of three main stages: upstream, midstream, and downstream. Most key raw materials are locally sourced, which helps reduce procurement time and related costs. The average production capacity was 112,500 bricks per month. The cost analysis showed that fixed cost was 19,084 baht per month, variable cost

was 55,744 baht per month, and total cost was 74,828 baht per month. As a result, the average production cost was 0.67 baht per brick. Compared with the actual selling prices of 3.00–3.50 baht per brick, the business maintained a favorable unit margin before hidden and opportunity costs are considered. The study recommends systematic logistics activity-based cost recording, improvement of material handling, and the use of actual cost data for pricing and production planning.

Keywords: Clay brick, Supply chain, Total cost, Production cost, Logistics activities

1. บทนำ

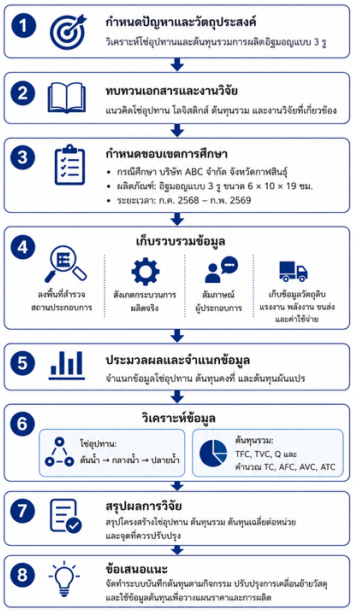
อิฐมอญหรืออิฐแดงเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานที่ยังมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างของไทย เนื่องจากผลิตได้จากวัตถุดิบท้องถิ่นและมีต้นทุนไม่สูง [1-4] อย่างไรก็ตาม การผลิตอิฐมอญในระดับผู้ประกอบการท้องถิ่นยังพึ่งพาแรงงานคน เครื่องจักรขนาดเล็ก สภาพอากาศ และเชื้อเพลิง ทำให้ต้นทุนการผลิตผันผวนตามราคาวัตถุดิบ ค่าแรง พลังงาน และค่าขนส่ง

จากการสำรวจบริษัท ABC จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู พบว่ามีกำลังการผลิตเฉลี่ย 112,500 ก้อนต่อเดือน ต้นทุนรวม 74,828 บาทต่อเดือน แบ่งเป็นต้นทุนคงที่ 19,084 บาทต่อเดือน และต้นทุนผันแปร 55,744 บาทต่อเดือน สะท้อนว่าต้นทุนส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการผลิตและโลจิสติกส์ เช่น การจัดหาวัตถุดิบ การเคลื่อนย้ายวัสดุ การใช้เชื้อเพลิง และการขนส่ง

อย่างไรก็ตาม การบันทึกต้นทุนของกิจการยังไม่ได้จำแนกตามกิจกรรมอย่างชัดเจน จึงอาจทำให้การประเมินต้นทุนต่อหน่วยและต้นทุนแฝงไม่ครบถ้วน แนวคิดโซ่อุปทานและโลจิสติกส์จึงสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของวัตถุดิบ สินค้า และข้อมูลตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ [5,6] งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างโซ่อุปทานและวิเคราะห์ต้นทุนรวมของการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู เพื่อเสนอแนวทางการจัดการต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานให้เหมาะสมกับบริบทของผู้ประกอบการท้องถิ่น

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามกรอบแนวคิดวิธีการวิจัย ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดวิธีการวิจัย

2.1 รูปแบบการวิจัยและขอบเขตการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงกรณีศึกษา โดยใช้ข้อมูลจากสถานประกอบการจริงคือ บริษัท ABC จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา คือ อิฐมอญ

แบบ 3 รู ขนาด 6 x 10 x 19 เซนติเมตร เป็นไปตามรูปที่ 2 [14]



รูปที่ 2 อิฐมอญแบบ 3 รู

ขอบเขตการวิเคราะห์ครอบคลุมกิจกรรมตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การเตรียมดิน การขึ้นรูป การตากการเผา การคลายความร้อน การจัดเก็บ และการกระจายสินค้า โดยระยะเวลาการศึกษาอยู่ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2568 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 และพิจารณาการผลิตและการขนส่งภายในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นหลัก

2.2 เครื่องมือ และการเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามและแบบสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างในการเก็บข้อมูล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยผู้ให้ข้อมูลหลักจำนวน 5 ราย ซึ่งประกอบไปด้วย

1. เจ้าของกิจการ/ผู้จัดการ จำนวน 1 ราย
2. ผู้ควบคุมการผลิต/หัวหน้าฝ่ายผลิต จำนวน 1 ราย
3. ผู้รับผิดชอบการจัดซื้อและคลังสินค้า จำนวน 1 ราย
4. พนักงานขนส่งหรือผู้รับผิดชอบการกระจายสินค้า จำนวน 2 ราย

ทั้งนี้ ผู้ให้ข้อมูลทั้งหมดเป็นผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการผลิต การบันทึกค่าใช้จ่าย และการตัดสินใจด้านการจัดหาและขนส่งของกิจการ

เครื่องมือวิจัยประกอบด้วย

(1) แบบสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างสำหรับผู้ให้ข้อมูลหลัก ใช้เพื่อเก็บข้อมูลแหล่งวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิต ปัญหาการดำเนินงาน และแนวทางกำหนดราคา

(2) แบบสอบถาม/แบบบันทึกข้อมูลต้นทุนจำนวน 1 ชุด ใช้กับ เจ้าของกิจการ/ผู้จัดการ เพื่อรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบ ค่าแรง ค่าเชื้อเพลิง ค่าบรรจุภัณฑ์ ค่าขนส่ง ค่าเสื่อมราคา และค่าใช้จ่ายอื่นที่เกี่ยวข้อง

(3) แบบสังเกตกระบวนการผลิต ใช้บันทึกลำดับกิจกรรม เวลาในการผลิต และการเคลื่อนย้ายวัสดุ

(4) แบบตรวจสอบเอกสารต้นทุน ใช้เปรียบเทียบข้อมูลจากใบเสร็จ บันทึกค่าใช้จ่าย สมุดบัญชีภายในและข้อมูลการสั่งซื้อ/ขายของกิจการ

คณะผู้วิจัยลงพื้นที่จำนวน 8 ครั้ง ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2568 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 กิจกรรมการลงพื้นที่ประกอบด้วยการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลหลัก การสังเกตกระบวนการผลิตจริง การบันทึกเวลาในการดำเนินกิจกรรม การตรวจสอบปริมาณการใช้วัสดุและเชื้อเพลิง และการถ่ายภาพ/จดบันทึกลำดับการไหลของวัตถุดิบ สินค้าระหว่างผลิต สินค้าสำเร็จรูป และข้อมูลคำสั่งซื้อ

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลใช้วิธีการตรวจสอบสามเส้า โดยเปรียบเทียบข้อมูลจาก 3 แหล่ง ได้แก่ ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ ข้อมูลจากการสังเกตหน้างาน และเอกสารภายในกิจการ หากพบค่าที่ไม่สอดคล้องกัน เช่น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อ

รอบเผา ค่าแรงต่อเดือน หรือจำนวนเที่ยวขนส่ง คณะผู้วิจัยจะสอบถามซ้ำกับผู้ให้ข้อมูลหลักและตรวจสอบกับเอกสารต้นทุนเพื่อยืนยันค่าที่ใช้ในการคำนวณ [7], [8]

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่ แบบสัมภาษณ์แบบสอบถาม/แบบบันทึกต้นทุน และเอกสารภายในกิจการ ถูกตรวจสอบความครบถ้วนก่อนนำเข้าสู่การวิเคราะห์ โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) การวิเคราะห์โซ่อุปทานเพื่อระบุความเชื่อมโยงของกิจกรรมต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ

(2) การจำแนกต้นทุนตามกิจกรรมโลจิสติกส์และตามพฤติกรรมต้นทุน และ

(3) การคำนวณต้นทุนรวม ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วย และส่วนต่างระหว่างราคาขายกับต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วย [15]

$$TC = TFC + TVC \quad (1)$$

$$AFC = TFC / Q \quad (2)$$

$$AVC = TVC / Q \quad (3)$$

$$ATC = TC / Q = AFC + AVC \quad (4)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวม (บาท/เดือน)

TFC คือ ต้นทุนคงที่รวม (บาท/เดือน)

TVC คือ ต้นทุนผันแปรรวม (บาท/เดือน)

Q คือ ปริมาณผลผลิตเฉลี่ย (ก้อน/เดือน)

AFC คือ ต้นทุนคงที่เฉลี่ยต่อหน่วย (บาท/ก้อน)

AVC คือ ต้นทุนผันแปรเฉลี่ยต่อหน่วย (บาท/ก้อน)

ATC คือ ต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อหน่วย (บาท/ก้อน)

การกำหนดตัวแปรและหน่วยวัดดังกล่าวช่วยให้การคำนวณต้นทุนในสมการ (1)-(4) มีความชัดเจนและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

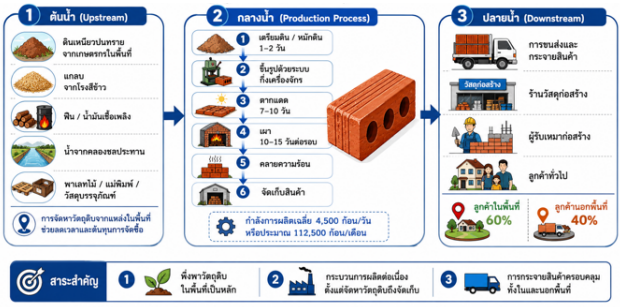
หลังจากคำนวณต้นทุนต่อหน่วยแล้ว ได้นำผลไปเปรียบเทียบกับราคาขายจริงเพื่อประเมินกำไรต่อก้อนและความสามารถในการแข่งขันของกิจการ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานของภัทรภร กินิพันธ์ [10] และอัครวีร์ จำปีรัตน์ และคณะ [11] ที่ใช้ข้อมูลต้นทุนเป็นฐานในการกำหนดราคาและวิเคราะห์ผลตอบแทนทางธุรกิจ ดังนั้น การวิเคราะห์นี้จึงช่วยสะท้อนโครงสร้างต้นทุน ความเชื่อมโยงของกิจกรรมในโซ่อุปทาน และแนวทางปรับปรุงการดำเนินงานของผู้ประกอบการได้อย่างเป็นระบบ

3. ผลการวิจัย

3.1 โครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญ

ผลการศึกษาพบว่าโซ่อุปทานของอิฐมอญแบบ 3 รูมีลักษณะเป็นโซ่อุปทานระดับท้องถิ่นที่เชื่อมโยงผู้จัดหาวัตถุดิบ ผู้ผลิต และลูกค้าปลายทางอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ การจำแนกโครงสร้างดังกล่าวช่วยให้เห็นการไหลของวัตถุดิบ สินค้าระหว่างกระบวนการผลิต สินค้าสำเร็จรูป และข้อมูลการสั่งซื้อ [8] ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการจัดการโซ่อุปทานที่มองการไหลของสินค้า ข้อมูล และกิจกรรมโลจิสติกส์เป็นระบบเชื่อมโยงตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ [16]

ผลการศึกษาพบว่าโซ่อุปทานของการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ โดยแต่ละช่วงมีความเชื่อมโยงกันตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ กระบวนการผลิตจนถึงการกระจายสินค้าไปยังลูกค้า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รูของบริษัท ABC จำกัด

จากรูปที่ 3 เป็นโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รูของบริษัท ABC จำกัด แสดงทิศทางการไหลของวัตถุดิบจากผู้จัดหาในพื้นที่เข้าสู่กระบวนการผลิต การไหลของสินค้าระหว่างผลิตและสินค้าสำเร็จรูปภายในโรงงาน และการไหลของข้อมูลคำสั่งซื้อจากลูกค้ากลับมายังกิจการเพื่อใช้วางแผนการผลิตและการขนส่ง

3.2 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนรวม

การวิเคราะห์ต้นทุนรวมในงานวิจัยนี้จำแนกต้นทุนออกเป็น 2 มิติ ได้แก่ มิติที่หนึ่ง คือ ต้นทุนตามกิจกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งใช้เพื่อระบุกิจกรรมที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายหลัก และมิติที่สอง คือ ต้นทุนตามพฤติกรรมต้นทุน ซึ่งจำแนกเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร ทั้งนี้ ตารางที่ 1 เป็นการนำเสนอต้นทุนตามกิจกรรมโลจิสติกส์ จึงอาจมีทั้งรายการที่เป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรประกอบกันอยู่ในกิจกรรมเดียวกัน เช่น กิจกรรมขนส่งอาจประกอบด้วยค่าเชื้อเพลิงและค่าเที่ยวขนส่งซึ่งเป็นต้นทุนผันแปร รวมถึงค่าเสื่อมราคายานพาหนะซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ ดังนั้นงานวิจัยจึงเพิ่มคอลัมน์ “ประเภทต้นทุนหลัก” เพื่อช่วยให้ผู้อ่านเห็นลักษณะของต้นทุนในแต่ละกิจกรรมอย่างชัดเจนขึ้น

ตารางที่ 1 สรุปการคำนวณต้นทุนตามกิจกรรมโลจิสติกส์

ลำดับ	กิจกรรม	ประเภทต้นทุนหลัก	บาท/เดือน	ร้อยละ	ร้อยละสะสม
1	ขนส่ง	ผันแปรเป็นหลัก / มีต้นทุนคงที่บางส่วน	20,613.88	27.55	27.55
2	จัดซื้อ	ผันแปรเป็นหลัก	18,900.00	25.26	52.81
3	เคลื่อนย้ายวัสดุ	ผันแปรเป็นหลัก	16,722.91	22.35	75.16
4	ผลิต/แปรรูป	ผันแปรและคงที่	9,375.00	12.53	87.68
5	บรรจุภัณฑ์	ผันแปรเป็นหลัก	5,437.50	7.27	94.95
6	อะไหล่/บริการ	คงที่และผันแปรตามการซ่อมบำรุง	3,777.77	5.05	100
	รวม		74,827.06	100	

จากตารางที่ 1 พบว่ากิจกรรมที่ควรให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกคือการขนส่ง การจัดซื้อ และการเคลื่อนย้ายวัสดุ เนื่องจากทั้งสามกิจกรรมมีสัดส่วนรวมกันร้อยละ 75.16 ของต้นทุนทั้งหมด จึงควรลดเที่ยวขนส่งที่ไม่จำเป็น วางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบตามรอบการผลิต และปรับปรุงการเคลื่อนย้ายวัสดุภายในโรงงาน

เมื่อนำข้อมูลต้นทุนตามพฤติกรรมต้นทุนมาคำนวณ พบว่าต้นทุนคงที่รวมเท่ากับ 19,084.00 บาทต่อเดือน และต้นทุนผันแปรรวมเท่ากับ 55,744.00 บาทต่อเดือน ส่งผลให้ต้นทุนรวมเท่ากับ 74,828.00 บาทต่อเดือน จากปริมาณการผลิตเฉลี่ย 112,500 ก้อนต่อเดือน ต้นทุนคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 0.17 บาทต่อก้อน ต้นทุนผันแปรเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 บาทต่อก้อน และต้นทุนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 0.67 บาทต่อก้อน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปต้นทุนตามพฤติกรรมต้นทุนและต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วย

รายการ/สูตร	มูลค่า	หน่วย
TFC (ต้นทุนคงที่รวม)	19,084.00	บาท/เดือน
TVC (ต้นทุนผันแปรรวม)	55,744.00	บาท/เดือน
TC = TFC + TVC	74,828.00	บาท/เดือน
Q (ปริมาณผลิตเฉลี่ย)	112,500	ก้อน/เดือน
AFC = TFC / Q	0.17	บาท/ก้อน
AVC = TVC / Q	0.50	บาท/ก้อน
ATC = TC / Q	0.67	บาท/ก้อน

ที่มา: คำนวณจากข้อมูลภาคสนามของผู้วิจัย

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยต่อหน่วยปัดเศษทศนิยมสองตำแหน่ง

4. อภิปรายผล

ผลการวิจัยสะท้อนว่าโครงสร้างโซ่อุปทานของผู้ผลิตอิฐมอญในกรณีศึกษามีความเชื่อมโยงกับแหล่งวัตถุดิบท้องถิ่นอย่างมาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบด้านต้นทุนและความต่อเนื่องในการผลิต อย่างไรก็ตาม กิจกรรมที่มีสัดส่วนต้นทุนสูง ได้แก่ การขนส่ง การจัดซื้อ และการเคลื่อนย้ายวัสดุ แสดงให้เห็นว่าต้นทุนหลักของกิจการไม่ได้เกิดจากกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับการจัดการโลจิสติกส์ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การเคลื่อนย้ายภายในโรงงาน และการส่งมอบสินค้าไปยังลูกค้า

แนวทางที่เหมาะสมกับบริบทของบริษัท ABC จำกัด คือ การปรับปรุงการจัดการต้นทุนในกิจกรรมหลักที่มีสัดส่วนต้นทุนสูง โดยควรดำเนินการดังนี้ 1) จัดรอบขนส่งให้สอดคล้องกับปริมาณคำสั่งซื้อและลดเที่ยววิ่งเปล่า 2) วางแผนจัดซื้อวัตถุดิบตามรอบการผลิตและราคาตามฤดูกาล โดยเฉพาะแกลบ ฟืน และน้ำมันเชื้อเพลิง 3) ปรับผังพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบและสินค้าสำเร็จรูปเพื่อลดระยะทางการเคลื่อนย้ายภายในโรงงาน และ 4) จัดทำระบบบันทึกต้นทุนรายกิจกรรมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถติดตามต้นทุนต่อเดือนและต้นทุนต่อก้อนได้อย่างถูกต้อง

หากกิจการสามารถลดต้นทุนในกิจกรรมหลักตามสถานการณ์เบื้องต้น ได้แก่ ลดต้นทุนขนส่งร้อยละ 10 ลดต้นทุนจัดซื้อร้อยละ 5 และลดต้นทุนการเคลื่อนย้ายวัสดุร้อยละ 10 จะสามารถลดต้นทุนได้ประมาณ 4,678.68 บาทต่อเดือน หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 6.25 ของต้นทุนรวมต่อเดือน ส่งผลให้ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยลดลงจากประมาณ 0.67 บาทต่อก้อน เหลือประมาณ 0.62 บาทต่อก้อน ภายใต้กำลังการผลิตเฉลี่ย 112,500 ก้อนต่อเดือน ดังนั้นการปรับปรุงกิจกรรมโลจิสติกส์หลักจึงเป็นแนวทางที่สามารถลดต้นทุนได้จริงและเหมาะสมกับบริบทของกิจการขนาดเล็กถึงขนาดกลาง

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รูของบริษัท ABC จำกัด แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ โดยต้นน้ำเกี่ยวข้องกับการจัดหาดินเหนียวปนทราย แกลบ ฟืน น้ำมันเชื้อเพลิง และวัสดุอื่น ๆ กลางน้ำประกอบด้วยกิจกรรมการเตรียมวัตถุดิบ การขึ้นรูป การตาก การเผา และการจัดเก็บสินค้า ส่วนปลายน้ำเกี่ยวข้องกับการจำหน่ายและการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าในพื้นที่

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่ากำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 112,500 ก้อนต่อเดือน ต้นทุนคงที่เท่ากับ 19,084.00 บาทต่อเดือน ต้นทุนผันแปรเท่ากับ 55,744.00 บาทต่อเดือน ต้นทุนรวมเท่ากับ 74,828.00 บาทต่อเดือน และต้นทุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.67 บาทต่อก้อน โดยกิจกรรมที่มีสัดส่วนต้นทุนสูง

ESTACON 2026 | 17th

ได้แก่ การขนส่ง การจัดซื้อ และการเคลื่อนย้ายวัสดุ จึงเป็นกิจกรรมที่ควรได้รับการปรับปรุงเป็นลำดับแรก

ข้อเสนอแนะจากการวิจัยคือ สถานประกอบการควรเริ่มจากการจัดระบบบันทึกต้นทุนรายกิจกรรมให้ชัดเจน ควบคู่กับการวางแผนรอบการจัดซื้อและรอบการขนส่งให้เหมาะสมกับปริมาณการผลิตและคำสั่งซื้อ นอกจากนี้ ควรปรับปรุงการจัดวางพื้นที่ภายในโรงงานเพื่อลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น หากดำเนินการตามแนวทางดังกล่าว จะช่วยลดต้นทุนรวม เพิ่มความสามารถในการควบคุมต้นทุน และสนับสนุนการตัดสินใจด้านการผลิตและโลจิสติกส์ของกิจการได้อย่างเป็นระบบมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประกอบการบริษัท ABC จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและอนุญาตให้ลงพื้นที่สำรวจ รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และเทคโนโลยีขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านวิชาการ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] บริษัท อิฐแดง2009 จำกัด. (2563). “รอบรู้เรื่องอิฐแดง ฉบับที่ 1.” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://itdang2009.com/e-book/

[2] Lopburi Travel Guide. (ม.ป.ป.). “อิฐมอญ อิฐแดง ผลิตจากไทยเชื้อสายคนมอญ ลพบุรี.” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://www.lopburi.org/itmon

[3] อิฐแดง2009. (ม.ป.ป.). “จำหน่ายอิฐมอญ อิฐแดงสำหรับงานก่อสร้างและออกแบบ.” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://itdang2009.com/

[4] อิฐตะวัน. (ม.ป.ป.). “อิฐมอญ ราคา ขนาด อิฐมอก. อิฐเซรามิก อิฐมอญก้อนใหญ่ อิฐแดง.” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://ithmontawan.com/

[5] Logos Logistics. (ม.ป.ป.). “ซัพพลายเชนและการจัดการซัพพลายเชน (SCM) คืออะไร.” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://www.logos3pl.com/th/blog/what-are-supply-chain-and-supply-chain-management-scm/

[6] BS Group Thailand. (2568). “13 กิจกรรมโลจิสติกส์ มีอะไรบ้างไปทำความรู้จักกัน!” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://www.bsgroupth.com/blog/8545/

[7] SIMTEC สถาบันเทคโนโลยีการผลิตสุมิพล. (2566). “กระบวนการผลิตอุตสาหกรรม คืออะไร ทำไมเราควรรู้?” สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2569, จาก https://www.simtec.or.th/blog/what-is-the-industrial-production-process-and-why-should-we-know-it/

[8] นฐ พชรธนนนท์, พิทธินันท์ สมไชยวงค์, มนฑิตา หาศรีวงค์, และภูวดล อิยะ. (2567). “การศึกษาระบบการจัดการโซ่อุปทานการแปรรูปผักพลูคาวในตำบลธารทอง อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย.” วารสารโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน, 2(3), 1–25.

[9] ธนภัทร กันทาวงศ์, กัสมา กาซ้อน, วิไลลักษณ์ วงค์ชัย, นิรุตติ์ ชัยโชค, และพีระพล ศรีวิชัย. (2568). “การพัฒนาแนวทางการลดต้นทุนการผลิต เพื่อยกระดับผลิตภาพของวิสาหกิจชุมชนในตำบลป่าแดด อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย.” วารสารบัญชีปริทัศน์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, 10(2), 1–20.

[10] ภัทรภร กินิพันธ์. (2566). “การวิเคราะห์ต้นทุนและแนวทางการกำหนดราคาขายตามวิธีต้นทุนของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสานเส้นพลาสติกของวิสาหกิจชุมชนบ้านขามป้อม ตำบลสวนหม่อน อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น.” วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 13(4), 298–309.

[11] อัครวีร์ จำปีรัตน์, จักรกฤษณ์ พจนศิลป์, และสุวรรณา สายรวมญาติ. (2566). “การวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทนและแบบจำลองธุรกิจการเลี้ยงปูนาในจังหวัดกำแพงเพชร.” วารสารสังคมศาสตร์ปัญญาพัฒน์, 5(2), 147–160.

[12] อุทอน สีพันดอน, และรชต สวนสวัสดิ์. (2564). “การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตนักศึกษาโดยประยุกต์ใช้ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม: กรณีศึกษา คณะบริหารธุรกิจ วิทยาลัยเทคนิคปากป่าสัก นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว.” วารสารวิทยาการจัดการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 3(3), 25–39.

[13] จินดา ไตรเวช, และจาริวรรณ ปานประเสริฐ. (2567). “การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยรายหลักสูตรของคณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ, 18(3), 88–99.

[14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2565). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 153-2565: อิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

[15] Datar, S. M., & Rajan, M. V. (2018). Horngren’s Cost Accounting: A Managerial Emphasis (16th ed.). Pearson.

[16] Chopra, S. (2019). Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (7th ed., Global ed.). Pearson Education Limited.

สรุปรายการแก้ไขบทความ

"การวิเคราะห์ต้นทุนรวมและโครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตอิฐมอญแบบ 3 รู กรณีศึกษาผู้ประกอบการในจังหวัดกาฬสินธุ์"

ส่วนที่แก้ไข	รายละเอียดการแก้ไข	การใช้งาน
บทนำ	เพิ่มข้อมูลเชิงปริมาณจากข้อมูลภาคสนามเบื้องต้น ได้แก่ กำลังการผลิต ต้นทุนรวม และสัดส่วนต้นทุนกิจกรรมหลัก เพื่อเสริมความหนักแน่นของปัญหา	นำไปแทนที่/เพิ่มเติมในบทนำ
วิธีดำเนินการวิจัย	เพิ่มจำนวนผู้ให้ข้อมูล ตำแหน่งผู้ให้สัมภาษณ์ จำนวนครั้ง/ช่วงเวลาลงพื้นที่ วิธีบันทึกต้นทุน การตรวจสอบเอกสาร และการตรวจสอบสามเส้า	เติมตัวเลขจริงในวงเล็บก่อนส่ง
สมการต้นทุน	ประกาศตัวแปร TC, TFC, TVC, Q, AFC, AVC และ ATC พร้อมหน่วยวัดในสมการ (1)-(4)	ใช้แทนข้อความเดิมใต้สมการ
ผลการวิจัย	ปรับตารางต้นทุนตามกิจกรรมให้เรียงจากมากไปน้อย เพิ่มประเภทต้นทุนหลักและร้อยละสะสม	ใช้แทนตารางที่ 1 เดิม
ผลการวิจัย	เพิ่มคำอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนตามกิจกรรมกับต้นทุนคงที่/ผันแปร และเพิ่มตารางต้นทุนย่อย	เพิ่มต่อจากตารางต้นทุนหลัก
อภิปรายผล/สรุปผล	เพิ่มข้อเสนอเชิงปฏิบัติที่เหมาะกับบริบทบริษัท และประมาณการผลลดต้นทุนจากกิจกรรมต้นทุนสูง	ใช้แทนย่อหน้าอภิปรายและสรุป
รูปและตาราง	ปรับคำอธิบายใต้รูปให้ระบุการไหลของวัตถุดิบ ข้อมูลและสินค้าพร้อมกำหนดรูปแบบหน่วย/ทศนิยมให้สอดคล้องกัน	ตรวจรูปแบบทั้งบทความอีกครั้ง

การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโรเตอร์เครื่องซักผ้า กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า

Efficiency Improvement in the Rotor Production Line of Washing Machines: A Case Study of an Electrical Appliance Manufacturing Plant

พิเชษฐ์ รัตนบุญทวี[1*]

[1] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 160 หมู่ที่ 4 ถนนกาญจนวนิช ต.เขารูปช้าง อ.เมืองสงขลา จ.สงขลา 90000
*ผู้ติดต่อ: s4001541@gmail.com , 08-1452-4051

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการปฏิบัติงานในขั้นตอนการประกอบแผ่นแม่เหล็กเข้ากับแกนคอร์ (Core) และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโรเตอร์ของเครื่องซักผ้า เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาความล่าช้าในขั้นตอนการเตรียมแกนคอร์ ส่งผลให้เกิดการรอคอยในสายการผลิตฉีดขึ้นรูป ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการศึกษาเวลาร่วมกับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยจับยึด (Jig) ด้วยโปรแกรม AutoCAD และ SolidWorks จากนั้นทำการทดสอบในสภาวะการทำงานจริงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ผลการวิจัยพบว่า อุปกรณ์ช่วยจับยึดที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาการปฏิบัติงานในขั้นตอนดังกล่าวจาก 52.61 วินาที เหลือ 13.15 วินาที ซึ่งลดลงร้อยละ 75.00 และลดเวลารวมในภาพรวมของกระบวนการผลิตโรเตอร์จาก 420.68 วินาที เหลือ 381.22 วินาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตโรเตอร์ในภาพรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.38 ซึ่งแนวทางดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสายการผลิตอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพ, กระบวนการผลิตโรเตอร์, อุปกรณ์จับชิ้นงาน, การศึกษาเวลา

Abstract

This research aims to reduce operation time in the assembly process of magnetic plates to the core and to enhance the production efficiency of washing machine rotors. Due to a case study factory experiencing delays during the core preparation phase, leading to bottlenecks and waiting times in the injection molding production line, the time study technique was applied in conjunction with the design and fabrication of a jig. The jig was developed using AutoCAD and SolidWorks programs and subsequently tested under real working conditions for a duration of two weeks. The research results revealed that the developed jig could reduce the operation time in the aforementioned process from 52.61 seconds to 13.15 seconds, representing a 75.00% reduction. Furthermore, the overall production time for the rotor manufacturing process decreased from 420.68 seconds to 381.22 seconds. Consequently, the overall production efficiency of the rotors increased by 9.38%. This approach can be effectively applied to improve other production lines with similar characteristics.

Keywords: Efficiency Improvement, Rotor Manufacturing Process, Jig, Time Study

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำและวัตถุประสงค์งานวิจัย

1.1 บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า ความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนถือเป็นปัจจัยสำคัญในการบรรลุเป้าหมายขององค์กร ซึ่งจากการศึกษาสายการผลิตชิ้นส่วนโรเตอร์ของเครื่องซักผ้า พบปัญหาคอขวดในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ “คอร์” (Core) ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยมีสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการเตรียมงาน (Setup Preparation) ในการบรรจุแผ่นแม่เหล็ก (Magnet) เข้ากับคอร์ ที่ยังคงใช้แรงงานคนเป็นหลัก ส่งผลให้พนักงานไม่สามารถเตรียมวัตถุดิบได้ทันตามอัตราการผลิตของเครื่องฉีด ความล่าช้าดังกล่าวนำไปสู่การหยุดชะงักของเครื่องจักรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและขั้นตอนถัดไปเนื่องจากการรอคอยวัตถุดิบ ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเปล่า (Waste) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินงานวิจัยในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยจับยึด (Jig) สำหรับกระบวนการประกอบแผ่นแม่เหล็กเข้ากับคอร์ เพื่อลดระยะเวลาการทำงาน ลดการรอคอยวัตถุดิบ และป้องกันการหยุดชะงักของเครื่องจักร ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโรเตอร์ให้สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อลดเวลาการปฏิบัติงานในขั้นตอนการประกอบแผ่นแม่เหล็กเข้ากับแกนคอร์ (Core)
- เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโรเตอร์ของเครื่องซักผ้า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ประกอบการวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การศึกษาการทำงาน

การศึกษาการทำงาน [1] ด้านการศึกษาเวลา (time study) คือเทคนิคของการวัดผลงานเพื่อหาเวลาและอัตราการทำงานของงานส่วนย่อยของงานชิ้นหนึ่งๆ ภายใต้สภาวะอันหนึ่ง นอกจากนี้ก็เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในการหาเวลาเท่าที่ควรในการทำงานชิ้นหนึ่งในระดับการทำงานที่เหมาะสม เพื่อใช้สำหรับวัดผลงาน หาเวลามาตรฐาน และประเมินผลงานของพนักงาน

การคำนวณขนาดตัวอย่างของการจับเวลาในทางสถิติ ต้องทดลองจับเวลาจำนวนหนึ่งก่อน (n’) แล้วประยุกต์สูตร สำหรับระดับความเชื่อมั่น 95% และให้โอกาสผิดพลาด ± 5%

$$n = \left(\frac{40\sqrt{n'\sum x^2-(\sum x)^2}}{\sum x}\right)^2 \qquad (1)$$

เมื่อ n = ขนาดตัวอย่างที่จะหา

n’ = จำนวนที่ทดลองจับเวลาก่อน

x = ค่าที่อ่านได้ (เวลาในแต่ละวัฏจักร)

2.2 อุปกรณ์ช่วยจับยึดและนำร่อง (Jig & Fixture)

อุปกรณ์ช่วยจับยึดและนำร่อง [2] หมายถึง อุปกรณ์เฉพาะทางที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต โดยมีหน้าที่หลักในการจับยึดและกำหนดตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่กับที่อย่างมั่นคงและแม่นยำ การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวช่วยเพิ่มความสะดวกและความรวดเร็วในขั้นตอนการทำงาน และสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ ตลอดจนช่วยประหยัดเวลาและลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โสภิดา จรเด่น และคณะ [3] ได้ออกแบบและพัฒนานวัตกรรมอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเจาะ โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผลในการวิเคราะห์ปัญหา เพื่อสร้างอุปกรณ์จับยึดที่มีแรงดูดแม่เหล็กและเพิ่มความมั่นคงในการทำงาน ผลการวิจัยพบว่า อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วในการเจาะชิ้นงานโลหะขึ้นร้อยละ 39.30 และเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะชิ้นงานอโลหะขึ้นร้อยละ 75.34 อีกทั้งคุณภาพของชิ้นงานหลังการเจาะมีความคลาดเคลื่อนต่ำและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

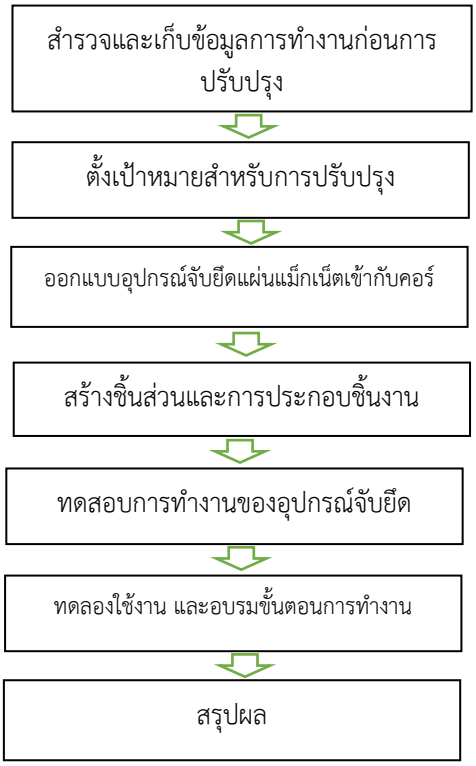
เจษฎาภรณ์ ยอดเพชร และคณะ [4] ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับชิ้นงานไทเทเนียม โดยประยุกต์ใช้หลักการ CDIO เพื่อแก้ไขปัญหาชิ้นงานขนาดไม่ตรงตามแบบสั่งผลิตและเป็นอุปกรณ์นำทางในการขึ้นรูป ภายหลังการปรับปรุงพบว่า อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถเพิ่มความเที่ยงตรงและลดความผิดพลาดในกระบวนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดเวลาในการตรวจสอบชิ้นงานก่อนผลิตลงจาก 10,446 วินาที เหลือเพียง 1,194 วินาที และสามารถลดปริมาณของเสียลงได้ถึงร้อยละ 99 นอกจากนี้ยังช่วยลดความเมื่อยล้าของพนักงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งมอบสินค้าได้ตามเป้าหมาย

บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์ และพิพัฒน์ เลิศโกวิทย์ [5] ได้ทำการศึกษาแนวทางการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นงานเหล็กแผ่น (PLATE 20Y-06) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการผลิตผ่านเครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด, หลักการ ECRS และการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการปรับปรุงแผนภูมิการผลิต ออกแบบกระบวนการผลิตใหม่ ตลอดจนออกแบบ ผลิต และทดสอบแม่พิมพ์ร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผลการวิจัยพบว่า การประยุกต์ใช้เครื่องมือดังกล่าวสามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตลงจากเดิม 149.68 บาทต่อชิ้น เหลือเพียง 107.65 บาทต่อชิ้น (ลดลง 42.03 บาทต่อชิ้น) ลดเวลาที่ใช้ในการผลิตจาก 21.35 นาทีต่อชิ้น เหลือเพียง 14.88 นาทีต่อชิ้น และสามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิตจากเดิม 7 ขั้นตอน ให้เหลือเพียง 4 ขั้นตอน ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษามีขั้นตอนการศึกษา เครื่องมือที่ใช้และการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษา

จากขั้นตอนการศึกษาในรูปที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- การสำรวจและเก็บข้อมูลการทำงานก่อนการปรับปรุง เป็นการดำเนินการลงหน้างานเพื่อศึกษาสภาวะแวดล้อมและลำดับขั้นตอนในกระบวนการประกอบแผ่นแม็กเน็ตเข้ากับคอร์ในปัจจุบัน และร่วมระดมสมองกับพนักงาน ผู้บริหารที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และใช้ why-why analysis ในการค้นหาปัญหา และสาเหตุของปัญหา ข้อจำกัด หรือจุดที่เป็นคอขวด และเก็บรวบรวมข้อมูลและบันทึกข้อมูลคือ เวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (Cycle Time) เพื่อใช้เป็นข้อมูลฐานในการเปรียบเทียบ

- การกำหนดเป้าหมายในการปรับปรุง จะเป็นการตั้งเป้าหมายที่ชัดเจนและวัดผลได้ ซึ่งหลังจากที่ผู้วิจัยได้ประชุมร่วมกับวิศวกรและผู้บริหารโรงงานได้ตกลงร่วมกัน โดยจะเป็นการลดระยะเวลาในการทำงานลง 5% ซึ่งเป้าหมายนี้จะไม่มากหรือน้อย

เกินไป และไม่กระทบต่อการทำงานในสายการผลิตปกติอีกด้วย

- การออกแบบอุปกรณ์จับยึด จะออกแบบโครงสร้างและกลไกของอุปกรณ์จับยึดแผ่นแม็กเน็ตเข้ากับคอร์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่แม่นยำ ปลอดภัย

- การจัดสร้างและการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ จะดำเนินการจัดหาวัสดุ ขึ้นรูปชิ้นส่วนตามแบบวิศวกรรม และประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเป็นอุปกรณ์จับยึดที่พร้อมใช้งาน

- การทดสอบสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ จะนำอุปกรณ์จับยึดที่สร้างเสร็จมาทดลองระบบในเบื้องต้น เพื่อตรวจสอบความแข็งแรง ความแม่นยำในการจับยึด และปรับแต่งกลไกให้สมบูรณ์ก่อนนำไปใช้จริง

- การทดลองใช้งานจริงและการฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงาน นำอุปกรณ์ไปทดลองใช้ในสายการผลิตจริง พร้อมทั้งจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน และดำเนินการฝึกอบรมแนะนำขั้นตอนการใช้งานที่ถูกต้องและปลอดภัยให้แก่ผู้ปฏิบัติงานหน้างาน

- การสรุปผล ประเมินผล และข้อเสนอแนะ รวบรวมข้อมูลหลังการปรับปรุงมาเปรียบเทียบกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ เพื่อพัฒนาต่อยอดในอนาคต

3.2 เครื่องมือที่ใช้

3.2.1 แบบฟอร์มบันทึกการจับเวลา

3.2.2 เครื่องมือสำหรับการศึกษาการทำงาน ได้แก่ นาฬิกาจับเวลา แผนภูมิกระบวนการ วัสดุ อุปกรณ์เพื่อการออกแบบสร้างชิ้นงานสำหรับการทดลอง

3.2.3 ข้อมูลต่างๆ เพื่อประกอบการวิเคราะห์ผล ได้แก่ ภาพถ่ายอย่างละเอียด วีดีโอบันทึกข้อมูล

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ก่อนทำการปรับปรุงได้ทำการเก็บข้อมูลดิบจับเวลาเบื้องต้นจำนวน 10 รอบ แล้วทำการคำนวนโดยใช้สูตรหาจำนวน n ในทฤษฎีการศึกษาเวลาโดยสูตร

$$n = \left(\frac{40\sqrt{n'\sum x^2-(\sum x)^2}}{\sum x}\right)^2 \qquad (2)$$

$$= \left(\frac{40\sqrt{10(34{,}334.45)-(579.78)^2}}{579.78}\right)^2$$

= 34.26 หรือ 35 รอบ

ผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลเพิ่มและจับเวลาก่อนการปรับปรุงเพิ่มเป็นทั้งหมด 35รอบการทำงาน และหาเวลาเฉลี่ยได้ผลตามตารางที่ 1 ซึ่งเวลารวมเฉลี่ยคือ 420.68 วินาที

ตารางที่ 1 เวลารวมเฉลี่ยกระบวนการผลิตโรเตอร์ก่อนการปรับปรุง

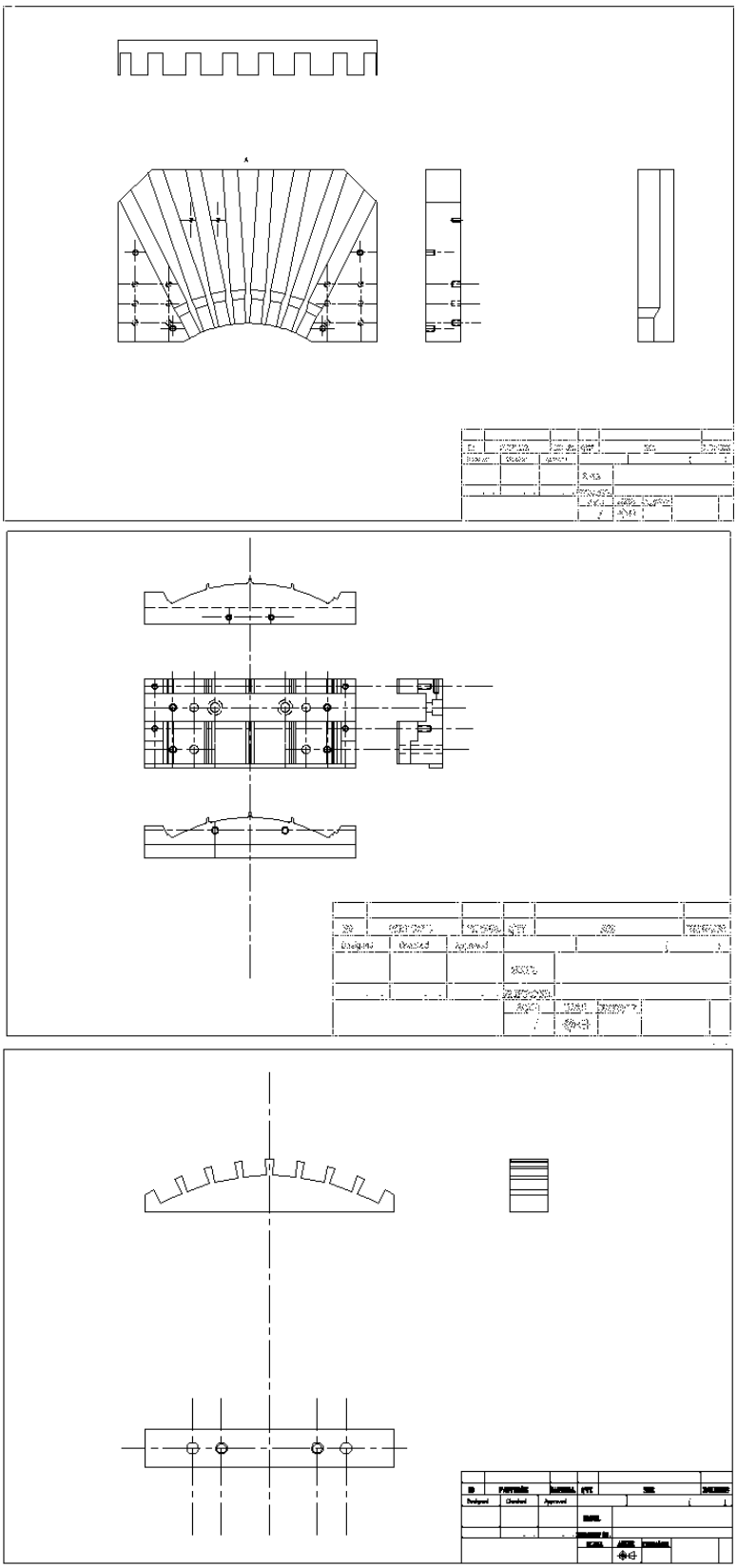
ลำดับ	รายการ	เวลาเฉลี่ย
1	ใส่แผ่นแม็กเน็ตลงในคอร์ จำนวน 48 ตัวด้วยมือ	52.61
2	ขนคอร์ที่ได้ใส่แผ่นแม็กเน็ตแล้วมาที่เครื่องฉีดพลาสติก	77.29
3	ทำการฉีดพลาสติกเข้าโรเตอร์คอร์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก	106.07
4	วางโรเตอร์ลงสายพานเพื่อนำมาตกแต่ง	30.42
5	ตัดหรือแกะเอาพลาสติกที่เกินออกให้หมดจากโรเตอร์	20.06
6	นำโรเตอร์เข้าเครื่องตรวจสอบโรเตอร์เพื่อตรวจสอบการฉีดพลาสติก	32.64
7	ขนโรเตอร์มาพักไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้พลาสติกอยู่ตัว	45.07
8	ขนโรเตอร์ที่พักไว้ไปที่ชาร์จแม็กเน็ต	34.58
9	ชาร์จแม็กเน็ต (Charge Mag net) ให้เป็นแม่เหล็ก	12.4
10	ตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กโรเตอร์(Inspection Rotor)	9.54
	รวมเวลาเฉลี่ย	420.68

ผู้วิจัยได้ประชุมร่วมกับวิศวกรและผู้บริหารโรงงานและได้ตกลงร่วมกัน โดยตั้งเป้าหมายจะลดเวลารวมเฉลี่ยกระบวนการผลิตโรเตอร์ 5% ซึ่งก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 420.68 วินาที ดังนั้นเป้าหมายใหม่จะอยู่ที่ 399.64 วินาที

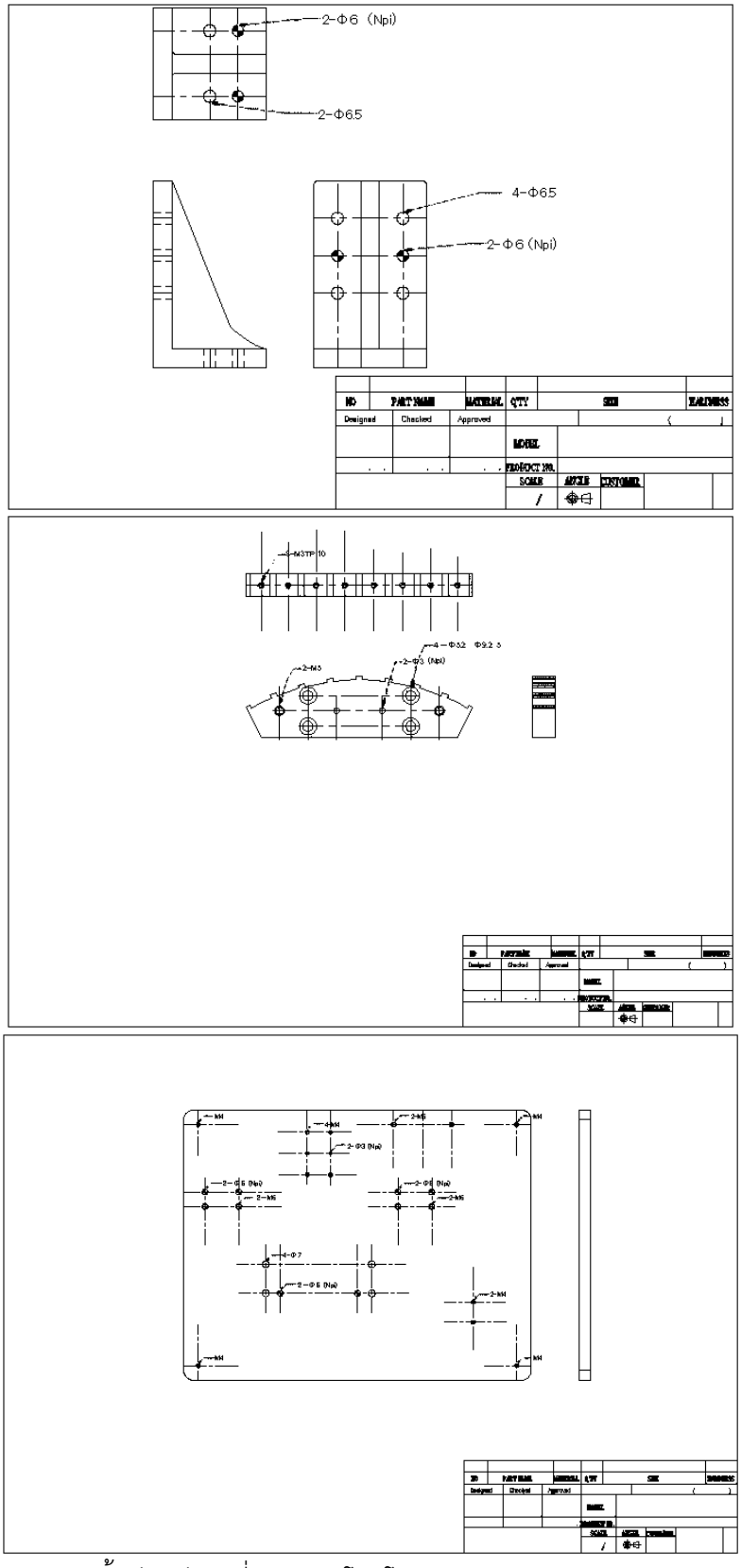
4. ผลการศึกษา

4.1 การออกแบบอุปกรณ์จัดยึด

ผลการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโรเตอร์เห็นว่าขั้นตอนการบรรจุแผ่นแม่เหล็กลงในแกนโรเตอร์จำนวน 48 ชิ้นด้วยมือ จะเกิดความล่าช้าและผิดพลาดได้ ผู้วิจัยจึงดำเนินแนวทางแก้ไขด้วยการออกแบบอุปกรณ์จับยึดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลาและลดความผิดพลาดในการปฏิบัติงานของพนักงาน ทั้งนี้การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ และโครงสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม AutoCAD [6] และSolidWorks [7] ดังแสดงในรูป 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2-1 แบบชิ้นส่วนต่างๆที่ออกแบบโดยโปรแกรม AutoCAD และ SolidWorks



รูปที่ 2-2 แบบชิ้นส่วนต่างๆที่ออกแบบโดยโปรแกรม AutoCAD และ SolidWorks

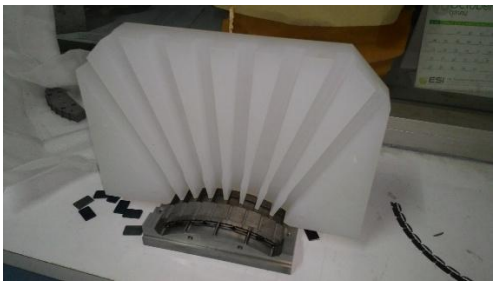
4.2 การสร้างและทดสอบอุปกรณ์จับยึด

หลังจากผู้วิจัยได้การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างและขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆ ตามแบบร่าง โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC) และเครื่องมือกลประเภทต่างๆ ได้ชิ้นส่วนต่างๆได้แก่ ตัวประคองแผ่นแม็กเน็ต ตัวรองแผ่นแม็กเน็ต ฐานวางคอร์ ฉากตัวประคองแผ่นแม็กเน็ต ตัวดันแผ่นแม็กเน็ต แผ่นดันแม็กเน็ตเข้ากับคอร์ ตัวกันกระแทกหลังฐานวางคอร์ และแผ่นเพลท แล้วทำการประกอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3



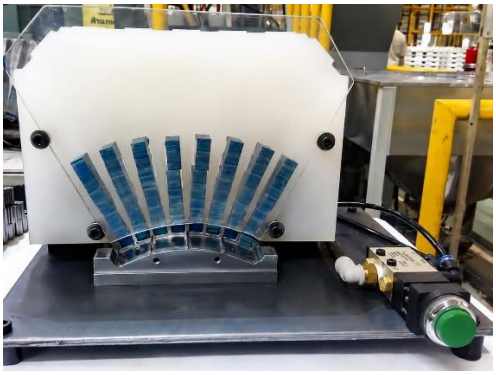
รูปที่ 3 การขึ้นรูปและประกอบอุปกรณ์จับยึด

ซึ่งขั้นตอนประกอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจะเป็นดังนี้ เจาะรูและต๊าปเกลียวแผ่นเพลทในตำแหน่งที่ต้องการยึดชิ้นส่วนทั้งหมด แล้วนำชิ้นส่วนทั้งหมดได้แก่ฐานวางคอร์ ฉากตัวประคองแผ่นแม็กเน็ต ตัวกันกระแทกหลังฐานคอร์ มาประกอบเข้ากับแผ่นเพลท ซึ่งชิ้นส่วนทั้งหมดที่มาประกอบเข้าด้วยกัน จะมีโครงสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจะเป็นลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4



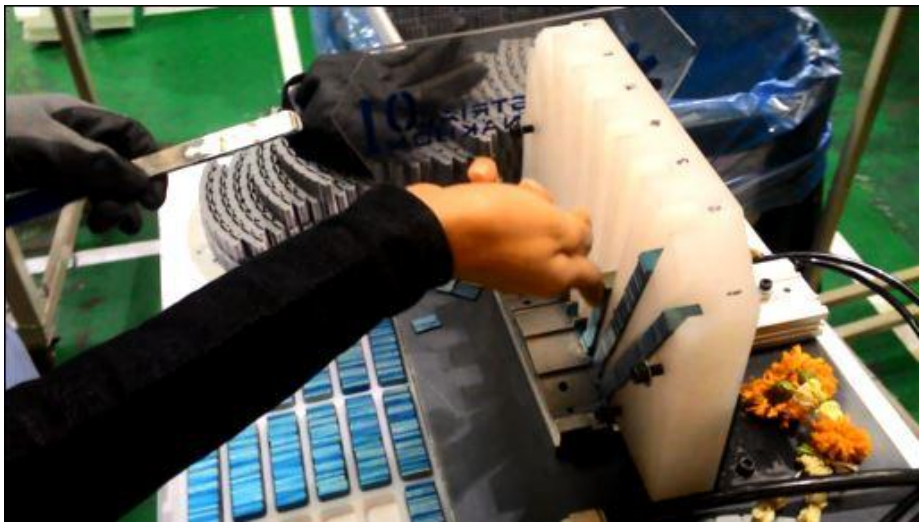
รูปที่ 4 ชิ้นส่วนทั้งหมดเมื่อมาประกอบเข้าด้วยกัน

หลังการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างหลักแล้วเสร็จ ได้ทำการติดตั้งระบบควบคุมอันประกอบด้วยวาล์วและระบบนิวเมติกส์ เพื่อให้อุปกรณ์จับยึด (Jig) พร้อมสำหรับการใช้งาน และนำอุปกรณ์จับยึดนี้ไปติดตั้งบนโต๊ะประกอบชิ้นงานในสายการผลิต ซึ่งแสดงอุปกรณ์จับยึดทั้งหมดดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์จับยึดที่พร้อมใช้งาน

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ร่วมมือกับวิศวกรชาวญี่ปุ่นประจำโรงงานในการทดสอบและปรับปรุงอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานดังกล่าว โดยพบปัญหาคือแผ่นแม็กเน็ตติดค้างไม่ลงมาที่ฐานวางคอร์ ทำให้คอร์ใส่แผ่นแม็กเน็ตไม่ครบ และแผ่นแม็กเน็ตดันคอร์ออก และได้แก้ปัญหาโดยการเจียรลบคมส่วนที่ทำแผ่นแม็กเน็ตติดค้าง และขัดแผ่นดันแม็กเน็ตเข้ากับคอร์ให้เรียบเพื่อให้พร้อมใช้งานจริง และนำไปทดสอบอีกครั้งและสามารถใช้งานได้จริง และจากนั้นจึงนำไปให้พนักงานทดลองใช้งานในกระบวนการทำงานจริง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 พนักงานกำลังใส่แผ่นแม่เหล็กด้วยอุปกรณ์จับยึด

โดยขั้นตอนหรือกลไกในการทำงานของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนี้ คือ

1. กรอกแผ่นแม็กเน็ตที่ตัวประครองแผ่นแม็กเน็ตให้เต็ม
2. หยิบคอร์วางไว้ที่ฐานวางคอร์
3. กดปุ่มสีเขียวที่วาว์ลพร้อมกดที่คอร์ไว้เบาๆ
4. หยิบคอร์ที่ใส่แผ่นแม็กเน็ตแล้วออกจากฐานวางคอร์

4.3 ผลการปรับปรุงกระบวนการ

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการทำงานและดำเนินการฝึกอบรมทักษะให้แก่พนักงาน โดยเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์จับยึดในการบรรจุแผ่นแม่เหล็กจำนวน 48 ชิ้นลงในคอร์แทนการใช้มือเปล่าแบบเดิม ผู้วิจัยได้จับเวลาเบื้องต้นจำนวน 10รอบการทำงาน แล้วทำการคำนวนโดยใช้สูตรหาจำนวน n ในทฤษฎีการศึกษาเวลาโดยสูตร

$$n = \left(\frac{40\sqrt{n'\sum x^2-(\sum x)^2}}{\sum x}\right)^2 \qquad (3)$$

$$= \left(\frac{40\sqrt{10(34{,}423.45)-(378.57)^2}}{378.57}\right)^2$$

= 44.17 หรือ 45 รอบ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลและจับเวลาเพิ่มเติมรวมเป็น 45 รอบการทำงาน เพื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและประเมินประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า เวลารวมเฉลี่ยในการปฏิบัติงานลดลงเหลือเพียง 381.22 วินาที ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นอย่างเป็นรูปธรรมว่า การใช้อุปกรณ์ช่วยจัดยึดดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มทั้งความรวดเร็วและความแม่นยำในการทำงานได้

ตารางที่ 2 เวลารวมเฉลี่ยกระบวนการผลิตโรเตอร์หลังการปรับปรุง

ลำดับ	รายการ	เวลาเฉลี่ย(วินาที)
1	ใส่แผ่นแม็กเน็ตลงในคอร์ จำนวน 48 ตัวด้วยอุปกรณ์จัดยึด	13.15
2	ขนคอร์ที่ได้ใส่แผ่นแม็กเน็ตแล้ว มาที่เครื่องฉีดพลาสติก	76.94
3	ทำการฉีดพลาสติกเข้าโรเตอร์คอร์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก	105.72
4	วางโรเตอร์ลงสายพานเพื่อนำมาตกแต่ง	30.07
5	ตัดหรือแกะเอาพลาสติกที่เกินออกให้หมดจากโรเตอร์	19.71
6	นำโรเตอร์เข้าเครื่องตรวจสอบโรเตอร์เพื่อตรวจสอบการฉีดพลาสติก	32.99
7	ขนโรเตอร์มาพักไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้พลาสติกอยู่ตัว	45.07
8	ขนโรเตอร์ที่พักไว้ไปที่ชาร์จแม็กเน็ต	34.93
9	ชาร์จแม็กเน็ต (Charge Mag net) ให้เป็นแม่เหล็ก	12.75
10	ตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กโรเตอร์ (Inspection Rotor)	9.89
	รวมเวลาเฉลี่ย	381.22

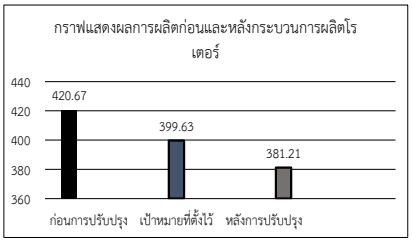
5. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการนำอุปกรณ์จับยึดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตโรเตอร์เครื่องซักผ้าเพื่อทดแทนการทำงานด้วยแรงงานคน ผู้วิจัยสามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตลงได้ถึง 9.38% (จากเดิม 420.68 วินาที ลดลงเหลือ 381.22 วินาที) ซึ่งผลลัพธ์นี้สูงกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (5% หรือ 399.64 วินาที) อยู่ที่ 4.38% ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3 และกราฟในรูปที่ 7

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

ตัวชี้วัด	เวลาเปรียบเทียบ (วินาที)	สัดส่วนการลดเวลา (%)
ก่อนการปรับปรุง	420.68	-
เป้าหมายที่ตั้งไว้ (5%)	399.64	5.00%
หลังการปรับปรุง	381.22	9.38%
ผลลัพธ์เปรียบเทียบกับเป้าหมาย	เร็วกว่าเป้าหมาย 18.42 วินาที	เกินเป้าหมาย 4.38%



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

5.2 อภิปรายผล

ในส่วนของประสิทธิภาพด้านเวลาและการลดต้นทุนนั้น จากก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิตโรเตอร์นี้ใช้เวลาเฉลี่ย 420.68 วินาทีต่อชิ้น ซึ่ง 1 วันจะมีเวลาทำงานที่หักเวลาพักและเวลาเผื่อในการทำงานแล้วประมาณ 23,400 วินาที (6.5ชั่วโมง) ดังนั้น

จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อสายการผลิต

$$= \left(\frac{23{,}400}{420.68}\right) = 55.65$$

หรือประมาณ 55 ชิ้นต่อวัน แต่โรงงานนี้มีความต้องการใช้โรเตอร์รุ่นนี้ 550 ชิ้นต่อวัน ดังนั้นต้องใช้คนงาน 10 คนเพื่อผลิตโรเตอร์ตามเป้านี้ แต่หลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตโรเตอร์นี้แล้วเหลือใช้เวลาเฉลี่ย 381.22 วินาทีต่อชิ้น ดังนั้น

จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อสายการผลิต

$$= \left(\frac{23{,}400}{381.22}\right) = 61.38$$

หรือประมาณ 61 ชิ้นต่อวัน ดังนั้นจะใช้คนงานเหลือเพียง 9 คนเพื่อผลิตโรเตอร์ตามเป้านี้ ซึ่งสามารถลดคนงานไปได้ 1 คน ถ้าคิดเป็นต้นทุนแรงงาน คือสามารถลดค่าแรงไปได้เดือนละ 11,500 บาท (ค่าแรงวันละ 500 บาท ทำงานเฉลี่ย 23 วันทำการต่อเดือน)

สำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต งานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อยกระดับชุดอุปกรณ์จับยึดสำหรับประกอบแผ่นแม่เหล็กเข้ากับแกนคอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการนำเทคโนโลยีขั้นสูงอย่างระบบหุ่นยนต์เข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประกอบ และลดโอกาสการเกิดของเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ ทว่าอาจมีข้อจำกัดสำคัญในเรื่องของต้นทุนการลงทุนระบบในระยะแรกเริ่มที่ค่อนข้างสูง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดประกอบแผ่นแม่เหล็กเข้ากับแกนคอร์นี้สามารถนำมาต่อยอดและยกระดับกระบวนการผลิตในรุ่นถัดไปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่นการเปลี่ยนจากระบบแมนนวล (Manual) ไปสู่ระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อควบคุมระบบ หรือการนำระบบ PLC (Programmable Logic Controller) [8] เข้ามาเป็นศูนย์กลางในการควบคุมสั่งการ พร้อมทั้งติดตั้งเซนเซอร์ (Sensor) เพื่อตรวจจับและตรวจสอบสถานะการทำงานของกระบวนการอย่างแม่นยำ เช่น การเช็กตำแหน่งการเข้า-ออกของกระบอกสูบลม (Pneumatic Cylinder) [9] ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error) และเพิ่มความปลอดภัยในสายการผลิตได้อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ แผนกวิศวกรรมกระบวนการผลิตเครื่องซักผ้า โรงงานอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ข้อมูลจากผู้บริหารโรงงาน วิศวกร และพนักงานทุกท่าน ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] วิจิตร ตัณฑสุทธิ์, วันชัย ริจิรวนิช, จรูญ มหิทธาฟองกุล, และ ชูเวช ชาญสง่าเวช (แปล). (2547). การศึกษาการทำงาน [Introduction to work study]. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] สรรพสิทธิ์ สัตตะรุจาวงษ์. (2552). การออกแบบจิ๊กและฟิกซ์เจอร์ (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพ; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[3] โสภิดา จรเด่น, วรวิทย์ ศรีวิทยากูล, และ วิชัย ประยูร. (2566, 24–26 พฤษภาคม). “การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเจาะเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน รายวิชาปฏิบัติงานอุตสาหกรรมการผลิต1.” รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8, โรงแรมอมารีพัทยา, ชลบุรี, ประเทศไทย

[4] เจษฎาภรณ์ ยอดเพชร, สิทธิชัย วรรณกิจ, ชานนท์ มูลวรรณ, วีรญา กรทิพย์, และ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ. (2565, 5–6 พฤศจิกายน). “การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดในกระบวนการผลิตชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง.” รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการและแสดงนิทรรศการระดับชาติ พัฒนาวิศวกรรมและนวัตกรรมเทคโนโลยีสู่การเป็นผู้นำพอเพียงเพื่อความยั่งยืน ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ครั้งที่ 4 (SEITS2022) (รหัสบทความ SEITS 73), คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

[5] บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์ และ พิพัฒน์ เลิศโกวิทย์. (2567) "การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อทำการลดต้นทุน," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 44-58.

[6] อภิรัตน์ บางศิริ. (2562). เขียนแบบทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมด้วย AutoCAD 2020 ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: ซิมพลิฟาย.

[7] นพดล สิงห์ฉลาด. (2558). ออกแบบ 3 มิติ ด้านวิศวกรรมและงานช่าง SolidWorks 2015 ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: ซิมพลิฟาย.

[8] ณรงค์ ตันชีวะวงศ์. (2541). *ระบบ PLC*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[9] เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2560) คัมภีร์การใช้งานระบบนิวแมติกส์. กรุงเทพฯ: ซิกมา พลัส.

การศึกษาการเลือกรูปแบบการเดินทางเพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ

Analysis of Tourist Travel Mode Choice in Nakhon Phanom: An Application of Multinomial Logistic Regression Model

วทัญญา นามบุรี[1],เมธาวุฒิ สีหามาตย์[2], กฤชณัท รวมบุญ[3] และ ธนิสรา บุตรสิงขรณ์[4*]

[1,2,3,4] มหาวิทยาลัยนครพนม อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 214 หมู่12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

*ผู้ติดต่อ: palm1921@gmail.com, 086-237-5897

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังจังหวัดนครพนม และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง โดยใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logistic Regression: MNL) กลุ่มตัวอย่างเป็นนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยวจังหวัดนครพนม จำนวน 600 คน เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถาม และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของการเลือกรูปแบบการเดินทางได้ในระดับสูง ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง ได้แก่ ความสะดวกสบาย ความรวดเร็วในการเดินทาง ความยืดหยุ่นในการเดินทาง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จำนวนผู้ร่วมเดินทาง ความพร้อมของที่จอดรถ ความสะดวกในการเดินทางต่อภายในจังหวัด ความง่ายในการจองและเข้าถึงบริการ ความถี่และความพร้อมของบริการขนส่ง ต้นทุนการเดินทางโดยรวม และคุณภาพถนน โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้เครื่องบินมากที่สุดคือ ความถี่และความพร้อมของบริการขนส่ง (Exp(B)=18.405) รองลงมาคือ ความง่ายในการจองและเข้าถึงบริการสำหรับรถโดยสารประจำทาง (Exp(B)=5.519) และต้นทุนการเดินทางโดยรวมต่อการเลือกใช้เครื่องบิน (Exp(B)=5.307) ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดนโยบายและการวางแผนพัฒนาระบบคมนาคมและการท่องเที่ยวของจังหวัดนครพนมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ การเชื่อมโยงเส้นทางท่องเที่ยว และการออกแบบบริการด้านการเดินทางให้สอดคล้องกับพฤติกรรมและความต้องการของนักท่องเที่ยวในปัจจุบัน อันจะนำไปสู่การส่งเสริมการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืนของจังหวัดนครพนมในอนาคต

คำสำคัญ: พฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทาง, แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ, พฤติกรรมนักท่องเที่ยว, การเลือกรูปแบบการขนส่ง

Abstract

This study aimed to investigate the travel mode choices of tourists visiting Nakhon Phanom Province and to analyze the factors influencing their travel mode selection using the Multinomial Logistic

Regression (MNL) model. The study employed a questionnaire survey to collect data from 600 tourists visiting Nakhon Phanom Province. The collected data were analyzed using the Multinomial Logistic Regression model. The results indicated that the proposed model demonstrated a high explanatory power in explaining tourists' travel mode choices. Statistically significant factors influencing travel mode selection included travel comfort, travel speed, travel flexibility, environmental concerns, number of travel companions, parking availability, convenience of intra-provincial transportation, ease of booking and service accessibility, service frequency and availability, overall travel cost, and road quality. Among these factors, service frequency and availability had the strongest positive effect on air travel choice (Exp(B) = 18.405), followed by ease of booking and service accessibility for bus travel (Exp(B) = 5.519), and overall travel cost for air travel (Exp(B) = 5.307). The findings provide empirical evidence to support transportation and tourism policy formulation and planning in Nakhon Phanom Province, particularly in enhancing public transportation systems, improving connectivity between tourist destinations, and designing travel services that better align with tourists' travel behavior and preferences. These improvements are expected to contribute to the sustainable development of tourism in Nakhon Phanom Province in the future.

Keywords: Tourists' Travel Mode Choice Behavior, Multinomial Logistic Regression, Tourist Behavior, Transportation Mode Choice

1. บทนำ

จังหวัดนครพนมเป็นหนึ่งในจุดหมายปลายทางด้านการท่องเที่ยวที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะมีบทบาทสำคัญทั้งด้านการท่องเที่ยวและการคมนาคมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเนื่องจากเป็นจังหวัดชายแดนที่เชื่อมโยงประเทศไทยกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวผ่านสะพานมิตรภาพไทย–ลาวแห่งที่ 3 อีกทั้งยังมีสนามบินนครพนมและโครงข่ายทางหลวงสายหลักที่รองรับการเดินทางจากภูมิภาคต่าง ๆ ส่งผลให้จังหวัดมีทางเลือกในการเดินทางที่หลากหลาย ทั้งทางถนนและทางอากาศ ประกอบกับการเติบโตของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ศาสนา และการท่องเที่ยวริมแม่น้ำโขง ทำให้จังหวัดนครพนมเป็นพื้นที่ที่มีบริบทด้านการเดินทางแตกต่างจากจังหวัดท่องเที่ยวหลักอีกทั้งมีแหล่งท่องเที่ยวที่โดดเด่นทั้งด้านธรรมชาติวัฒนธรรม และอัตลักษณ์ท้องถิ่น ส่งผลให้จังหวัดนครพนมสามารถดึงดูดนักท่องเที่ยวจากหลากหลายพื้นที่ให้เดินทางเข้ามาท่องเที่ยวอย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบัน นักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังจังหวัดนครพนมสามารถเลือกรูปแบบการเดินทางได้หลากหลาย ได้แก่ รถยนต์ส่วนตัว รถโดยสารประจำทาง และเครื่องบิน ซึ่งแต่ละรูปแบบมีข้อดี ข้อจำกัดและต้นทุนที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ระบบขนส่งสาธารณะยังไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ทำให้การเชื่อมต่อจากสนามบินหรือสถานีขนส่งไปยังแหล่งท่องเที่ยว

ต่างๆยังไม่สะดวก ทำให้นักท่องเที่ยวมีการพึ่งพารถยนต์ส่วนตัวมากเกินไป ดังนั้นการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวจึงมิได้ขึ้นอยู่เพียงปัจจัยด้านระยะทางเท่านั้นแต่ยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สังคม โครงสร้างพื้นฐาน ความสะดวกในการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยว ความถี่ในการให้บริการ ตลอดจนลักษณะส่วนบุคคลของนักท่องเที่ยว

แม้ว่าภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะมีการส่งเสริมการท่องเที่ยวและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมอย่างต่อเนื่อง แต่การกำหนดนโยบายและแนวทางการพัฒนาที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สะท้อนพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวอย่างแท้จริง ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาพฤติกรรมการเดินทางและการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวในพื้นที่ท่องเที่ยวของประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านเวลา ค่าใช้จ่าย ความสะดวกสบาย และคุณลักษณะส่วนบุคคลของนักท่องเที่ยว[1] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาโดยมากมุ่งศึกษาในเมืองท่องเที่ยวหลักหรือพื้นที่ที่มีระบบขนส่งสาธารณะขนาดใหญ่ ขณะที่การศึกษาซึ่งวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวในจังหวัดชายแดนที่กำลังเติบโตด้านการท่องเที่ยว[2] เช่น จังหวัดนครพนม ยังมีจำนวนจำกัด นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ยังเน้นการศึกษาพฤติกรรมการท่องเที่ยวหรือความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวมากกว่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางด้วยแบบจำลองเชิงสถิติที่สามารถเปรียบเทียบทางเลือกได้หลายรูปแบบ เช่น แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logistic Regression)ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งศึกษารูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังจังหวัดนครพนม และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logistic Regression) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรตามที่มีหลายทางเลือก ได้แก่ รถยนต์ส่วนตัว รถโดยสารประจำทาง และเครื่องบิน [3]

ผลการศึกษานี้คาดว่าจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยวได้อย่างชัดเจน สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดนโยบายการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคม และการส่งเสริมการท่องเที่ยวของจังหวัดนครพนมให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของนักท่องเที่ยวในอนาคต ตลอดจนเป็นองค์ความรู้ทางวิชาการที่สามารถนำไปต่อยอดในการศึกษาด้านพฤติกรรมการเดินทางและการวางแผนนโยบายด้านคมนาคมและการท่องเที่ยวต่อไปในอนาคต [4]

2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Travel Mode Choice Behavior Theory) เป็นกรอบแนวคิดที่ใช้อธิบายกระบวนการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของบุคคลภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ เช่น เวลา ค่าใช้จ่าย ความสะดวกสบาย และลักษณะส่วนบุคคล โดยมีพื้นฐานจากแนวคิดที่ว่าผู้เดินทางจะเลือกทางเลือกที่ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์สูงสุดแก่ตนเอง (Random Utility Theory) [5] แนวคิดดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง

เนื่องจากช่วยอธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางแต่ละประเภท

2.1 องค์ประกอบสำหรับทฤษฎีการเลือกรูปแบบการเดินทาง

พฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทางได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย ทั้งด้านลักษณะส่วนบุคคล ลักษณะการเดินทาง คุณลักษณะของโหมดการเดินทาง โครงสร้างพื้นฐาน และข้อจำกัดภายนอก ปัจจัยส่วนบุคคล เช่น เพศ อายุ รายได้ ระดับการศึกษา และสถานภาพครอบครัว มีผลต่อการรับรู้และการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของแต่ละบุคคล ขณะที่ปัจจัยด้านลักษณะการเดินทาง เช่น วัตถุประสงค์ ระยะทาง ระยะเวลา และความถี่ของการเดินทาง ล้วนมีบทบาทสำคัญต่อการเลือกใช้ยานพาหนะแต่ละประเภท [6]

นอกจากนี้ คุณลักษณะของโหมดการเดินทาง ได้แก่ ค่าใช้จ่าย ความสะดวกสบาย ความปลอดภัย ความถี่ในการให้บริการ และการเข้าถึงบริการ ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้เดินทางใช้ในการประเมินทางเลือกต่าง ๆ รวมถึงคุณภาพของโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมและสภาพแวดล้อม ซึ่งมีผลต่อความสามารถและแรงจูงใจในการเลือกใช้โหมดการเดินทางแต่ละประเภท อีกทั้งข้อจำกัดด้านเวลา งบประมาณ การเข้าถึงบริการ และนโยบายภาครัฐ ยังสามารถส่งผลต่อทางเลือกและพฤติกรรมการเดินทางของบุคคลได้เช่นกัน โดยปัจจัยเหล่านี้มักถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองเชิงพฤติกรรมเพื่ออธิบายและพยากรณ์การตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางอย่างมีประสิทธิภาพ [7]

2.2 ทฤษฎีแบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logistic Regression)

แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logistic Regression: MLR) หรือแบบจำลอง Multinomial Logit Model (MNL) เป็นแบบจำลองทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม (Categorical Variable) ซึ่งมีมากกว่าสองทางเลือกและไม่มีลำดับเชิงอันดับ (Nominal Outcome) เช่น การเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนตัว รถโดยสารประจำทาง และเครื่องบิน แบบจำลองดังกล่าวพัฒนามาจากแนวคิดทฤษฎีอรรถประโยชน์แบบสุ่ม (Random Utility Theory: RUT) ซึ่งอธิบายว่าผู้เดินทางจะเลือกทางเลือกที่ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์สูงสุดแก่ตนเอง ภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ค่าใช้จ่าย ความสะดวกสบาย และปัจจัยส่วนบุคคล [3, 5] โดยอรรถประโยชน์ของแต่ละทางเลือกสามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการ (1) ดังนี้

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

เมื่อ U_{in} = อรรถประโยชน์รวมของทางเลือก i สำหรับบุคคล n

V_{in} = อรรถประโยชน์ที่สามารถสังเกตได้ (Deterministic Utility)

ε_{in} = ค่าความคลาดเคลื่อนหรือปัจจัยที่ไม่สามารถสังเกตได้ (Random Error Term)

ในแบบจำลอง Multinomial Logistic Regression ความน่าจะเป็นที่ผู้เดินทาง n จะเลือกทางเลือก i

จากทางเลือกทั้งหมด J ทางเลือก สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{J-1}^{J} e^{V_{jn}}} \quad (2)$$

เมื่อ P_{in} = ความน่าจะเป็นที่บุคคล nจะเลือกทางเลือก i

V_{in}= ค่าฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของทางเลือก i J= จำนวนทางเลือกทั้งหมด

ฟังก์ชันอรรถประโยชน์เชิงเส้นสามารถกำหนดได้สมการ (3) ดังนี้

$$V_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k \quad (3)$$

เมื่อ β_0= ค่าคงที่ของแบบจำลอง

β_k= ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

X_k= ตัวแปรอิสระ เช่น อายุ รายได้ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ระยะเวลาเดินทาง หรือวัตถุประสงค์การเดินทาง

ในการวิเคราะห์ แบบจำลองจะกำหนด “กลุ่มอ้างอิง” (Reference Category) ขึ้นมาหนึ่งกลุ่ม และเปรียบเทียบโอกาสในการเลือกทางเลือกอื่นกับกลุ่มอ้างอิงผ่านค่า Log-Odds ดังสมการ (4)

$$\ln\left(\frac{P_{im}}{P_{iM}}\right) = \beta_{0m} + \beta_{1m} X_{1i} + \beta_{2m} X_{2i} + \cdots + \beta_{km} X_{ki} \quad (4)$$

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลอง Multinomial Logistic Regression ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านคมนาคมและการท่องเที่ยว เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางที่มีหลายทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การเลือกเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนตัว รถโดยสารประจำทาง หรือเครื่องบิน ซึ่งช่วยให้สามารถอธิบายและพยากรณ์พฤติกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยวได้อย่างเป็นระบบ และสามารถนำผลลัพธ์ไปใช้สนับสนุนการวางแผนนโยบายและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมได้ เช่น Harz (2022) ศึกษาพฤติกรรมการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวในเมืองท่องเที่ยวประเทศเยอรมนี โดยใช้แบบจำลอง Discrete Choice พบว่าเวลาเดินทาง ค่าใช้จ่าย และความสะดวกในการเข้าถึงมีผลต่อการเลือกโหมดการเดินทาง [8] Coppola et al. (2020) ศึกษานโยบายด้านคมนาคมเพื่อสนับสนุนการเดินทางท่องเที่ยว โดยวิเคราะห์ผลของการเข้าถึงระบบขนส่งต่อพฤติกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยว ผลการศึกษาชี้ว่าคุณภาพโครงสร้างพื้นฐานและความสะดวกในการเข้าถึงระบบขนส่งมีผลต่อการตัดสินใจเลือกโหมดการเดินทาง [4] Qi et al. (2020) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกรูปแบบการเดินทางและรูปแบบเส้นทางการท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยวในเมืองหนานจิง ประเทศจีน โดยใช้แบบจำลอง Nested Logit Model ผลการศึกษาพบว่า อายุ ระยะเวลาเดินทาง ค่าใช้จ่าย และลักษณะกิจกรรมการท่องเที่ยวมีผลต่อการเลือกโหมดการเดินทางอย่างมีนัยสำคัญ และนักท่องเที่ยวมักพิจารณารูปแบบกิจกรรมการเดินทางก่อนเลือกรูปแบบการเดินทาง [9] Wulansari et al. (2025) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือก

รูปแบบการเดินทางและรูปแบบการเดินทางต่อเนื่อง (Trip Chain) ของนักท่องเที่ยวในคาบสมุทรบีราประเทศอินโดนีเซีย โดยพบว่า อายุ รายได้ ต้นทาง–ปลายทาง จำนวนครั้งที่เดินทาง ขนาดกลุ่ม ความยืดหยุ่น สิ่งอำนวยความสะดวก ความสะดวกในการเข้าถึง ค่าใช้จ่าย ระยะทาง เวลา และความปลอดภัย เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง อีกทั้งยังพบว่าความยืดหยุ่นและประเภทของกิจกรรมเป็นปัจจัยที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้า และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการอธิบายพฤติกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยวในระดับสูง[1] ส่วนงานวิจัยในไทย Tosporn et al. (2025) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังจังหวัดเชียงรายซึ่งเป็นเมืองท่องเที่ยวชายแดน โดยใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (Multinomial Logit Model: MNL) ผลการศึกษาพบว่า อายุ เพศ รายได้ วัตถุประสงค์การเดินทาง เวลาเดินทาง และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง และนักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนบุคคลมากกว่าระบบขนส่งสาธารณะ สะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะเพื่อสนับสนุนการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การศึกษาการเลือกรูปแบบการเดินทางของนักท่องเที่ยวในเมืองท่องเที่ยวชายแดนยังมีอยู่อย่างจำกัดเมื่อเทียบกับเมืองขนาดใหญ่ โดยใช้แบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุ (MNL) วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง และพบว่าปัจจัยด้านประชากรศาสตร์และลักษณะการเดินทางมีผลต่อการตัดสินใจอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญของการศึกษาพฤติกรรมการเดินทางในบริบทของจังหวัดชายแดน เช่น จังหวัดนครพนม ได้เป็นอย่างดี[2] และ Philuek et al. (2025) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้สูงอายุในประเทศไทย โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง Multinomial Logistic Regression (MNL) กับเทคนิค Machine Learning ผลการศึกษาพบว่า ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เวลาเดินทาง จำนวนผู้ร่วมเดินทาง และฐานะทางเศรษฐกิจเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง โดยแบบจำลอง MNL แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการเดินทางเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเลือกใช้ระบบขนส่งสาธารณะ ขณะที่เทคนิค Machine Learning ให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าแบบจำลอง MNL[10]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือกลุ่มนักท่องเที่ยวเดินทางมาจากต่างจังหวัดเพื่อท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมจำนวน 600 คน ซึ่งการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างใช้สูตรทางสถิติ Cohen’s Sample Size Formula โดยทำการเก็บข้อมูลทั้งในรูปแบบการสัมภาษณ์และการแจกแบบสอบถามให้กับนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาจากต่างจังหวัด โดยทำการเก็บข้อมูลที่สนามบิน สถานีขนส่งรถโดยสารสาธารณะ และจุดท่องเที่ยวสำคัญเช่น ลานพญาศรีสัตนาคราช เนื่องจากเป็นจุดที่นักท่องเที่ยวมาเยือนมากที่สุด เพื่อให้มีจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ Multinomial Logistic Regression

ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาคสนามประกอบด้วยแบบสอบถามที่ออกแบบมาเพื่อสำรวจพฤติกรรมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกรูปแบบ

การเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังจังหวัดนครพนม โดยแบบสอบถามประกอบด้วยคำถามทั้งหมด 4 ส่วน โดยส่วนที่ 1: จะถามข้อมูลทั่วไปของนักท่องเที่ยว (เพศ/อายุ/การศึกษา/สถานภาพสมรส/รายได้เฉลี่ย/ภูมิลำเนา/สถานภาพการเดินทาง) ส่วนที่ 2: จะถามพฤติกรรมการเดินทางเพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน (รูปแบบการเดินทางมาท่องเที่ยวในปัจจุบัน) ส่วนที่ 3: จะถามปัจจัยด้านการเดินทางที่มีผลต่อการตัดสินใจ (ต้นทุน/ความสะดวกสบาย/ความยืดหยุ่น/ความรวดเร็ว/ความปลอดภัย/ความถี่/ความน่าเชื่อถือ/การเข้าถึงการบริการ/ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม/ระยะทาง/จำนวนผู้ร่วมเดินทาง) โดยให้คะแนนความสำคัญของปัจจัย 5 ระดับ (5 = สำคัญมากที่สุด, 4 = สำคัญมาก, 3 = สำคัญปานกลาง , 2 = สำคัญน้อย , 1 = สำคัญน้อยที่สุด) และส่วนที่ 4: การเข้าถึงและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ (ความพร้อมของที่จอดรถ/การเชื่อมต่อภายในจังหวัด/คุณภาพถนน/การมีป้ายบอกทางและข้อมูลการเดินทาง) โดยให้คะแนนความสำคัญของปัจจัย 5 ระดับเช่นเดียวกัน

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทำการตรวจสอบและทำความสะอาดข้อมูลแล้ว ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเรียงและเตรียมให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ ในกรณีที่มีข้อมูลที่ต้องการการปรับปรุงหรือการแปลงข้อมูล เช่น การแปลงตัวแปรที่มีลักษณะเป็นหมวดหมู่ให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ การแปลงหน่วย หรือการคำนวณค่าความแปรปรวน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ต่อไป

ในการศึกษานี้จะใช้ Multinomial Logistic Regression เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยกำหนดกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) เพื่อทำการคำนวณ log-odds ของแต่ละกลุ่ม จากนั้นประเมินค่าสัมประสิทธิ์ (coefficients) ของแต่ละตัวแปร เช่น ค่าใช้จ่าย, เวลาเดินทาง, และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วคำนวณความน่าจะเป็น (Probability) ของแต่ละทางเลือกการเดินทางโดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ข้อมูลจะดำเนินการตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในขั้นตอนการวิจัย โดยจะใช้การทดสอบทางสถิติ เช่น Chi-square Test, F-Test, หรือ p-value เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (เช่น ค่าใช้จ่าย, เวลาเดินทาง) และตัวแปรที่ต้องการทำนาย (รูปแบบการเดินทาง) ซึ่งจะช่วยให้สามารถยืนยันหรือปฏิเสธสมมติฐานที่ตั้งไว้ได้

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการเก็บข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างพบว่านักท่องเที่ยวตอบแบบสอบถามเป็นเพศหญิงมากที่สุดเป็นจำนวน 322 คน รองลงมาเพศชายจำนวน 278 คน อายุ 20-30 ปี มากที่สุดจำนวน 410 คน รองลงมาอายุ 31-40 ปี จำนวน 112 คน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีมากที่สุดจำนวน 493 คน รองลงมาต่ำกว่าปริญญาตรี จำนวน 71 คน สถานะโสดมากที่สุดจำนวน 517 คน สถานะสมรสจำนวน 83 คน มีรายได้ต่ำกว่า 10000 บาท มากที่สุดจำนวน 305 คน รองลงมารายได้ 10001-20000 บาทจำนวน 182 คน สถานภาพการเดินทาง 1 คนมากที่สุดจำนวน 263 คน รองลงมาเดินทาง 2 คนจำนวน 234 คน และเดินทางด้วยรถยต์มากที่สุดจำนวน 334 รองลงมาเดินทางด้วย

เครื่องบินจำนวน 138 คน และรถประจำทางจำนวน 127 คน

4.1 พฤติกรรมการเดินทางเพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน

ผลการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองโลจิสติกพหุ (Model Fitting Information) พบว่าค่า Chi-square เท่ากับ 588.080 และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.001$) แสดงว่าแบบจำลองที่มีตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเลือกโหมดการเดินทางได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่มีตัวแปรอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่1 Model Fitting Information

Model	Model Fitting Criteria	Likelihood Ratio Tests		
	-2 Log Likelihood	Chi-Square	df	Sig.
Intercept Only	773.65	-	-	-
Final	185.57	588.08	39	0

ค่าสถิติ Pearson Chi-Square เท่ากับ 183.089 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.000$) และ Deviance Chi-Square เท่ากับ 140.969 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.002$) จะสามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Goodness of Fit Test

	Chi-Square	df	Sig.
Pearson	183.089	96	0
Deviance	140.969	96	0.002

ส่วนค่า Nagelkerke Pseudo R-Square เท่ากับ 0.722 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของการเลือกโหมดการเดินทางได้ประมาณร้อยละ 72 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Pseudo R-Square

Cox and Snell	0.625
Nagelkerke	0.722
McFadden	0.488

ผลการทดสอบด้วยสถิติ Likelihood Ratio Test ตัวแปรอิสระ เพศ รายได้ สถานภาพการเดินทางสถานะ พบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.000$) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนตัวแปรอื่นๆไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับเนื่องจาก 0.05 ($p > 0.083$) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต โดยค่าประมาณพารามิเตอร์ของรถประจำทาง พบว่า เพศชายมีโอกาสเลือกใช้รถประจำทางมากกว่าเพศหญิงประมาณ 3.689 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ถ้าจำแนกรายได้อยู่ในช่วง 10001-20000 บาท มีโอกาสในการเลือกรถประจำทางลดลง

ประมาณ 0.071 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้รถยนต์ส่วนตัว และสถานภาพการเดินทางคนเดียวมีโอกาสเลือกใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้นประมาณ 19.711 เท่า รองลงมาเดินทางสองคนยังมีโอกาสเลือกใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้นประมาณ 19.020 เท่า เมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ค่าประมาณพารามิเตอร์ของเครื่องบิน พบว่า สถานะโสดมีโอกาสในการเลือกขึ้นเครื่องบินลดลงประมาณ 0.243 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Parameter Estimates

รูปแบบการเดินทาง[a]		B	Sig.	Exp(B)
BUS	เพศ 1.00	1.305	0.000	3.689
	รายได้2.00	-2.641	0.011	0.071
	สถานภาพการเดินทาง 1.00	2.981	0.000	19.711
	สถานภาพการเดินทาง 2.00	2.945	0.000	19.020
AIR PLANE	สถานะ1.00	-1.416	0.031	0.243

a. The reference category is CAR.

4.2 ปัจจัยด้านการเดินทางที่มีผลต่อการตัดสินใจ

ผลการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองโลจิสติกพุ (Model Fitting Information) พบว่าค่า Chi-square เท่ากับ 744.725 และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.000$) แสดงว่าแบบจำลองที่มีตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเลือกโหมดการเดินทางได้ดีกว่าแบบจำลองที่ไม่มีตัวแปรอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 Model Fitting Information

Model	Model Fitting Criteria	Likelihood Ratio Tests		
	-2 Log Likelihood	Chi-Square	df	Sig.
Intercept Only	1019.027 (618.750)	-	-	-
Final	274.302 (485.382)	744.725 (133.368)	33 (12)	0 (0)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บคือ Model Fitting Information ของการเข้าถึงและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่

การทดสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง (Goodness of Fit Test) พบว่าค่าสถิติ Pearson Chi-Square เท่ากับ 246008584.060 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.000$) และ Deviance Chi-Square เท่ากับ 261.344 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.002$) จะสามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้ แต่สังเกตได้ว่าค่า Pearson Chi-square สูงมาก แต่ Deviance กลับต่ำกว่าเพราะค่า Pearson Chi-square และ Deviance Chi-square เป็นสถิติที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง (Goodness-of-Fit) ในการวิเคราะห์แบบจำลอง Multinomial Logistic Regression โดยทั้งสองสถิติอาศัยวิธีการ

คำนวณที่แตกต่างกัน จึงอาจให้ค่า Chi-square แตกต่างกันได้ การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองจึงควรพิจารณาจากระดับนัยสำคัญทางสถิติ (p-value) ของทั้ง Pearson และ Deviance ร่วมกัน โดยหากค่า p-value มากกว่า 0.05 จะถือว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธความเหมาะสมของแบบจำลอง[11] ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 Goodness of Fit Test

	Chi-Square	df	Sig.
Pearson	246008584.060 (557.683)	198 (87)	0 (0)
Deviance	261.344 (444.811)	198 (87)	0.002 (0)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บคือ Goodness of Fit Test ของการเข้าถึงและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่

ส่วนค่าอำนาจการอธิบายของแบบจำลอง (Pseudo R-Square) พบว่า ค่า Nagelkerke Pseudo R-Square เท่ากับ 0.821 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของการเลือกโหมดการเดินทางได้ประมาณร้อยละ 82 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 Pseudo R-Square

Cox and Snell	0.711(0.199)
Nagelkerke	0.821(0.230)
McFadden	0.618(0.111)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บคือ Pseudo R-Square ของการเข้าถึงและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่

การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรอิสระด้วย (Likelihood Ratio Test) พบว่า ต้นทุน/ค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรวม ความสะดวกสบายในการเดินทาง ความรวดเร็ว/ประหยัดเวลาในการเดินทาง ความถี่/ความพร้อมของบริการขนส่ง ความง่ายในการจอง/เข้าถึงบริการ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ความกังวลต่อมลพิษ) จำนวนผู้ร่วมเดินทางมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.000$) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และตัวแปรอิสระไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 $p >$ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ความปลอดภัยของรูปแบบการเดินทางที่เลือก ความน่าเชื่อถือในด้านตารางเวลา ระยะทาง ในการเดินทางที่ไกลมากจากภูมิลำเนา

ถ้านักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับปัจจัยเพิ่มขึ้นหนึ่งระดับจะทำให้นักท่องเที่ยวเลือกใช้รถประจำทางลดลง ได้แก่ ปัจจัยความสะดวกสบายในการเดินทาง 0.429 เท่า ปัจจัยความรวดเร็ว/ประหยัดเวลาในการเดินทาง 0.384 เท่า ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า นักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับความสะดวกสบายและความรวดเร็วในการเดินทางมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่ารถประจำทาง เนื่องจากรถยนต์ส่วนตัวสามารถเดินทางจากต้นทางถึงจุดหมายปลายทางได้โดยตรง ไม่ต้องรอรอบการให้บริการหรือเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางระหว่างทาง อีกทั้งยังสามารถกำหนดเวลาออกเดินทางและเลือกเส้นทางได้อย่างอิสระ ส่งผลให้ใช้เวลาเดินทางโดยรวม

น้อยกว่าและมีความสะดวกสบายมากกว่า[1,12] ส่วนปัจจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ความกังวลต่อมลพิษ) 0.389 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้รถยนต์ส่วนตัว เนื่องจากปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบแต่ยังมีนัยสำคัญ แม้ว่านักท่องเที่ยวจะมีความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมแต่การตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางไม่ได้ขึ้นอยู่กับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียว หากยังคำนึงถึงความสะดวกสบาย ความยืดหยุ่น ความเป็นส่วนตัวและประสิทธิภาพของการเดินทางร่วมด้วย โดยเฉพาะในบริบทของจังหวัดนครพนมที่ระบบขนส่งสาธารณะอาจยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมของเส้นทาง ความถี่ในการให้บริการ และการเชื่อมต่อกับแหล่งท่องเที่ยว ทำให้นักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอาจมองว่าการใช้รถยนต์ส่วนตัวที่มีเทคโนโลยีประหยัดพลังงานหรือรถยนต์รุ่นใหม่ที่ปล่อยมลพิษต่ำสามารถตอบโจทย์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ พร้อมกับยังคงได้รับความสะดวกและความยืดหยุ่นในการเดินทางมากกว่าการใช้รถประจำทาง[13,14]

ส่วนนักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับปัจจัยความง่ายในการจอง/เข้าถึงบริการ โอกาสที่นักท่องเที่ยวจะใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 5.519 เท่า เมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า นักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับความสะดวกในการเข้าถึงบริการขนส่งสาธารณะ เช่น การค้นหาข้อมูลเส้นทาง การจองตั๋วผ่านช่องทางออนไลน์หรือแอปพลิเคชัน การซื้อตั๋วที่สะดวก และการเข้าถึงจุดให้บริการได้ง่าย เมื่อระบบการให้บริการสามารถตอบสนองความต้องการในด้านดังกล่าวได้ จะช่วยลดความยุ่งยากในการวางแผนการเดินทางและเพิ่มความมั่นใจในการใช้บริการ ส่งผลให้นักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้รถประจำทางมากกว่าการใช้รถยนต์ส่วนตัว ซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยระบบการจองหรือช่องทางการให้บริการของผู้ให้บริการขนส่ง[14,15] ส่วนปัจจัยจำนวนผู้ร่วมเดินทางเพิ่มโอกาสใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 2.744 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว เนื่องจากสองปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ติดลบและยังมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่านักท่องเที่ยวที่เดินทางเป็นกลุ่มมีแนวโน้มเลือกรถประจำทางมากขึ้น เนื่องจากสามารถเดินทางร่วมกันได้อย่างสะดวก ลดความยุ่งยากในการขับขี่และการหาที่จอดรถ รวมทั้งช่วยลดภาระในการแบ่งหน้าที่ผู้ขับขี่ทำให้สมาชิกทุกคนสามารถเดินทางและทำกิจกรรมร่วมกันได้ตลอดการเดินทาง นอกจากนี้ การเดินทางด้วยรถประจำทางยังอาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับคณะนักท่องเที่ยวหรือกลุ่มที่จัดโปรแกรมการเดินทางร่วมกัน ซึ่งให้ความสำคัญกับความสะดวกในการเดินทางเป็นหมู่คณะมากกว่าความเป็นส่วนตัวของการใช้รถยนต์ส่วนตัว[1,14]

ส่วนค่าประมาณพารามิเตอร์ของเครื่องบิน พบว่า ถ้านักท่องเที่ยวให้ความสัมคัญกับปัจจัยเพิ่มขึ้นหนึ่งระดับจะทำให้นักท่องเที่ยวเลือกใช้เครื่องบินลดลง ได้แก่ ปัจจัยความสะดวกสบายในการเดินทาง 0.015 เท่า ปัจจัยความยืดหยุ่น/อิสระในการกำหนดเส้นทาง 0.027 เท่า ปัจจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ความกังวลต่อมลพิษ) 0.088 เท่า ปัจจัยจำนวนผู้เดินทาง 0.014 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้รถยนต์ส่วนตัว เนื่องจากปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบแต่ยังมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า แม้เครื่องบินจะมีข้อได้เปรียบด้านความรวดเร็วในการเดินทางระยะไกล แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความสะดวกในการเดินทางแบบครบวงจร เนื่องจากนักท่องเที่ยว

ต้องเดินทางไปยังสนามบิน ผ่านขั้นตอนการเช็กอินและยังต้องจัดหาพาหนะเพื่อเดินทางต่อจากสนามบินไปยังแหล่งท่องเที่ยว ส่งผลให้การใช้รถยนต์ส่วนตัวสามารถตอบสนองความต้องการด้านความสะดวกสบายและความยืดหยุ่นในการเดินทางได้ดีกว่า [16] หรือกล่าวได้ว่าความสะดวกสบายในงานวิจัยนี้หมายถึง ความสะดวกตลอดทั้งการเดินทาง ไม่ใช่เฉพาะความสะดวกขณะนั่งบนเครื่องบินซึ่งรถยนต์ส่วนตัวมีข้อได้เปรียบมากกว่าในบริบทของการท่องเที่ยวจังหวัดนครพนม และสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลอง Multinomial Logistic Regression

ส่วนนักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับ ต้นทุน/ค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรวมโอกาสที่นักท่องเที่ยวจะเลือกใช้บริการเครื่องบินเพิ่มขึ้น 5.307 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว รองลงมาปัจจัยความถี่/ความพร้อมของบริการขนส่งโอกาสใช้บริการเครื่องบินเพิ่มขึ้น18.405 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว เนื่องจากสองปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ติดลบและยังมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่านักท่องเที่ยวไม่ได้พิจารณาเฉพาะราคาค่าโดยสารเครื่องบิน แต่พิจารณาต้นทุนการเดินทางโดยรวม ซึ่งรวมถึงค่าเชื้อเพลิง ค่าทางด่วน ค่าเสื่อมสภาพของรถยนต์ ค่าใช้จ่ายระหว่างการเดินทาง และมูลค่าของเวลาที่ใช้ในการเดินทาง โดยเฉพาะนักท่องเที่ยวที่เดินทางจากพื้นที่ห่างไกล การเดินทางด้วยเครื่องบินอาจช่วยลดระยะเวลาในการเดินทางและลดต้นทุนแฝงต่าง ๆ จึงถูกมองว่ามีความคุ้มค่ามากกว่าการใช้รถยนต์ส่วนตัว นอกจากนี้ ปัจจัยด้านความถี่และความพร้อมของบริการขนส่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สนับสนุนการเลือกใช้เครื่องบิน เนื่องจากหากมีเที่ยวบินที่เพียงพอ ตารางบินมีความเหมาะสม และสามารถเชื่อมต่อกับรูปแบบการเดินทางอื่นได้สะดวก นักท่องเที่ยวจะมีความมั่นใจในการวางแผนการเดินทางมากขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มเลือกใช้เครื่องบินมากกว่ารถยนต์ส่วนตัว[17] ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 Parameter Estimates

รูปแบบการเดินทาง[a]		B	Sig.	Exp(B)
BUS	ความสะดวกสบาย	-0.847	0.009	0.429
	ความรวดเร็ว/ประหยัดเวลา	-0.957	0.003	0.384
	ความง่ายในการจอง/เข้าถึงบริการ	1.708	0.001	5.519
	ความกังวลต่อมลพิษ	-0.944	0.002	0.389
	จำนวนผู้ร่วมเดินทาง	1.009	0.001	2.744
AIR PLANE	ต้นทุน/ค่าใช้จ่าย	1.669	0.033	5.307
	ความสะดวกสบาย	-4.214	0.000	0.015
	ความยืดหยุ่น/อิสระในการกำหนดเส้นทาง	-3.610	0.000	0.027

รูปแบบการเดินทาง[a]		B	Sig.	Exp(B)
	ความถี่/ความพร้อมของบริการขนส่ง	2.913	0.002	18.405
	ความกังวลต่อมลพิษ	-2.435	0.019	0.088
	จำนวนผู้ร่วมเดินทาง	-4.294	0.000	0.014

ส่วนการเข้าถึงและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ดัง แสดงในตารางที่ 9 พบว่า ค่าประมาณพารามิเตอร์ของรถประจำทางนั้นถ้านักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับปัจจัยขึ้นหนึ่งระดับจะทำให้นักท่องเที่ยวเลือกใช้รถประจำทางลดลง ได้แก่ ปัจจัยความพร้อมของที่จอดรถในแหล่งท่องเที่ยว 0.279 เท่า ปัจจัยคุณภาพถนน/สภาพเส้นทางที่ใช้ในการเดินทาง 0.598 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้รถยนต์ส่วนตัว เนื่องจากปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบแต่ยังมีระยะนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า นักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวและโครงสร้างพื้นฐานมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่า เนื่องจากเมื่อแหล่งท่องเที่ยวมีที่จอดรถเพียงพอและถนนมีคุณภาพดี การเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนตัวจะมีความสะดวก รวดเร็ว และสามารถเข้าถึงจุดหมายปลายทางได้โดยตรง อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการกำหนดเส้นทางและช่วงเวลาเดินทางมากกว่าการใช้รถประจำทาง ในทางกลับกัน การมีที่จอดรถที่เพียงพอและคุณภาพถนนที่ดีไม่ได้เพิ่มความสะดวกให้กับผู้ใช้รถประจำทางโดยตรง เนื่องจากผู้โดยสารยังต้องเดินทางตามเส้นทางและตารางเวลาที่ผู้ให้บริการกำหนด รวมทั้งอาจต้องเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางหรือเดินเท้าเพื่อเข้าสู่แหล่งท่องเที่ยว ดังนั้น เมื่อโครงสร้างพื้นฐานเอื้อต่อการใช้รถยนต์ส่วนตัวมากขึ้น นักท่องเที่ยวจึงมีแนวโน้มลดการเลือกใช้รถประจำทางและหันไปใช้รถยนต์ส่วนตัวแทน[14]

ส่วนนักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับปัจจัยความสะดวกในการเดินทางต่อในจังหวัด โอกาสที่นักท่องเที่ยวจะใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 3.773 เท่า เมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า นักท่องเที่ยวที่ให้ความสำคัญกับการเดินทางเชื่อมต่อภายในจังหวัดมีแนวโน้มเลือกใช้รถประจำทางมากขึ้น เนื่องจากสามารถใช้บริการขนส่งสาธารณะในการเดินทางต่อไปยังแหล่งท่องเที่ยวหรือจุดหมายต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก ลดภาระในการขับขี่ การค้นหาเส้นทาง และการหาที่จอดรถ อีกทั้งหากระบบขนส่งสาธารณะภายในจังหวัดมีการเชื่อมต่อที่ดี มีเส้นทางครอบคลุม และสามารถเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวสำคัญได้ นักท่องเที่ยวจะมีความเชื่อมั่นในการใช้รถประจำทางมากขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มเลือกใช้รถประจำทางแทนการใช้รถยนต์ส่วนตัว [18,19]

ส่วนค่าประมาณพารามิเตอร์ของเครื่องบินพบว่า ถ้านักท่องเที่ยวให้ความสัมคัญกับปัจจัยคุณภาพถนน/สภาพเส้นทางที่ใช้ในการเดินทางเพิ่มขึ้นหนึ่งระดับจะทำให้นักท่องเที่ยวใช้บริการเครื่องบินลดลง 0.268 เท่าถ้าเทียบกับรถยนต์ ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่า เมื่อนักท่องเที่ยวรับรู้ว่าถนนมีคุณภาพดี สภาพเส้นทางมีความปลอดภัย และสามารถเดินทางได้อย่างสะดวก จะมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่า

การเดินทางด้วยเครื่องบิน เนื่องจากรถยนต์ส่วนตัวสามารถเดินทางจากต้นทางถึงแหล่งท่องเที่ยวได้โดยตรง มีความยืดหยุ่นในการกำหนดเส้นทางและเวลาเดินทาง รวมทั้งสามารถแวะสถานที่ท่องเที่ยวระหว่างทางได้ตามความต้องการ ในทางกลับกัน การเดินทางด้วยเครื่องบินยังต้องอาศัยการเดินทางเชื่อมต่อระหว่างสนามบินกับแหล่งท่องเที่ยว รวมถึงมีข้อจำกัดด้านตารางเวลาและขั้นตอนการเดินทาง ดังนั้น เมื่อโครงสร้างพื้นฐานด้านถนนมีคุณภาพและเอื้อต่อการเดินทางมากขึ้น นักท่องเที่ยวจึงมีแนวโน้มลดการเลือกใช้เครื่องบิน และหันมาใช้รถยนต์ส่วนตัวแทน[14,16]

ส่วนนักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับปัจจัยความพร้อมของที่จอดรถในแหล่งท่องเที่ยว โอกาสจะเลือกใช้บริการเครื่องบินเพิ่มขึ้น 4.843 เท่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนตัว ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนว่านักท่องเที่ยวที่เลือกเดินทางด้วยเครื่องบินยังคงให้ความสำคัญกับความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ณ จุดหมายปลายทาง เนื่องจากหลังจากเดินทางมาถึงจังหวัดแล้ว ยังต้องใช้พาหนะรูปแบบอื่น เช่น รถเช่า รถแท็กซี่ หรือรถของญาติและเพื่อน เพื่อเดินทางไปยังแหล่งท่องเที่ยว ดังนั้น หากแหล่งท่องเที่ยวมีที่จอดรถเพียงพอ จะช่วยอำนวยความสะดวกให้กับการเดินทางต่อภายในพื้นที่ ทำให้การเดินทางโดยรวมมีความคล่องตัวมากขึ้น และส่งผลให้นักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้เครื่องบินมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้รถยนต์ส่วนตัว[16]

ตารางที่ 9 Parameter Estimates

รูปแบบการเดินทาง[a]		B	Sig.	Exp(B)
BUS	ความพร้อมของที่จอดรถในแหล่งท่องเที่ยว	-1.278	0.000	0.279
	ความสะดวกในการเดินทางต่อในจังหวัด	1.328	0.000	3.773
	คุณภาพถนน/สภาพเส้นทาง	-0.515	0.048	0.598
AIR PLANE	ความพร้อมของที่จอดรถในแหล่งท่องเที่ยว	1.577	0.000	4.843
	คุณภาพถนน/สภาพเส้นทาง	-1.317	0.000	0.268

4.3 สมการอรรถประโยชน์ (Utility Function) และสมการความน่าจะเป็น (Probability)

ในการศึกษานี้กำหนดให้ รถยนต์ส่วนตัว (CAR) เป็นทางเลือกอ้างอิง (Reference Category) ดังนั้นจะมีสมการอรรถประโยชน์ 2 สมการ ได้แก่

$$U_{Bus} = 1.305(Gender) -$$

$$2.641(Income) + 2.981(Travel\ Status1) + 2.945(Travel\ Status) - 0.847(Comfort) - 0.957(Travel\ Speed) + 1.708(Booking\ Accessibility) - 0.944(Environment\ Concern) + 1.009(Number\ of\ Companions) - 1.278(Parking\ Availability) + 1.328(Travel\ Connectivity) - 0.515(Road\ Quality) \quad (5)$$

$$U_{Air} = -1.416(Status) + 1.669(Travel\ Cost) - 4.214(Comfort) - 3.610(Travel\ Flexibility) + 2.913(Service\ Frequency) - 2.435(Environment\ Concern) - 4.294(Number\ of\ Companions) + 1.577(Parking\ Availability) - 1.317(Road\ Quality) \quad (6)$$

ส่วนสมการความน่าจะเป็น (Probability) เมื่อกำหนดให้ CAR เป็น Reference Category จะได้สมการในแต่ละทางเลือกดังนี้

$$P(CAR) = \frac{1}{1 + e^{U_{Bus}} + e^{U_{Air}}} \quad (7)$$

$$P(BUS) = \frac{e^{U_{Bus}}}{1 + e^{U_{Bus}} + e^{U_{Air}}} \quad (8)$$

$$P(AIR) = \frac{e^{U_{Air}}}{1 + e^{U_{Bus}} + e^{U_{Air}}} \quad (9)$$

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการประมาณค่าแบบจำลองถดถอยโลจิสติกพหุทางเลือก (Multinomial Logistic Regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติพบว่า ปัจจัยด้านคุณลักษณะส่วนบุคคลและปัจจัยด้านการบริกาคมนาคมมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการตัดสินใจเลือกประเภทยานพาหนะของนักท่องเที่ยวโดยแบบจำลองมีความเหมาะสมของโมเดลในภาพรวมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการเลือกการเดินทางได้ในระดับสูง จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเสนอข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและแนวทางพัฒนา ดังนี้

5.1 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1 **พัฒนาความถี่และความพร้อมของระบบขนส่งทางอากาศ** เนื่องจากปัจจัยด้านความถี่และความพร้อมของบริการขนส่งมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้เครื่องบินสูงที่สุด (Exp(B) = 18.405) หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรประสานความร่วมมือกับสายการบินและท่าอากาศยานในการเพิ่มความถี่ของเที่ยวบิน ปรับช่วงเวลาเที่ยวบินให้เหมาะสมกับความต้องการของนักท่องเที่ยว และเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมต่อระหว่างสนามบินกับแหล่งท่องเที่ยว เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเดินทางเข้าสู่จังหวัดนครพนม

2 **ยกระดับระบบการจองและการเข้าถึงบริการขนส่งสาธารณะ** จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านความง่ายในการจองและการเข้าถึงบริการส่งผลให้โอกาสเลือกใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 5.519 เท่า ดังนั้นควรพัฒนาระบบจองตั๋วออนไลน์ แอปพลิเคชันการเดินทาง ระบบแสดงข้อมูลตารางเดินรถแบบ Real-time และเพิ่มช่องทางการเข้าถึงข้อมูลการเดินทางเพื่ออำนวยความสะดวกและสร้างความเชื่อมั่นในการใช้บริการรถประจำทาง

3 **พัฒนาระบบขนส่งเชื่อมต่อภายในจังหวัด (Last-mile Transportation)** ผลการศึกษาพบว่า

ESTACON 2026 | 17th

ปัจจัยด้านความสะดวกในการเดินทางต่อภายในจังหวัดส่งผลให้โอกาสเลือกใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 3.773 เท่า จึงควรพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะเชื่อมต่อระหว่างสถานีขนส่ง สนามบิน สถานที่พักและแหล่งท่องเที่ยว เช่น รถ Shuttle Bus รถโดยสารท้องถิ่น หรือระบบ Feeder เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเดินทางต่อและลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนตัว

4 **ส่งเสริมการเดินทางเป็นกลุ่มผ่านระบบขนส่งสาธารณะ** เนื่องจากจำนวนผู้ร่วมเดินทางส่งผลให้โอกาสเลือกใช้รถประจำทางเพิ่มขึ้น 2.744 เท่า หน่วยงานด้านการท่องเที่ยวควรสนับสนุนแพ็กเกจการเดินทางสำหรับนักท่องเที่ยวแบบกลุ่ม ครอบครัว หรือคณะทัวร์ พร้อมจัดสิทธิประโยชน์หรือส่วนลดสำหรับการเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะ เพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้ระบบขนส่งสาธารณะ

5 **ยกระดับคุณภาพการให้บริการรถโดยสารสาธารณะ** ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านความสะดวกสบาย ความรวดเร็ว และการประหยัดเวลาส่งผลให้นักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่ารถประจำทาง ดังนั้น ควรปรับปรุงคุณภาพรถโดยสาร เพิ่มความตรงต่อเวลา เพิ่มความถี่ในการให้บริการ ลดระยะเวลาการรอคอย และปรับเส้นทางให้สามารถเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวสำคัญได้โดยตรง เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับรถยนต์ส่วนตัว

6. **พัฒนาระบบขนส่งสาธารณะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม** แม้ว่านักท่องเที่ยวจะให้ความสำคัญกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่า ดังนั้น ควรปรับเปลี่ยนรถโดยสารให้เป็นรถพลังงานสะอาด เช่น รถโดยสารไฟฟ้า (EV) หรือรถโดยสารที่มีมาตรฐานการปล่อยมลพิษต่ำ พร้อมทั้งประชาสัมพันธ์ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อสร้างภาพลักษณ์ของระบบขนส่งสาธารณะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

7. **พัฒนาการเชื่อมต่อระหว่างสนามบินกับแหล่งท่องเที่ยว** ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านความสะดวกสบาย ความยืดหยุ่น และคุณภาพถนน ส่งผลให้นักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากกว่าเครื่องบิน ดังนั้น ควรพัฒนาระบบขนส่งต่อเนื่องจากสนามบินไปยังแหล่งท่องเที่ยว เช่น รถ Shuttle Bus รถเช่าสาธารณะ และศูนย์บริการนักท่องเที่ยว เพื่อให้การเดินทางด้วยเครื่องบินมีความสะดวกแบบDoor-to-door มากยิ่งขึ้น และ

8. **บริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐานให้สมดุลกับการใช้ระบบขนส่งสาธารณะ** แม้ว่าการพัฒนาถนนและที่จอดรถจะช่วยอำนวยความสะดวกแก่นักท่องเที่ยว แต่ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้นักท่องเที่ยวมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนตัวมากขึ้น ดังนั้น การลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานควรดำเนินควบคู่กับการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ เช่น การจัดพื้นที่ Park and Ride จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร และระบบขนส่งเชื่อมต่อ เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการใช้รถยนต์ส่วนตัวและระบบขนส่งสาธารณะ และสนับสนุนการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการทำวิจัยครั้งต่อไป

ควรเพิ่มตัวแปรด้านจิตวิทยาและทัศนคติของนักท่องเที่ยว เช่น แรงจูงใจ ความคุ้มค่าในการรับรู้ ความพึงพอใจ และภาพลักษณ์แหล่งท่องเที่ยว เพื่ออธิบายพฤติกรรมที่แบบจำลองปัจจุบันยังไม่ครอบคลุม และควรขยายขนาดและความหลากหลายของกลุ่มตัวอย่างโดยเก็บข้อมูลจากนักท่องเที่ยวหลาย

ช่วงเวลาและหลายฤดูกาล เพื่อเพิ่มความแม่นยำทางสถิติและความสามารถในการสรุปอ้างอิงผล

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากนักท่องเที่ยว บุคคลและหน่วยงานต่างๆ มากมาย คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Wulansari, I., et al., *Modeling Tourist Transportation Mode Choice and Trip Chains Through Key Influencing Factors.* Civil Engineering Journal, 2025. **11**(2): p. 688-703.
2. Tosporn, A., et al., *Determinants of intercity mode choice preferences and travel behavior in a border tourism city.* Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2025. **34**: p. 101638.
3. Train, K.E., *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2 ed. 2009, Cambridge: Cambridge University Press.
4. Coppola, P., et al., *Assessing transport policies for tourist mobility based on accessibility indicators.* European Transport Research Review, 2020. **12**(1): p. 56.
5. Ben-Akiva, M.E. and S.R. Lerman, *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. 1985: MIT Press.
6. Srisawat, P., et al., *Tourist Behavior and Sustainable Tourism Policy Planning in the COVID-19 Era: Insights from Thailand.* Sustainability, 2023. **15**(7): p. 5724.
7. Zou, L. and T. Yai, *Exploration of mental envelope determinants when pedestrians interact with various mobilities on mixed streets.* Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022. **85**: p. 24-37.
8. Harz, J. and C. Sommer, *Mode choice of city tourists: Discrete choice modeling based on survey data from a major German city.* Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2022. **16**: p. 100704.
9. Qi, C., et al., *Examining Interrelationships between Tourist Travel Mode and Trip Chain Choices Using the Nested Logit Model.* Sustainability, 2020. **12**(18): p. 7535.
10. Philuek, A., et al., *Elderly travel mode choice in Thailand-evaluating MNL and machine learning models.* Frontiers in Built Environment, 2025. **Volume 11 - 2025**.
11. Fagerland, M.W., D.W. Hosmer, and A.M. Bofin, *Multinomial goodness-of-fit tests for logistic regression models.* Stat Med, 2008. **27**(21): p. 4238-53.
12. Ruslan, R., F. Rachman, and Z. Abdullah, *Evaluating the Effects of Travel Time and Cost on Mode Choice in Transportation System.* Disaster in Civil Engineering and Architecture, 2025. **2**: p. 128-144.
13. Zhou, H., et al., *Tourists vs. residents: Nested logit analysis of mode choices for environmental sustainability.* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2025. **138**: p. 104521.
14. Iamtrakul, P., J. Klaylee, and I.-s. Raungratanaamporn, *An Evaluation of Travel Mode Choice and Travel Patterns: A Case Study in Pathum Thani Province, Thailand.* Sage Open, 2024. **14**(4): p. 21582440241292887.
15. Wani, S.A., et al., *Digital payment adoption in public transportation: Mediating role of mode choice segments in developing cities.* Transportation Research Part A:

Policy and Practice, 2025. **191**: p. 104319.
16. Jang, H., et al., *Urban air mobility for airport access: Mode choice preference associated with socioeconomic status and airport usage behavior.* Journal of Air Transport Management, 2025. **124**: p. 102719.
17. Cao, W., et al., *Analysis of Travel Mode Choice Behavior between High-Speed Rail and Air Transport Utilizing Large-Scale Ticketing Data.* Transportation Research Record, 2025. **2679**(2): p. 1344-1358.
18. Iamtrakul, P., et al., *Promoting accessibility for sustainable tourism: a spatial analysis of tourist attractions and public transportation networks in Bangkok.* City, Territory and Architecture, 2025. **12**(1): p. 13.
19. Ni, X., et al., *Tourist Uncertainty Premium for Intra-Destination Public Transport: A Context-Specific Hybrid Choice Model.* Journal of Hospitality & Tourism Research, 2025. **49**(7): p. 1317-1331.

การประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

Application of Industrial Engineering Tools for Defect Reduction in the Automotive Parts Manufacturing Process

สุทธิดา การะเวก[1], สราวุธ อิศรานุวัฒน์[2], อมรรัตน์ พรประเสริฐ[3], ยุทธณรงค์ จงจันทร์[4], และ วชิรวิทย์ โพธิ์นอก[5]*

[1, 4, 5]*สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

[2]สาขาวิชาการออกแบบผลิตภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

[3]สาขาวิชาการจัดการทั่วไป คณะบริหารธุรกิจและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี 2 ถนนราชธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000

*ผู้ติดต่อ: E-mail, 68003538031@mail.rru.ac.th, 0937956291

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา โดยมุ่งเน้นปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน Butsu ซึ่งเป็นข้อบกพร่องด้านคุณภาพผิวที่ส่งผลโดยตรงต่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของลูกค้า การดำเนินงานเริ่มจากการสำรวจข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิต พบว่าจากการผลิต 100,000 ชิ้น มีของเสียรวม 128 ชิ้น หรือ 1,280 PPM โดยปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานพบมากที่สุด จำนวน 33 ชิ้น หรือ 330 PPM ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายของลูกค้าที่กำหนดไว้ไม่เกิน 3 PPM ผู้วิจัยจึงใช้แผนภูมิพาเรโตและการให้คะแนนแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อคัดเลือกปัญหาหลัก จากนั้นวิเคราะห์สาเหตุด้วยเทคนิค 5 Why และ 4M พบว่าสาเหตุสำคัญเกี่ยวข้องกับสิ่งปนเปื้อนในกระบวนการชุบผิว ได้แก่ การร่วงของก้อนแอโนดลงในบ่อชุบ การควบคุมแรงลมไม่เหมาะสม และการล้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไม่สะอาด แนวทางปรับปรุงประกอบด้วยการจัดทำที่ครอบเติมแอโนด การติดตั้งสเกลวัดแรงลม และการกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานก่อนใช้งาน ผลการปรับปรุงพบว่าของเสียจากปัญหาเม็ดนูนลดลงจาก 33 ชิ้น เหลือ 0 ชิ้นต่อการผลิต 100,000 ชิ้น หรือจาก 330 PPM เหลือ 0 PPM คิดเป็นการลดลง 100% ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการร่วมกับแนวคิดไคเซ็นสามารถลดของเสีย ควบคุมคุณภาพ และเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการ การลดของเสีย ชิ้นส่วนประดับรถยนต์ ไคเซ็น

Abstract

This study aimed to reduce defects in the production process of automotive decorative parts at a case study company, with particular emphasis on raised surface defects, known as Butsu. This defect directly affects the visual quality of the product and customer acceptance. The study began by surveying defect data in the production process. Based on a production volume of 100,000 pieces, 128 defective pieces were identified, equivalent to 1,280 PPM. Among these defects, Butsu was the most frequently occurring problem, with 33 defective pieces or 330 PPM, which exceeded the customer's target of no more than 3 PPM. Therefore, a Pareto chart and a weighted scoring method were applied to select the primary problem for improvement. Root-cause analysis was then conducted using the 5 Why technique and 4M analysis. The results revealed that the major causes were related to contamination in the plating process, including copper anode pieces falling into the plating bath, improper air flow control, and

insufficient cleaning of the workpiece holding rack. The improvement measures consisted of installing an anode cover, adding an air flow scale, and establishing a standard inspection procedure for the workpiece holding rack before use. After implementation, Butsu defects were reduced from 33 pieces to 0 pieces per 100,000 pieces produced, or from 330 PPM to 0 PPM, representing a 100% reduction. The findings indicate that the application of industrial engineering tools combined with the Kaizen concept can effectively reduce defects, improve quality control, and enhance the stability of the automotive parts manufacturing process.

Keywords: Industrial engineering tools, Defect reduction, Automotive decorative parts, Kaizen

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต เนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีผลโดยตรงต่อความเชื่อมั่นของลูกค้าและความสามารถในการแข่งขันของผู้ผลิต โดยเฉพาะชิ้นส่วนตกแต่งภายนอกที่สามารถมองเห็นได้จากภายนอกตัวรถยนต์ ซึ่งคุณภาพด้านพื้นผิว รูปลักษณ์ และความสม่ำเสมอของชิ้นงานถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของลูกค้า หากกระบวนการผลิตไม่สามารถควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพได้อย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ (Defect) ของเสียภายในกระบวนการผลิต (In-house Defect) การตรวจสอบซ้ำ การแก้ไขงาน และต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างเป็นระบบจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดของเสียและเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิต

จากการศึกษาข้อมูลของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าปัญหาด้านคุณภาพผิวของชิ้นงานเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต โดยเฉพาะปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ซึ่งมีลักษณะเป็นจุดนูนหรือสิ่งผิดปกติบนพื้นผิวหลังผ่านกระบวนการชุบผิว ส่งผลต่อความเรียบ ความสวยงาม และคุณภาพด้านรูปลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลการผลิตจำนวน 100,000 ชิ้น รวมของเสีย 128 ชิ้น คิดเป็น 1,280 PPM โดยปัญหา Butsu เป็นข้อบกพร่องที่พบมากที่สุด จำนวน 33 ชิ้น หรือ 330 PPM ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายด้านคุณภาพที่ลูกค้ากำหนดไว้ไม่เกิน 3 PPM ดังนั้น ปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องได้รับการวิเคราะห์หาสาเหตุรากและกำหนดแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดซ้ำและยกระดับความสามารถในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการและเครื่องมือควบคุมคุณภาพ เช่น แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) การวิเคราะห์สาเหตุรากด้วย 5 Why การวิเคราะห์แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) และแนวคิด 8D มาใช้ในการวิเคราะห์และลดของเสียในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งสามารถช่วยระบุปัญหาหลักและกำหนดแนวทางแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการลดของเสียในกระบวนการผลิตโดยภาพรวม หรือมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาหลังจากเกิดข้อบกพร่องแล้ว โดยยังมีข้อจำกัดด้านการวิเคราะห์ปัจจัยเฉพาะของกระบวนการชุบผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย รวมถึงยังขาดการกำหนดมาตรการควบคุมหลังการปรับปรุงเพื่อรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตในระยะยาว

งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการ ได้แก่ แผนภูมิพาเรโต วิธีการให้คะแนน

แบบถ่วงน้ำหนัก การวิเคราะห์ 5 Why และการวิเคราะห์ 4M ร่วมกับแนวคิดไคเซ็น (Kaizen) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุรากของปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นส่วนประดับรถยนต์ และกำหนดมาตรการปรับปรุงที่เหมาะสม รวมถึงจัดทำแนวทางควบคุมกระบวนการหลังการปรับปรุง เพื่อช่วยลดของเสีย เพิ่มความสามารถในการควบคุมคุณภาพ และสร้างความมั่นคงให้กับกระบวนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อลดปัญหาของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ ของบริษัทกรณีศึกษาตัวอย่าง

2) ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการปรับปรุงการผลิตอย่างเป็นระบบเพื่อลดของเสียให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านคุณภาพของลูกค้า

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผนภูมิพาเรโต

แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) เป็นเครื่องมือที่ใช้จัดลำดับความสำคัญของปัญหาจากข้อมูลเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการที่ว่าปัญหาจำนวนน้อยมักก่อให้เกิดผลกระทบส่วนใหญ่ต่อระบบการผลิต แนวคิดนี้ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาที่มีผลกระทบสูงก่อน แทนการกระจายทรัพยากรไปยังปัญหาทุกประเภทอย่างเท่าเทียม [1] ในงานควบคุมคุณภาพ แผนภูมิพาเรโตนิยมใช้เพื่อจำแนกประเภทของเสีย วิเคราะห์ความถี่ของปัญหา และเลือกหัวข้อปรับปรุงที่มีความสำคัญได้ [2]

2.2 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค 5 Whys

การวิเคราะห์ 5 Why เป็นเทคนิคการค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหาโดยตั้งคำถามว่า “ทำไม” ซ้ำอย่างเป็นลำดับ จากปัญหาไปสู่สาเหตุที่แท้จริง เทคนิคนี้มีจุดเด่นคือ เข้าใจง่าย และเหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาหน้างานร่วมกับผู้ปฏิบัติงานจริง [3] การใช้เทคนิค 5 Why อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจริงจากกระบวนการผลิตจริงไม่ควรหยุดการวิเคราะห์เพียงสาเหตุผิวเผิน และควรตรวจสอบยืนยันสาเหตุด้วยการทดลอง [4]

2.3 การวิเคราะห์ 4M

การวิเคราะห์ 4M เป็นแนวทางการจำแนกสาเหตุของปัญหาตามองค์ประกอบหลักของกระบวนการผลิต ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัสดุ (Material) การจัดกลุ่มสาเหตุด้วย 4M ช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหามีโครงสร้างชัดเจน ลดความสับสนจากสาเหตุจำนวนมาก และช่วยให้ทีมงานมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [5] ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ 4M ถูกใช้เพื่อจัดกลุ่มสาเหตุของปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน โดยพิจารณาสาเหตุจากด้านคน วิธีการ วัสดุ และเครื่องจักร จากนั้นจึงมีการพิสูจน์สาเหตุเพื่อแยกสาเหตุที่เกี่ยวข้องจริงออกจากสาเหตุที่ไม่ใช่ประเด็นหลัก การดำเนินการดังกล่าวทำให้สามารถเลือกมาตรการแก้ไขได้ตรงจุด

2.4 การคัดเลือกปัญหาด้วยวิธีถ่วงน้ำหนัก

การคัดเลือกปัญหาด้วยวิธีถ่วงน้ำหนัก (Weighted Scoring Method) เป็นวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบปัญหาหรือทางเลือกหลายรายการ โดยกำหนดน้ำหนักของแต่ละปัจจัยตามความสำคัญ แล้วให้คะแนนแต่ละปัญหาตามเกณฑ์ที่กำหนด จากนั้นนำคะแนนมาคำนวณเป็นคะแนนรวมถ่วงน้ำหนักเพื่อจัดลำดับความสำคัญ [6] วิธีนี้เหมาะสำหรับสถานการณ์ที่การตัดสินใจไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเสียเพียงอย่างเดียว แต่ต้องพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ความรุนแรง ความถี่ ความสามารถในการตรวจพบ ต้นทุนในการแก้ไข และโอกาสในการแก้ไขสำเร็จ [7] ในงานวิจัยนี้ วิธีถ่วงน้ำหนักถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการเลือกปัญหาที่ควรปรับปรุงก่อน โดยใช้ร่วมกับผลจากแผนภูมิพาเรโต ทำให้การตัดสินใจมีความรอบด้านมากขึ้น

2.5 ไคเซ็น

ไคเซ็น (Kaizen) เป็นแนวคิดการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องที่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการทีละเล็กทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ โดยอาศัยการมีส่วนร่วมของพนักงานทุกระดับ แนวคิดนี้ให้ความสำคัญกับการ

มองเห็นปัญหา การปรับปรุงหน้างาน การกำหนดมาตรฐาน การปฏิบัติตามมาตรฐาน และการติดตามผลเพื่อป้องกันการเกิดซ้ำ [8] ไคเซ็นจึงเหมาะกับงานปรับปรุงกระบวนการผลิตที่ต้องการลดความสูญเสีย ลดของเสีย และสร้างวัฒนธรรมการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในองค์กร [9] แนวคิดไคเซ็นถูกใช้เป็นกรอบในการปรับปรุงกระบวนการผลิตหลังจากระบุสาเหตุของปัญหา โดยเน้นการแก้ไขจากหน้างานจริง เช่น การปรับปรุงอุปกรณ์ป้องกันวัสดุตกลงในบ่อชุบ การกำหนดค่ามาตรฐานของแรงลม การเพิ่มจุดตรวจสอบคุณภาพ การจัดทำเอกสารมาตรฐานการทำงาน การฝึกอบรมพนักงาน และการติดตามผลโดยหัวหน้างาน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องและการป้องกันปัญหาเกิดซ้ำ

2.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดของเสียในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการและเครื่องมือควบคุมคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์ปัญหา ค้นหาสาเหตุ และกำหนดแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิต โดย Memon และคณะ [10] ได้ศึกษาการลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tools) ได้แก่ แผนภูมิพาเรโต ใบตรวจสอบ และแผนผังเหตุและผล ผลการศึกษาพบว่าสามารถช่วยระบุปัญหาหลักและลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นการวิเคราะห์ของเสียในภาพรวมของกระบวนการผลิต และไม่ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยเฉพาะของกระบวนการชุบผิวซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย Lestyánszka Skurkova และคณะ [11] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ โดยประยุกต์ใช้แผนภูมิพาเรโต (Pareto Analysis) ร่วมกับแนวทาง 8D เพื่อค้นหาปัญหาหลัก วิเคราะห์สาเหตุ และกำหนดมาตรการแก้ไข ผลการศึกษาพบว่าวิธีการดังกล่าวช่วยลดโอกาสการเกิดข้อบกพร่องและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์เชิงลึกของปัจจัยด้านกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิว รวมถึงยังไม่ได้แสดงแนวทางการควบคุมกระบวนการภายหลังการปรับปรุงอย่างชัดเจน Manojkumar และ Kumar [12] ได้ศึกษาการลดข้อบกพร่องของชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด ซึ่งสามารถช่วยค้นหาปัญหาและกำหนดแนวทางการปรับปรุงจากข้อมูลจริงของกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพเพื่อแก้ไขปัญหาของเสียเป็นหลัก แต่ยังขาดการวิเคราะห์สาเหตุรากโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยด้านคน เครื่องจักร วิธีการ และวัสดุ (4M) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของกระบวนการผลิต

นอกจากนี้ แนวคิดไคเซ็น (Kaizen) เป็นแนวทางการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง โดยเน้นการมีส่วนร่วมของผู้ปฏิบัติงาน การกำหนดมาตรฐานการทำงาน และการติดตามผลหลังการปรับปรุง [8] ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับแนวทาง PDCA เพื่อแก้ไขปัญหาของเสียในอุตสาหกรรมการผลิต [13], [14] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังไม่ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดไคเซ็นร่วมกับการวิเคราะห์สาเหตุรากของปัญหาข้อบกพร่องด้านพื้นผิวในกระบวนการชุบผิวชิ้นส่วนยานยนต์

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลผลิตภัณฑ์และขั้นตอนการผลิต

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ชิ้นส่วนประดับรถยนต์ ของบริษัทตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนประดับรถยนต์ตัวอย่าง

จากรูปที่ 1 แสดงชิ้นส่วนโลโก้ประดับรถยนต์ตัวอย่างที่มีความสำคัญต่อคุณภาพด้านรูปลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นได้โดยตรง ผิวของชิ้นงานจึงต้องมีความเรียบ สวยงาม มีความเงาสม่ำเสมอ และปราศจากข้อบกพร่อง เช่น เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน รอยขีดข่วน คราบด่าง สิ่งสกปรก หรือผิวไม่สม่ำเสมอ หากชิ้นงานมีความบกพร่องด้านผิว อาจส่งผลต่อการยอมรับของลูกค้า และทำให้เกิดของเสียภายในกระบวนการผลิตหรือของเสียที่ตรวจพบในขั้นตอนรับเข้าของลูกค้าได้ ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนโลโก้รถยนต์ ของบริษัทตัวอย่างมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์

จากรูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ในลักษณะการไหลของกระบวนการผลิตตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ โดยเริ่มจาก ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อสร้างชิ้นงานพื้นฐานให้ได้รูปทรงตามที่กำหนด จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการชุบผิว เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิว เพิ่มความเงางาม และความทนทานของชิ้นงาน ต่อมาเป็น ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการประกอบและติดตั้งชิ้นส่วน ซึ่งเป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแล้วมาติดตั้งหรือประกอบเข้ากับตำแหน่งที่กำหนดอย่างถูกต้อง จากนั้นเข้าสู่ ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ทั้งด้านขนาด ผิวงาน และข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนที่ 5 กระบวนการส่งมอบผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยการบรรจุภัณฑ์ การเตรียมสินค้า และการจัดส่งให้ลูกค้า โดยภาพรวมของกระบวนการนี้สะท้อนให้เห็นว่าการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ต้องอาศัยการควบคุมคุณภาพในทุกขั้นตอนอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด ลดโอกาสการเกิดของเสีย และสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้า

3.2 สำรวจข้อมูลของปัญหา

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นพบว่า กระบวนการผลิตมีการกำหนดเป้าหมายด้านคุณภาพของของเสียภายในกระบวนการผลิต (In-house Defect) ไว้ไม่ 3 PPM (Parts Per Million หรือ ส่วนในล้านส่วน) และมีการติดตามปัญหาของเสียที่ตรวจพบในกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยค่า PPM สามารถคำนวณได้จากสูตร

(จำนวนของเสีย/จำนวนผลิตทั้งหมด) × 1,000,000

เมื่อจำแนกข้อมูลตามประเภทของปัญหา พบว่าของเสียในด้านคุณภาพผิวงานเป็นประเด็นสำคัญโดยเฉพาะปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ซึ่งเป็นลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการชุบผิว และส่งผลโดยตรงต่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์ การยอมรับของลูกค้า และโอกาสในการเกิดของเสียที่หลุดไปถึงขั้นตอนรับเข้าของลูกค้า เพื่อให้การเลือกปัญหามีความชัดเจน ผู้วิจัยได้จำแนกข้อมูลของเสียตามประเภทของปัญหาและตามกลุ่มชิ้นส่วน ดังแสดงในตารางที่ 1

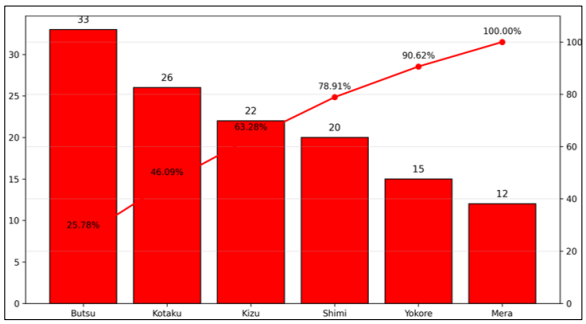
ตารางที่ 1 ข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิต (จากข้อมูลการผลิต 100,000 ชิ้น)

ลำดับ	ประเภท ข้อบกพร่อง	จำนวน (ชิ้น)	อัตราของเสีย (%NG)	PPM	ร้อยละสะสม (%)
1	เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu)	33	0.033	330	25.78
2	ความเงาผิดปกติหรือโคตะคุ (Kotaku)	26	0.026	260	46.09
3	รอยขีดข่วน (Kizu)	22	0.022	220	63.28
4	คราบหรือด่างบนผิวชิ้นงาน (Shimi)	20	0.020	200	78.91
5	สิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน (Yokore)	25	0.015	150	90.63
6	ผิวไม่สม่ำเสมอ (Mera)	12	0.012	120	100
รวม		**128**	**0.128**	**1,280**	

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา โดยเก็บข้อมูลจากจำนวนการผลิตทั้งหมด 100,000 ชิ้น พบว่ามีของเสียรวมทั้งสิ้น 128 ชิ้น คิดเป็นอัตราของเสีย 0.128% หรือ 1,280 PPM ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของข้อบกพร่องได้ทั้งหมด 6 ประเภท ได้แก่ เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ความเงาผิดปกติหรือโคตะคุ (Kotaku) รอยขีดข่วน (Kizu) คราบหรือด่างบนผิวชิ้นงาน (Shimi) สิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน (Yokore) และผิวไม่สม่ำเสมอ (Mera) เมื่อพิจารณาจำนวนของเสียในแต่ละประเภท พบว่าปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) มีจำนวนสูงที่สุด 33 ชิ้น คิดเป็นอัตราของเสีย 0.033% หรือ 330 PPM รองลงมา ได้แก่ ความเงาผิดปกติหรือโคตะคุ (Kotaku) จำนวน 26 ชิ้น คิดเป็น 260 PPM และรอยขีดข่วน (Kizu) จำนวน 22 ชิ้น คิดเป็น 220 PPM ตามลำดับ ขณะที่ปัญหาผิวไม่สม่ำเสมอ (Mera) พบจำนวนน้อยที่สุด 12 ชิ้น หรือ 120 PPM นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละสะสมของการเกิดของเสีย พบว่า ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) มีสัดส่วนคิดเป็น 25.78% ของของเสียทั้งหมด ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่พบมากที่สุดในกระบวนการผลิต ดังนั้น ปัญหาดังกล่าวจึงถูกกำหนดเป็นปัญหาหลักที่ต้องดำเนินการวิเคราะห์หาสาเหตุและปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป โดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อค้นหาสาเหตุรากและกำหนดแนวทางแก้ไขอย่างเป็นระบบ

3.3 จัดเรียงลำดับและคัดเลือกปัญหา

จากการสำรวจข้อมูลของปัญหา ผู้วิจัยนำข้อมูลของเสียมาจัดทำแผนภูมิพาเรโต เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและคัดเลือกปัญหาที่ควรดำเนินการปรับปรุงก่อน โดยพิจารณาจากจำนวนการเกิดของเสียและร้อยละสะสมของปัญหา ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) เป็นปัญหาที่มีจำนวนของเสียสูงที่สุด และเป็นข้อบกพร่องที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน จึงถูกคัดเลือกเป็นปัญหาหลักสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุและกำหนดแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตลำดับความสำคัญของปัญหา

รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิพาเรโตของประเภทข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ โดยพบว่าปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) เป็นข้อบกพร่องที่มีจำนวนสูงที่สุด 33 ชิ้น คิดเป็นร้อยละสะสม 25.78 ของจำนวนของเสีย

ทั้งหมด รองลงมา ได้แก่ ความเงาผิดปกติหรือโคตะคุ (Kotaku) และรอยขีดข่วน (Kizu) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัญหา Butsu เป็นปัญหาหลักที่ควรได้รับการวิเคราะห์หาสาเหตุและดำเนินการปรับปรุงก่อนเนื่องจากมีความถี่ในการเกิดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับข้อบกพร่องประเภทอื่น

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโต ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ถูกพิจารณาเป็นปัญหาที่มีความสำคัญในเบื้องต้น เนื่องจากมีจำนวนการเกิดสูงที่สุดและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การคัดเลือกปัญหาสำหรับการปรับปรุงมีความรอบด้านมากขึ้น ผู้วิจัยจึงนำปัญหาที่พบมาประเมินด้วยวิธีการให้คะแนนแบบถ่วงน้ำหนัก โดยให้พนักงานผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ร่วมประเมินภายใต้ปัจจัยที่ส่งผล 5 ปัจจัย ได้แก่ ความรุนแรงของปัญหา ความถี่ในการเกิดปัญหา ความสามารถในการตรวจพบ ต้นทุนในการแก้ไข และโอกาสในการแก้ไขสำเร็จ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกปัญหาที่ควรดำเนินการปรับปรุงก่อน ผลการให้คะแนนดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลการให้คะแนนคัดเลือกปัญหาจากพนักงานผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ลักษณะ	ความรุนแรง	ความถี่	การตรวจพบ	ต้นทุนแก้ไข	โอกาสสำเร็จ	คะแนนรวม	อันดับ
เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน	29	25	18	13	9	94	1
ความเงาผิดปกติ	25	22	16	11	8	82	2
รอยขีดข่วน	24	19	15	11	7	76	3
คราบด่างบนผิวชิ้นงาน	23	18	15	10	7	73	4
สิ่งสกปรกบนผิว	21	16	14	9	7	67	5
ผิวไม่สม่ำเสมอ	20	15	13	8	6	62	6

จากตารางที่ 2 แสดงผลการคัดเลือกปัญหาจากพนักงานผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยพิจารณาจากปัจจัยสำคัญ 5 ด้าน ได้แก่ ความรุนแรงของปัญหา ความถี่ในการเกิดปัญหา ความสามารถในการตรวจพบ ต้นทุนในการแก้ไข และโอกาสในการแก้ไขสำเร็จ ผลการประเมินพบว่า ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน ได้คะแนนรวมสูงที่สุดเท่ากับ 94 คะแนน จัดอยู่ในอันดับที่ 1 รองลงมาคือ ความเงาผิดปกติ ได้ 82 คะแนน และ รอยขีดข่วน ได้ 76 คะแนน ตามลำดับ

จากผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือก ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน เป็นประเด็นหลักในการปรับปรุงก่อน เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีความสำคัญสูงสุดเมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งด้านผลกระทบ ความถี่ของการเกิด ความยากในการตรวจพบ ต้นทุนที่เกี่ยวข้อง และโอกาสในการแก้ไขให้สำเร็จ การเลือกปัญหาเพียงหนึ่งประเด็นมาดำเนินการก่อนมีความสอดคล้องกับแนวคิดการทำงานแบบไคเซ็น ซึ่งมุ่งเน้นการปรับปรุงอย่างเป็นระบบทีละขั้นตอน โดยเริ่มจากปัญหาที่มีผลกระทบสูงสามารถดำเนินการแก้ไขได้อย่างเป็นรูปธรรม

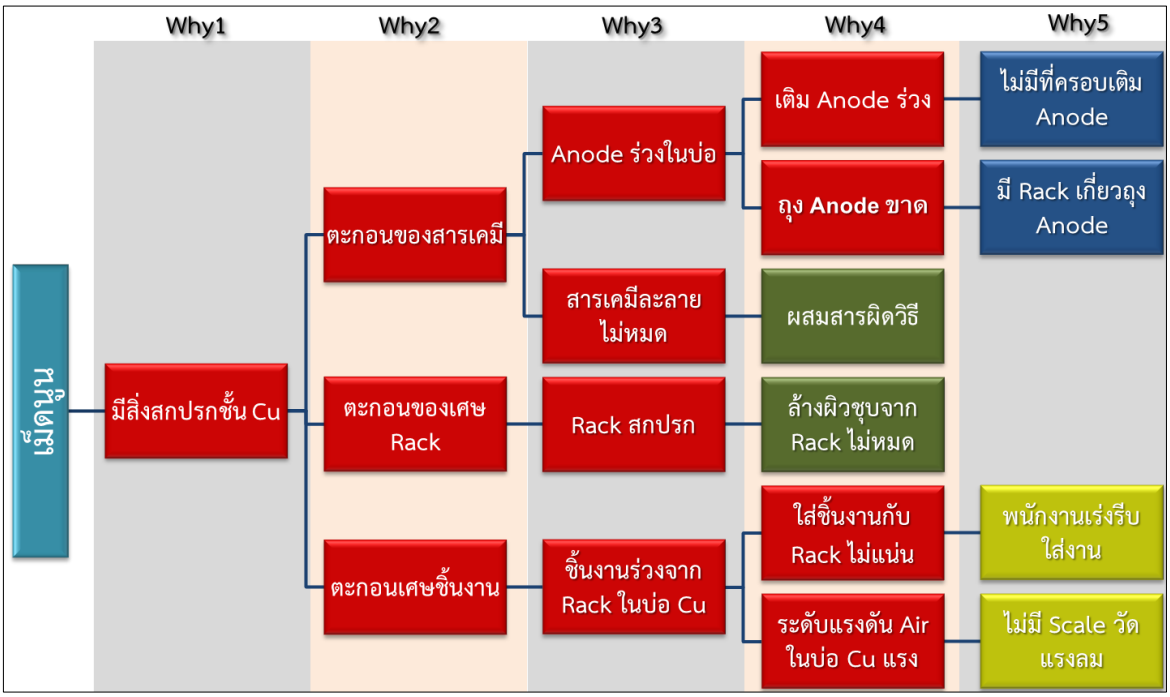
สำหรับปัญหาอื่น ๆ ได้แก่ ความเงาผิดปกติ รอยขีดข่วน คราบด่างบนผิวชิ้นงาน สิ่งสกปรกบนผิว และผิวไม่สม่ำเสมอ ผู้วิจัยจะนำเข้าสู่กระบวนการติดตามและวางแผนปรับปรุงในลำดับถัดไป ภายหลังจากการแก้ไขปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานประสบผลสำเร็จ ทั้งนี้เพื่อให้การปรับปรุงกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ไม่กระจายทรัพยากรเกินความจำเป็น และสามารถควบคุมผลลัพธ์ของการแก้ไขปัญหาได้อย่างชัดเจนตามหลักการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

3.4 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการคัดเลือกปัญหา เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน เป็นปัญหาหลักในการปรับปรุง ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิค 5 Why Analysis ในการวิเคราะห์สาเหตุ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่เหมาะสำหรับการค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง โดย

สามารถวิเคราะห์ย้อนกลับจากอาการของปัญหาไปสู่สาเหตุที่แท้จริงได้อย่างเป็นลำดับ เข้าใจง่าย สามารถใช้ร่วมกับข้อมูลจากหน้างานและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานได้โดยตรง

การวิเคราะห์เริ่มจากปัญหาที่พบ คือ ชิ้นงานเกิดเม็ดนูนบนผิวหลังผ่านกระบวนการชุบผิว จากนั้นตั้งคำถามว่า “ทำไม” ต่อเนื่องกัน เพื่อค้นหาสาเหตุที่เกี่ยวข้องในแต่ละระดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าปัญหาเม็ดนูนมีความสัมพันธ์กับสิ่งปนเปื้อนในกระบวนการชุบผิว เช่น ตะกอนสารเคมี เศษวัสดุในบ่อชุบ การร่วงของวัสดุชุบ การควบคุมแรงลมที่ไม่เหมาะสม และความสะอาดของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ดังนั้น การใช้เทคนิค 5 Why จึงช่วยให้ผู้วิจัยสามารถแยกสาเหตุของปัญหาออกเป็นลำดับอย่างชัดเจน ไม่พิจารณาเพียงอาการที่เห็นภายนอก แต่เชื่อมโยงไปถึงปัจจัยที่ควรได้รับการแก้ไขจริงในกระบวนการผลิต ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 5 Why ดังแสดงในรูปที่ 4

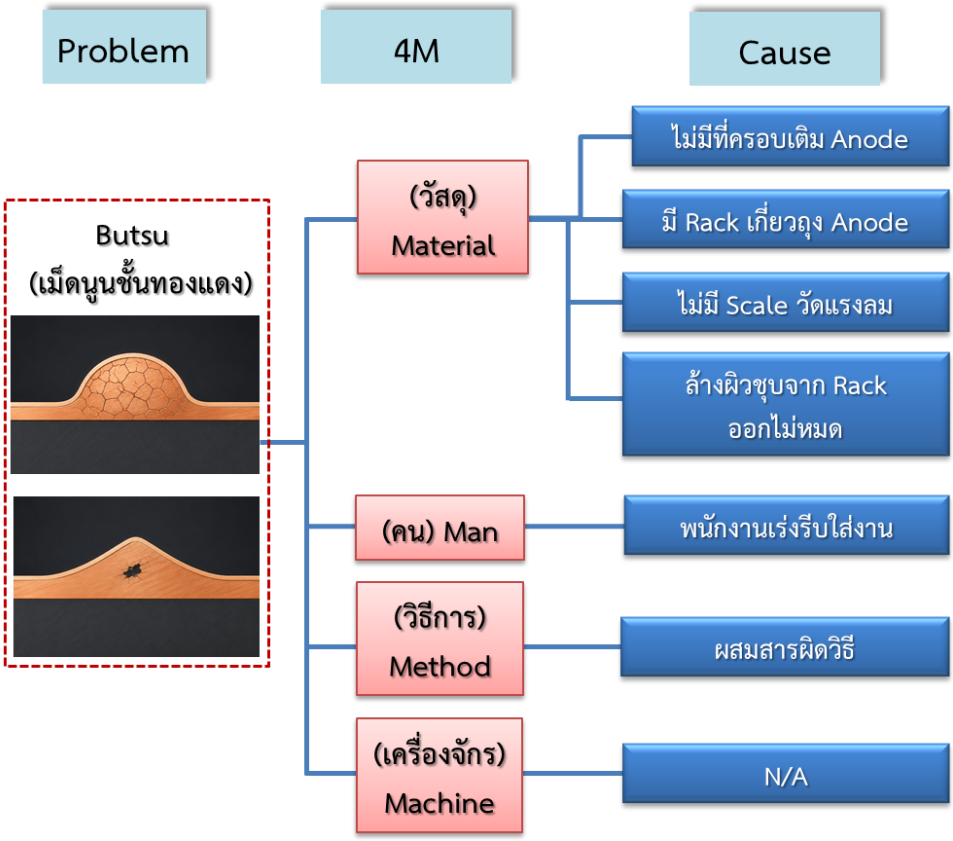


รูปที่ 4 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วย 5 Why

จากรูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน ด้วยเทคนิคการถามทำไม 5 ครั้ง (5 Why Analysis) โดยเริ่มจากปัญหาหลักคือการเกิดสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในชั้นชุบทองแดง (Copper Plating Layer: Cu Layer) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดเม็ดนูนหลังผ่านกระบวนการชุบผิว ผลการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุของปัญหามีความเกี่ยวข้องกับหลายประเด็น ได้แก่ ตะกอนจากสารเคมี ตะกอนจากเศษอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) และตะกอนจากเศษชิ้นงานที่ตกค้างอยู่ในบ่อชุบทองแดง (Copper Plating Bath) เมื่อวิเคราะห์ลึกลงไป พบว่าสาเหตุย่อยมีทั้งการเติมขั้วแอโนด (Anode) แล้วเกิดการร่วงลงในบ่อชุบ การไม่มีอุปกรณ์ครอบป้องกันบริเวณเติมขั้วแอโนด (Anode Cover) ถุงแอโนด (Anode Bag) ขาดจากการถูกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเกี่ยว การล้างผิวชุบออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไม่หมด การใส่ชิ้นงานกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไม่แน่น รวมถึงการควบคุมแรงลม (Air Pressure) ในบ่อชุบที่ยังไม่มีสเกลวัดแรงลม (Air Flow Scale) สำหรับกำหนดค่าอย่าง

ชัดเจน สาเหตุเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าปัญหาเม็ดนูนไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากความเชื่อมโยงของหลายองค์ประกอบในกระบวนการผลิต

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำผลการวิเคราะห์จากเทคนิคการถามทำไม 5 ครั้ง (5 Why Analysis) ไปวิเคราะห์ต่อด้วยหลักการวิเคราะห์ 4M (4M Analysis) เพื่อจัดกลุ่มสาเหตุให้เป็นระบบ ได้แก่ ด้านคน (Man) ด้านวิธีการ (Method) ด้านเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ (Machine) และด้านวัสดุ (Material) การวิเคราะห์ด้วย 4M จะช่วยให้สามารถจำแนกสาเหตุได้ชัดเจนขึ้น และนำไปสู่การกำหนดมาตรการแก้ไขที่ตรงกับสาเหตุของปัญหาอย่างเหมาะสมในขั้นตอน ผลการวิเคราะห์ 4M ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย 4M เพื่อจัดกลุ่มสาเหตุให้เป็นระบบ

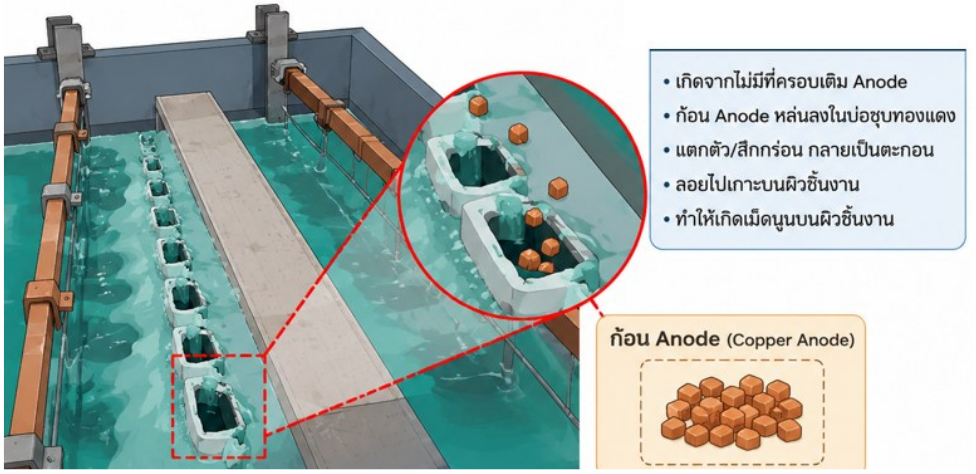
จากรูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา เม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน โดยใช้หลักการวิเคราะห์ 4M เพื่อจัดกลุ่มสาเหตุที่ได้จากการวิเคราะห์ก่อนหน้าให้เป็นระบบมากขึ้น ประกอบด้วยด้านวัสดุ ด้านคน ด้านวิธีการ และด้านเครื่องจักร

ผลการวิเคราะห์พบว่า สาเหตุส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับด้าน วัสดุ (Material) ได้แก่ ไม่มีที่ครอบเติม Anode มี Rack เกี่ยวถุง Anode ไม่มี Scale วัดแรงลม และการล้างผิวชุบจาก Rack ออกไม่หมด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนหรือตะกอนในกระบวนการชุบผิวส่งผลให้เกิดเม็ดนูนในชั้นทองแดงของชิ้นงาน ด้านคน (Man) พบสาเหตุจากพนักงานเร่งรีบใส่งาน ซึ่งอาจทำให้การจับยึดชิ้นงานกับ Rack ไม่มั่นคงหรือเกิดความคลาดเคลื่อนในการปฏิบัติงาน ด้านวิธีการ (Method) พบสาเหตุจากการผสมสารผิดวิธี ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของสารเคมีในกระบวนการชุบผิว ส่วนด้านเครื่องจักร (Machine) ไม่พบสาเหตุที่เกี่ยวข้องโดยตรง จึงระบุเป็น N/A

3.5 วิเคราะห์เพื่อพิสูจน์ปัญหา

3.5.1 ปัญหาด้านวัสดุ (Material)

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกลุ่มวัสดุ (Material) พบประเด็นไม่มีที่ครอบเติมแอโนด (Anode Cover) เป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงลงไปตรวจสอบบริเวณการปฏิบัติงานจริงพบว่าพนักงานต้องเติมแอโนดในปริมาณมากต่อสัปดาห์ และพบการร่วงของก้อนแอโนดระหว่างการเติมอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากไม่มีที่ครอบก่อนเติม ดังแสดงในรูปที่ 6

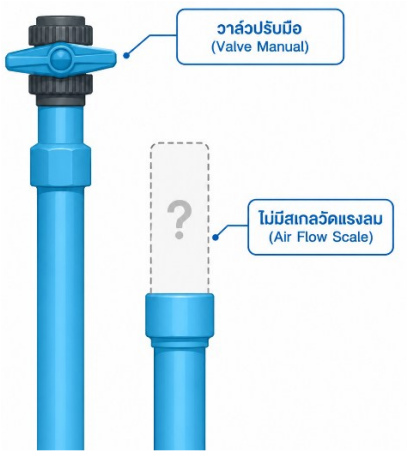


รูปที่ 6 ประเด็นไม่มีที่ครอบก่อนเติมแอโนดในบ่อชุบ

จากรูปที่ 6 แสดงผลการพิสูจน์สาเหตุในกลุ่มวัสดุ (Material) ซึ่งเป็นกลุ่มสาเหตุที่ได้จากการวิเคราะห์ 4M โดยประเด็นแรกคือ ไม่มีที่ครอบเติมแอโนด (Anode Cover) ทำให้ก้อนแอโนด (Anode) มีโอกาสร่วงลงในบ่อชุบทองแดงระหว่างการเติม เมื่อก้อนแอโนดตกลงในบ่อชุบ อาจเกิดการแตกตัว สึกกร่อนหรือกลายเป็นตะกอนปนเปื้อนในสารละลายชุบ ตะกอนจะสามารถลอยไปเกาะบนผิวชิ้นงานขณะทำการชุบ และส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน ได้ ดังนั้น ปัญหาการไม่มีที่ครอบเติมแอโนดจึงเป็นสาเหตุที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดของเสีย และควรถูกนำไปกำหนดมาตรการแก้ไขเพื่อลดการปนเปื้อนในบ่อชุบ

จากนั้นผู้วิจัยได้พิจารณาในประเด็นที่ 2 คือ มีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) เกี่ยวถุงแอโนด (Anode Bag) เนื่องจากถุงแอโนดมีหน้าที่คลุมตะกร้าแอโนดและกรองสิ่งสกปรกที่เกิดจากก้อนแอโนด หากถุงแอโนดฉีกขาด อาจทำให้เศษวัสดุหรือตะกอนจากแอโนดหลุดออกสู่บ่อชุบและปนเปื้อนผิวชิ้นงานได้ อย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบสภาพถุงแอโนดตามรอบการดูดสารและล้างบ่อ พบว่าไม่พบความเสียหายของถุงแอโนดอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าสาเหตุนี้ “ไม่ใช่สาเหตุหลัก”ของการเกิดเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานในกรณีศึกษา

สำหรับประเด็นที่ 3 คือ ไม่มีสเกลวัดแรงลม (Air Flow Scale) ในบ่อชุบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงลมที่ใช้กวนสารเคมีในบ่อชุบไม่ให้เกิดการตกตะกอน หากแรงลมมากเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานหลุดจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) และตกลงในบ่อชุบ เมื่อชิ้นงานที่ตกค้างเกิดการกัดกร่อนหรือสลายตัว อาจกลายเป็นสิ่งปนเปื้อนที่ลอยไปเกาะบนผิวชิ้นงานอื่นได้ จากการพิสูจน์โดยติดตั้งสเกลวัดแรงลมและเก็บข้อมูลการชุบงาน พบว่าเมื่อใช้แรงลมที่ไม่เหมาะสมยังพบการร่วงของชิ้นงาน จึงสามารถสรุปได้ว่า การไม่มีสเกลวัดแรงลมเป็นสาเหตุที่มีผลต่อการเกิดสิ่งปนเปื้อนในบ่อชุบ และเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ควรนำไปกำหนดมาตรการแก้ไข สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ลักษณะไม่มีสเกลวัดแรงลม

3.5.2 ปัญหาด้านคน (Man)

จากการพิสูจน์สาเหตุของปัญหาด้านคนหรือพนักงานผู้ปฏิบัติงาน พบว่าสาเหตุที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดปัญหา คือ การล้างผิวชุบออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ไม่หมด โดยจากการตรวจสอบสภาพที่จุดปฏิบัติงานพบว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) บางส่วนยังมีคราบชุบหรือเศษวัสดุตกค้าง เช่น เศษโครเมียมติดบริเวณขาสเตนเลส (Stainless) เศษโครเมียมติดผิวเคลือบ (Coating) และน้ำยาโครเมียมซึมออกจากผิวเคลือบ (Coating) เมื่อนำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการชุบ อาจทำให้เศษวัสดุหรือคราบตกค้างหลุดออกมาและปนเปื้อนในบ่อชุบ ส่งผลให้เกิดเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานได้ ลักษณะการล้างไม่สะอาด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ล้างผิวชุบออกไม่หมด

จากผลการทดสอบชุบงาน (Test Plating) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของสาเหตุดังกล่าว พบว่าการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ที่ล้างไม่สะอาดทำให้เกิดชิ้นงานเสียอย่างต่อเนื่อง จึงสรุปได้ว่า การล้างผิวชุบจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ไม่หมดเป็นสาเหตุที่ต้องนำไปแก้ไข โดยควรกำหนดมาตรการควบคุม เช่น การตรวจสอบสภาพอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ก่อนใช้งาน การกำหนดจุดตรวจสอบสำคัญ (Q-Point) การแยกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ที่มีปัญหาออกจากการใช้งาน และการกำหนดให้หัวหน้างานติดตามการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ

ส่วนในประเด็นพนักงานเร่งรีบใส่งาน จากการตรวจสอบพบว่ากระบวนการผลิตมีการกำหนดเส้นทางการแจ้งเปลี่ยนแปลงงานไว้อย่างชัดเจน โดยฝ่ายควบคุมการผลิต (Production Control: PC) ต้องแจ้งการเปลี่ยนแปลงล่วงหน้า ทำให้พนักงานมีเวลารับทราบและเตรียมการก่อนปฏิบัติงาน ดังนั้นประเด็นพนักงานเร่งรีบใส่งานจึง “ไม่ใช่สาเหตุหลัก” ของการเกิดเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน

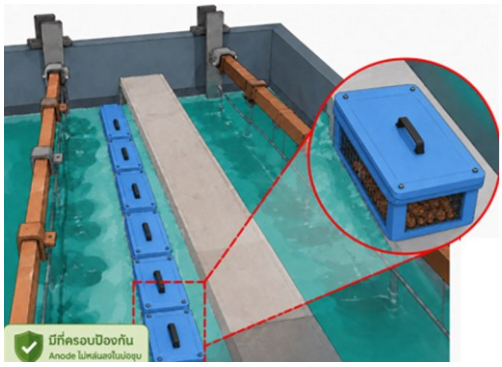
3.5.3 ปัญหาด้านวิธีการ (Method)

ในประเด็นปัญหาการผสมสารเคมีในการชุบผิดวิธี จากการติดตามการปฏิบัติงานตามมาตรฐานที่กำหนด พบว่าพนักงานสามารถดำเนินการเติมสารในบ่อชุบได้ถูกต้องตามเอกสารมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Operation Standard: OS) และผลการตรวจสอบอยู่ในเกณฑ์ปกติทุกครั้ง จึงสรุปได้ว่าการผสมสารเคมีผิดวิธี “ไม่ใช่สาเหตุของปัญหา”

3.6 ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข

จากผลการวิเคราะห์และพิสูจน์สาเหตุ พบว่าปัญหาไม่มีที่ครอบเติมแอโนด (Anode Cover) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ก้อนแอโนด (Anode) มีโอกาสร่วงลงในบ่อชุบทองแดง (Copper Plating Bath) ระหว่างการเติมวัสดุ เมื่อก้อนแอโนดร่วงลงในบ่อชุบอาจเกิดการแตกตัว สึกกร่อน หรือกลายเป็นตะกอนปนเปื้อนในสารละลายชุบ และลอยไปเกาะบนผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะเม็ดนูน

บนผิวชิ้นงาน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางแก้ไขโดยการจัดทำ แผ่นพีวีซีครอบบริเวณจุดเติมแอโนด (PVC Anode Cover) เพื่อป้องกันไม่ให้ก้อนแอโนดร่วงลงระหว่างช่องตะแกรงขณะปฏิบัติงาน ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การแก้ไขก้อนแอโนดร่วงลงในบ่อชุบ

จากรูปที่ 9 แนวทางการแก้ไขเริ่มจากการออกแบบแผ่นพีวีซีให้มีขนาดเหมาะสมกับตำแหน่งตะกร้าแอโนด โดยมีช่องเปิดเฉพาะจุดสำหรับการเติมก้อนแอโนด เพื่อให้พนักงานสามารถเติมวัสดุได้สะดวก ขณะเดียวกันก็สามารถป้องกันไม่ให้ก้อนแอโนดหล่นออกนอกตำแหน่งที่กำหนด จากนั้นนำแผ่นพีวีซีที่จัดทำขึ้นไปติดตั้งบริเวณบ่อชุบทองแดง และทดลองใช้งานจริงกับพนักงานผู้ปฏิบัติงาน

ผลหลังการปรับปรุงพบว่า เมื่อมีการติดตั้งแผ่นครอบเติมแอโนดแล้ว ไม่พบก้อนแอโนดร่วงลงในบ่อชุบระหว่างการเติม แสดงให้เห็นว่ามาตรการดังกล่าวสามารถลดโอกาสการเกิดสิ่งปนเปื้อนในบ่อชุบได้โดยตรง อีกทั้งยังช่วยควบคุมสภาพกระบวนการชุบให้มีความเสถียรมากขึ้น ลดความเสี่ยงของการเกิดเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน และสนับสนุนการป้องกันปัญหาเกิดซ้ำในกระบวนการผลิต

หลังจากปรับปรุงปัญหาก้อนแอโนดร่วงลงในบ่อชุบ ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงลมในบ่อชุบทองแดง เนื่องจากเดิมใช้เพียงวาล์วปรับมือ (Valve Manual) โดยไม่มีสเกลวัดแรงลม ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณแรงลมได้อย่างแม่นยำ หากแรงลมมากเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) และร่วงลงในบ่อชุบทองแดง ส่งผลให้ชั้นชุบทองแดงบนผิวชิ้นงานละลาย กลายเป็นเศษปนเปื้อน และลอยไปเกาะบนผิวชิ้นงานอื่น จนเกิดข้อบกพร่องลักษณะเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน

แนวทางการปรับปรุงผู้วิจัยทำการติดตั้งสเกลวัดแรงลม เพื่อให้สามารถอ่านค่าและควบคุมปริมาณแรงลมในบ่อชุบได้อย่างชัดเจน จากนั้นทำการทดลองปรับแรงลมในระดับต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อกระบวนการชุบ โดยพิจารณาจากจำนวนชิ้นงานร่วงและชิ้นงานที่ไม่แล้วเสร็จ ผลการทดลองพบว่า ระดับแรงลมที่เหมาะสมและไม่ทำให้ชิ้นงานร่วงอยู่ในช่วง 250–350 ลิตรต่อนาที ผู้วิจัยจึงกำหนดค่ามาตรฐานแรงลมไว้ที่ 300 ± 50 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ลักษณะการติดตั้งสเกลวัดแรงลม

หลังจากได้ค่ามาตรฐานดังกล่าวผู้วิจัยได้บันทึกลงในเอกสารการตรวจสอบเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมกระบวนการและให้พนักงานตรวจสอบได้อย่างต่อเนื่อง การปรับปรุงนี้ช่วยลดความแปรปรวนของแรงลม ลดโอกาสที่ชิ้นงานจะหลุดจากอุปกรณ์จับยึด ลดการเกิดเศษปนเปื้อนในบ่อชุบ และสนับสนุนการป้องกันปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานอย่างเป็นระบบ

สุดท้ายผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงปัญหาการล้างผิวชุบออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ไม่หมด เนื่องจากคราบชุบหรือเศษวัสดุที่ตกค้างอยู่บนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานอาจหลุดออกมาระหว่างการชุบและปนเปื้อนในบ่อชุบทองแดง ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน เริ่มจากการกำหนดให้มีการตรวจสอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานก่อนนำไปใช้งาน โดยจัดทำจุดตรวจสอบสำคัญ (Q-Point) วิธีปฏิบัติงาน (Work Instruction: WI) และแบบฟอร์มบันทึกผลการตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อให้พนักงานสามารถตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ได้อย่างเป็นมาตรฐานและลดความคลาดเคลื่อนจากการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังได้กำหนดพื้นที่คัดแยกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่พบความผิดปกติหรือมีคราบตกค้าง เพื่อส่งกลับไปล้างซ้ำก่อนนำกลับมาใช้งานในกระบวนการผลิต และกำหนดให้หัวหน้างานเข้าตรวจสอบกระบวนการจัดวางชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Racking) เป็นระยะ เพื่อยืนยันว่าพนักงานปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนด

4. ผลลัพธ์ในการปรับปรุง

จากผลการวิเคราะห์สาเหตุรากของปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ด้วยเทคนิค 5 Why และการวิเคราะห์ปัจจัย 4M พบว่าสาเหตุสำคัญของปัญหาเกิดจากการปนเปื้อนในกระบวนการชุบผิว ได้แก่ การหลุดร่วงของก้อนแอโนดลงในบ่อชุบ การควบคุมแรงลมในบ่อชุบทองแดงที่ไม่เหมาะสม และความไม่สะอาดของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางการปรับปรุงโดยมุ่งเน้นการกำจัดสาเหตุที่ต้นเหตุของกระบวนการ ประกอบด้วย การจัดทำที่ครอบเติมแอโนด (Anode Cover) เพื่อป้องกันการหลุดร่วงของก้อนแอโนดและลดโอกาสการปนเปื้อนภายในบ่อชุบการติดตั้งสเกลวัดแรงลม (Air Flow Scale) เพื่อควบคุมแรงลมให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของกระบวนการชุบ การกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Rack) ก่อนใช้งาน เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนที่อาจส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน ภายหลังดำเนินการตามมาตรการปรับปรุง ผู้วิจัยได้ติดตามผลการเกิดของเสียจากปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง พบว่าอัตราการเกิดของเสียลดลงอย่างชัดเจน โดยไม่พบข้อบกพร่องของลักษณะ Butsu ในกระบวนการผลิตหลังการปรับปรุง เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงก่อนปรับปรุง พบว่าจำนวนของเสียลดลงจาก 33 ชิ้น หรือ 330 PPM เหลือ 0 PPM ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu)

รายการเปรียบเทียบ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลการเปลี่ยนแปลง
จำนวนการผลิต (ชิ้น)	100,000	100,000	-
จำนวนของเสีย Butsu (ชิ้น)	33	0	ลดลง 33 ชิ้น
อัตราของเสีย (%NG)	0.033	0	ลดลง 0.033%
อัตราของเสีย (PPM)	330	0	ลดลง 330 PPM
ร้อยละการลดลงของของเสีย	-	-	100%

จากตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ก่อนและหลังการปรับปรุง โดยพบว่าจำนวนของเสียลดลงจาก 33 ชิ้น หรือ 330 PPM เหลือ 0 PPM คิดเป็นการลดลงร้อยละ 100 แสดงให้เห็นว่ามาตรการปรับปรุงสามารถกำจัดสาเหตุของปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิผล

5. อภิปรายผลการปรับปรุงและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการปรับปรุง

ผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตพบว่า ปัญหาเม็ดนูนบนผิวชิ้นงาน (Butsu) ลดลงจาก 330 PPM เหลือ 0 PPM หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 100 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามาตรการแก้ไขที่ดำเนินการสามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการเพิ่มความเข้มงวดในการตรวจสอบหรือการคัดแยกชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องภายหลังการผลิตเท่านั้น แต่เกิดจากการวิเคราะห์และกำจัดสาเหตุรากของปัญหา (Root Cause Elimination) ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการผลิต จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 5 Why และ 4M พบว่า ปัญหา Butsu มีสาเหตุหลักจากปัจจัยด้านวัสดุ กระบวนการ และเครื่องจักร ได้แก่ การปนเปื้อนจากก้อนแอโนดที่ตกลงในบ่อชุบ การควบคุมแรงลมที่ไม่เหมาะสม และความไม่สะอาดของ Rack ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผิวชิ้นงาน ดังนั้น การปรับปรุงจึงมุ่งเน้นการป้องกันการเกิดปัญหาตั้งแต่ต้นทาง (Prevention Approach) โดยการออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน การกำหนดมาตรฐานการควบคุม และการตรวจสอบสภาวะกระบวนการให้เหมาะสม แทนการพึ่งพาการตรวจสอบและคัดแยกของเสียหลังจากเกิดปัญหาแล้ว (Detection Approach)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวคิดไคเซ็น (Kaizen) ที่มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง การลดความสูญเสีย และการสร้างมาตรฐานการทำงานเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำ [8] รวมถึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Memon และคณะ [10] และ Manojkumar และ Kumar [12] ที่พบว่าการประยุกต์ใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพร่วมกับการวิเคราะห์สาเหตุสามารถช่วยลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานที่ผ่านมา เนื่องจากมุ่งเน้นการกำจัดสาเหตุเฉพาะของกระบวนการชุบผิว และมีการกำหนดมาตรการควบคุมหลังการปรับปรุงเพื่อรักษาเสถียรภาพของการผลิต นอกจากนี้การติดตามตัวชี้วัดด้านคุณภาพ ได้แก่ การดำเนินการแก้ไขภาคสนาม (Field Action) ข้อบกพร่องของชิ้นส่วนวิกฤต (Critical Part Defect) ข้อบกพร่องของชิ้นส่วนด้านการทำงาน (Function Part Defect) และของเสียที่ตรวจพบขณะรับเข้าโดยลูกค้า (Receiving Defect) ไม่พบปัญหาหลังการปรับปรุง แสดงให้เห็นว่าการดำเนินการแก้ไขสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ตั้งแต่กระบวนการผลิต และลดความเสี่ยงของการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานไปยังลูกค้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการติดตามประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมอย่างต่อเนื่อง โดยจัดทำแผนการตรวจสอบกระบวนการ (Process Audit) และประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ เช่น แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เพื่อเฝ้าระวังความผันแปรของกระบวนการและป้องกันการกลับมาเกิดซ้ำของปัญหาในระยะยาว

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทตัวอย่างกรณีศึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล กระบวนการผลิต และโอกาสในการเข้าสำรวจสภาพปัญหาจริงในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประดับรถยนต์ ขอขอบคุณทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษา วิเคราะห์ข้อมูล และสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยทั้งในด้านวิชาการและการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการตลอดจนการเรียบเรียงบทความวิชาการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (Eds.). (1999). Juran’s quality handbook (5th ed.). McGraw-Hill.

[2] Montgomery, D. C. (2019). Introduction to statistical quality control (8th ed.). John Wiley & Sons.

[3] Ohno, T. (1988). Toyota production system: Beyond large-scale production. Productivity Press.
[4] Liker, J. K. (2004). The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer. McGraw-Hill.
[5] Ishikawa, K. (1986). Guide to quality control (2nd rev. ed.). Asian Productivity Organization.
[6] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill.
[7] Taherdoost, H. (2023). Multi-criteria decision-making methods and concepts. Encyclopedia, 3(1), 77–87.
[8] Imai, M. (1986). Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success.
[9] Farris, J. A., Van Aken, E. M., Doolen, T. L., & Worley, J. M. (2009). Critical success factors for human resource outcomes in Kaizen events: An empirical study. International Journal of Production Economics, 117(1), 42–65.
[10] Memon et al. (2019). Defect reduction with the use of seven quality control tools for productivity improvement at an automobile company.
[11] Lestyánszka Skurkova et al. (2023). Quality improvement of the forging process using Pareto analysis and 8D methodology in automotive manufacturing.
[12] Manojkumar และ Kumar (2021). Elimination of visor defects using 7 QC tools. Materials Today: Proceedings, 45, 8203–8206.
[13] Darmawan, H., Hasibuan, S., & Purba, H. H. (2018). Application of Kaizen concept with 8 steps PDCA to reduce in line defect at pasting process: A case study in automotive battery. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 4(8), 97–107.
[14] Makwana, A. D., Patange, G. S., Mehta, V., & Patel, A. J. (2023). Implementation of integrated PDCA-Kaizen in the plastic converting machinery manufacturing industry. International Journal of Engineering Trends and Technology, 71(11), 116–123.

การคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้วิธี AHP-WASPAS

Selection of Suitable Electric Vehicles Using an Integrated AHP-WASPAS Approach

ประสิทธิ์ ไกรลมสม[1,*], ธนากร เมียงอารมณ์[2] และ วรวิทย์ ลีลาวรรณ[3]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

[2,3] สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

172 ถนนอิสรภาพ แขวงวัดกัลยาณ์ เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

*ผู้ติดต่อ: prasit.k@lawasri.tru.ac.th, โทรศัพท์ +(66) 91-710-9000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ร่วมระหว่าง Analytic Hierarchy Process (AHP) และ Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) เพื่อคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณารถยนต์ไฟฟ้า 4 ทางเลือก ซึ่งกำหนดรหัสเป็น A1–A4 ภายใต้เกณฑ์ประเมิน 5 ด้าน ได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ ผลการศึกษา พบว่า ทางเลือก A2 มีความเหมาะสมสูงสุด ด้วยค่า WASPAS Score เท่ากับ 1.0000 รองลงมาคือ A4 เท่ากับ 0.8604, A1 เท่ากับ 0.8383 และ A3 เท่ากับ 0.7969 ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า AHP-WASPAS สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และอธิบายผลการจัดอันดับได้อย่างมีเหตุผล ผลการกำหนดน้ำหนักด้วย AHP พบว่าเกณฑ์ราคาจำหน่าย (C1) ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ (C2) และความสามารถในการชาร์จ DC (C4) มีน้ำหนักสูงสุดเท่ากันที่ 0.25 ส่วนความจุแบตเตอรี่ (C3) และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ (C5) มีน้ำหนัก 0.15 และ 0.10 ตามลำดับ

คำสำคัญ: รถยนต์ไฟฟ้า, การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์, AHP, WASPAS, การคัดเลือกทางเลือก

Abstract

This study applies an integrated multi-criteria decision-making approach combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) to select a suitable electric vehicle. Four electric vehicle alternatives were considered and coded as A1–A4. The evaluation was based on five criteria: purchase price, driving range per charge, battery capacity, DC fast-charging capability, and service-center or brand readiness. The results show that alternative A2 is the most suitable option, with a WASPAS score of 1.0000, followed by A4 with 0.8604, A1 with 0.8383, and A3 with 0.7969. These findings indicate that the AHP-WASPAS approach can be used as a systematic, transparent, and rational decision-support tool for electric vehicle selection. The AHP-derived weights indicated that purchase price (C1), driving range per charge (C2), and DC fast-charging capability (C4) were the most influential criteria, with equal weights of 0.25, followed by battery capacity (C3 = 0.15) and service-center/brand readiness (C5 = 0.10).

Keywords: Electric vehicle, multi-criteria decision-making, AHP, WASPAS, decision support system.

1. บทนำ

ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้า หรือ Electric Vehicle (EV) มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านระบบคมนาคมไปสู่พลังงานสะอาด เนื่องจากช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดมลพิษจากภาคการขนส่ง และสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว สำหรับประเทศไทย ภาครัฐได้ส่งเสริมการใช้และการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะมาตรการ EV 3.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2567–2570 รวมถึงการผลักดันเป้าหมาย 30@30 เพื่อให้ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าสำคัญของภูมิภาค [1], [2] นอกจากนี้ Krungsri Research คาดการณ์ว่าในช่วงปี พ.ศ. 2569–2571 การจดทะเบียนรถยนต์นั่งไฟฟ้า BEV ใหม่ในประเทศไทยจะมีแนวโน้มอยู่ที่ประมาณ 125,000 คันต่อปี [3] สะท้อนให้เห็นถึงการเติบโตของตลาดรถยนต์ไฟฟ้าและจำนวนทางเลือกที่เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม การคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมไม่ควรพิจารณาจากราคาจำหน่ายเพียงอย่างเดียว เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละรุ่นมีคุณลักษณะแตกต่างกัน เช่น ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จเร็วแบบกระแสตรง อัตราเร่ง ระบบความปลอดภัย เทคโนโลยีภายในรถ การรับประกันแบตเตอรี่ ความพร้อมของศูนย์บริการ และความน่าเชื่อถือของแบรนด์ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อทั้งต้นทุนการใช้งาน ความสะดวก ความปลอดภัย และความคุ้มค่าในระยะยาว ดังนั้น การเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นปัญหาการตัดสินใจที่มีความซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบรถยนต์ไฟฟ้าหลายรุ่นที่มีระดับราคาและกลุ่มตลาดใกล้เคียงกัน

ปัญหาดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ หรือ Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM) / Multiple-Criteria Decision Analysis (MCDA) ซึ่งเป็นกลุ่มวิธีที่ใช้สนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีหลายทางเลือก หลายเกณฑ์ และมีเป้าหมายที่อาจขัดแย้งกัน เช่น ต้นทุน สมรรถนะ ความปลอดภัย ความสะดวก และความยั่งยืน [4]–[7] การประยุกต์ใช้ MCDM กับการคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าจึงช่วยให้กระบวนการตัดสินใจมีความเป็นระบบ โปร่งใส ตรวจสอบได้ และสามารถอธิบายเหตุผลของการจัดอันดับได้อย่างชัดเจน

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ร่วมระหว่าง Analytic Hierarchy Process (AHP) และ Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) สำหรับการคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดย AHP ใช้จัดโครงสร้างปัญหาเป็นลำดับชั้นและคำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์จากการเปรียบเทียบเป็นคู่ [8], [9] ขณะที่ WASPAS ใช้จัดอันดับทางเลือกโดยผสานแนวคิดของ Weighted Sum Model (WSM) และ Weighted Product Model (WPM) เข้าด้วยกัน [10], [11] ดังนั้น การผสาน AHP และ WASPAS จึงเหมาะสมกับการศึกษานี้ เนื่องจาก AHP ช่วยกำหนดน้ำหนักของเกณฑ์ ส่วน WASPAS ช่วยคำนวณคะแนนรวมและจัดอันดับรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละรุ่นอย่างเป็นระบบ.

ขอบเขตของการศึกษานี้มุ่งเน้นการคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับ ผู้บริโภคทั่วไปหรือผู้ใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ซึ่งมีความต้องการใช้งานเพื่อการเดินทางในชีวิตประจำวันเป็นหลัก และอาจมีการเดินทางระหว่างจังหวัดเป็นครั้งคราว โดย

พิจารณาปัจจัยที่สะท้อนความคุ้มค่า สมรรถนะในการใช้งานจริง ความสะดวกในการชาร์จ และ ความพร้อมของบริการหลังการขายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการตัดสินใจ

เกณฑ์การประเมินที่ใช้ในการศึกษานี้กำหนดให้สอดคล้องกับลักษณะการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าและแนวทางของงานวิจัยด้านการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ สมรรถนะของแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ และความพร้อมด้านบริการหรือโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อความคุ้มค่า ความสะดวก และความมั่นใจในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในระยะยาว ทั้งยังสะท้อนข้อจำกัดและความต้องการของผู้ใช้จริงในบริบทการเดินทางประจำวัน การเดินทางไกล และการดูแลรักษาหลังการซื้อ [12]–[15]

2. วิธีการวิจัย

2.1 กรอบการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ที่ใช้แนวทางการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้วิธี AHP สำหรับกำหนดน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ และใช้วิธี WASPAS สำหรับคำนวณคะแนนรวมและจัดอันดับทางเลือก กระบวนการวิจัยเริ่มจากการกำหนดทางเลือกและเกณฑ์การประเมิน จากนั้นรวบรวมข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ไฟฟ้า สร้างเมทริกซ์การตัดสินใจ ปรับค่าข้อมูลให้อยู่ในรูปมาตรฐาน และคำนวณคะแนนรวมเพื่อจัดอันดับความเหมาะสมของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละรุ่น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบขั้นตอนการวิจัยสำหรับการคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธี AHP-WASPAS

จากรูปที่ 1 แสดงกรอบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 7 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การกำหนดทางเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา 2) การกำหนดเกณฑ์การประเมิน 3) การรวบรวมข้อมูลจำเพาะจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ 4) การคำนวณน้ำหนักเกณฑ์ด้วยวิธี AHP 5) การสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจ 6) การปรับค่าข้อมูลให้อยู่ในรูปมาตรฐาน และ 7) การคำนวณคะแนนรวมด้วยวิธี WASPAS เพื่อจัดอันดับความเหมาะสมของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละรุ่น ผลลัพธ์สุดท้ายคือคะแนนรวมและลำดับความเหมาะสมของทางเลือกภายใต้เกณฑ์และน้ำหนักที่กำหนด

2.2 ทางเลือกที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้กำหนดทางเลือกเป็นรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 4 ทางเลือก (ดังตารางที่ 1) โดยใช้รหัส A1–A4 แทนชื่อยี่ห้อและรุ่นของรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้การนำเสนอผลการเปรียบเทียบมีความเป็นกลาง ลดการ

ระบุถึงผู้ผลิตโดยตรง และลดโอกาสเกิดประเด็นด้านผลประโยชน์หรือส่วนได้เสีย ทั้งนี้ ทางเลือกที่นำมาศึกษามีระดับราคา กลุ่มตลาด และคุณลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกัน เพื่อให้การเปรียบเทียบมีความเหมาะสมและลดความเอนเอียงจากความแตกต่างของระดับรถยนต์แต่ละรุ่น

2.3 เกณฑ์การประเมินและที่มาของเกณฑ์

ตารางที่ 2 ทางเลือกชนิดรถยนต์ไฟฟ้า

รหัส	ทางเลือก
A1	ทางเลือกที่ 1
A2	ทางเลือกที่ 2
A3	ทางเลือกที่ 3
A4	ทางเลือกที่ 4

ทางเลือก A1–A4 เป็นรถยนต์นั่งไฟฟ้ากลุ่มตลาดและระดับราคาใกล้เคียง กัน แต่มีความแตกต่างด้านราคาจำหน่าย ระยะทาง วิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถ ในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการ หรือแบรนด์ ซึ่งรายละเอียดเชิงเปรียบเทียบ แสดงไว้ในเมทริกซ์การตัดสินใจ ตารางที่ 3 ทั้งนี้ใช้รหัส A1–A4 ให้สอดคล้องตลอดทั้งบทความ เพื่อลด ความสับสน จากการใช้รหัสทางเลือก

การกำหนดเกณฑ์ประเมินพิจารณาจากข้อมูลจำเพาะที่ผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้าสามารถตรวจสอบได้จริงก่อนตัดสินใจซื้อ ร่วมกับแนวทางในวรรณกรรมด้าน EV selection และ MCDM โดยราคาจำหน่ายสะท้อนต้นทุนเริ่มต้น ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ และความจุแบตเตอรี่สะท้อนความสามารถในการใช้งานและความมั่นใจด้านพลังงาน ความสามารถในการชาร์จ DC สะท้อนความสะดวก ในการเดินทางไกล และความพร้อมของศูนย์บริการ หรือแบรนด์สะท้อนความเสี่ยง หลังการซื้อและความน่าเชื่อถือในการใช้งานระยะยาว [12]–[15]

2.3 ชื่อบทความและรายละเอียดของผู้เขียน

การศึกษานี้กำหนดเกณฑ์การประเมินทั้งหมด 5 เกณฑ์ ได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ โดยเกณฑ์ราคาจำหน่ายจัดเป็นเกณฑ์ประเภทต้นทุน เนื่องจากค่ายิ่งต่ำยิ่งดี ส่วนเกณฑ์ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ จัดเป็นเกณฑ์ประเภทผลประโยชน์ เนื่องจากค่ายิ่งสูงยิ่งสะท้อนความเหมาะสมของทางเลือกมากขึ้น รายละเอียดของเกณฑ์ดังตารางที่ 2

การให้คะแนนเปรียบเทียบรายคู่ดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ประเมินที่มีประสบการณ์เกี่ยวข้องกับรถยนต์ไฟฟ้า การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า และ การพิจารณาข้อมูล จำเพาะเชิงเทคนิค จำนวน 5 คน โดยใช้แบบประเมิน AHP ภายใต้เกณฑ์ทั้ง 5 ด้าน จากนั้นนำค่าการ เปรียบเทียบรายคู่ ของ ผู้เชี่ยวชาญ มาสรุปเป็นค่าน้ำหนัก รวมของเกณฑ์

เนื่องจากผู้ประเมินส่วนใหญ่ไม่ประสงค์เปิดเผยชื่อหน่วยงาน หรือข้อมูลที่สามารถระบุตัวตนได้ ผู้วิจัยจึงนำเสนอผลในภาพรวมเท่านั้น เพื่อรักษาความเป็นกลางและลดความเสี่ยงที่ความคิดเห็นอาจส่งผลกระทบต่อผู้ผลิต ผู้จำหน่าย หรือผู้เกี่ยวข้อง ในตลาดรถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมิน

รหัส	เกณฑ์	ประเภท	น้ำหนัก
C1	ราคา	Cost	0.25
C2	ระยะทาง	Benefit	0.25
C3	แบตเตอรี่	Benefit	0.15
C4	DC charge	Benefit	0.25
C5	บริการ/แบรนด์	Benefit	0.10

ESTACON 2026 | 17th

2.4 การคำนวณน้ำหนักเกณฑ์ด้วยวิธี AHP

วิธี AHP ใช้สำหรับคำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ โดยให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเกณฑ์เป็นคู่ตามมาตราส่วน 1–9 ของ Saaty จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างเมทริกซ์เปรียบเทียบคู่ และคำนวณน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต ดังสมการที่ 1 และสมการที่ 2

$$GM_i = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{1/n} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum_{i=1}^{n} GM_i} \quad (2)$$

โดยที่ GM_i คือ ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของเกณฑ์ที่ i, a_{ij} คือ ค่าการเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างเกณฑ์ที่ i และ j, w_i คือ น้ำหนักของเกณฑ์ที่ i, และ n คือ จำนวนเกณฑ์ทั้งหมด หลังจากได้ค่าน้ำหนักแล้ว จะตรวจสอบความสอดคล้องของการเปรียบเทียบด้วยค่า Consistency Ratio (CR) โดยทั่วไป หาก $CR < 0.10$ ถือว่าการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องและสามารถนำค่าน้ำหนักไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อได้

ในเชิงหลักการ WSM เป็นการรวมคะแนนแบบ บวกถ่วง น้ำหนัก จึงตีความง่ายและเหมาะ กับการสะท้อนผลรวม ของสมรรถนะรายเกณฑ์ ขณะที่ WPM เป็นการรวม คะแนนแบบคูณถ่วงน้ำหนัก จึงช่วยลดผลของ การชดเชย กันมากเกินไประหว่างเกณฑ์และทำให้ทางเลือกที่มีค่าต่ำมากในบางเกณฑ์ถูกสะท้อนอย่างชัดเจนมากขึ้น การใช้ WASPAS ซึ่งผสาน WSM และ WPM จึงช่วยให้การ จัดอันดับมีความสมดุลระหว่างความง่ายในการตีความและความเข้มงวดในการประเมินหลายเกณฑ์ เมื่อเทียบ กับการใช้ WSM หรือ WPM เพียงวิธีเดียว

2.5 การคำนวณด้วยวิธี WASPAS

หลังจากสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจแล้ว ข้อมูลของแต่ละเกณฑ์จะถูกปรับให้อยู่ในรูปมาตรฐาน เนื่องจากเกณฑ์มีหน่วยวัดแตกต่างกัน โดยเกณฑ์ประเภทผลประโยชน์ (Benefit) และเกณฑ์ประเภทต้นทุน (Cost) คำนวณได้ดังสมการ

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (3)$$

$$x_{ij}^{*} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad (4)$$

จากนั้นนำค่าที่ผ่านการปรับมาตรฐานไปคำนวณด้วยวิธี WASPAS ซึ่งประกอบด้วยส่วนของ Weighted Sum Model (WSM) และ Weighted Product Model (WPM) ดังสมการ

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{n} w_j \, x_{ij}^{*} \quad (5)$$

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^{n} (x_{ij}^{*})^{w_j} \quad (6)$$

คะแนนรวมของวิธี WASPAS คำนวณได้จาก

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1-\lambda) Q_i^{(2)} \quad (7)$$

โดยที่ x_{ij}^{*} คือค่าข้อมูลที่ผ่านการปรับมาตรฐาน, w_j คือค่าน้ำหนักของเกณฑ์ที่ j, $Q_i^{(1)}$ คือคะแนนจาก WSM, $Q_i^{(2)}$ คือคะแนนจาก WPM และ Q_i คือคะแนนรวมของทางเลือกที่ iในงานวิจัยนี้กำหนดค่า $\lambda = 0.5$ เพื่อให้ความสำคัญเท่ากันระหว่าง WSM และ WPM จากนั้นจัดอันดับทางเลือกจากค่า Q_i มากไปน้อย

3. ผลการวิจัย

3.1 เมทริกซ์การตัดสินใจ

จากการรวบรวมข้อมูลของรถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 4 รุ่น สามารถสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจได้ดังตารางที่ 3 โดยเกณฑ์ C1–C4 เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ และความสามารถในการชาร์จ DC ส่วนเกณฑ์ C5 เป็นคะแนนเชิงคุณภาพระดับ1–5 เพื่อสะท้อนความพร้อมของ ศูนย์บริการและความน่าเชื่อถือของแบรนด์

ตารางที่ 3 เมทริกซ์การตัดสินใจ

Alt.	C1	C2	C3	C4	C5
A1	769900	480	60.48	88	5
A2	699900	540	66.20	140	5
A3	749000	490	63.20	80	3
A4	899000	520	58.30	120	4

3.2 เมทริกซ์ที่ผ่านการปรับค่ามาตรฐาน

จากการรวบรวมข้อมูลของรถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 4 รุ่น สามารถสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 เมทริกซ์ Normalize

Alt.	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0.9091	0.8889	0.9136	0.6286	1.0000
A2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
A3	0.9344	0.9074	0.9547	0.5714	0.6000
A4	0.7785	0.9630	0.8807	0.8571	0.8000

จากตารางที่ 4 พบว่า ทางเลือก A2 มีค่ามาตรฐานสูงสุดในหลายเกณฑ์สำคัญ ได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ แสดงให้เห็นว่าทางเลือกดังกล่าวมีสมรรถนะโดยรวมโดดเด่นเมื่อเทียบกับทางเลือกอื่น จึงมีแนวโน้มได้รับคะแนนรวมจากวิธี WASPAS สูงกว่าทางเลือกอื่น

3.3 ผลการคำนวณและจัดอันดับด้วย WASPAS

จากนั้นใช้สมการที่ (3)-(7) คำนวณคะแนน WASPAS ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 2

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณคะแนน WASPAS

Alt.	Q(1)	Q(2)	Score	Rank
A1	0.8437	0.8328	0.8383	3
A2	1.0000	1.0000	1.0000	1
A3	0.8065	0.7873	0.7969	4
A4	0.8618	0.8590	0.8604	2

เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะรายเกณฑ์พบว่า ทางเลือก A2 มีระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ 540 กิโลเมตร ซึ่งเป็น ค่าสูงสุดในชุดข้อมูลที่ศึกษา อีกทั้งมีราคาจำหน่ายต่ำสุด 699,900 บาท ความจุแบตเตอรี่สูงสุด 66.20 kWh และ ความสามารถในการชาร์จ DC สูงสุด 140 kW จึงได้รับ คะแนนมาตรฐานสูงสุดในหลายเกณฑ์ สำคัญ และส่งผลให้มีคะแนน WASPAS สูงสุด

3.4 การวิเคราะห์ความไวของค่าน้ำหนัก

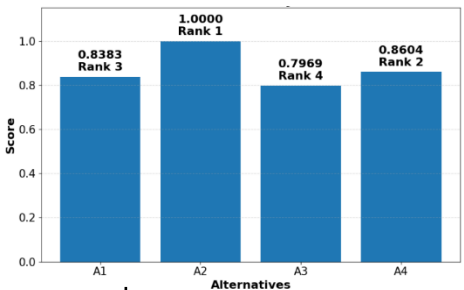
เพื่อประเมินความเสถียรของผลการจัดอันดับ จึงทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของเกณฑ์สำคัญ โดยปรับน้ำหนักของเกณฑ์ที่มีค่าน้ำหนักสูง ได้แก่ C1, C2 และ C4 เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 แล้วปรับค่าน้ำหนักทุกเกณฑ์

ให้มีผลรวมเท่ากับ 1 รวมถึงทดสอบกรณีให้น้ำหนักเท่ากันทุกเกณฑ์ เพื่อพิจารณาว่าการเปลี่ยนสมมติฐานด้านความสำคัญของเกณฑ์ส่งผลต่ออันดับทางเลือกมากน้อยเพียงใด ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิเคราะห์ความไวของค่าน้ำหนัก

กรณีทดสอบ	ลำดับทางเลือก	ข้อสังเกต
ฐานเดิม	A2 > A4 > A1 > A3	A2 อันดับ 1
เพิ่มน้ำหนัก C1 10%	A2 > A4 > A1 > A3	อันดับไม่เปลี่ยน
เพิ่มน้ำหนัก C2 10%	A2 > A4 > A1 > A3	อันดับไม่เปลี่ยน
เพิ่มน้ำหนัก C4 10%	A2 > A4 > A1 > A3	อันดับไม่เปลี่ยน
ให้น้ำหนักเท่ากัน	A2 > A1 > A4 > A3	A2 ยังเป็นอันดับ 1

ผลการวิเคราะห์ความไวพบว่า ทางเลือก A2 ยังคงเป็นอันดับ 1 ในทุกกรณีทดสอบ แสดงให้เห็นว่าผลการคัดเลือกทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดมีความเสถียรภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักระดับพื้นฐาน อย่างไรก็ตาม กรณีให้น้ำหนักเท่ากันทุกเกณฑ์ทำให้ลำดับ A1 และ A4 สลับกัน แสดงให้เห็นว่าลำดับรอง ยังอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อสมมติฐานด้านค่าน้ำหนัก เปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบ เชิงแนวคิดกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษานี้ สอดคล้องกับแนวทาง EV selection ที่พบว่าปัจจัย ด้านราคา ระยะทางวิ่ง แบตเตอรี่ และการชาร์จเป็น ตัวแปรหลักในการประเมิน ความเหมาะสมของรถยนต์ไฟฟ้า ขณะเดียวกันการ เพิ่ม การวิเคราะห์ ความไวช่วย ยืนยันความน่าเชื่อถือของอันดับทางเลือก เช่นเดียวกับ งานด้าน MCDA สำหรับการคัดเลือก รถยนต์ ไฟฟ้า ที่ให้ความสำคัญกับการตรวจสอบเสถียรภาพของผลลัพธ์ [13]–[15]



รูปที่ 2 ผลการจัดลำดับคะแนน

ผลการจัดอันดับพบว่า ทางเลือก A2 เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมมากที่สุดภายใต้เกณฑ์และค่าน้ำหนักที่กำหนด เนื่องจากมีค่าคะแนนมาตรฐานโดดเด่นในหลายเกณฑ์ โดยเฉพาะระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ และความสามารถในการชาร์จ DC ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมรรถนะและความสะดวกในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า รองลงมาคือ A4, A1 และ A3 ตามลำดับ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ร่วมระหว่าง AHP และ WASPAS เพื่อคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยกำหนดทางเลือกเป็นรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 4 ทางเลือก และใช้รหัส A1–A4 แทนชื่อยี่ห้อและรุ่นของรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อลดการระบุถึงผู้ผลิตโดยตรง เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วย 5 เกณฑ์ ได้แก่ ราคาจำหน่าย ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ ความจุแบตเตอรี่ ความสามารถในการชาร์จ DC และความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์

ผลการวิจัยพบว่า ทางเลือก A2 เป็นรถยนต์ไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมสูงสุด โดยมีค่า WASPAS Score เท่ากับ 1.0000 รองลงมาคือ A4 มีคะแนนเท่ากับ 0.8604, A1 มีคะแนนเท่ากับ 0.8383 และ A3 มีคะแนนเท่ากับ 0.7969 ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า AHP-WASPAS สามารถใช้เป็นกรอบการตัดสินใจสำหรับคัดเลือกรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถอธิบายเหตุผลของการจัดอันดับได้อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม ผลการจัดอันดับขึ้นอยู่กับข้อมูลจำเพาะของรถยนต์และค่าน้ำหนักของเกณฑ์ที่ใช้ใน

การวิเคราะห์ หากข้อมูลด้านราคาจำหน่าย สมรรถนะรถยนต์ หรือความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเปลี่ยนแปลงไป ผลการจัดอันดับอาจเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปใช้ในทางปฏิบัติควรตรวจสอบข้อมูลล่าสุดจากผู้ผลิตหรือตัวแทนจำหน่ายก่อนการตัดสินใจ

ในเชิงผลลัพธ์ที่ชัดเจน ทางเลือก A2 เหมาะสมที่สุดในชุดข้อมูลนี้ เนื่องจากมีราคาจำหน่าย 699,900 บาท ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จ 540 กิโลเมตร ความจุแบตเตอรี่ 66.20 kWh ความสามารถในการชาร์จ DC 140 kW และคะแนนความพร้อมของศูนย์บริการหรือแบรนด์ 5 คะแนน ซึ่งเป็นค่าที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับ ทางเลือกอื่นในหลายเกณฑ์ที่มีน้ำหนักสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Thailand Board of Investment. (2024). *EV 3.5*. Available from: https://www.boi.go.th/upload/content/EV%203.5ENG.pdf

[2] Thailand Board of Investment. (2024). *EV Board Gives the Green Light to EV 3.5 Package*. Available from: https://www.boi.go.th/un/boi_event_detail?language=en&module=news&topic_id=134676

[3] Krungsri Research. (2025). *Industry Outlook 2026–2028: Electric Vehicle Industry*. Available from: https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/hi-tech-industries/electric-vehicle/io/electric-vehicle-bev-2026-2028

[4] Belton, V. and Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4

[5] Greco, S., Ehrgott, M. and Figueira, J. R. (Eds.). (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. 2nd ed. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4

[6] Cinelli, M., Kadzinski, M., Gonzalez, M. and Slowinski, R. (2020). “How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy.” *Omega*, 96, 102261. https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261

[7] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. and Bansal, R. C. (2017). “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191

[8] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.

[9] Saaty, R. W. (1987). “The analytic hierarchy process—what it is and how it is used.” *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

[10] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. and Zakarevicius, A. (2012). “Optimization of weighted aggregated sum

product assessment." *Electronics and Electrical Engineering*, 122(6), 3–6. https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810

[11] Sorooshian, S. (2022). "Weighted aggregated sum product assessment (WASPAS): A review." *MPRA Paper* No. 114715. Available from: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/114715/

[12] Biswas, T. K. and Das, M. C. (2019). "Selection of commercially available electric vehicle using fuzzy AHP-MABAC." Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 100(3), 531–537. https://doi.org/10.1007/s40032-018-0481-3

[13] Sonar, H. C. and Kulkarni, S. D. (2021). "An integrated AHP-MABAC approach for electric vehicle selection." Research in Transportation Business & Management, 41, 100665. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100665

[14] Wieckowski, J., Watróbski, J., Sałabun, W. and Karczmarczyk, A. (2023). "Complex sensitivity analysis in Multi-Criteria Decision Analysis: An application to the selection of an electric car." Journal of Cleaner Production, 390, 136051. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136051

[15] Kıral Özkan, T., Alp, S., Aydın, N. and Yu, H. (2026). "Electric Vehicle Selection Using the Technique of Precise Order Preference." Promet – Traffic&Transportation, 38(4), 786–803. https://doi.org/10.7307/ptt.v38i4.1259

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมควบคุมอุณหภูมิด้วยพลังงานโซลาร์เซลล์

Optimization of Candied Bilimbi Drying Using a Solar-Powered Temperature-Controlled Parabolic-Dome Hot-Air Dryer

สราวุธ อิศรานุวัฒน์[1], ยุทธณรงค์ จงจันทร์[2], ปริยาภรณ์ อิศรานุวัฒน์[3], อภิวัฒน์ วงศ์ณรัตน์[4] และ ธรรมนูญ แสนอ่อน[5]*

[1], [4] สาขาวิชาการออกแบบผลิตภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

[2, 5]สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

[3]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 269/2 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

*ผู้ติดต่อ: E-mail, 68003538047@mail.rru.ac.th , 0983852710

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมควบคุมอุณหภูมิด้วยพลังงานโซลาร์เซลล์ และศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา กระบวนการดำเนินงานเริ่มจากการสำรวจแผนผังการไหลของขั้นตอนการผลิต วิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค 5 Whys และกำหนดแนวทางปรับปรุงด้วยเทคนิค 5W1H จากนั้นทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาอบแห้งได้อย่างแม่นยำ เพื่อทดแทนการตากแดดแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาสภาพอากาศธรรมชาติ ซึ่งส่งผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์เกิดความแปรปรวนและใช้ระยะเวลานาน ผลการศึกษาพบว่า สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือประมาณร้อยละ 18 โดยน้ำหนักมาตรฐานเปียก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม เนื้อนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ ผิวหน้าไม่แฉะเยิ้มและไม่แข็งกระด้าง การปรับปรุงกระบวนการด้วยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถลดเวลาในขั้นตอนการอบแห้งลงจากเดิม 1,320 นาที เหลือเพียง 840 นาที หรือลดลงร้อยละ 36.36 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมนี้ มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มขีดความสามารถด้านกระบวนการผลิต ลดความสูญเสียด้านเวลา และช่วยยกระดับมาตรฐานการผลิตผลิตภัณฑ์ชุมชนให้คงที่ได้อย่างมีรูปธรรม

คำสำคัญ: ตะลิงปลิงแช่อิ่ม อุปกรณ์อบลมร้อน พาราโบลาโดม พลังงานโซลาร์เซลล์

Abstract

This study aimed to develop a solar-powered, temperature-controlled parabolic-dome hot-air dryer and determine the optimal drying conditions for dried candied bilimbi produced by the Mit Samphan Community Enterprise in Chachoengsao Province. The research methodology began with a process flow survey, followed by root-cause analysis using the 5 Whys technique and improvement planning via the 5W1H approach. A prototype dryer capable of precisely regulating temperature and drying duration was subsequently designed and constructed to replace traditional open-sun drying, which typically causes product quality fluctuations and requires prolonged processing times. The results revealed that the optimal drying condition was 60°C for 14 hours, which successfully reduced the final moisture content to approximately 18% on a wet basis. The resulting product exhibited desirable

physical characteristics, featuring a soft-chewy texture and uniform color without excessive stickiness or case hardening. Implementing the developed drying equipment significantly optimized the process, shortening the drying time from 1,320 minutes to 840 minutes, which represents a 36.36% reduction. These findings demonstrate that the parabolic-dome hot-air dryer is highly effective in enhancing production efficiency, minimizing processing time, and establishing quality standardization for community-level agro-industrial product manufacturing.

Keywords: Candied bilimbi, Hot-air dryer, Parabolic dome, Solar power

1. บทนำ

ตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปผลไม้ที่มีศักยภาพในการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ชุมชน เนื่องจากตะลิงปลิงเป็นผลไม้ที่มีความชื้นสูง เนื้ออ่อน และมีรสเปรี้ยวเด่น เมื่อนำมาผ่านกระบวนการดองแช่น้ำปูนใส และแช่น้ำเชื่อมหลายรอบ จะทำให้เกิดการแทรกซึมของน้ำตาลเข้าสู่เนื้อผล ส่งผลต่อคุณลักษณะด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความคงตัวของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการอบแห้งยังเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะค่าความชื้น สี เนื้อสัมผัส และความสม่ำเสมอของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งจากข้อมูลกระบวนการผลิตของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ พบว่ากระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งมีหลายขั้นตอน ตั้งแต่การคัดเลือกวัตถุดิบ การดองน้ำเกลือ การแช่น้ำปูนใส การแช่น้ำเชื่อมซ้ำหลายครั้ง จนถึงขั้นตอนการอบแห้ง โดยเฉพาะขั้นตอนการอบแห้งใช้เวลารวม 1,320 นาที หรือ 22 ชั่วโมง ซึ่งนับเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานและมีผลต่อความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์อย่างมาก หากสภาวะการอบไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าแห้งแต่แกนกลางยังมีความชื้นสูง หรือมีเนื้อสัมผัสแข็งเหนียว หรือแฉะเกินไป ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมที่ควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาได้อย่างสม่ำเสมอปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง ลดความแปรปรวนคุณภาพผลิตภัณฑ์และสร้างแนวทางการผลิตที่เหมาะสมสำหรับวิสาหกิจชุมชน การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลจะช่วยวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาอบต่อคุณภาพของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งอย่างเป็นระบบ และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้กำหนดสภาวะการอบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจริง

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมและศึกษาสภาวะการอบที่เหมาะสมต่อคุณภาพของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง โดยพิจารณาจากความชื้นสุดท้ายและการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับความสามารถในการแข่งขันขององค์กร โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุน ลดความสูญเปล่า เพิ่มผลผลิต และทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอ แนวคิดการผลิตแบบลีนเป็นหนึ่งในแนวทางที่ใช้ลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่าในกระบวนการผลิต [1] ขณะที่การบริหารคุณภาพโดยรวมมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งองค์กร [2] และแนวคิดซิกซ์ซิกมาช่วยลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการและเพิ่มความแม่นยำในการผลิต [3]

ในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูป การควบคุมสภาวะการผลิต โดยเฉพาะอุณหภูมิ

ความชื้น และระยะเวลาในการอบแห้ง มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การใช้เทคโนโลยีอบแห้งที่สามารถควบคุมเงื่อนไขการทำงานได้จึงช่วยลดข้อจำกัดของการพึ่งพาแสงแดดตามธรรมชาติ ทำให้ลดระยะเวลาการผลิต ลดความแปรปรวนของคุณภาพ และเพิ่มความสามารถในการผลิตให้ได้มาตรฐานมากขึ้น [4], [5]

2.2 ความชื้นสุดท้าย

ความชื้นสุดท้ายเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ประเมินคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อบแห้ง เนื่องจากปริมาณความชื้นมีผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษา การเจริญของจุลินทรีย์ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความคงตัวของผลิตภัณฑ์ หากผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงเกินไป อาจเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียจากเชื้อราและจุลินทรีย์ ในทางกลับกัน หากความชื้นต่ำเกินไป อาจทำให้ผลิตภัณฑ์แข็ง เปราะ หรือสูญเสียคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่พึงประสงค์ [5], [6] การอบแห้งโดยใช้แสงแดดตามธรรมชาติแม้มีต้นทุนพลังงานต่ำ แต่มีข้อจำกัดด้านการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แต่ละรอบมีคุณภาพไม่แน่นอน ดังนั้น การอบแห้งด้วยลมร้อนหรืออุปกรณ์อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการลดระยะเวลาอบและควบคุมค่าความชื้นสุดท้ายให้ได้ตามเป้าหมาย [4], [6]

2.3 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค 5 Whys

เทคนิค 5 Whys เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สาเหตุรากของปัญหา โดยใช้การตั้งคำถามว่า “ทำไม” ซ้ำหลายระดับ เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริง ไม่ใช่เพียงอาการของปัญหา วิธีการนี้ถูกนำมาใช้ในระบบการผลิตของโตโยต้าและเป็นเครื่องมือพื้นฐานของการปรับปรุงกระบวนการผลิต [7] จุดเด่นของเทคนิคนี้คือใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน และช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถเชื่อมโยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับสาเหตุเชิงระบบได้ชัดเจนขึ้น

ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอาหารแปรรูป เทคนิค 5 Whys สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา เช่น คุณภาพไม่สม่ำเสมอ ระยะเวลาอบนาน ความชื้นสุดท้ายไม่คงที่ หรือการสูญเสียผลิตภัณฑ์ระหว่างการผลิต เมื่อทราบสาเหตุที่แท้จริงแล้ว จึงสามารถกำหนดแนวทางแก้ไขได้ตรงจุด เช่น การปรับปรุงอุปกรณ์ การควบคุมอุณหภูมิ หรือการกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงาน [7], [8]

2.4 การกำหนดแนวทางแก้ไขด้วยเทคนิค 5W1H

เทคนิค 5W1H เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์และกำหนดแนวทางปฏิบัติอย่างเป็นระบบ ผ่านคำถามหลัก 6 ประเด็น ได้แก่ What, Why, Who, Where, When และ How เครื่องมือนี้ช่วยให้การวางแผนแก้ไขปัญหามีความชัดเจน ครอบคลุม และสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง [8] โดยเฉพาะในงานปรับปรุงกระบวนการผลิต 5W1H สามารถช่วยระบุว่าควรปรับปรุงสิ่งใด เพราะเหตุใด ใครเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการที่ขั้นตอนใด ควรดำเนินการเมื่อใด และมีวิธีการดำเนินการอย่างไร สำหรับการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง การใช้ 5W1H สามารถช่วยกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น การเปลี่ยนจากการอบที่พึ่งพาสภาพแวดล้อมภายนอกไปสู่อุปกรณ์อบลมร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิและเวลาได้ ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขการผลิตที่ชัดเจนและลดความแปรปรวนของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเป็นระบบ

2.5 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เป็นหลักของกระบวนการที่ต้องบูรณาการความรู้ด้านวิศวกรรม วัสดุศาสตร์ ความต้องการของผู้ใช้ และข้อจำกัดของการใช้งานจริง โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของกระบวนการ จากนั้นจึงกำหนดแนวคิด ออกแบบ ทดลอง สร้างต้นแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ [9] การออกแบบที่ดีควรคำนึงถึงความปลอดภัย ความสะดวกในการใช้งาน ความสามารถในการควบคุมกระบวนการ ต้นทุนที่เหมาะสม และความยั่งยืนของการผลิต ในบริบทของการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร อุปกรณ์อบควรสามารถควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนของอากาศ และ

ระยะเวลาอบได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การลดความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและไม่ทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมจึงเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตระดับชุมชน เนื่องจากสามารถช่วยลดการพึ่งพาแสงแดด ลดระยะเวลาอบ และทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพคงที่มากขึ้น [4], [9]

2.6 หลักการออกแบบพาราโบลาโดม

การออกแบบพาราโบลาโดมเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบอบแห้ง โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน การสะสมพลังงานความร้อน และการควบคุมการไหลเวียนของอากาศภายในห้องอบ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องอบมีความสม่ำเสมอ ลดความแตกต่างของอุณหภูมิ และส่งเสริมการระเหยความชื้นของผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง โดยรูปทรงและวัสดุของโดมเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกักเก็บความร้อนและการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง [10] การออกแบบระบบอบแห้งแบบพาราโบลาโดมจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ รูปทรงและขนาดโครงสร้าง วัสดุคลุม การจัดวางช่องทางการไหลของอากาศ ระบบให้ความร้อน และระบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เกิดการกระจายลมร้อนอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เช่น ผลไม้แช่อิ่ม ซึ่งต้องควบคุมอัตราการลดความชื้นเพื่อป้องกันการเกิดผิวแห้งแข็งก่อนความชื้นภายในลดลงอย่างสมดุล และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ [11]

2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาเทคโนโลยีอบแห้งเพื่อยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์เกษตรได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยลดความชื้น ยืดอายุการเก็บรักษา และเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ งานวิจัยของ Chaudhari และ Salve [12] ได้ทบทวนเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอธิบายหลักการทำงาน ประเภทของเครื่องอบ และปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลเวียนของอากาศ และความเข้มของรังสีอาทิตย์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดระยะเวลาอบ เพิ่มสุขลักษณะ และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการตากแดดแบบดั้งเดิม

นอกจากนี้ Lugnasin และคณะ [13] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายชั้นที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อใช้ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์ ระบบดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสภาวะการอบและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบได้อย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่าเครื่องอบสามารถกักเก็บความร้อนได้ดีและช่วยลดระยะเวลาการอบเมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดแบบดั้งเดิม งานวิจัยดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการผสานเทคโนโลยีควบคุมสภาวะการอบเข้ากับการออกแบบอุปกรณ์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สำรวจขั้นตอนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง

ผู้วิจัยสำรวจและเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง ณ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ หมู่ที่ 6 ตำบลบ้านซ่อง อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาและกำหนดแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยศึกษาขั้นตอนการผลิตจริงตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนสิ้นสุดเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย เพื่อนำมาวิเคราะห์ลำดับการไหลของงาน รวมทั้งระบุขั้นตอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะขั้นตอนการอบแห้ง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความชื้นสุดท้าย เนื้อสัมผัส และความสม่ำเสมอของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำเป็นแผนผังการไหลของกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง เพื่อแสดงลำดับการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต ☑ คน ☐ วัสดุ ☐ เครื่องจักร **(ก่อนการปรับปรุง)**

ชื่อหน่วยงาน: วิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์
ที่ตั้ง: หมู่ที่ 6 ต.บ้านช่อง อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
กรรมวิธี: การประกอบผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง
ผู้รับผิดชอบในการผลิต: อาจารย์ ดร.สราวุธ อิสรานุวัฒน์
สมาชิกวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์



●	=	12
➡	=	-
D	=	11
■	=	3
▼	=	1

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	คน	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์ ●	➡	D	■	▼
1) คัดเลือกลูกตะลิงปลิงสด (10 กิโลกรัม)	1	45				■	
2) ล้างทำความสะอาด		40	●				
3) การดองน้ำเกลือเบื้องต้น		720			D		
4) ล้างน้ำทำความสะอาด 2 รอบ		20	●				
5) ตรวจสอบคุณภาพ (สุ่มชิม 10 ครั้ง)		1				■	
6) นำผลที่ดองเสร็จมาผ่าครึ่งตามยาว		60	●				
7) แช่น้ำปูนใส (เพื่อให้เนื้อสัมผัสคงรูปและกรอบ)		120			D		
8) ล้างน้ำทำความสะอาด 2 รอบ		20	●				
9) ผึ่งตะลิงปลิงให้สะเด็ดน้ำ		30			D		
10) เตรียมน้ำเชื่อม (น้ำตาล 2 กก.+น้ำ 2 กก.+กรดมะนาว 2 ช้อนโต๊ะ)		20	●				
11) รอให้น้ำเชื่อมเย็น		40			D		
12) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
13) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 1)		1,440			D		
14) แยกน้ำเชื่อมมาอุ่น เติมน้ำตาลเพิ่ม 1.5 กก.		30	●				
15) รอให้น้ำเชื่อมเย็น		40			D		
16) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
17) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 2)		1,440			D		
18) แยกน้ำเชื่อมมาอุ่น เติมน้ำตาลเพิ่ม 1.5 กก.		30	●				
19) รอให้น้ำเชื่อมเย็น		40			D		
20) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
21) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 3) (ทิ้งไว้ 5 วัน)		7,200			D		
22) แยกผลตะลิงปลิงออกจากน้ำเชื่อม		20	●				
23) ผึ่งบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำเชื่อม		60			D		
24) จัดเรียงตะลิงปลิงแช่อิ่มลงบนแผงตากใน		30	●				
25) การอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มในตู้เรือนกระจกแบบปิด รายละเอียดดังนี้ 1) ช่วงไล่ความชื้นผิวหน้า = 480 นาที 2) ช่วงดึงน้ำออกจากแกนกลาง = 480 นาที 3) ช่วงเซ็ตตัวคงสภาพ = 360 นาที		1,320			D		
26) สุ่มตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ		15				■	
27) จัดเก็บรอบรรจุภัณฑ์		10					▼
ประเมินอัตราการทำงานแบบ (Westinghouse)	**เวลาพื้นฐาน (Basic time)**	12,851					
- ทักษะ (Skill)	= 0.00						
- ความพยายาม (Effort)	= 0.00						
- สภาพแวดล้อมการทำงาน (Conditions)	= 0.00						
- ความสม่ำเสมอ (Consistency)	= 0.00						
เวลาเฉลี่ยปกติ (Normal Time)	**= 12,851+0.00**	12,851					
เวลาเผื่อ (Allowance Time)							
- เวลาเผื่อความส่วนบุคคล	= 15% ของ OT = 192.75 นาที						
- เวลาเผื่อความเหนื่อยล้า	= 15% ของ OT = 192.75 นาที						
- เวลาเผื่อความล่าช้า	= 10% ของ OT = 128.50 นาที						
เวลาเผื่อ (Allowance Time) รวม	**= 514.00 นาที**	514					
เวลามาตรฐาน (Standard Time)							
Normal Time + Allowance Time = 12,851 + 514		13,364					



หมายเหตุ OT = Operation Time = เวลาปฏิบัติงานที่วิเคราะห์ได้เบื้องต้น

รูปที่ 1 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง (ก่อนการปรับปรุง)

จากรูปที่ 1 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ โดยกระบวนการเริ่มจากการคัดเลือกตะลิงปลิงสด การล้างทำความสะอาด การดองน้ำเกลือเบื้องต้น การแช่น้ำปูนใสเพื่อช่วยให้เนื้อสัมผัสคงรูป การเตรียมน้ำเชื่อม และการแช่อิ่มซ้ำหลายรอบ จากนั้นแยกผลตะลิงปลิงออกจากน้ำเชื่อม ผึ่งให้สะเด็ดน้ำ จัดเรียงบนแผงตาก และเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง (Drying process) ก่อนสุ่มตรวจสอบลักษณะของตะลิงปลิงแช่อิ่มทางกายภาพ (Physical inspection) และจัดเก็บรอบรรจุภัณฑ์ กระบวนการทั้งหมดประกอบด้วย 27 ขั้นตอน โดยมีเวลามาตรฐาน (Standard Time) รวม 13,364 นาที

3.2 สำรวจปัญหาในกระบวนการผลิต

จากการสำรวจกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าขั้นตอนที่ 25 คือ การอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่ม เป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความชื้น เนื้อสัมผัส สี และความสม่ำเสมอ โดยกระบวนการเดิมใช้เวลาอบรวม 1,320 นาที หรือ 22 ชั่วโมง แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงไล่ความชื้นผิวหน้า 480 นาที ช่วงดึงน้ำออกจากแกนกลาง 480 นาที และช่วงเซ็ตตัวคงสภาพ 360 นาที เมื่อพิจารณาลักษณะของตะลิงปลิงแช่อิ่ม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เนื้ออ่อน และมีน้ำตาลแทรกอยู่ภายในเนื้อผล การอบแห้งจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนให้เหมาะสม หากสภาวะการอบไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งไม่ทั่วถึง มีความชื้นตกค้างบริเวณแกนกลาง หรือเกิดผิวแห้งแข็งก่อนที่ความชื้นภายในจะถูกระบายออกอย่างเหมาะสม ดังนั้น ขั้นตอนการอบแห้งจึงเป็นจุดวิกฤตของกระบวนการผลิต และควรได้รับการปรับปรุงเพื่อลดความแปรปรวนของผลิตภัณฑ์ และสร้างมาตรฐานการผลิตที่ทำซ้ำได้ในระดับวิสาหกิจชุมชน

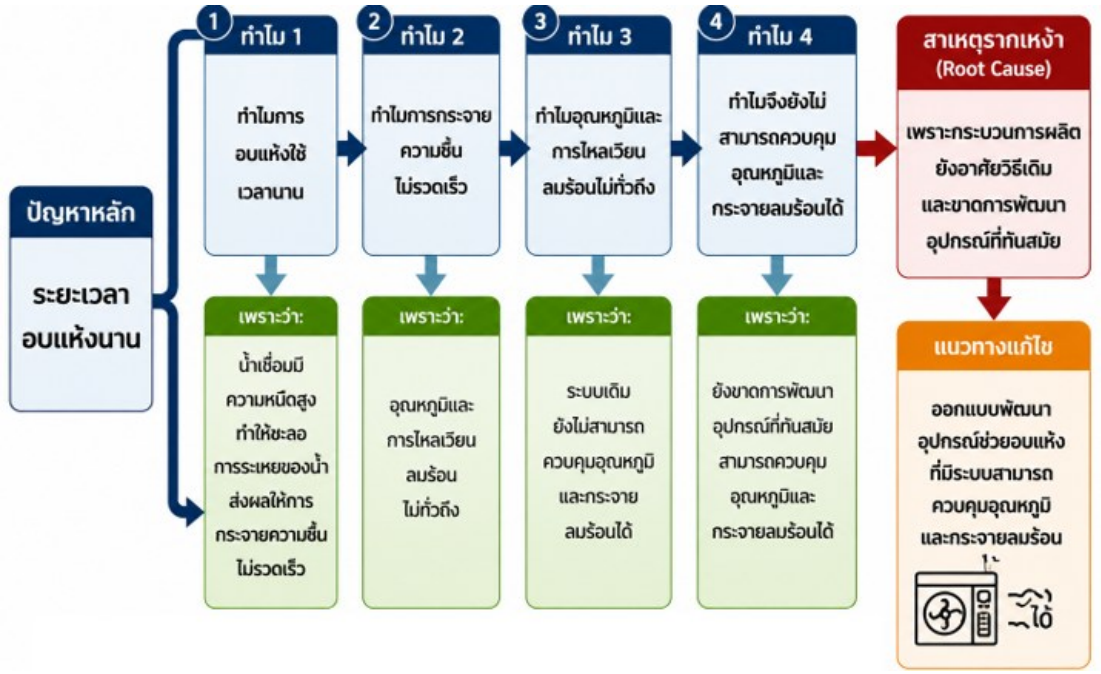
3.3 วิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค 5 Whys

จากปัญหาที่พบในขั้นตอนการอบแห้ง ผู้วิจัยได้นำเทคนิค 5 Whys มาใช้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาอย่างเป็นระบบ โดยตั้งคำถามว่า “ทำไม” ต่อเนื่องกันหลายระดับ เพื่อเชื่อมโยงจากอาการของปัญหาไปสู่สาเหตุพื้นฐานที่แท้จริง การวิเคราะห์มุ่งเน้นประเด็นสำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาอบแห้งที่ยาวนาน และความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนในกระบวนการอบแห้ง ผลการวิเคราะห์เริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาการควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ปัญหาการควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ

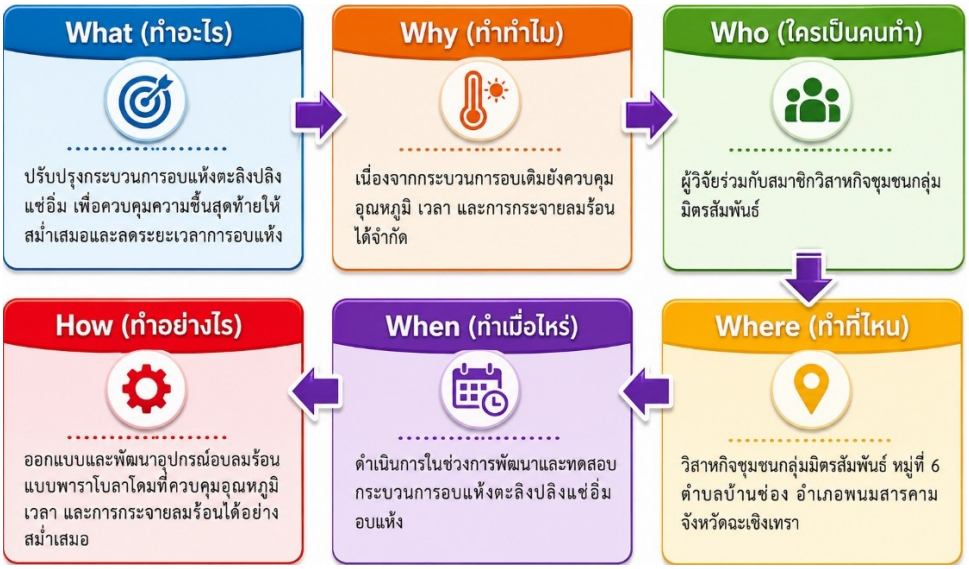
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 5 Whys พบว่า ปัญหาหลักของกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง คือ ความไม่สม่ำเสมอของความชื้นสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากสภาวะการอบแห้งในแต่ละรอบการผลิตแตกต่างกัน เนื่องจากกระบวนการเดิมยังพึ่งพาความร้อนจากธรรมชาติเป็นหลัก ส่งผลให้อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มของแสงแดดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะของตะลิงปลิงแช่อิ่ม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เนื้อผลอ่อน และมีน้ำเชื่อมแทรกอยู่ภายในเนื้อผล ทำให้การระเหยความชื้นจากผิวหน้าและแกนกลางเกิดขึ้นไม่เท่ากัน หากขาดการควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนที่เหมาะสม อาจทำให้ผลิตภัณฑ์บางส่วนมีความชื้นตกค้าง ขณะที่บางส่วนแห้งเกินไป ดังนั้น สาเหตุรากของปัญหาจึงเกี่ยวข้องกับการขาดระบบควบคุมสภาวะการอบแห้งที่สม่ำเสมอและเหมาะสมกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์ปัญหาด้านการควบคุมความชื้นสุดท้ายสามารถเชื่อมโยงจากสาเหตุของปัญหาแรกได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาระยะเวลาการอบแห้งนาน

จากรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 5 Whys พบว่า ระยะเวลาอบแห้งที่นาน มีความเชื่อมโยงกับการควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สม่ำเสมอ และสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นปัญหากลุ่มเดียวกันในมิติของ “การควบคุมกระบวนการอบแห้ง” ใช้เวลานานเนื่องจากตะลิงปลิงแช่อิ่มมีความชื้นและน้ำเชื่อมคงอยู่สูง ขณะที่น้ำเชื่อมมีความหนืดและชะลอการระเหยของน้ำออกจากเนื้อผล อีกทั้งอุณหภูมิและการไหลเวียนของลมร้อนไม่คงทีทำให้การดึงความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้ไม่สม่ำเสมอ

ดังนั้นปัญหา “ระยะเวลาอบแห้งนาน” และ “ความชื้นสุดท้ายไม่สม่ำเสมอ” เป็นปัญหาที่มีสาเหตุร่วมกัน คือ การขาดระบบควบคุมสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม โดยเฉพาะการควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนให้สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลทั้งต่อระยะเวลาอบและคุณภาพสุดท้ายของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H ในการกำหนดแนวทางแก้ไข ดังรูปที่ 4

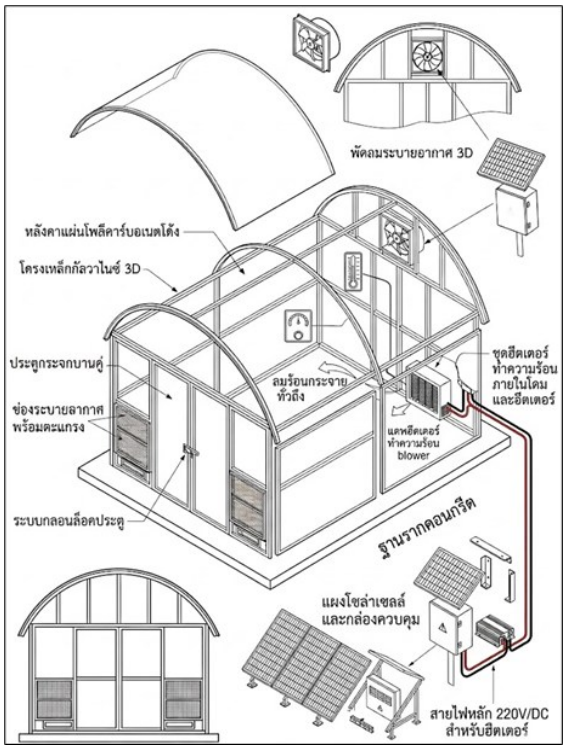


รูปที่ 4 กำหนดแนวทางการแก้ไขด้วยเทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H

จากรูปที่ 4 จากการกำหนดแนวทางแก้ไขด้วยเทคนิค 5W1H สรุปได้ว่า แนวทางหลักในการแก้ปัญหาคือ การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่ม เพื่อให้สามารถควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ได้สม่ำเสมอ และลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยสาเหตุสำคัญเกิดจากกระบวนการอบเดิมยังควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนได้จำกัด การดำเนินงานควรทำโดยผู้วิจัยร่วมกับสมาชิกวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ ณ พื้นที่ผลิตจริงของวิสาหกิจชุมชน โดยดำเนินการในช่วงการพัฒนาและทดสอบกระบวนการอบแห้ง แนวทางที่เหมาะสมคือการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ เวลา และการกระจายลมร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์และสร้างมาตรฐานกระบวนการผลิตที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในระดับวิสาหกิจชุมชน

3.4 ออกแบบอุกกรณ์และออกแบบการทดลอง

เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการตากและควบคุมความชื้นของตะลิงปลิง ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดสร้างอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดม ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถควบคุมทิศทางลมและกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ อุปกรณ์ดังกล่าวถูกสร้างขึ้นเพื่อทดแทนการตากแบบพึ่งพาสภาพอากาศธรรมชาติ ซึ่งมีความแปรปรวนสูงและไม่สามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การออกแบบส่วนประกอบอุปกรณ์อบลมร้อน

จากรูปที่ 5 อุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมได้รับการออกแบบและพัฒนาเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งจากระบบเดิมที่มีข้อจำกัดด้านการควบคุมอุณหภูมิ การกระจายลมร้อน และความสม่ำเสมอของการลดความชื้น โดยระบบเดิมยังพึ่งพาสภาพแวดล้อมภายนอก ส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งยาวนานและคุณภาพผลิตภัณฑ์มีความแปรปรวน ดังนั้นจึงนำแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมมาใช้เพื่อทดแทนและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นการควบคุมสภาวะการอบให้เหมาะสมกับลักษณะของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง

โครงสร้างแบบพาราโบลาโดมช่วยเพิ่มพื้นที่รับและสะสมพลังงานความร้อน ส่งเสริมการหมุนเวียนของอากาศภายในห้องอบ และลดความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและการระเหยความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ประกอบด้วยโครงสร้างโดม แผ่นคลุมโปร่งแสง พัดลมกระจายลมร้อน ชุดให้ความร้อน เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และระบบควบคุมการทำงาน โดยสามารถใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ร่วมกับระบบไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในระดับวิสาหกิจชุมชน

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นด้านการควบคุมอุณหภูมิและเวลาอบได้อย่างเหมาะสม ลดจุดอับลม เพิ่มความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ และลดระยะเวลาในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดด้านต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นและความซับซ้อนของระบบควบคุมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมเพิ่มเติม ทั้งนี้ประโยชน์ที่ได้รับจากการลดเวลาอบและเพิ่มความสามารถในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตระดับชุมชน

3.5 จัดสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

หลังจากออกแบบ ผู้วิจัยดำเนินการจัดสร้างอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมตามแบบที่พัฒนาขึ้น โดยโครงสร้างหลักออกแบบให้มีลักษณะโค้งแบบพาราโบลา เพื่อช่วยส่งเสริมการไหลเวียนของอากาศและการกระจายความร้อนภายในห้องอบ วัสดุที่ใช้เน้นความแข็งแรง ทนต่อความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้งานในระดับวิสาหกิจชุมชน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การจัดสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 6 หลังจากจัดสร้างอุปกรณ์ต้นแบบแล้วเสร็จผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 × 3 โดยกำหนดปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ: 3 ระดับ (50°C, 60°C และ 70°C) และรอบเวลาในการอบ: 3 ระดับ (12, 14 และ 16 ชั่วโมง) รวมทั้งหมดเป็น 9 กลุ่มการทดลอง เพื่อศึกษาผลต่อค่าความชื้นสุดท้ายของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง ตลอดจนผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สี และรสชาติตะลิงปลิงที่ใช้ในการทดลองแต่ละรอบ และควบคุมให้มีค่าความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกันทุกชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดลองอบด้วยอุปกรณ์ต้นแบบ

3.6 ผลการเก็บข้อมูลการทดลอง

ผลการทดลองการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดม ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งที่มีต่อความชื้นสุดท้ายและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลการทดลองใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในการควบคุมสภาวะการอบแห้ง ซึ่งพบว่าการควบคุมอุณหภูมิและการกระจายลมร้อนมีผลต่อการลดความชื้นและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลาในการอบลมร้อนของตะลิงปลิงแช่อิ่ม

ครั้งที่	อุณหภูมิ (℃)	เวลา (ชั่วโมง)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	ลักษณะ/รสชาติ
1	50	12	28	เนื้อยังนุ่มมาก ผิวชื้น มีความเหนียวจากน้ำเชื่อม
2	50	14	24	เนื้อนุ่ม สีดี แต่ยังมีความชื้นค่อนข้างสูง
3	50	16	21	เนื้อนุ่ม สีค่อนข้างดี แต่ใช้เวลานาน
4	60	12	23	เนื้อเริ่มแห้ง ผิวไม่แฉะ แต่แกนกลางยังชื้นเล็กน้อย
5	**60**	**14**	**18**	**เนื้อนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ รสชาติดี ไม่แฉะ และไม่แข็งกระด้าง**
6	60	16	15	เนื้อค่อนข้างแห้ง สีเริ่มเข้มขึ้น ความหนึบลดลง
7	70	12	18	ผิวแห้งเร็ว เนื้อด้านในยังไม่สม่ำเสมอ สีเริ่มคล้ำ
8	70	14	14	เนื้อแข็งขึ้น สีคล้ำ รสชาติหวานเข้มจากการระเหยน้ำมาก
9	70	16	11	เนื้อแห้งแข็ง ผิวคล้ำ อาจเกิดลักษณะผิวแข็งก่อนแกนกลางแห้ง

จากตารางที่ 1 ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลตามพบว่า อุณหภูมิและเวลาอบมีผลต่อความชื้นสุดท้ายและคุณภาพของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งอย่างชัดเจน โดยการอบที่อุณหภูมิ 50°C สามารถรักษาสีและเนื้อสัมผัสได้ดี แต่การลดความชื้นเกิดขึ้นค่อนข้างช้า ทำให้ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นตกค้างสูงเมื่อใช้เวลาอบสั้น ขณะที่การอบที่อุณหภูมิ 70°C ช่วยลดความชื้นได้รวดเร็ว แต่มีแนวโน้มทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำ ผิวแห้งแข็ง และเนื้อสัมผัสกระด้าง สภาวะที่เหมาะสมจากตารางคือ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง เนื่องจากให้ค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 18%wb ซึ่งเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง และยังคงลักษณะเนื้อนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ ไม่แฉะ และไม่แข็งกระด้าง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งตะลิงปลิงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสที่อุณหภูมิประมาณ 50°C สามารถลดความชื้นให้อยู่ในช่วงประมาณ 19 ± 1% และยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ [14] รวมถึงงานวิจัยเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์แช่อิ่มอบแห้งที่พบว่า อุณหภูมิอบมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้นและความแข็งของผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิสูงช่วยให้แห้งเร็วขึ้น แต่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดเนื้อสัมผัสแข็ง [15] ดังนั้น อุณหภูมิ 60°C

เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่ม ทั้งในด้านประสิทธิภาพการลดความชื้น คุณภาพผลิตภัณฑ์ และการลดระยะเวลาในการผลิต

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดม

การทดลองอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดม ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาอบที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดอุณหภูมิอบ 3 ระดับ ได้แก่ 50, 60 และ 70°C และระยะเวลาอบ 3 ระดับ ได้แก่ 12, 14 และ 16 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 9 สภาวะการทดลองตัวแปรที่ใช้ประเมินผล ได้แก่ ค่าความชื้น

สุดท้าย (%wb) ลักษณะเนื้อสัมผัส สี และคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองการอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมข้อมูลดังตารางที่ 1 นั้น พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาอบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสุดท้ายและลักษณะคุณภาพของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มอุณภูมิและระยะเวลาอบ ค่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ความชื้นสามารถระเหยออกจากโครงสร้างของเนื้อผลได้มากขึ้น การอบที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าสามารถรักษาสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ดี แต่ใช้ระยะเวลาในการอบค่อนข้างนาน และยังมีค่าความชื้นตกค้างสูง โดยเฉพาะที่เวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าความชื้นสุดท้าย 28%wb ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะผิวชื้นและมีความเหนียวจากน้ำเชื่อม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60°C พบว่า ผลิตภัณฑ์มีการลดความชื้นได้ดีขึ้น โดยเฉพาะที่เวลาอบ 14 ชั่วโมง สามารถลดค่าความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 18%wb และยังคงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสได้เหมาะสม มีลักษณะเนื้อนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ ไม่แฉะและไม่แข็งกระด้าง ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง สำหรับการอบที่อุณหภูมิ 70°C พบว่า สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วที่สุด โดยค่าความชื้นสุดท้ายต่ำสุดอยู่ที่ 11%wb ที่เวลาอบ 16 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเกิดปัญหาด้านคุณภาพ ได้แก่ สีคล้ำขึ้น ผิวแห้งแข็ง และเนื้อสัมผัสแข็งมากขึ้น เนื่องจากการระเหยน้ำเกิดขึ้นรวดเร็วเกินไป ทำให้เกิดการแห้งบริเวณผิวก่อนที่ความชื้นภายในจะเคลื่อนออกมาอย่างสมดุล

4.2 การกำหนดสภาวะของกระบวนการอบแห้ง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 9 สภาวะ พบว่า สภาวะการอบที่เหมาะสมสำหรับตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดม คือ อุณหภูมิ 60°C เวลา 14 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นสภาวะที่สามารถสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการลดความชื้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยให้ค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 18 %wb ซึ่งเหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง และยังสามารถรักษาคุณลักษณะที่ต้องการได้แก่ เนื้อสัมผัสนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ รสชาติคงเดิม และไม่เกิดลักษณะแข็งกระด้างเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมที่ใช้การอบในตู้เรือนกระจกแบบปิดซึ่งใช้เวลาอบรวม 1,320 นาที หรือ 22 ชั่วโมง การใช้อุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมสามารถลดระยะเวลาอบเหลือ 840 นาที หรือ 14 ชั่วโมง คิดเป็นการลดระยะเวลาในขั้นตอนการอบแห้งประมาณ 36.36% ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้สม่ำเสมอมากขึ้น

4.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบด้วยสภาวะที่เหมาะสม

ผลิตภัณฑ์ตะลิงปลิงแช่อิ่มที่ผ่านการอบด้วยอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมที่สภาวะ 60°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม โดยมีสีสม่ำเสมอ ผิวผลิตภัณฑ์แห้งพอดี ไม่เกิดการเยิ้มของน้ำเชื่อม และยังคงความนุ่มหนึบของเนื้อผลไว้ได้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การออกแบบอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมสามารถช่วยแก้ไขข้อจำกัดของกระบวนการอบแบบเดิม โดยเฉพาะปัญหาการควบคุมอุณหภูมิ การกระจายความร้อน และระยะเวลาอบที่ยาวนาน ส่งผลให้สามารถพัฒนากระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในระดับวิสาหกิจชุมชน

5. อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

การพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมควบคุมอุณหภูมิด้วยพลังงานโซลาร์เซลล์ สามารถแก้ไขข้อจำกัดของกระบวนการอบแห้งแบบเดิมที่อาศัยการควบคุมจากสภาพแวดล้อมภายนอก

โดยเฉพาะปัญหาด้านความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิการกระจายความร้อน และระยะเวลาในการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมสภาวะการอบให้เหมาะสมกับลักษณะของตะลิงปลิงแช่อิ่ม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงและมีน้ำตาลแทรกอยู่ในเนื้อผล ทำให้สามารถลดความชื้นได้อย่างเหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาอบมีผลโดยตรงต่อค่าความชื้นสุดท้ายและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการอบที่อุณหภูมิ 50°C สามารถรักษาสีและเนื้อสัมผัสได้ดี แต่ใช้เวลานานและยังมีความชื้นตกค้างสูง ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70°C ช่วยเร่งการลดความชื้น แต่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเกิดผิวแห้งแข็ง สีคล้ำ และความนุ่มลดลง เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำบริเวณผิวหน้าเกิดขึ้นเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การกำหนดสภาวะการอบจึงจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลระหว่างอัตราการลดความชื้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองคือ การอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 18%wb และผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อนุ่มหนึบ สีสม่ำเสมอ ไม่แฉะ และไม่แข็งกระด้าง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิระดับดังกล่าวสามารถสร้างสมดุลระหว่างการถ่ายเทความร้อนและการแพร่กระจายความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เหมาะสม โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียคุณลักษณะที่ต้องการของตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง

ผลการศึกษายังสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการอบแห้งผลไม้ที่พบว่า อุณหภูมิอบมีผลต่ออัตราการลดความชื้นและคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง แต่หากใช้ระดับอุณหภูมิสูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของผิวผลิตภัณฑ์และลดคุณภาพทางประสาทสัมผัส [14], [15], [16] นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ระบบอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศได้ ยังช่วยลดข้อจำกัดของการอบแบบดั้งเดิม และเพิ่มความสามารถในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า อุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งจากเดิม 1,320 นาที หรือ 22 ชั่วโมง เหลือ 840 นาที หรือ 14 ชั่วโมง คิดเป็นการลดระยะเวลาในการอบประมาณ 36.36% โดยยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ การลดระยะเวลาดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการกระจายลมร้อนภายในห้องอบ ทำให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้สม่ำเสมอมากขึ้น

ดังนั้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง ลดความแปรปรวนของผลิตภัณฑ์ ช่วยสร้างมาตรฐานกระบวนการผลิตที่เหมาะสม และ สามารถลดเวลาของกระบวนการได้ ดังแสดงในรูปที่ 8

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาผลของปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งเพิ่มเติม เช่น ความเร็วลม ตำแหน่งการจัดวางผลิตภัณฑ์ จำนวนชั้นของถาดอบ และปริมาณผลิตภัณฑ์ต่อรอบการอบ เพื่อประเมินความสามารถในการขยายกำลังการผลิต

2) ควรศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสี อายุการเก็บรักษา คุณค่าทางโภชนาการ และการยอมรับของผู้บริโภค เพื่อยืนยันความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

3) ควรประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดสร้างอุปกรณ์ เช่น ต้นทุนการสร้าง ต้นทุนพลังงาน ระยะเวลาคืนทุน เพื่อสนับสนุนการนำไปใช้งานจริงในระดับวิสาหกิจชุมชนควรพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติเพิ่มเติม เช่น ระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นแบบออนไลน์ เพื่อช่วยติดตามกระบวนการอบและเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในอนาต

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต ☑ คน ☐ วัสดุ ☐ เครื่องจักร **(หลังการปรับปรุง)**

ชื่อหน่วยงาน: วิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์
ที่ตั้ง: หมู่ที่ 6 ต.บ้านช่อง อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
กรรมวิธี: การประกอบผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง
ผู้รับผิดชอบในการผลิต: อาจารย์ ดร.สราวุธ อิสรานุวัฒน์
สมาชิกวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์



●	=	12
➡	=	-
D	=	11
■	=	3
▼	=	1

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	คน	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์ ●	➡	D	■	▼
1) คัดเลือกลูกตะลิงปลิงสด (10 กิโลกรัม)		45				■	
2) ล้างทำความสะอาด		40	●				
3) การดองน้ำเกลือเบื้องต้น		720			D		
4) ล้างน้ำทำความสะอาด 2 รอบ		20	●				
5) ตรวจสอบคุณภาพ (สุ่มชิม 10 ครั้ง)		1				■	
6) นำผลที่ดองเสร็จมาผ่าครึ่งตามยาว		60	●				
7) แช่น้ำปูนใส (เพื่อให้เนื้อสัมผัสคงรูปและกรอบ)		120			D		
8) ล้างน้ำทำความสะอาด 2 รอบ		20	●				
9) ผึ่งตะลิงปลิงให้สะเด็ดน้ำ		30			D		
10) เตรียมน้ำเชื่อม (น้ำตาล 2 กก.+น้ำ 2 กก.+กรดมะนาว 2 ช้อนโต๊ะ)		20	●				
11) รอให้น้ำเชื่อมเย็น		40			D		
12) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
13) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 1)		1,440			D		
14) แยกน้ำเชื่อมมาอุ่น เติมน้ำตาลเพิ่ม 1.5 กก.		30	●				
15) รอให้น้ำเชื่อมเย็น	1	40			D		
16) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
17) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 2)		1,440			D		
18) แยกน้ำเชื่อมมาอุ่น เติมน้ำตาลเพิ่ม 1.5 กก.		30	●				
19) รอให้น้ำเชื่อมเย็น		40			D		
20) นำตะลิงปลิงลงแช่ในน้ำเชื่อม		20	●				
21) แช่น้ำเชื่อมให้ตะลิงปลิงอิ่มตัว (ตรั้งที่ 3) (ทิ้งไว้ 5 วัน)		7,200			D		
22) แยกผลตะลิงปลิงออกจากน้ำเชื่อม		20	●				
23) ผึ่งบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำเชื่อม		60			D		
24) จัดเรียงตะลิงปลิงแช่อิ่มลงบนแผงตากใน		30	●				
25) การอบแห้งตะลิงปลิงแช่อิ่มในตู้เรือนกระจกแบบปิด รายละเอียดดังนี้ 1) ช่วงไล่ความชื้นผิวหน้า = 300 นาที 2) ช่วงดึงน้ำออกจากแกนกลาง = 300 นาที 3) ช่วงเซ็ตตัวคงสภาพ = 240 นาที		840			D		
26) สุ่มตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ		15				■	
27) จัดเก็บรอบรรจุภัณฑ์		10					▼
ประเมินอัตราการทำงานแบบ (Westinghouse)	**เวลาพื้นฐาน (Basic time)**	12,371					
- ทักษะ (Skill)	= 0.00						
- ความพยายาม (Effort)	= 0.00						
- สภาพแวดล้อมการทำงาน (Conditions)	= 0.00						
- ความสม่ำเสมอ (Consistency)	= 0.00						
เวลาเฉลี่ยปกติ (Normal Time)	**= 12,851+0.00**	12,371					
เวลาเผื่อ (Allowance Time)							
- เวลาเผื่อความส่วนบุคคล	= 15% ของ OT = 192.75 นาที						
- เวลาเผื่อความเหนื่อยล้า	= 15% ของ OT = 192.75 นาที						
- เวลาเผื่อความล่าช้า	= 10% ของ OT = 128.50 นาที						
เวลาเผื่อ (Allowance Time) รวม	**= 514.00 นาที**	514					
เวลามาตรฐาน (Standard Time)							
Normal Time + Allowance Time = 12,371 + 514		12,885					





หมายเหตุ OT = Operation Time = เวลาปฏิบัติงานที่วิเคราะห์ได้เบื้องต้น

รูปที่ 8 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้ง (หลังการปรับปรุง)

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนกลุ่มมิตรสัมพันธ์ หมู่ที่ 6 ตำบลบ้านซ่อง อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่อนุเคราะห์ข้อมูล สถานที่ดำเนินการทดลอง และความร่วมมือในการทดสอบอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาราโบลาโดมตลอดการวิจัย ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ และมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนองค์ความรู้จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่อการยกระดับกระบวนการผลิตตะลิงปลิงแช่อิ่มอบแห้งของวิสาหกิจชุมชนอย่างยั่งยืน.

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The machine that changed the world. Rawson Associates.

[2] Oakland, J. S. (2014). Total quality management and operational excellence: Text with cases (4th ed.). Routledge.

[3] Montgomery, D. C. (2019). Introduction to statistical quality control (8th ed.). Wiley.

[4] Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). Handbook of industrial drying (4th ed.). CRC Press.

[5] Fellows, P. J. (2017). Food processing technology: Principles and practice (4th ed.). Woodhead Publishing.

[6] Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). Dehydration of foods. Springer.

[7] Ohno, T. (1988). Toyota production system: Beyond large-scale production. Productivity Press.

[8] Tague, N. R. (2005). The quality toolbox (2nd ed.). ASQ Quality Press.

[9] Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Yang, M. C. (2020). Product design and development (7th ed.). McGraw-Hill Education.

[10] Kumar, A., & Tiwari, G. N. (2021). Solar drying systems and their performance improvement through thermal design approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111084.

[11] Mohanraj, M., & Chandrasekar, P. (2020). Performance analysis of solar greenhouse dryer integrated with forced air circulation for agricultural products. Journal of Cleaner Production, 258, 120723.

[12] Chaudhari, A. D., & Salve, S. P. (2014). A review of solar dryer technologies. International Journal of Research in Advent Technology.

[13] Lugnasin, J. V. B., Peña, R. A. S., Dumlao, S. M. G., & Macabebe, E. Q. B. (2023). IoT-enabled multilevel solar dryer for agriculture. In 2023 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems. IEEE.

[14] Aparna, G. S., Lekshmi, P. R., & Mini, C. (2022). Effect of osmo dehydration on quality attributes of bilimbi (Averrhoa bilimbi) fruits. Asian Journal of Dairy and Food Research.

[15] Katsoufi, S., Lazou, A. E., Giannakourou, M. C., & Krokida, M. K. (2021). Air drying kinetics and quality characteristics of osmodehydrated-candied pumpkins using alternative sweeteners. Drying Technology, 39(3), 434–447.

[16] Idah, M., J. J. P., A., & Olaleye, A. O. (2010). Effect of temperature and drying time on some nutritional quality parameters of dried tomatoes. Federal University of Technology Minna Repository.

แรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมา

Travel Motivations of Backpacker Tourists Using Railway Transportation in Nakhon Ratchasima Province, Thailand

อรอนงค์ แสงผ่อง[1*],เอกภพ พึ่งภูมิ[1], นทีทิพย์ หาญบาง[1] และ พจมาน จักร์ศรีรัตน์[1]

[1]วิศวกรรมการก่อสร้าง ขนส่งและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
*ผู้ติดต่อ: onanong.s@nrru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์:0981023742

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมา และเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงจูงใจตามลักษณะประชากรศาสตร์ โดยใช้แบบสอบถามเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 397 คน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา และทดสอบสมมติฐานด้วย Independent Sample t-test และ One-Way ANOVA ผลการศึกษาพบว่า แรงจูงใจปัจจัยผลักโดยรวมอยู่ในระดับมาก โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือความต้องการเดินทางแบบประหยัด รองลงมาคือความยั่งยืนในการเดินทางและความอิสระในการเดินทาง ส่วนแรงจูงใจปัจจัยดึงโดยรวมอยู่ในระดับมากเช่นกัน โดยระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกัน สถานที่ท่องเที่ยว และร้านสะดวกซื้อเป็นปัจจัยสำคัญที่สุด ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า อายุ อาชีพ และสถานภาพสมรส ส่งผลต่อความแตกต่างของแรงจูงใจอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และระดับการศึกษาไม่ส่งผลต่อแรงจูงใจ ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและการส่งเสริมการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แรงจูงใจทางการท่องเที่ยว, นักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้, การเดินทางโดยรถไฟ, ปัจจัยผลัก, ปัจจัยดึง

Abstract

This study aimed to investigate travel motivations among backpacker tourists using rail transport in Nakhon Ratchasima Province and to examine differences in motivations based on demographic characteristics. Data were collected from 397 respondents using a questionnaire and analyzed through descriptive statistics, Independent Sample t-test, and One-Way ANOVA. The results revealed that push factors were rated at a high level, with budget travel being the most important motivation, followed by sustainable travel and travel freedom. Pull factors were also rated at a high level, with integrated transportation systems, tourist attractions, and convenience stores identified as the most influential factors. Hypothesis testing indicated that age, occupation, and marital status significantly affected travel motivations, whereas gender, monthly income, and educational level showed no significant differences. The findings provide useful information for improving rail transportation services and promoting sustainable tourism development for backpacker travelers.

Keywords: Travel Motivation, Backpacker Tourists, Rail Travel, Push Factors, Pull Factors.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ โดยระบบคมนาคมขนส่งมีบทบาทในการอำนวยความสะดวกและเพิ่มศักยภาพการแข่งขันด้านการท่องเที่ยว การขนส่งทางรางได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนการเดินทางต่ำ รองรับผู้โดยสารจำนวนมาก และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น จึงเป็นทางเลือกที่สอดคล้องกับแนวคิดการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน [1]

ในปัจจุบัน การท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ (Backpacker Tourism) ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง โดยนักท่องเที่ยวกลุ่มนี้มักให้ความสำคัญกับความประหยัด ความยืดหยุ่นในการเดินทาง และการแสวงหาประสบการณ์ใหม่ รวมถึงการเรียนรู้วัฒนธรรมท้องถิ่น [2] สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นจุดหมายปลายทางสำคัญของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ การเดินทางโดยรถไฟได้รับความนิยม เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายและเปิดโอกาสให้สัมผัสประสบการณ์ระหว่างเส้นทางการเดินทางได้อย่างใกล้ชิด [3]

แม้จังหวัดนครราชสีมาจะมีศักยภาพในการรองรับนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ทางราง แต่ยังคงเผชิญปัญหาเชิงพื้นที่ที่สำคัญ โดยเฉพาะข้อจำกัดด้านการเชื่อมต่อจากสถานีรถไฟหลักไปยังแหล่งท่องเที่ยวทางไกล เช่น อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่และอุทยานประวัติศาสตร์พิมาย อีกทั้งระบบขนส่งมวลชนท้องถิ่นยังขาดความพร้อมและการบูรณาการข้อมูลตารางเวลาร่วมกัน ทำให้นักท่องเที่ยวที่ไม่มีพาหนะส่วนตัวเดินทางลำบากและมีค่าใช้จ่ายสูง

การศึกษาครั้งนี้อาศัยแนวคิดแรงจูงใจทางการท่องเที่ยวผ่านกรอบปัจจัยผลัก (Push Factors) และปัจจัยดึง (Pull Factors) โดยปัจจัยผลักเป็นแรงกระตุ้นภายในของนักท่องเที่ยว ส่วนปัจจัยดึงเป็นคุณลักษณะของแหล่งท่องเที่ยวและสิ่งอำนวยความสะดวกที่ดึงดูดให้เกิดการเดินทาง [4,5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังมีงานศึกษาที่วิเคราะห์แรงจูงใจในการเดินทางโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมาอย่างจำกัด ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงจูงใจด้านปัจจัยผลักและปัจจัยดึงที่มีผลต่อการเดินทางโดยรถไฟ และเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงจูงใจตามลักษณะประชากรศาสตร์ของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและการส่งเสริมการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อศึกษาแรงจูงใจที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเดินทางโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ในจังหวัดนครราชสีมา โดยประยุกต์ใช้แนวคิดแรงจูงใจทางการท่องเที่ยวตามทฤษฎีปัจจัยผลัก (Push Factors) และปัจจัยดึง (Pull Factors) ซึ่งอธิบายว่าการตัดสินใจเดินทางของนักท่องเที่ยวเกิดจากแรงกระตุ้นภายในร่วมกับคุณลักษณะของแหล่งท่องเที่ยวและสิ่งอำนวยความสะดวกภายนอก [4,5]

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย คือ นักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ที่ใช้บริการรถไฟในจังหวัดนครราชสีมา โดยไม่ทราบจำนวนประชากรที่แน่นอน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรของ Cochran [6] ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.05 ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างไม่น้อยกว่า 385 คน อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของข้อมูล ผู้วิจัยจึงเก็บข้อมูลจริงจำนวน 397 ชุด

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยเลือกเฉพาะผู้ที่มีลักษณะสอดคล้องกับนิยามของนักท่องเที่ยวแบบ

สะพายเป้ และใช้บริการรถไฟในการเดินทางเข้าหรือออกจากจังหวัดนครราชสีมา

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือแบบสอบถาม ซึ่งพัฒนาจากการทบทวนวรรณกรรม แนวคิดแรงจูงใจทางการท่องเที่ยว และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4,5,7] โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา อาชีพ และรายได้เฉลี่ยต่อเดือน

ส่วนที่ 2 ข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางโดยรถไฟ ได้แก่ ความถี่ในการเดินทาง วัตถุประสงค์ในการเดินทาง ค่าใช้จ่าย และรูปแบบการเดินทาง

ส่วนที่ 3 ข้อมูลเกี่ยวกับแรงจูงใจในการเดินทาง ประกอบด้วยปัจจัยผลักและปัจจัยดึง โดยใช้มาตรวัดแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ (Likert Scale) ตั้งแต่ 1 = น้อยที่สุด ถึง 5 = มากที่สุด

ก่อนนำแบบสอบถามไปใช้จริง ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน และทดสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ (Reliability Test) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ควรมากกว่า 0.70

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ที่ใช้บริการรถไฟบริเวณสถานีในจังหวัดนครราชสีมา โดยชี้แจงวัตถุประสงค์ของการวิจัยและขอความยินยอมจากผู้ตอบแบบสอบถามก่อนดำเนินการเก็บข้อมูล

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ความถี่ (Frequency) ร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่ออธิบายลักษณะข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

ส่วนการทดสอบสมมติฐานใช้สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) ประกอบด้วย Independent Sample t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสองกลุ่ม และ One-Way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่ม โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

3. ผลการวิจัย

3.1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ผลการศึกษาจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 397 คน พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 55.9 และเพศหญิง ร้อยละ 44.1 โดยมีอายุระหว่าง 21–30 ปี มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 44.6 รองลงมาคืออายุ 31–40 ปี คิดเป็นร้อยละ 21.2 และอายุไม่เกิน 20 ปี คิดเป็นร้อยละ 18.6 ตามลำดับ

ด้านระดับการศึกษา พบว่าส่วนใหญ่กำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีหรือสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ขณะที่อาชีพส่วนใหญ่เป็นนักเรียน/นักศึกษา คิดเป็นร้อยละ 29.7 รองลงมาเป็นพนักงานบริษัทเอกชนและประกอบอาชีพอิสระ สำหรับรายได้เฉลี่ยต่อเดือน พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีรายได้ต่ำกว่า 5,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 28.0 สะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้บริการรถไฟในกลุ่มนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มวัยเรียนและวัยเริ่มต้นทำงาน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านงบประมาณในการเดินทาง

3.2 ระดับแรงจูงใจด้านปัจจัยผลัก (Push Factors)

จากตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ พบว่าพบว่าแรงจูงใจด้านปัจจัยผลักของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้โดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x}$ = 3.865, S.D. = 0.874) เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่า ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ความต้องการเดินทางแบบประหยัด ($\bar{x}$ = 4.435, S.D. = 0.707) อยู่ในระดับมากที่สุด รองลงมาคือ การแสวงหาความยั่งยืนในการเดินทาง ($\bar{x}$ = 3.983, S.D. = 0.788) และ ความต้องการสัมผัสประสบการณ์แปลกใหม่ ($\bar{x}$ = 3.918, S.D. = 0.833) ตามลำดับ ขณะที่ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ ความ

ESTACON 2026 | 17th

ต้องการพบปะผู้คนใหม่ ($\bar{X}$ = 3.535, S.D. = 0.961) แม้ว่าจะยังอยู่ในระดับมาก สะท้อนให้เห็นว่านักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ให้ความสำคัญกับความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ความยั่งยืน และการแสวงหาประสบการณ์ใหม่ มากกว่าการสร้างปฏิสัมพันธ์ทางสังคมระหว่างการเดินทาง

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงจูงใจด้านปัจจัยผลัก

ลำดับ	ปัจจัยผลัก	Mean ($\bar{X}$)	S.D.	ระดับ
1	ต้องการเดินทางแบบประหยัด	4.435	0.707	มากที่สุด
2	การแสวงหาความยั่งยืนในการเดินทาง	3.983	0.788	มาก
3	ต้องการสัมผัสประสบการณ์แปลกใหม่	3.918	0.833	มาก
4	ต้องการอิสระในการเดินทาง	3.912	0.836	มาก
5	ต้องการสัมผัสประสบการณ์ทางวัฒนธรรม	3.704	0.879	มาก
6	ต้องการพักผ่อนและหลีกหนีความเครียด	3.571	0.946	มาก
7	ต้องการพบปะผู้คนใหม่	3.535	0.961	มาก
	ภาพรวม	**3.865**	**0.874**	**มาก**

3.3 ระดับแรงจูงใจด้านปัจจัยดึง (Pull Factors)

จากตารางที่ 2 พบว่าแรงจูงใจด้านปัจจัยดึงของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้โดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}$ = 3.725, S.D. = 0.890) โดยปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกัน ($\bar{X}$ = 4.150, S.D. = 0.831) รองลงมาคือ สถานที่ท่องเที่ยว ($\bar{X}$ = 3.935, S.D. = 0.771) และ ร้านสะดวกซื้อ ($\bar{X}$ = 3.660, S.D. = 0.980) ตามลำดับ ส่วนปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ Street Food และอาหารท้องถิ่น ($\bar{X}$ = 3.338, S.D. = 0.893) อย่างไรก็ตาม ทุกปัจจัยยังคงอยู่ในระดับมาก สะท้อนให้เห็นว่าความสะดวกในการเชื่อมต่อระบบขนส่งและการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ดึงดูดให้นักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้เลือกใช้บริการรถไฟ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงจูงใจด้านปัจจัยดึง

ลำดับ	ปัจจัยดึง	Mean ($\bar{X}$)	S.D.	ระดับ
1	ระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกัน	4.150	0.831	มาก
2	สถานที่ท่องเที่ยว	3.935	0.771	มาก
3	ร้านสะดวกซื้อ	3.660	0.980	มาก
4	ที่พักใกล้สถานีรถไฟ	3.451	0.963	มาก
5	Street Food และอาหารท้องถิ่น	3.338	0.893	มาก
	ภาพรวม	**3.725**	**0.890**	**มาก**

3.4 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างของแรงจูงใจตามลักษณะประชากรศาสตร์

ผลการทดสอบความแตกต่างของแรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ตามปัจจัยส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน อาชีพ ระดับการศึกษา และสถานภาพสมรส โดยใช้สถิติ Independent Sample t-test และ One-Way ANOVA พบว่า ปัจจัยส่วนบุคคลบางประการมีผลต่อแรงจูงใจในการเดินทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 3

3.4.1 ความแตกต่างของแรงจูงใจปัจจัยผลัก (Push Factors)

ผลการวิเคราะห์พบว่า เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และระดับการศึกษา ไม่มีความแตกต่างของแรงจูงใจ

ปัจจัยผลักในทุกด้านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ในขณะที่ อายุ มีผลต่อแรงจูงใจด้านการเดินทางแบบประหยัด ($F = 3.419$, $p = 0.009$) ด้านอิสระในการเดินทาง ($F = 3.151$, $p = 0.014$) และด้านการแสวงหาประสบการณ์ใหม่ ($F = 3.990$, $p = 0.003$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปีมีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มอายุอื่น

นอกจากนี้ อาชีพ มีผลต่อแรงจูงใจด้านการเดินทางแบบประหยัด ($F = 2.750$, $p = 0.008$) ด้านการแสวงหาประสบการณ์ใหม่ ($F = 3.266$, $p = 0.002$) ด้านการพักผ่อนและหลีกหนีความเครียด ($F = 2.418$, $p = 0.020$) ด้านการสัมผัสวัฒนธรรม ($F = 2.040$, $p = 0.049$) และด้านการพบปะผู้คนใหม่ ($F = 2.951$, $p = 0.005$)

สำหรับ สถานภาพสมรส พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านอิสระในการเดินทาง ($p = 0.018$) ด้านการสัมผัสวัฒนธรรม ($p = 0.039$) ด้านการพบปะผู้คนใหม่ ($p < 0.001$) และด้านความยั่งยืนในการเดินทาง ($p < 0.001$)

3.4.2 ความแตกต่างของแรงจูงใจปัจจัยดึง (Pull Factors)

ผลการวิเคราะห์พบว่า เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน อาชีพ และระดับการศึกษา ไม่มีความแตกต่างของแรงจูงใจปัจจัยดึงในทุกด้านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ในส่วนของ อายุ พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านที่พักใกล้สถานีรถไฟ ($F = 7.037$, $p < 0.001$) ด้านร้านสะดวกซื้อ ($F = 4.535$, $p = 0.001$) และด้าน Street Food และอาหารท้องถิ่น ($F = 2.614$, $p = 0.035$) โดยกลุ่มอายุน้อยกว่า 20 ปีให้ความสำคัญกับปัจจัยดังกล่าวมากกว่ากลุ่มอายุอื่น

สำหรับ สถานภาพสมรส พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านที่พักใกล้สถานีรถไฟ ($t = 2.953$, $p < 0.001$) ด้านร้านสะดวกซื้อ ($t = 0.876$, $p = 0.002$) ด้าน Street Food และอาหารท้องถิ่น ($t = 2.135$, $p < 0.001$) และด้านสถานที่ท่องเที่ยว ($t = 0.824$, $p < 0.001$) ขณะที่ด้านระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.500$)

3.4.3 สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า อายุ อาชีพ และสถานภาพสมรส เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความแตกต่างของแรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ ขณะที่ เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และระดับการศึกษา ไม่ส่งผลต่อแรงจูงใจอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยแรงจูงใจปัจจัยผลักมีแนวโน้มได้รับอิทธิพลจากลักษณะส่วนบุคคลมากกว่าแรงจูงใจปัจจัยดึง ซึ่งสะท้อนว่าแรงขับภายในของนักท่องเที่ยวมีความแตกต่างตามช่วงวัย อาชีพ และสถานภาพชีวิต ขณะที่ปัจจัยดึงซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของระบบการเดินทางและแหล่งท่องเที่ยวได้รับการประเมินในทิศทางที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มนักท่องเที่ยวส่วนใหญ่

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแตกต่างของแรงจูงใจตามลักษณะประชากรศาสตร์

ตัวแปรประชากรศาสตร์	ปัจจัยผลัก (Push Factors)	ผลการทดสอบ	ปัจจัยดึง (Pull Factors)	ผลการทดสอบ
เพศ	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง ($p > 0.05$)	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง ($p > 0.05$)
อายุ	การเดินทางแบบประหยัด ($F=3.419$, $p=0.009$)อิสระในการเดินทาง ($F=3.151$, $p=0.014$)แสวงหาประสบการณ์ใหม่ ($F=3.990$, $p=0.003$)	แตกต่าง*	ที่พักใกล้สถานีรถไฟ ($F=7.037$, $p<0.001$)ร้านสะดวกซื้อ ($F=4.535$, $p=0.001$)Street Food และอาหารท้องถิ่น ($F=2.614$, $p=0.035$)	แตกต่าง*

ตัวแปรประชากรศาสตร์	ปัจจัยผลัก (Push Factors)	ผลการทดสอบ	ปัจจัยดึง (Pull Factors)	ผลการทดสอบ
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง (p > 0.05)	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง (p > 0.05)
อาชีพ	การเดินทางแบบประหยัด (F=2.750, p=0.008)แสวงหาประสบการณ์ใหม่ (F=3.266, p=0.002)พักผ่อนและหลีกหนีความเครียด (F=2.418, p=0.020) สัมผัสวัฒนธรรม (F=2.040, p=0.049) พบปะผู้คนใหม่ (F=2.951, p=0.005)	แตกต่าง*	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง (p > 0.05)
ระดับการศึกษา	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง (p > 0.05)	ทุกด้าน	ไม่แตกต่าง (p > 0.05)
สถานภาพสมรส	อิสระในการเดินทาง (p=0.018)สัมผัสวัฒนธรรม (p=0.039)พบปะผู้คนใหม่ (p<0.001)ความยั่งยืนในการเดินทาง (p<0.001)	แตกต่าง*	ที่พักใกล้สถานีรถไฟ (p<0.001)ร้านสะดวกซื้อ (p=0.002)Street Food และอาหารท้องถิ่น (p<0.001)สถานที่ท่องเที่ยว (p<0.001)	แตกต่าง*

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4. สรุปผลและอภิปรายผล

4.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงจูงใจในการเดินทางท่องเที่ยวโดยรถไฟของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ และเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงจูงใจตามลักษณะประชากรศาสตร์ จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 397 คน

ผลการศึกษาพบว่า แรงจูงใจปัจจัยผลัก (Push Factors) โดยรวมอยู่ในระดับมาก โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ความต้องการเดินทางแบบประหยัด รองลงมาคือ การแสวงหาความยั่งยืนในการเดินทาง และความต้องการอิสระในการเดินทาง ส่วนแรงจูงใจปัจจัยดึง (Pull Factors) โดยรวมอยู่ในระดับมากเช่นกัน โดยปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกัน รองลงมาคือ สถานที่ท่องเที่ยว และร้านสะดวกซื้อ

ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า อายุ อาชีพ และสถานภาพสมรส ส่งผลต่อความแตกต่างของแรงจูงใจในการเดินทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และระดับการศึกษา ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของแรงจูงใจทั้งปัจจัยผลักและปัจจัยดึง

4.2 อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า ความต้องการเดินทางแบบประหยัดเป็นแรงจูงใจปัจจัยผลักที่สำคัญที่สุดของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ สอดคล้องกับแนวคิดของ Crompton [5] และ Dann [8] ที่อธิบายว่าแรงจูงใจในการเดินทางเกิดจากความต้องการภายในของบุคคล โดยเฉพาะการแสวงหาประสบการณ์ภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ ผลลัพธ์นี้สามารถตีความในเชิงลึกได้ว่า สอดคล้องกับพฤติกรรมเฉพาะของกลุ่มนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ (Backpacker) ที่มักมีการจัดสรรงบประมาณในการเดินทางไว้อย่างจำกัด เพื่อให้สามารถเพิ่มระยะเวลาในการพำนักและท่องเที่ยวได้ยาวนานยิ่งขึ้น การเลือกเดินทางด้วยรถไฟซึ่งมีอัตราค่าโดยสารที่เข้าถึงได้และประหยัดที่สุดเมื่อเทียบกับการขนส่งรูปแบบอื่น จึงเป็นแรงขับเคลื่อนภายในที่สำคัญในการผลักดันให้เกิดการออกเดินทางท่องเที่ยว

ด้านแรงจูงใจปัจจัยดึง พบว่าระบบขนส่งที่เชื่อมโยงกันมีความสำคัญมากที่สุด แสดงให้เห็นว่านักท่องเที่ยวให้ความสำคัญกับความสะดวกในการ

เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวและการเชื่อมต่อการเดินทาง สอดคล้องกับแนวคิดปัจจัยดึงของ Crompton [2] ที่ระบุว่าคุณลักษณะของแหล่งท่องเที่ยวและสิ่งอำนวยความสะดวกเป็นองค์ประกอบสำคัญในการดึงดูดนักท่องเที่ยว ประเด็นนี้มีความหมายอย่างยิ่งเมื่อเชื่อมโยงกับลักษณะการเดินทางของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ ซึ่งเป็นกลุ่มเดินทางที่ไม่มีพาหนะส่วนตัวและมีความต้องการความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนแผนการเดินทางสูง ดังนั้น ความพร้อมและความสะดวกของระบบขนส่งสาธารณะท้องถิ่นที่สามารถเชื่อมต่อหรือรองรับการเดินทางต่อเนื่องจากสถานีรถไฟไปยังแหล่งท่องเที่ยวเป้าหมายหลักในพื้นที่ได้อย่างไร้รอยต่อ จึงกลายเป็นองค์ประกอบภายนอกที่มีอิทธิพลและดึงดูดใจให้นักท่องเที่ยวกลุ่มนี้ตัดสินใจเลือกจังหวัดนครราชสีมาเป็นจุดหมายปลายทาง

นอกจากนี้ อายุ อาชีพ และสถานภาพสมรส เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างของแรงจูงใจอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะกลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปีที่ให้ความสำคัญกับการเดินทางแบบประหยัด การแสวงหาประสบการณ์ใหม่ ที่พักใกล้สถานีรถไฟ ร้านสะดวกซื้อ และอาหารท้องถิ่นมากกว่ากลุ่มอายุอื่น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Travel Career Pattern ของ Pearce และ Lee [9] ที่เสนอว่าแรงจูงใจในการเดินทางมีความแตกต่างกันตามช่วงวัยและประสบการณ์ชีวิต

ในขณะที่เพศ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และระดับการศึกษา ไม่พบความแตกต่างของแรงจูงใจอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สะท้อนว่านักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้มีรูปแบบความต้องการและพฤติกรรมการเดินทางที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน แม้จะมีลักษณะประชากรศาสตร์ที่แตกต่างกัน

5. ข้อเสนอแนะ

5.1ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้เชิงพื้นที่ได้ดังนี้

- พัฒนาระบบขนส่งเชื่อมต่อ (Shuttle Bus) จัดบริการรถรับส่งจากสถานีรถไฟหลักไปยังแหล่งท่องเที่ยวสำคัญ เช่น เส้นทางปากช่อง-เขาใหญ่ หรือนครราชสีมา-พิมาย เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ไม่มีพาหนะส่วนตัว
- จัดทำแผนที่ท่องเที่ยว (Backpacker Guide Map) ผลิตแผนที่ดิจิทัลและแผ่นพับระบุเส้นทางรถสาธารณะ จุดเชื่อมต่อ ตารางเวลา และค่าโดยสารที่ชัดเจน เอื้อต่อการเดินทางด้วยตนเอง
- พัฒนาป้ายข้อมูลสองภาษา (Bilingual Signs) ปรับปรุงป้ายบอกทางและข้อมูลการเดินทางภายในสถานีรถไฟเป็นระบบสองภาษา (ไทย-อังกฤษ) เพื่อรองรับนักท่องเที่ยวต่างชาติ
- เชื่อมโยงข้อมูลผ่าน QR Code ติดตั้งคิวอาร์โค้ดบริเวณสถานีเพื่อให้สแกนเข้าถึงข้อมูลตารางเวลาเดินรถไฟที่เชื่อมโยงกับระบบขนส่งท้องถิ่นแบบเรียลไทม์
- ส่งเสริมที่พักราคาประหยัดใกล้สถานี สนับสนุนผู้ประกอบการรอบสถานีพัฒนาโฮสเทลที่สะอาด ปลอดภัย และราคาประหยัด สอดคล้องกับงบประมาณของกลุ่มเป้าหมาย
- ออกแบบแพ็กเกจท่องเที่ยวร่วมกับชุมชน สร้างเส้นทางท่องเที่ยวสำเร็จรูปที่เชื่อมโยงตั๋วรถไฟ ขนส่งชุมชน และที่พักรอบสถานี เพื่อกระจายรายได้สู่ท้องถิ่น

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาครั้งต่อไป

สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป ควรขยายพื้นที่วิจัยไปยังจังหวัดอื่นที่มีเส้นทางรถไฟสายสำคัญเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาในบริบทที่หลากหลาย ร่วมกับการศึกษาตัวแปรเพิ่มเติม ได้แก่ ความพึงพอใจ คุณภาพการบริการ และความตั้งใจกลับมาใช้บริการซ้ำ นอกจากนี้ ควรประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods) โดยบูรณาการการวิจัยเชิงคุณภาพด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรม แรงจูงใจ และความต้องการเชิงลึกของนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ได้อย่างครอบคลุมและรอบด้านมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Duong, L.N., Pham, L.H., and Hoang, T.T.P. (2023). Applying Push and Pull Theory to Determine Domestic Visitors' Tourism Motivations. Journal of Tourism and Services, 14(27), pp. 136-160.

[2] Jensen, J.M. and Hjalager, A.M. (2019). "Travel Motivations of First-Time, Repeat and Serial Backpackers." Tourism and Hospitality Research, 19(4), pp. 465–477.

[3] บุษบา ทวีปี, ศุภชัย กลิ่นขจร และ รัตนา ปิ่นรัตนนนท์. (2567). "การศึกษาพฤติกรรมนักท่องเที่ยวแบบสะพายเป้ต่อเส้นทางคมนาคมขนส่งทางรางในประเทศไทย." วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มทร.อีสาน, 11(1), หน้า 109–120.

[4]Klenosky, D.B. (2002). The "Pull" of Tourism Destinations: A Means-End Investigation. Journal of Travel Research, 40(4), pp. 396-403.

[5] Crompton, J.L. (1979). "Motivations for Pleasure Vacation." Annals of Tourism Research, 6(4), pp. 408–424.

[6] Cochran, W.G. (1977) Sampling Techniques. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.

[7] Jensen, J.M. and Hjalager, A.M. (2019). "Travel Motivations of First-Time, Repeat, and Serial Backpackers," Tourism and Hospitality Research, 19(4), pp. 465–477.

[8] Dann GMS. Anomie. (1977). ego-enhancement and tourism. Ann Tour Res.,4(4), pp.184–194.

[9] Pearce PL, Lee UI. (2005). Developing the travel career approach to tourist motivation. Journal of Travel Research, 43(3), pp.226–237.

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิและประสิทธิภาพความร้อนของตู้อบฟลักซ์สำหรับการเชื่อมใต้ผงฟลักซ์ด้วยท่อกระจายความร้อนแบบเจาะรู

An Experimental Study on Temperature Distribution Behavior and Thermal Efficiency of a Submerged Arc Welding Flux Oven Using a Perforated Heat-Distribution Tube

ภาณุพงษ์ อักษรศรี[1], สมชาย โอนตึง[1], นิพันธ์ ศิริศักดิ์[1] และ บัณฑิต สุขสวัสดิ์[2,*]

[1] แผนกวิจัยและพัฒนา บริษัท เอ็ม.ซี เอส.สตีล จำกัด (มหาชน) 70 หมู่ที่ 2 ตำบลช้างใหญ่ อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13290
[2] ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800
*ผู้ติดต่อ: E-mail bandit.s@fte.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการเตรียมผงฟลักซ์อัดเม็ดสำหรับงานเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) เพื่อแก้ปัญหาจุดอับความร้อนและการกักขังความชื้นในตู้อบแบบดั้งเดิมซึ่งมีพฤติกรรมเป็นตัวกลางรูพรุนทึบ โดยนำเสนอท่อกระจายความร้อนเหล็กเหนียวกลวงขนาด 1.5 inch ยาว 50 cm เจาะรูรอบลำตัว 152 รู ปักบริเวณแกนกลางตู้อบเพื่อเปลี่ยนกลไกการนำความร้อนที่เชื่องช้าให้เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ผลการทดลองอบฟลักซ์ชื้นหนัก 71 กิโลกรัม จำลองสภาวะเติมน้ำ 1 ลิตร พบว่าท่อกระจายความร้อนนี้ช่วยป้องกันการไหลแบบสำลักและเร่งระบายไอน้ำออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาวิกฤตที่ความร้อนเริ่มแยกชั้นลดลงเหลือ 35 นาที (เร็วขึ้น 10 นาที) อีกทั้งช่วยยกระดับประสิทธิภาพความร้อนเชิงควบคุมเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 10 ในทุกตำแหน่ง โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ตรงกลางตู้อบที่เป็นจุดอับความร้อนเดิม มีประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 18.44 ท่อกระจายความร้อนนี้จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบและสร้างความเชื่อมั่นในอุตสาหกรรมโครงสร้างเหล็กกล้าสำเร็จรูปได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การเชื่อมใต้ฟลักซ์, ท่อกระจายความร้อน, การไหลแบบสำลัก, ประสิทธิภาพทางความร้อน

Abstract

This research developed a preparation process of bonded flux for submerged arc welding (SAW) to resolve the issues of thermal dead zones and moisture entrapment inside a conventional drying oven, which behaves as a dense packed-bed porous medium. A hollow mild steel heat spreader tube, with a diameter of 1.5 inches and a length of 50 cm, perforated with 152 holes around its body, was introduced and vertically plunged into the center of the oven to transition the dominant heat transfer mechanism from slow heat conduction to natural convection. Experimental results from baking 71 kg of wet flux under a simulated condition of adding 1 liter of water revealed that this heat spreader tube successfully prevented choke flow and accelerated the venting of expanded steam out of the system. Consequently, the critical period before thermal stratification began was reduced to 35 minutes (10 minutes faster). Furthermore, the comparative control thermal efficiency was elevated by more than 10% across all measured coordinates. Particularly at the center of the oven—the primary conventional thermal dead zone—the thermal efficiency achieved the highest increase of 18.44%. The proposed hollow mild steel heat spreader tube significantly enhances drying efficiency and establishes manufacturing quality assurance within the prefabricated steel structure industry.

Keywords: Submerged Arc Welding, Perforated Heat-Distribution Tube, Choke Flow, Thermal Efficiency

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding: SAW) เป็นเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงที่มีอัตราการเติมเนื้อโลหะและความเร็วในการเชื่อมสูง จึงเป็นหัวใจหลักในอุตสาหกรรมโครงสร้างเหล็กกล้าขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม คุณภาพเชิงกลของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับความชื้นของฟลักซ์ โดยเฉพาะฟลักซ์อัดเม็ด (Bonded Flux) ที่มีสารประสานประเภทซิลิเกต ซึ่งมีความไวต่อการดูดซับความชื้นสูง (High Hygroscopicity) ความชื้นดังกล่าวจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนอิสระ (Diffusible Hydrogen) ในบ่อหลอม ก่อให้เกิดจุดบกพร่องวิกฤต เช่น รูพรุน (Porosity) และการแตกร้าวจากไฮโดรเจนภายใต้ความเค้น (Hydrogen-Induced Cold Cracking) มาตรฐานสากลจึงบังคับให้ต้องอบไล่ความชื้นของฟลักซ์ก่อนปฏิบัติงาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma et al. [1] ที่ยืนยันว่าหากระบบฟลักซ์ดูดซับความชื้นโดยไม่มีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสม พลังงานความร้อนจากการอาร์คจะส่งผลกระทบต่อโลหะวิทยาและสร้างข้อบกพร่องที่เป็นอันตรายต่อแนวเชื่อม

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการอบฟลักซ์มักประสบปัญหาคอขวดเนื่องจากกองผงฟลักซ์ที่มีปริมาณมากจะเกิดการอัดตัวแน่นจนเต็มถังบรรจุ มีลักษณะเป็นตัวกลางที่มีรูพรุนทึบ (Packed-Bed Porous Media) [2] สภาวะดังกล่าวสร้างข้อจำกัดทางกายภาพและกลไกของอากาศร้อนทำให้กลไกการนำความร้อน (Heat Conduction) จากแผงทำความร้อนด้านล่างตู้อบแผ่กระจายขึ้นสู่ด้านบนได้ช้ามาก ส่งผลให้เกิดจุดอับความร้อน (Thermal Dead Zone) บริเวณส่วนกลางและส่วนบนของตู้อบอุตสาหกรรม โดยมีอุณหภูมิหยุดนิ่งเท่ากัน ความหนาแน่นนี้ยังปิดกั้นไม่ให้ไอน้ำระเหยลอยขึ้นสู่ด้านบนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นช่องว่างงานวิจัยที่ยังไม่มีการศึกษาและหาแนวทางแก้ไขในเชิงวิศวกรรม

จากข้อจำกัดข้างต้น นำมาสู่การตั้งคำถามวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนในตู้อบแบบดั้งเดิมในสภาวะฟลักซ์ชื้นเป็นอย่างไร และหากมีการติดตั้งท่อกระจายความร้อนปักกลางตู้อบจะช่วยปรับปรุงการพาความร้อนและระบบกระจายอุณหภูมิได้อย่างไร ทั้งนี้ ชัยวัฒน์ อุทัยแสน และคณะ ระบุว่าประสิทธิภาพความร้อนในเตาอบอุตสาหกรรมจะมีค่าสูงสุดได้ เมื่อมีการออกแบบทางกายภาพให้เกิดการไหลเวียนที่สมมาตรและกระจายช่องทางเข้าความร้อนหลายตำแหน่งเพื่อลดสิ่งกีดขวาง [3] กรอบแนวคิดนี้จึงเป็นฐานคิดในการพัฒนาท่อกระจายความร้อนเพื่อช่วยลดการทานการไหลช่วยให้ไอน้ำระบายขึ้นสู่ด้านบนอย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนกลไกจากการนำความร้อนอย่างช้า ให้กลายเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ผ่านท่อกลวง ในการประเมินพฤติกรรมความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลาต้องใช้เครื่องมือวัดเพื่อวิเคราะห์อัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิอย่างละเอียด ซึ่งเป็นระบบมาตรฐานสากลเช่นเดียวกับแนวทางการทดลองของนฤดม ขจรวุฒิตระกูล และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์ [4]

งานวิจัยชิ้นนี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิเชิงตำแหน่งแปรผันตามเวลาภายในตู้อบฟลักซ์ขนาด 40 kW ขนาดความจุไม่เกิน 100 กิโลกรัม ทั้งในบริเวณด้านล่าง ตรงกลาง และด้านบน ภายใต้สภาวะปกติ (แห้ง) และสภาวะชื้นอย่างละเอียด ควบคู่กับการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนเชิงเปรียบเทียบของตู้อบฟลักซ์ที่ติดตั้งท่อกระจายความร้อนกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม เพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของท่อกระจายความร้อนอย่างเป็นระบบ

2. ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology)

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการอบไล่ความชื้นของผงฟลักซ์อัดแน่นก่อนใช้กับกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding: SAW) โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ESTACON 2026 | 17th

2.1 การออกแบบท่อกระจายความร้อน

ในการออกแบบนี้ได้ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนเพื่อคำนวณหาขนาดท่อที่เหมาะสมโดยมีรายละเอียด 2 ขั้นตอนหลักได้แก่ การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเชิงออกแบบและการคำนวณหารัศมีวิกฤติทางความร้อน ดังแสดงผลลัพธ์การคำนวณไว้ในรูปที่ 1 โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

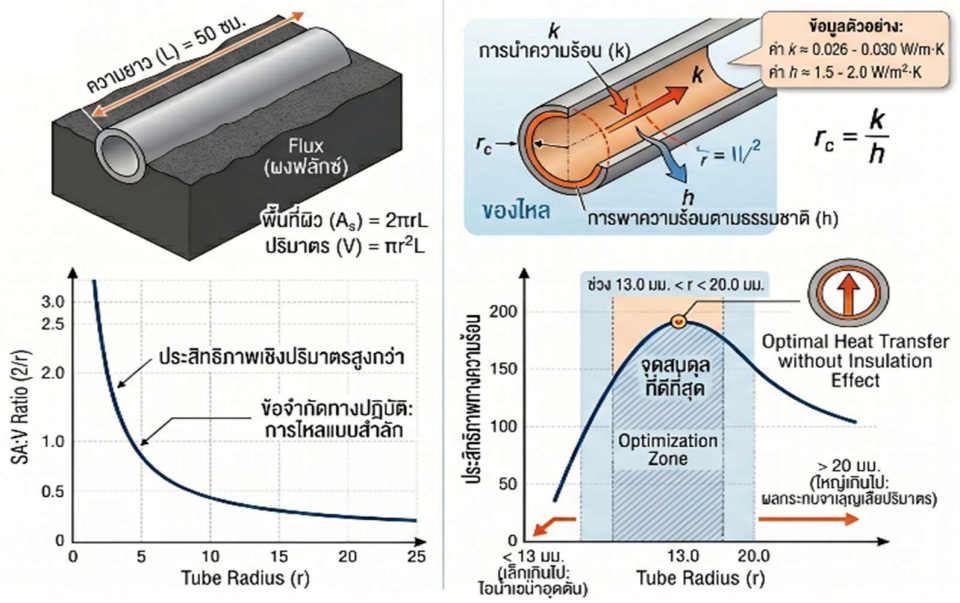
2.1.1 สมการและฟังก์ชันเป้าหมายเชิงออกแบบ

การกำหนดขนาดทางเรขาคณิตของท่อกระจายความร้อนซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงความยาวกำหนด 50 cm ปักอยู่กลางถังบรรจุผง ฟลักซ์น้ำหนัก 71 กิโลกรัม โดยมีวัตถุประสงค์หาพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอกในการถ่ายเทความร้อน (A_s = 2pi rL) ให้มีค่าสูงสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กระจายความร้อนออกสู่จุดอับ ควบคู่ไปกับการควบคุมปริมาตรทรงกระบอกของท่อที่เข้าไปแทนที่ภายในระบบ (V = pi r^2L) ให้มีค่าต่ำสุด เพื่อป้องกันไม่ให้แย่งเนื้อที่ความจุของผงฟลักซ์ภายในตู้อบเมื่อทำการวิเคราะห์โดยกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface Area-to-Volume Ratio) จะได้ความสัมพันธ์คงที่ทางเรขาคณิตเท่ากับสัดส่วน $2/r$

2.1.2 การคำนวณหารัศมีวิกฤตทางความร้อน

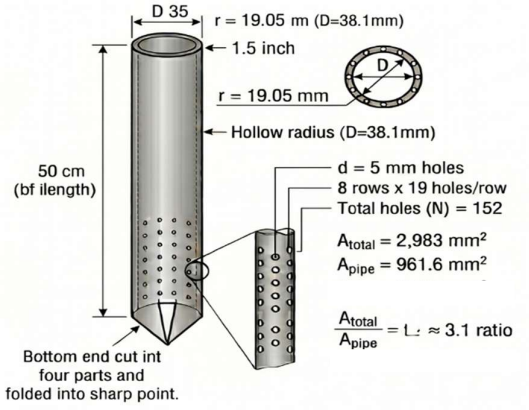
การออกแบบได้คำนวณหารัศมีวิกฤตของท่อ (r_c = k/h) [5] ซึ่งเป็นจุดสมดุลทางฟิสิกส์ระหว่างความต้านทานการนำความร้อนผ่านวัสดุเหล็กเหนียวกับความสามารถในการพาความร้อนและไอน้ำรอบข้างออกสู่บรรยากาศ โดยการประเมินสมบัติทางฟิสิกส์ ณ สภาวะการอบ ฟลักซ์ชื้นที่มีอุณหภูมิใช้งานเฉลี่ยช่วงเปลี่ยนสถานะและกลายเป็นไออยู่ระหว่าง 100 ถึง 125°C กำหนดให้ค่าความนำความร้อนของอากาศชื้นผสมไอน้ำ (k) มีค่าประมาณ 0.026 ถึง 0.030 w/m-K และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติในช่องแคบปิดตรึงของตัวกลางรูพรุน (h) มีค่าประมาณ 1.5 ถึง 2.0 w/m-K เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการสมดุลจะได้ช่วงรัศมีวิกฤตทางทฤษฎีจำกัดขอบเขตค่าเหมาะสุดอยู่ระหว่าง 13.0 ถึง 20.0 mm ดังแสดงในรูปที่ 1

มิติเรขาคณิตที่แท้จริงของท่อขนาด 1.5 inch ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 38.1 mm คิดเป็นค่ารัศมีภายนอกสัมบูรณ์เท่ากับ 19.05 mm นั้น มีค่าที่ตกอยู่ตรงช่วงปลายสุดของเส้นโค้งจุดยอดประสิทธิภาพสูงสุดภายในช่วงรัศมีวิกฤตทางทฤษฎี (13.0 mm < 19.05 mm < 20.0 mm) พอดี



รูปที่ 1 การออกแบบและหาค่ารัศมีวิกฤตของท่อกระจายความร้อน

มิติเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใช้งานจริงที่ขนาด 35 mm ก่อให้เกิดพื้นที่หน้าตัดสัญจรภายในแกนกลวง (A_{pipe}) เท่ากับ 9.62 cm^2 ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการจัดวางพิกัดรูระบาย 152 รู รอบลำตัวท่อที่มีพื้นที่รวม (A_{total}) เท่ากับ 29.85 cm^2 จะได้อัตราส่วนมิติพื้นผิวการไหลรวมประมาณ 3.10 เท่า ซึ่งการที่พื้นที่รับมวลไอน้ำรอบลำตัวใหญ่กว่าพื้นที่แกนท่อภายในมากกว่า 3 เท่า ตามหลักกลศาสตร์ของไหล ดังแสดงรายละเอียดทางมิติในรูปที่ 2



รูปที่ 2 มิติของท่อกระจายความร้อน

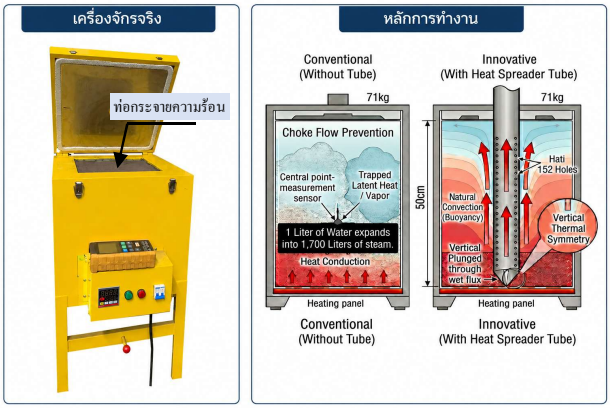
2.2 แผนการทดลองและสภาวะการทดสอบ

แผนการทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลองหลัก โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้

การทดลองที่ 1 (การอบฟลักซ์แห้งสภาวะปกติ): อบฟลักซ์แห้งสนิท 71 กิโลกรัม โดยไม่มีท่อกระจายความร้อนเป็นเวลา 60 นาที ควบคุมอุณหภูมิหน้าตู้อบที่ 350 °C [6,7] บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที นำข้อมูลอุณหภูมิก้นถังไปคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะประสิทธิผล (c) ของฟลักซ์ตามสมการสมดุลความร้อน $Q = mc\Delta T$ ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 1,302 J/kg°C และใช้เป็นฐานพลังงานความร้อนอ้างอิง (Q_{ref} = 376.3284 J) ซึ่งคำนวณจากพลังงานของตู้อบฟลักซ์ที่ใช้ต่อหนึ่งชั่วโมง

การทดลองที่ 2 (การอบฟลักซ์ชื้นแบบดั้งเดิม) จำลองสภาวะชื้นโดยนำผงฟลักซ์มาคลุกเคล้ากับน้ำสะอาดปริมาตร 1 ลิตร บรรจุลงตู้อบฟลักซ์แบบปกติ (ไม่ติดตั้งท่อเสริม) ดำเนินการอบเป็นเวลา 90 นาที และบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที

การทดลองที่ 3 (การอบฟลักซ์ชื้นร่วมกับท่อกระจายความร้อน) เตรียมสภาวะชื้นของฟลักซ์ในลักษณะเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่ทำการติดตั้งท่อกระจายความร้อนปักลงบริเวณจุดศูนย์กลาง ดำเนินการอบเป็นเวลา 90 นาที ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนทางสถิติ แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยมาวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3 การติดตั้งท่อกระจายความร้อนในตู้อบฟลักซ์

2.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน

การประเมินประสิทธิภาพความร้อนเชิงปริมาณเพื่อแสดงขีดความสามารถของท่อกระจายความร้อน แบ่งเกณฑ์การคำนวณออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ดังนี้ ประสิทธิภาพความร้อนเชิงตำแหน่งภายในตู้อบ (Relative Position Efficiency)ใช้เพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์การแผ่กระจายความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน (ด้านล่างของถัง) ขึ้นสู่พื้นที่ส่วนกลางและส่วนบนภายในตู้อบ โดยกำหนดให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ตำแหน่งล่างสุด (Q_{bottom}) ของสภาวะนั้นๆ เป็นฐานคิดที่ร้อยละ 100 ตามสมการด้านล่าง

$$\eta_{position} = \left(\frac{Q_{position}}{Q_{bottom}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ $\eta_{position}$ คือ ประสิทธิภาพความร้อนเชิงตำแหน่ง ณ จุดวัดที่พิจารณาและ $Q_{position}$ คือ ค่าพลังงานความร้อนที่วัตถุดูดกลืน ณ ตำแหน่งตรงกลางตู้ หรือตำแหน่งด้านบนปากถังอบ

เพื่อหาความสามารถและผลการใช้ท่อกระจายความร้อนในการอบฟลักซ์ขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม โดยกำหนดให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่คำนวณได้จากตำแหน่งด้านล่างถังจากการอบฟลักซ์แห้งปกติ (การทดลองที่ 1) เป็นค่าพลังงานอ้างอิงคงที่ (Q_{ref} = 376.3284 J) ใช้เป็นฐานเปรียบเทียบที่ร้อยละ 100 ตามสมการด้านล่าง

$$\eta_{control} = \left(\frac{Q_{experimental}}{Q_{ref}}\right) \times 100\% \qquad (2)$$

เมื่อ $\eta_{control}$ คือ ประสิทธิภาพความร้อนเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม และ $Q_{experimental}$ คือ ค่าพลังงานความร้อนที่คำนวณได้จากผลต่างอุณหภูมิในสภาวะจำลองฟลักซ์ชื้นของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ณ ตำแหน่งต่างๆ

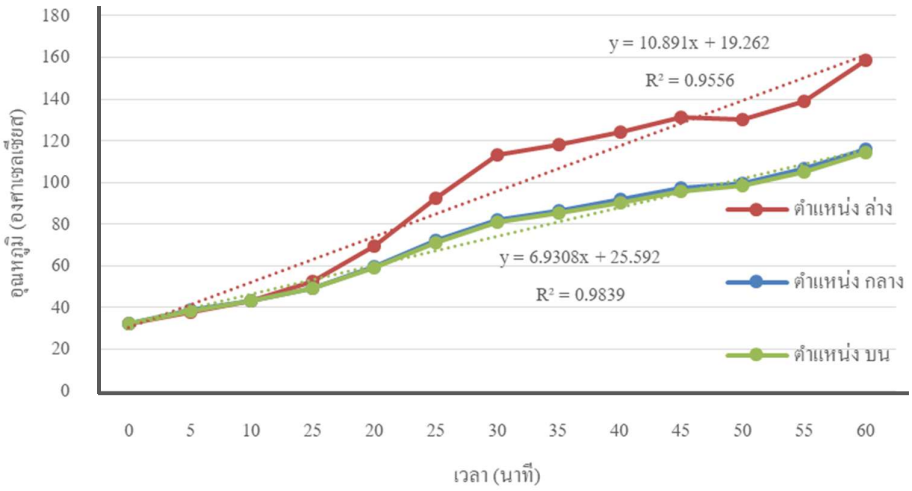
3. ผลการวิจัย

3.1 พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบฟลักซ์ในสภาวะปกติ

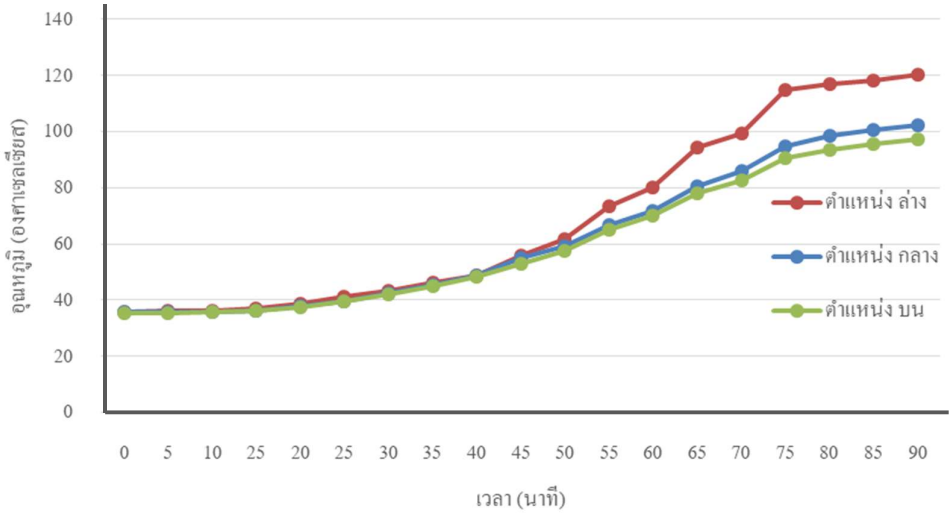
จากการศึกษาจลนศาสตร์ความร้อนของการอบผง ฟลักซ์แห้งน้ำหนัก 71 กิโลกรัม ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิหน้าเตาอบที่ 350°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเชิงเวลามีลักษณะแปรผันตามตำแหน่งความลึกของถังอบอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงผลการบันทึกการกระจายตัวของอุณหภูมิใน รูปที่ 4 ซึ่งพบว่าในช่วง 0–25 นาทีแรกอุณหภูมิในทุกตำแหน่ง (ด้านล่าง ตรงกลาง และด้านบน) มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันโดยไต่ระดับอยู่ในช่วง 32–50°C อย่างไรก็ตาม หลังนาทีที่ 25 เป็นต้นไป อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งด้านล่างซึ่งอยู่ใกล้ชิดกับแผงฮีตเตอร์แหล่งกำเนิดความร้อน มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (ความชันกราฟสูง) ในช่วงนาทีที่ 25–30 โดยพุ่งสูงขึ้นจาก 50°C ไปสู่ 113°C และเข้าสู่อุณหภูมิสูงสุด 160°C ณ นาทีที่ 60 ในทางตรงกันข้าม ค่าอุณหภูมิในตำแหน่งตรงกลางตู้และตำแหน่งด้านบนปากถังอบกลับมีพฤติกรรมที่หยุดนิ่งและมีค่าเท่ากันโดยตลอดในทุกช่วงเวลา โดยไต่ระดับไปสิ้นสุดที่อุณหภูมิเท่ากันประมาณ 120°C ณ นาทีที่ 60 ปรากฏการณ์นี้สามารถอภิปรายได้ว่า พลังงานความร้อนในตู้อบแบบดั้งเดิมถูกส่งผ่านผงฟลักซ์อัดแน่นด้วยกลไกการนำความร้อน (Heat Conduction) เป็นหลัก ซึ่งผงฟลักซ์ที่มีความหนาแน่นสูงทำหน้าที่เป็นฉนวนกักเก็บความร้อน ส่งผลให้เกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างก้นตู้และส่วนบนสูงถึง 40°C เมื่อนำผลต่างอุณหภูมินี้มาคำนวณร่วมกับมวลและพลังงานอินพุตตามสมการสมดุลความร้อน จะได้ค่าความจุความร้อนจำเพาะประสิทธิผล (c) ของฟลักซ์ประมาณ 1,302 J/kg°C (คิดที่ประสิทธิภาพตู้อบฟลักซ์ 80%)

3.2. ผลกระทบของสภาวะความชื้นต่อจลนศาสตร์ความร้อนในตู้อบแบบดั้งเดิม

เมื่อจำลองสภาวะชื้นด้วยการเพิ่มมวลน้ำ 1 ลิตร เข้าสู่เนื้อฟลักซ์ก่อนการอบเป็นเวลา 90 นาที พบว่าสภาวะความชื้นส่งผลกระทบและเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในตู้อบอย่างเห็นได้ชัด โดยจากพฤติกรรมอุณหภูมิที่บันทึกได้ใน รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในช่วง 0–45 นาทีแรก อุณหภูมิในทุกตำแหน่งของตู้อบเกิดสภาวะหยุดนิ่งโดยตรึงกราฟความร้อนให้อยู่ในระดับต่ำและคงที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 60°C ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบเกือบทั้งหมดถูกโมเลกุลของน้ำนำไปใช้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอ (ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ Latent Heat of Vaporization) แทนที่จะนำไปใช้เพิ่มอุณหภูมิเนื้อวัสดุหลังผ่านนาทีที่ 45 เป็นต้นไป เมื่อน้ำบางส่วนเริ่มระเหยออก ค่าอุณหภูมิเชิงตำแหน่งจึงเริ่มเกิดการแยกชั้นแปรผันตามความลึก (Temperature Stratification) โดย ณ นาทีที่ 90 ตำแหน่งด้านล่าง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบฟลักซ์แห้งในสภาพปกติ

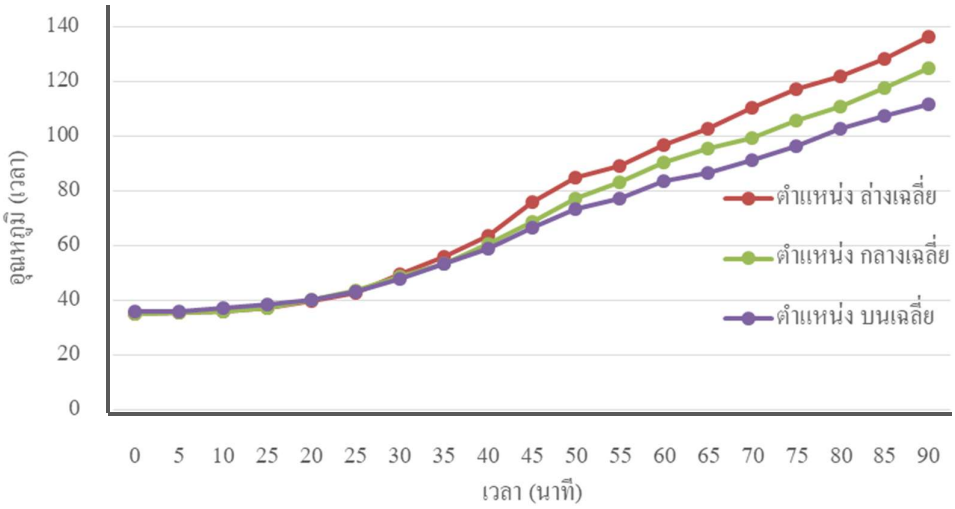


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบฟลักซ์ชิ้นโดยไม่ใส่ท่อกระจายความร้อน

สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้เพียง 144°C ขณะที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนปากถังอบเกิดจุดอับความร้อน (Thermal Dead Zone) ส่งผลให้อุณหภูมิหยุดนิ่งและเท่ากันอยู่เพียง 111°C แสดงว่าในตู้อบดั้งเดิม ชั้นผงฟลักซ์ที่เปียกชื้นและอัดตัวแน่นหนาไม่มีช่องว่างทางสัญจรของของไหลทำให้ปิดกั้นการระเหยและการลอยตัวของไอน้ำ และทำให้ความร้อนสะสมกระจุกตัวอยู่เพียงด้านล่างของตู้อบจึงเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

3.3 พฤติกรรมความร้อนและผลสัมฤทธิ์ของท่อกระจายความร้อน

การติดตั้งท่อกระจายความร้อนผลการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงแนวโน้มใน รูปที่ 6 พบว่า ท่อกระจายความร้อนนี้สามารถลดระยะเวลาวิกฤตที่อุณหภูมิเริ่มแยกชั้นกระจายตัวจากเดิม 45 นาที ลงเหลือเพียง 35 นาที เร็วขึ้นถึง 10 นาที แสดงว่ารูเปิดขนาด 5 mm รอบลำตัวท่อทำหน้าที่ลดแรงต้านทานการไหลของของไหลยอมให้ไอน้ำเคลื่อนที่เข้าสู่แกนกลางท่อซึ่งเป็นโซนความดันต่ำได้อย่างรวดเร็วนอกจากนี้ พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิ ณ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบฟลักซ์ชิ้นโดยใส่ท่อท่อกระจายความร้อน (ค่าเฉลี่ย)

นาทีที่ 90 ไม่ปรากฏลักษณะกราฟหยุดนิ่งเท่ากันของพื้นที่ส่วนกลางและส่วนบนอีกต่อไป แต่สามารถแผ่กระจายอุณหภูมิไล่ระดับจากล่างขึ้นบนได้อย่างสม่ำเสมอเป็นลำดับขั้น โดยอุณหภูมิด้านล่าง 136°C อุณหภูมิตรงกลางตู้อบ 125°C และอุณหภูมิด้านบนของตู้อบ 111°C แสดงว่าท่อกลวงเหล็กเหนียวได้เปลี่ยนกลไกการนำความร้อนไปสู่การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ทำให้อากาศร้อนจากด้านล่างตู้อบลอยขึ้นมาและแผ่กระจายความร้อนออกทางรูเจาะทั้ง 152 จุด เข้าสู่จุดอับความร้อนโดยตรง ส่งผลให้อุณหภูมิตรงกลางตู้อบเพิ่มสูงขึ้นกว่าสภาวะปกติ 23°C และส่วนบนสูงขึ้น 15°C

3.4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน

เพื่อพิสูจน์ผลสัมฤทธิ์ของท่อกระจายความร้อนเชิงปริมาณ การประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนแปรผันตามสภาวะและตำแหน่งการอบสรุปได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ประสิทธิภาพทางความร้อนเชิงตำแหน่ง ($\eta_{position}$) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ในสภาวะการอบฟลักซ์ชิ้นแบบดั้งเดิม (การทดลองที่ 1) พลังงานความร้อนแผ่กระจายขึ้นสู่พื้นที่ส่วนกลางได้ค่อนข้างจำกัดเนื่องจากชั้นผงฟลักซ์อัดตัวแน่นหนา แต่เมื่อมีการติดตั้งท่อกระจายความร้อนปักตรงกลาง (การทดลองที่ 3) กลไกการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ภายในแกนท่อกลวงได้ช่วยส่งผ่านมวลอากาศร้อนขึ้นสู่ด้านบนอย่างสมมาตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนเชิงตำแหน่ง ณ บริเวณตรงกลางตู้อบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 78.88 เป็น ร้อยละ 88.61

ประสิทธิภาพทางความร้อนเชิงสภาวะควบคุม ($\eta_{control}$) ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับฐานอ้างอิง พบว่าสภาวะความชื้นสะสมดั้งเดิม (การทดลองที่ 2) ทำให้ประสิทธิภาพความร้อนตรงกลางตู้อบลดต่ำลงเหลือเพียงร้อยละ 52.69 แต่หลังจากการใช้ท่อกระจายความร้อน (การทดลองที่ 3) ประสิทธิภาพความร้อนเชิงควบคุม ณ ตำแหน่งกลางตู้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเป็นร้อยละ 71.13 หรือคิดเป็นค่าประสิทธิภาพความร้อนที่ยกระดับขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 18.44 แสดงว่าท่อกระจายความร้อนนี้สามารถช่วยแก้ปัญหาจุดอับความร้อน (Thermal Dead Zone) ของระบบเดิมได้

จากผลการคำนวณเชิงเปรียบเทียบใน ตารางที่ 1 และ 2 พบว่าการติดตั้งท่อกระจายความร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 10 ในทุกตำแหน่งเชิงพิกัดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการอบฟลักซ์ชิ้นแบบปกติ บริเวณตรงกลางตู้อบ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้นสูงที่สุดถึง ร้อยละ

18.44 จากเดิมร้อยละ 52.69 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71.13 ตามด้วยตำแหน่งด้านล่างที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.59 และตำแหน่งด้านบนเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนเชิงตำแหน่ง ($\eta_{position}$)

การทดลอง	ประสิทธิภาพทางความร้อน (%)		
	ด้านล่าง	ตรงกลาง	ด้านบน
1	100	66.32	65.06
2	100	78.88	73.42
3	100 (±0.00)	88.61 (±1.24)	74.89 (±0.85)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนเชิงสภาวะควบคุม ($\eta_{control}$)

การทดลอง	ประสิทธิภาพทางความร้อน (%)		
	ด้านล่าง	ตรงกลาง	ด้านบน
1	100	66.32	65.06
2	66.7	52.69	49.04
3	80.29 (±2.15)	71.13 (±1.82)	60.16 (±1.10)
ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น	13.59	18.44	11.12

4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและทดสอบท่อเหล็กกระจายความร้อนแบบเจาะรู 152 รู รอบลำตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 mm ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสุดกับมวลไอน้ำและสามารถป้องกันการไหลแบบสำลัก (Choke Flow Prevention) ภายในตู้อบฟลักซ์ที่ต้องอบฟลักซ์ 71 กิโลกรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองอบฟลักซ์ในสภาวะจำลองความชื้นพบว่า ท่อกระจายความร้อนที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนกลไกการถ่ายเทความร้อนหลักภายในระบบ จากเดิมที่เป็นการนำความร้อนแบบช้าๆ ผ่านตัวกลางรูพรุนทึบ ให้กลายเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติผ่านแกนท่อกลวงโดยอาศัยแรงลอยตัว ส่งผลให้ไอน้ำเคลื่อนที่และระบายออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถลดระยะเวลาวิกฤตที่ความร้อนเริ่มเกิดการแยกชั้นมีความเร็วในการระบายความชื้นเพิ่มขึ้นกว่าสภาวะปกติถึง 10 นาที ผลการประเมินประสิทธิภาพพบว่า การติดตั้งท่อกระจายความร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นมากกว่า 10 % ในทุกพิกัดตำแหน่งการวัดเมื่อเทียบกับการอบฟลักซ์ชื้นแบบเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่ตรงกลางตู้อบซึ่งเป็นจุดอับความร้อนมีค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 18.44 สรุปได้ว่าท่อกระจายความร้อนนี้ช่วยแก้ปัญหาจุดอับความร้อนได้

4.2 อภิปรายผล

พฤติกรรมความร้อนเชิงเวลาในระบบดั้งเดิมที่มีการแยกชั้นอุณหภูมิตามระดับความลึกอย่างชัดเจน แสดงว่ากองผงฟลักซ์อัดแน่นทำหน้าที่เป็นฉนวนกักเก็บความร้อนและปิดกั้นการหมุนเวียนของอากาศ ส่งผลให้เกิดภาวะความชื้นตกค้างซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดไฮโดรเจนอิสระและจุดบกพร่องวิกฤตในรอยเชื่อม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma et al. [1] อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ท่อกระจายความร้อนนี้ สามารถลดแรงต้านทานและเร่งระบายไอน้ำเข้าสู่แกนกลางท่อได้อย่างรวดเร็ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อน ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดย ชัยวัฒน์ อุทัยแสน และคณะ [3] ที่ระบุว่า การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนในอุปกรณ์อบอุตสาหกรรม จำเป็นต้องสร้างช่องทางเข้า-ออกของความร้อนหลายตำแหน่งรอบกายภาพเพื่อทลายสิ่งกีดขวางการไหล ท่อกระจายความร้อนนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการอบฟลักซ์ปริมาณมากในภาคอุตสาหกรรมผลิตโครงสร้างเหล็กที่มีการเชื่อมใต้ผงฟลักซ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. ข้อเสนอแนะแนวทางการประยุกต์ใช้และการวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาเชิงทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพทางความร้อนของตู้อบฟลักซ์ SAW ด้วยการติดตั้งต่อกระจายความร้อน คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1 ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้

สำหรับการขยายสเกลการผลิตสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานตู้อบฟลักซ์ขนาดบรรจุมากกว่า 100 กิโลกรัม สามารถนำแนวคิดจากงานวิจัยนี้ไปปรับมาตราส่วน และแนะนำให้เพิ่มความหนาผนังท่อกระจายความร้อนเป็น 2-3 mm วัสดุทำด้วยสเตนเลสเกรด SUS304 ขึ้นไปเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากไอความชื้นสะสม

5.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต

ควรมีการทดลองปรับเปลี่ยนปัจจัยเชิงโครงสร้างของท่อกระจายความร้อน เช่น ขนากเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (Hole Diameter) และระยะห่างระหว่างรูเจาะ (Hole Pitch) เพื่อหาค่าเหมาะสุดที่ช่วยให้อากาศร้อนและไอความชื้นไหลเวียนได้อย่างเป็นอิสระและสม่ำเสมอทั่งทั้งถังบรรจุฟลักซ์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ma, Q., Li, H., Liu, S., Liu, D., Wang, P., Zhu, Q., and Lei, Y. (2022). "Comparative evaluation of self-shielded flux-cored wires designed for high strength low alloy steel in underwater wet welding: Arc stability, slag characteristics, and joints' quality." Journal of Materials Engineering and Performance 31, 7 : 5231-5244.

[2] Skarbalius, G., Džiugys, A., Misiulis, E., & Navakas, R. (2022). "A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed." *Powder Technology* 404 : 117499

[3] ชัยวัฒน์ อุทัยแสน, ยศกร ประทุมวัลย์ และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี. (2568). “การตรวจสอบการกระจายลมร้อนในเตาอบด้วยการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.” วารสารวิจัย UTK 19, 2 (มกราคม-มิถุนายน) : 51-62.

[4] นฤดม ขจรวุฒิตระกูล และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์. (2559). “การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและทดลองของกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์สำหรับประเมินการบิดเสียรูปและความเค้นตกค้างในชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กกล้า.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26, 3 (กันยายน-ธันวาคม): 395-405.

[5] Acharya, Swastik, and Sukanta K. Dash (2021). "Natural convection heat transfer from a vertical hollow cylinder with surface holes." Journal of Heat Transfer 143,4 : 042602.

[6] American Welding Society. (2020). “AWS A5.17/A5.17M:2019 Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding.” January 1.

[7] Lincoln Electric Company. (2024). “Recommended Storage and Baking Procedures for Submerged Arc Welding Fluxes: Industrial Technical Report.” November 12.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Comparison of Machine Learning Algorithms for Product Quality Classification in Injection Molding Process

อนุชิต คงฤทธิ์[1]*

[1] สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ถนนสุรนรายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Anuchit khongrit[1]*

[1]Industrial Management Engineering Program, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Suranarai Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000

*ผู้ติดต่อ: anuchit.kh@nrru.ac.th, 0858603339

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยเทคนิค Machine Learning และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการฉีดไม่เต็มแบบในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เป็นชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ ข้อมูลถูกกำหนดค่าเป้าหมายในลักษณะการจำแนกแบบทวิภาค ประกอบด้วยงานดี (Good) และงานเสีย (No Good) จากนั้นนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม Altair AI Studio เพื่อสร้างและทดสอบแบบจำลอง Machine Learning โดยแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองในสัดส่วนร้อยละ 80 และ 20 ตามลำดับ และประเมินประสิทธิภาพด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความสามารถในการตรวจจับข้อมูลของคลาส (Class Recall) และค่าความแม่นยำของการจำแนกคลาส (Class Precision)

ผลการวิจัยพบว่า Artificial Neural Network ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 94.74% รองลงมาคือ Random Forest และ Logistic Regression ซึ่งมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.42% และ 82.89% ตามลำดับ นอกจากนี้ Artificial Neural Network ยังให้ค่า Class Recall และ Class Precision ของทั้งคลาส Good และ No Good อยู่ในระดับสูงและมีความสมดุลมากที่สุด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองสามารถนำมาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้กับเทคนิค Machine Learning ในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอัลกอริทึม Artificial Neural Network มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

คำสำคัญ: การฉีดขึ้นรูป การออกแบบการทดลอง การเรียนรู้ของเครื่อง

Abstract

This research aimed to apply Design of Experiments (DOE) data for product quality classification using Machine Learning techniques and to compare the performance of Logistic Regression, Random Forest, and Artificial Neural Network algorithms for product quality classification in an injection molding process. The dataset used in this study was obtained from a previous factorial experimental design conducted to investigate the factors affecting short-shot defects in an injection molding process. Product quality was categorized into two classes, namely Good and No Good, representing a binary classification

problem. The dataset was imported into Altair AI Studio for model development and evaluation. The data were divided into training and testing sets at a ratio of 80:20. Model performance was evaluated using Accuracy, Class Recall, and Class Precision metrics.

The results indicated that the Artificial Neural Network achieved the highest classification performance with an accuracy of 94.74%, followed by Random Forest and Logistic Regression with accuracies of 93.42% and 82.89%, respectively. In addition, the Artificial Neural Network provided the most balanced performance in terms of Class Recall and Class Precision for both Good and No Good classes. The findings demonstrate that data obtained from Design of Experiments can be effectively extended for Machine Learning-based product quality classification. Furthermore, the Artificial Neural Network was found to be the most suitable algorithm for the dataset used in this study and showed strong potential for supporting quality control and decision-making in injection molding manufacturing processes.

Keywords: Injection Molding, Design of Experiments, Machine Learning

1. บทนำ

กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและมีอัตราการผลิตสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การผลิตหลายประการ เช่น ความดันฉีด อุณหภูมิการฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วการฉีด และระยะเวลาการหล่อเย็น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์และส่งผลกระทบต่อกันอย่างซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้เกิดของเสียหรือข้อบกพร่องของชิ้นงาน เช่น การฉีดไม่เต็มแบบ (Short Shot) การบิดงอ (Warpage) และตำหนิบนผิวชิ้นงานได้ ดังนั้น การควบคุมและการพยากรณ์คุณภาพของชิ้นงานจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดอัตราของเสีย และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ [1-2]

เพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงานและลดความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต นักวิจัยจำนวนมากได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เนื่องจาก DOE เป็นเครื่องมือทางสถิติที่สามารถวางแผนการทดลองได้อย่างเป็นระบบ ช่วยลดจำนวนการทดลองที่จำเป็น และสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า DOE สามารถนำมาใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูป เช่น ความดันฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการฉีด และเวลาการหล่อเย็น เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน ลดอัตราของเสีย และเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิต นอกจากนี้ DOE ยังช่วยให้ผู้วิจัยสามารถระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้เทคนิคดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกในปัจจุบัน [3-4]

แม้ว่าการออกแบบการทดลองจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูป แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมักถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติและการตัดสินใจภายใต้เงื่อนไขของการทดลองที่กำหนดไว้เท่านั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกระบวนการและคุณภาพของชิ้นงานยังมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มเติม โดยเฉพาะการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจำแนกหรือพยากรณ์คุณภาพของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ ในปัจจุบัน แนวคิดการผลิตอัจฉริยะ (Smart Manufacturing) และอุตสาหกรรม 4.0 ให้ความสำคัญกับการใช้ข้อมูลจากกระบวนการผลิตเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและการควบคุมคุณภาพแบบเชิงรุก ส่งผลให้การนำข้อมูลจากการทดลองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลสมัยใหม่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่นำข้อมูลจากการออกแบบการทดลองในกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาต่อยอดเพื่อการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องยังมีจำนวนไม่มากนัก โดยเฉพาะการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหลายประเภทภายใต้ชุดข้อมูลเดียวกัน [1, 5]

Machine Learning เป็นเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากมีความสามารถในการเรียนรู้รูปแบบและความสัมพันธ์ของข้อมูลจากข้อมูลในอดีต เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์ การจำแนกประเภท และการสนับสนุนการตัดสินใจในกระบวนการผลิต งานวิจัยหลายฉบับได้รายงาน

ESTACON 2026 | 17th

ความสำเร็จของการประยุกต์ใช้ Machine Learning ในการพยากรณ์คุณภาพผลิตภัณฑ์ การตรวจจับข้อบกพร่อง และการควบคุมกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ โดยเฉพาะในกระบวนการฉีดขึ้นรูปซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกระบวนการและคุณภาพของชิ้นงานในลักษณะที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น อัลกอริทึม Machine Learning ที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูล ได้แก่ Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมมีหลักการเรียนรู้ข้อมูลและความสามารถในการสร้างแบบจำลองที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลอาจแตกต่างกันตามลักษณะของชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ดังนั้น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning บนชุดข้อมูลจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญในการคัดเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านการควบคุมคุณภาพในภาคอุตสาหกรรม [2, 6-7]

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของผู้วิจัย [8] ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มแบบในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ และสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตได้สำเร็จ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตและผลลัพธ์ด้านคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งยังมีศักยภาพในการนำมาต่อยอดเพื่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้อีกในหลายมิติ แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้ Machine Learning สำหรับการพยากรณ์และจำแนกคุณภาพผลิตภัณฑ์ในภาคการผลิต แต่การนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้เพื่อจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหลายประเภทภายใต้ชุดข้อมูลเดียวกัน [15-16] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยเทคนิค Machine Learning และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อคัดเลือกอัลกอริทึมที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพและสนับสนุนการตัดสินใจในกระบวนการผลิตต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

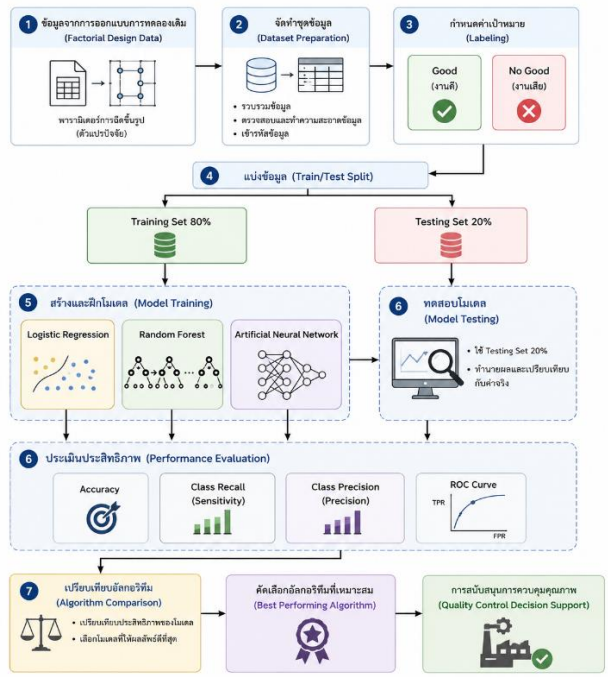
ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบทดลองในกระบวนการฉีดของการศึกษาที่ผ่านมาโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ที่มีการทำซ้ำแต่ละตัวแบบการทดลอง 5 ครั้ง และทำการบันทึกผลการทดลองของชิ้นงานในลักษณะของงานดี (Good) ซึ่งสามารถฉีดขึ้นรูปได้สมบูรณ์ตามแบบ และงานเสีย (No Good) ซึ่งเกิดการฉีดขึ้นรูปไม่เต็มตามแบบที่กำหนด

หลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองแล้ว ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาจัดสร้างเป็นชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับการวิเคราะห์ด้วย Machine Learning โดยกำหนดค่าเป้าหมาย (Label) ในลักษณะการจำแนกแบบทวิภาค (Binary Classification) ประกอบด้วยค่า Good และ No Good ซึ่งใช้แทนคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจากนั้นชุดข้อมูลถูกนำเข้าสู่โปรแกรม Altair AI Studio สำหรับการเตรียมข้อมูล (Data Preparation) และการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึม Machine Learning โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการจำแนกข้อมูลแบบทวิภาค (Binary Classification) ในการสร้างแบบจำลอง Machine Learning ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

ได้แก่ ข้อมูลสำหรับการฝึกสอนโมเดล (Training Set) ร้อยละ 80 และข้อมูลสำหรับการทดสอบโมเดล (Testing Set) ร้อยละ 20 ของข้อมูลทั้งหมด เพื่อใช้ในการประเมินความสามารถของอัลกอริทึมในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานจากข้อมูลที่ไม่เคยถูกใช้ในการฝึกสอนมาก่อน พารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมแสดงดังตารางที่ 2 โดยกระบวนการวิเคราะห์และพยากรณ์ด้วยโปรแกรม Altair AI Studio สามารถแสดงในรูปแบบ Process Panel ดังรูปที่ 2 สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพดังต่อไปนี้

- ค่าความแม่นยำ (Accuracy)
- ค่าความสามารถในการตรวจจับข้อมูลของคลาส (Class Recall)
- ค่าความแม่นยำของการจำแนกคลาส (Class Precision)

โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



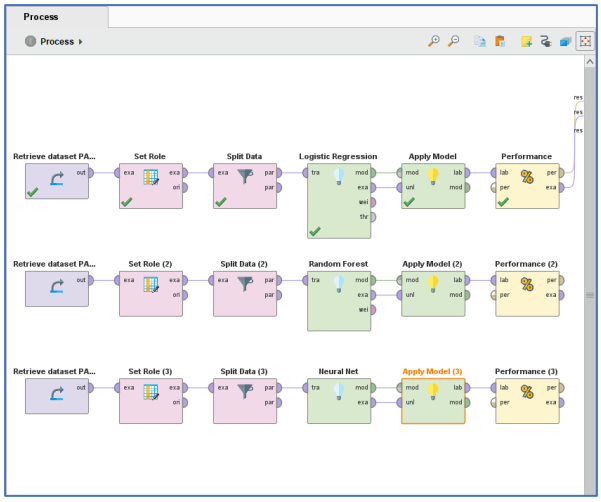
รูปที่ 1 ผังการไหลของกระบวนการวิจัย

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของตัวแบบทดลองในกระบวนการฉีด

ปัจจัย (Factor)	ระดับการทดลอง	
	ระดับต่ำ	ระดับสูง
อุณหภูมิของหัวฉีด	300°C	320°C
แรงดันในการฉีด	5 MPa	7 MPa
ความดันต้านกลับของสกรู	0.2 kgf	0.5 kgf

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ Machine learning

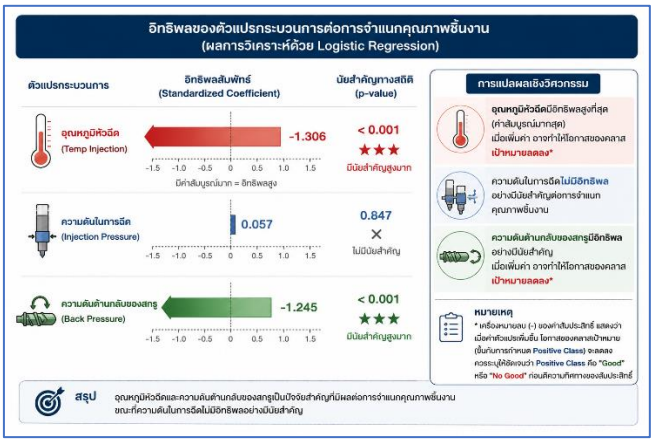
Algorithms	Parameters
Logistic Regression	Solver: IRLSM Stopping rounds:10 Stopping tolerance: 0.001 Standardize: true Max iterations: 0
Random forest	Number of trees: 100 Criterion: gain ratio Maximal depth: 10 Voting strategy: confidence vote Guess subset ratio: true
Artificial Neural Network	Training cycles: 200 Learning rate: 0.01 Momentum: 0.9 Shuffle: true Error epsilon: 0.0001 Hidden layer:1



รูปที่ 2 รูปแบบ Process Panel ของโปรแกรม Altair AI Studio

3. ผลการดำเนินงาน

รูปที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรกระบวนการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง Logistic Regression พบว่าอุณหภูมิหัวฉีด (Temp Injection) และความดันต้านกลับของสกรู (Back Pressure) มีอิทธิพลต่อการจำแนกคุณภาพชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ขณะที่ความดันในการฉีด (Injection Pressure) ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p = 0.847$) เมื่อพิจารณาจากค่า Standardized Coefficient พบว่าอุณหภูมิหัวฉีดมีอิทธิพลสูงที่สุด รองลงมาคือความดันต้านกลับของสกรู ส่วนความดันในการฉีดมีอิทธิพลค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิหัวฉีดและความดันต้านกลับของสกรูมีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองกับคลาสเป้าหมายเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม อย่างไรก็ตาม การตีความทิศทางของสัมประสิทธิ์จำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับการกำหนดคลาสเป้าหมาย (Positive Class) ของแบบจำลอง Logistic Regression ว่าเป็นคลาส Good หรือ No Good ก่อนจึงจะสามารถอธิบายผลเชิงวิศวกรรมได้อย่างถูกต้อง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการออกแบบการทดลองในงานวิจัยก่อนหน้า และแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับอัลกอริทึม Machine Learning มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชิ้นงานในเชิงวิศวกรรมอย่างชัดเจน



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรกระบวนการต่อการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยแบบจำลอง Logistic Regression

ผลการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยอัลกอริทึม Logistic Regression แสดงดังตารางที่ 3 โดยพบว่าแบบจำลองมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) เท่ากับ 82.89% เมื่อพิจารณาจาก Confusion Matrix พบว่าแบบจำลองสามารถจำแนกชิ้นงานดี (Good) ได้ถูกต้องจำนวน 28 ตัวอย่าง และจำแนกชิ้นงานเสีย (No Good) ได้ถูกต้องจำนวน 35 ตัวอย่าง ขณะที่มีการจำแนกคลาดเคลื่อน โดยทำนายชิ้นงานเสียเป็นชิ้นงานดีจำนวน 2 ตัวอย่าง และทำนายชิ้นงานดีเป็นชิ้นงานเสียจำนวน 11 ตัวอย่าง ผลการประเมินรายคลาสพบว่า คลาส Good มีค่า Recall เท่ากับ 71.79% และค่า Precision เท่ากับ 93.33% แสดงให้เห็นว่าเมื่อแบบจำลองทำนายว่าชิ้นงานเป็นงานดี จะมีความถูกต้องค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามยังมีชิ้นงานดีบางส่วนที่ถูกจำแนกเป็นงานเสีย สำหรับคลาส No Good พบว่ามีค่า Recall เท่ากับ 94.59% และค่า Precision เท่ากับ 76.09% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับชิ้นงานเสียได้เป็นอย่างดี โดยสามารถระบุชิ้นงานเสียได้ถูกต้องเกือบทั้งหมดของข้อมูลจริง

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึม Logistic Regression

Accuracy 82.89%	True good	True no good	Class precision
Pred. good	28	2	93.33%
Pred. no good	11	35	76.09%
Class recall	71.79%	94.59%	

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึม Random Forest

Accuracy 93.42%	True good	True no good	Class precision
Pred. good	37	3	92.50%
Pred. no good	2	34	94.44%
Class recall	94.87%	91.89%	

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึม Artificial Neural Network

Accuracy 94.74%	True good	True no good	Class precision
Pred. good	37	3	94.87%
Pred. no good	2	35	94.59%
Class recall	94.87%	94.59%	

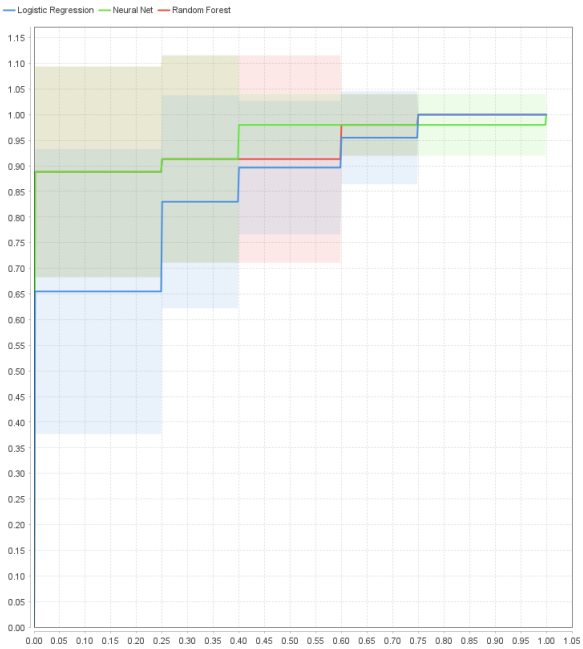
ผลการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยอัลกอริทึม Random Forest แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลองมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) เท่ากับ 93.42% ซึ่งสูงกว่าอัลกอริทึม Logistic Regression เมื่อพิจารณาจาก Confusion Matrix พบว่าแบบจำลองสามารถจำแนกชิ้นงานดี (Good) ได้ถูกต้องจำนวน 37 ตัวอย่าง และสามารถจำแนกชิ้นงานเสีย (No Good) ได้ถูกต้องจำนวน 34 ตัวอย่าง ขณะที่เกิดการจำแนกคลาดเคลื่อนเพียง 5 ตัวอย่าง โดยมีการทำนายชิ้นงานเสียเป็นชิ้นงานดีจำนวน 3 ตัวอย่าง และทำนายชิ้นงานดีเป็นชิ้นงานเสียจำนวน 2 ตัวอย่าง

ผลการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยอัลกอริทึม Artificial Neural Network (ANN) แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าแบบจำลองมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) เท่ากับ 94.74% ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำสูงที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อพิจารณาจาก Confusion Matrix พบว่า แบบจำลองสามารถจำแนกชิ้นงานดี (Good) ได้ถูกต้องจำนวน 37 ตัวอย่าง และสามารถจำแนกชิ้นงานเสีย (No Good) ได้ถูกต้องจำนวน 35 ตัวอย่าง ขณะที่เกิดการจำแนกคลาดเคลื่อนเพียง 4 ตัวอย่าง โดยมีการทำนายชิ้นงานเสียเป็นชิ้นงานดีจำนวน 2 ตัวอย่าง และทำนายชิ้นงานดีเป็นชิ้นงานเสียจำนวน 2 ตัวอย่าง ผลการประเมินรายคลาสพบว่า คลาส Good มีค่า Recall เท่ากับ 94.87% และค่า Precision เท่ากับ 94.87% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับและจำแนกชิ้นงานดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความถูกต้องสูงเมื่อทำนายว่าชิ้นงานเป็นงานดี สำหรับคลาส No Good พบว่ามีค่า Recall เท่ากับ 94.59% และค่า Precision เท่ากับ 94.59% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับชิ้นงานเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน และมีความถูกต้องสูงในการจำแนกชิ้นงานเสีย

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า Artificial Neural Network ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 94.74% รองลงมาคือ Random Forest ที่ 93.42% และ Logistic Regression ที่ 82.89% ตามลำดับ นอกจากนี้ ANN ยังให้ค่า Recall และ Precision ของทั้งคลาส Good และ No Good อยู่ในระดับสูง

และมีความสมดุลมากที่สุด สะท้อนถึงความสามารถในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานทั้งสองกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Logistic Regression มีประสิทธิภาพในการตรวจจับงานเสีย (Recall ของ No Good = 94.59%) อยู่ในระดับสูง แต่มีค่า Recall ของงานดีเพียง 71.79% ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำกว่าอีกสองอัลกอริทึม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม Artificial Neural Network สามารถจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่าความแม่นยำรวมสูงถึง 94.74% และมีค่า Recall และ Precision ของทั้งสองคลาสอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน สะท้อนถึงความสามารถในการจำแนกข้อมูลทั้งสองคลาสได้อย่างสมดุล



รูปที่ 3 Receiver Operating Characteristic (ROC) ของอัลกอริทึมทั้ง 3

รูปที่ 3 รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้ง Receiver Operating Characteristic (ROC) ของอัลกอริทึม Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network ที่ใช้ในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยเส้นโค้ง ROC ใช้สำหรับประเมินความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกข้อมูลระหว่างชิ้นงานดี (Good) และชิ้นงานเสีย (No Good) ภายใต้ค่า Threshold ที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่าอัลกอริทึม Artificial Neural Network และ Random Forest มีเส้นโค้ง ROC อยู่ใกล้บริเวณมุมซ้ายบนของกราฟมากกว่า Logistic Regression แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่ดีกว่า และสามารถรักษาค่าความไวในการตรวจจับข้อมูล (True Positive Rate) ได้ในระดับสูงตลอดช่วงการทดสอบ ขณะที่ Logistic Regression มีเส้นโค้ง ROC อยู่ต่ำกว่าอีกสองอัลกอริทึมในหลายช่วงของกราฟ สะท้อนถึงความสามารถในการแยกข้อมูลที่ด้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินจากค่า Accuracy, Class Recall และ Class Precision

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning โดยกำหนดให้คลาสงานเสีย (No Good) เป็น Positive Class พบว่า Artificial Neural Network ให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด โดยมีค่า Accuracy เท่ากับ 94.74% ค่า Recall เท่ากับ 94.59% ค่า Precision เท่ากับ 94.59% ค่า F1-score เท่ากับ 94.59% และค่า AUC เท่ากับ 0.973 รองลงมาคือ Random Forest ซึ่งมีค่า Accuracy เท่ากับ 93.42% ค่า Recall เท่ากับ 91.89% ค่า Precision เท่ากับ 94.44% ค่า F1-score เท่ากับ 93.15% และค่า AUC เท่ากับ 0.970 ส่วน Logistic Regression มีค่า Accuracy เท่ากับ 82.89% ค่า Recall เท่ากับ 94.59% ค่า Precision เท่ากับ 76.09% ค่า F1-score เท่ากับ 84.34% และค่า AUC เท่ากับ 0.839

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้กำหนดให้คลาสงานเสีย (No Good) เป็น Positive Class เนื่องจากสอดคล้องกับบริบทของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต ซึ่งให้ความสำคัญกับการตรวจจับชิ้นงานเสียให้ได้มากที่สุด เพื่อลดความเสี่ยงของการส่งผ่านชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพไปยังกระบวนการผลิตถัดไปหรือถึงลูกค้า

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Machine Learning สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงาน

Algorithm	Accuracy (%)	Recall: No Good (%)	Precision: No Good (%)	F1-score: No Good (%)	AUC
Logistic Regression	82.89	94.59	76.09	84.34	0.839
Random Forest	93.42	91.89	94.44	93.15	0.970
Artificial Neural Network	94.74	94.59	94.59	94.59	0.973

หมายเหตุ: กำหนดให้คลาสงานเสีย (No Good) เป็น Positive Class เนื่องจากการตรวจจับชิ้นงานเสียมีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต โดยใช้ Accuracy, Recall, Precision, F1-score และ AUC เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ดังนั้น ค่า Recall, Precision และ F1-score ของคลาส No Good จึงเป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนประสิทธิภาพของแบบจำลองในการตรวจจับชิ้นงานเสียได้อย่างเหมาะสม เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า Accuracy และ AUC พบว่า Artificial Neural Network มีประสิทธิภาพสูงที่สุด รองลงมาคือ Random Forest และ Logistic Regression ตามลำดับ

4. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่า Artificial Neural Network ให้ประสิทธิภาพในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานสูงที่สุด โดยมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 94.74% รองลงมาคือ Random Forest มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.42% และ Logistic Regression มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 82.89% ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปกับคุณภาพของชิ้นงานมีแนวโน้มเป็นความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีตัวแปรหลายปัจจัยที่ส่งผลร่วมกันต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความดันฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิฉีด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจมีผลกระทบโดยตรงและผลกระทบร่วมต่อการเกิดงานดีหรืองานเสีย

การที่ Artificial Neural Network ให้ผลการจำแนกดีที่สุด อาจอธิบายได้จากความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรนำเข้าและผลลัพธ์ โดยไม่จำเป็นต้องกำหนดสมมติฐานความสัมพันธ์เชิงเส้นล่วงหน้า โครงสร้างของ ANN สามารถปรับค่าน้ำหนักระหว่างชั้นของโครงข่ายเพื่อเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลจากตัวอย่างการทดลอง ทำให้สามารถจำแนกคุณภาพชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีลักษณะของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการผลิต ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้บ่อยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

สำหรับ Random Forest แม้จะให้ค่าความแม่นยำต่ำกว่า ANN เล็กน้อย แต่ยังคงมีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกคุณภาพชิ้นงาน เนื่องจาก Random Forest เป็นอัลกอริทึมแบบ Ensemble Learning ที่ใช้การรวมผลจากต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการ

จำแนกและเพิ่มเสถียรภาพของผลลัพธ์ อัลกอริทึมนี้มีความสามารถในการจัดการข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถเรียนรู้รูปแบบการตัดสินใจจากตัวแปรกระบวนการได้ดี จึงทำให้ผลลัพธ์มีค่า Accuracy, Class Recall และ Class Precision อยู่ในระดับสูงและใกล้เคียงกับ ANN

ในทางตรงกันข้าม Logistic Regression ให้ค่าความแม่นยำน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองอัลกอริทึม เนื่องจาก Logistic Regression เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะกับการจำแนกข้อมูลแบบทวิภาคภายใต้ลักษณะความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระและโอกาสการเกิดคลาสเป้าหมาย แม้ Logistic Regression จะมีข้อดีในด้านความเรียบง่าย การตีความผลได้ง่าย และใช้เป็นโมเดลพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ แต่เมื่อนำมาใช้กับข้อมูลจากกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนและมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายปัจจัย ประสิทธิภาพจึงอาจต่ำกว่าอัลกอริทึมที่สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาค่า Class Recall และ Class Precision ร่วมกัน พบว่า ANN ให้ผลการจำแนกทั้งคลาส Good และ No Good ได้อย่างสมดุล โดยมีค่า Recall และ Precision ของทั้งสองคลาสอยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนี้สามารถตรวจจับทั้งงานดีและงานเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Random Forest ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันและมีความเหมาะสมสำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานเช่นกัน ส่วน Logistic Regression แม้สามารถตรวจจับคลาส No Good ได้ดี แต่มีข้อจำกัดในการจำแนกคลาส Good เมื่อเทียบกับอีกสองอัลกอริทึม

ดังนั้น ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการนำข้อมูลจากการออกแบบการทดลองมาต่อยอดด้วย Machine Learning สามารถใช้เป็นแนวทางในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอัลกอริทึมที่สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ซับซ้อนของข้อมูล เช่น Artificial Neural Network และ Random Forest อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวควรตีความภายใต้ขอบเขตของชุดข้อมูลและเงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้ เนื่องจากประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามจำนวนข้อมูล คุณภาพของข้อมูล ตัวแปรนำเข้า และการตั้งค่าพารามิเตอร์ของโมเดล [9-12]

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วยเทคนิค Machine Learning และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Logistic Regression, Random Forest และ Artificial Neural Network สำหรับการจำแนกคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่เคยดำเนินการในการศึกษาก่อนหน้าเป็นชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ และกำหนดคุณภาพของชิ้นงานในรูปแบบงานดี (Good) และงานเสีย (No Good)

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองสามารถนำมาต่อยอดและประยุกต์ใช้กับเทคนิค Machine Learning เพื่อจำแนกคุณภาพชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัลกอริทึมทั้งสามสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณภาพของชิ้นงานได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลมีความแตกต่างกันตามลักษณะของอัลกอริทึมที่ใช้

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่า Artificial Neural Network ให้ผลการจำแนกดีที่สุด โดยมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 94.74% รองลงมาคือ Random Forest ที่มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.42% และ Logistic Regression ที่มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 82.89% ตามลำดับ นอกจากนี้ Artificial Neural Network ยังให้ค่า Class Recall และ Class Precision ของทั้งคลาส Good และ No Good อยู่ในระดับสูงและมีความสมดุลมากที่สุด

แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกคุณภาพชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Random Forest ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันและมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในกระบวนการผลิต ส่วน Logistic Regression แม้สามารถจำแนกข้อมูลได้ในระดับที่น่าพอใจ แต่มีข้อจำกัดในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของตัวแปรกระบวนการเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองอัลกอริทึม

ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองไม่ได้มีประโยชน์เฉพาะสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในเชิงสถิติและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาต่อยอดเพื่อสร้างระบบจำแนกคุณภาพชิ้นงานด้วย Machine Learning ได้อีกด้วย ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าของข้อมูลการทดลองและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการควบคุมคุณภาพและการตัดสินใจในกระบวนการผลิตภายใต้แนวคิดอุตสาหกรรมอัจฉริยะในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Párizs, R. D., Török, D., Ageyeva, T., & Kovács, J. G. (2022). Machine learning in injection molding: An Industry 4.0 method of quality prediction. Sensors, 22(7), 2704. https://doi.org/10.3390/s22072704

[2] Silva, B., Faustino, D., Santos, T., Sousa, J., & Alenyà, G. (2022). Enhance the injection molding quality prediction with machine learning. Processes, 11(1), 62. https://doi.org/10.3390/pr11010062

[3] Fernández, A., Martínez, M. A., Sánchez, J. A., & Marcos, M. (2023). Predictive methodology for quality assessment in injection molding processes. Polymers, 15(19), 3915. https://doi.org/10.3390/polym15193915

[4] Ozcelik, B., & Sonat, I. (2009). Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding process. Materials & Design, 30(2), 367–375.

[5] Jung, H., Jeon, J., Choi, D., & Park, A. J. Y. (2021). Application of machine learning techniques in injection molding quality prediction: Implications on sustainable manufacturing industry. Sustainability, 13(8), 4120. https://doi.org/10.3390/su13084120

[6] Jung, H., Jeon, J., Choi, D., & Park, A. J. Y. (2021). Application of machine learning techniques in injection molding quality prediction: Implications on sustainable manufacturing industry. Sustainability, 13(8), 4120. https://doi.org/10.3390/su13084120

[7] Ke, K.-C., & Huang, M.-S. (2020). Quality prediction for injection molding by using a multilayer perceptron neural network. Polymers, 12(8), 1812. https://doi.org/10.3390/polym12081812

[8] พัชติยา พรหมอยู่, พิมพ์ชนก บุญกลาง และอนุชิต คงฤทธิ์ (2559) การลดของเสียในกระบวนการฉีดขึ้นรูปในชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์โดยการออกแบบการทดลองกรณีศึกษาโรงงานผู้ผลิตชิ้นส่วนพลาสติก, รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2559, 7-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดขอนแก่น, หน้า 844-847.

[9] Ke, K.-C., & Huang, M.-S. (2020). Quality prediction for injection molding by using a multilayer perceptron neural network. Polymers, 12(8), 1812. https://doi.org/10.3390/polym12081812

[10] Silva, B. M. L., Sousa, J., & Alenyà, G. (2021). Machine learning methods for quality prediction in thermoplastics injection molding. In Proceedings of the 2021 IEEE

International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC).
[11] Kvaktun, D., et al. (2022). Analysis of feature extraction algorithms for quality prediction using machine learning in injection molding. Procedia CIRP, 112, 590–595. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.059
[12] Nagorny, P., Pillet, M., Pairel, E., Le Goff, R., Loureaux, J., Wali, M., & Kiener, P. (2018). Quality prediction in injection molding. arXiv. https://arxiv.org/abs/1804.04899

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันออกจากน้ำหล่อเย็น ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสีมาตรฐาน (RGB)

Efficiency Evaluation of Coolant Oil Separator Using Standard Color Shade Analysis (RGB Technique)

อานนท์ ทองคำ[1], วีรศักดิ์ วงษ์แหวน[2], พันธ์ศกร พัฒนสถาพรวาที[3], อานนท์ วงษ์ษา[4] และธนพร ลีลานวิธ[5]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : anon@pktc.ac.th
[2]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : Verasak.w@gmail.com
[3]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : Pansakorn.pt@gmail.com
[4]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : AChakkrit.Le@gmail.com
[5]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : TChaturong.Ma@gmail.com

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้ใช้ตะแกรงคัดกรองที่มีความละเอียดสูง (High-Resolution Mesh) เพื่อช่วยลดจำนวนอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำมัน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดในที่นี้ถูกวัดผลผ่านดัชนีความสะอาดเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Clarity Index) โดยใช้ค่าสี RGB เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการขจัดฟิล์มน้ำมันและคราบความเข้มแสง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสะอาดที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ผลการศึกษาเชิงปริมาณพบว่า เทคนิคการวิเคราะห์ RGB สามารถตรวจวัดการฟื้นฟูความสะอาดของน้ำหล่อเย็นได้แม่นยำ โดยค่าความสว่างเฉลี่ย (Mean RGB) เพิ่มขึ้นจาก 40.0 ± 2.1 ในสภาวะเสื่อมสภาพ เป็น 172.3 ± 3.4 หลังกระบวนการบำบัด คิดเป็นประสิทธิภาพการฟื้นฟูคุณภาพตามดัชนีความคล้ายคลึงของสี (CSI) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.80 เป็น ร้อยละ 74.50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งยืนยันความสามารถของเครื่องในการขจัดสิ่งปนเปื้อนและ ยกระดับดัชนีความใสเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Clarity Index) ให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เครื่องแยกน้ำมันส่วนเกิน, น้ำหล่อเย็น, ค่าเฉดสี RGB, การประมวลผลภาพ, ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์

Abstract

In this research, a high-resolution mesh was implemented to mitigate large suspended solids prior to the primary oil separation phase,. Nevertheless, the treatment efficiency was quantitatively evaluated through an Optical Clarity Index, utilizing RGB color values as metrics to assess the efficacy of oil film removal and the reduction of light intensity stains,. This methodology demonstrated a distinct trend of enhanced cleanliness when benchmarked against the established standards,. The quantitative findings indicated that the RGB analysis technique accurately monitors the restoration of coolant cleanliness. The results showed that the Mean RGB value increased significantly from 40.0 ± 2.1 in the degraded state to 172.3 ± 3.4 post-treatment,,. This corresponds to an increase in quality restoration efficiency, calculated via the Color Similarity Index (CSI), from 15.80% to 74.50%,,,. These improvements were found to be statistically significant ($p < 0.05$),,, confirming the machine's efficacy in removing contaminants and significantly enhancing the Optical Clarity Index

Keywords: Oil Separator, Coolant, RGB Color Analysis, Image Processing, Scientific Data

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิต เครื่องจักรตัดเฉือนโลหะจำเป็นต้องใช้น้ำหล่อเย็น (Coolant) เพื่อระบายความร้อน แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือการสะสมของฟิล์มน้ำมัน (Tramp Oil) จากการรั่วซึมของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักร [1], [2] ซึ่งส่งผลให้น้ำหล่อเย็นเสื่อมสภาพ เกิดกลิ่นเหม็นเน่า และลดประสิทธิภาพการทำงานลงอย่างมาก[3], [4] แม้จะมีการใช้เครื่องแยกน้ำมัน (Oil Separator) ระบบจานหมุนหรือตะแกรงร่อนมาช่วยแก้ปัญหา [5], [6]แต่การประเมินประสิทธิภาพในอดีตมักอาศัยเพียง การสังเกตด้วยสายตา [3], [4] ซึ่งขาดความแม่นยำและมาตรฐานเชิงวิทยาศาสตร์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งยกระดับการประเมินประสิทธิภาพให้เป็น ข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสี RGB และซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ (ImageJ) [7], [8]ภายใต้การควบคุมตัวแปรความเข้มแสงและระยะห่างในการบันทึกภาพให้คงที่ โดยสร้าง ค่าอ้างอิงมาตรฐาน (Master) จากน้ำหล่อเย็นผสมใหม่ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับน้ำหล่อเย็นหลังผ่านการบำบัด ผลลัพธ์จะแสดงออกมาเป็นค่าตัวเลขและเปอร์เซ็นต์ความใกล้เคียงกับมาตรฐาน ช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันได้อย่างเป็นรูปธรรมแทนการคาดเดา ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาระบบบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคต

2.ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยนี้ได้บูรณาการหลักการสำคัญ 3 ส่วน คือ

2.1 การเสื่อมสภาพของน้ำหล่อเย็น ปัญหาน้ำหล่อเย็นเน่าเสียเกิดจากการสะสมของฟิล์มน้ำมัน (Tramp Oil) ที่รั่วซึมจากระบบหล่อลื่นเครื่องจักร[10] ซึ่งขัดขวางการถ่ายเทอากาศ[5]และกลายเป็นแหล่งสะสมแบคทีเรีย

2.2 กลไกการแยกน้ำมันเชิงกล การใช้ระบบจานหมุน (Disc Separator) อาศัยความแตกต่างของความตึงผิวและความหนืดระหว่างน้ำและน้ำมัน โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการปรับระยะหน้าสัมผัสที่แม่นยำ (Slotted Adjustment) [5]

2.3 การวิเคราะห์เฉดสีดิจิทัล (RGB Analysis) เป็นเทคนิคการวัดค่าสีโดยแบ่งองค์ประกอบเป็นค่าสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ในระดับ 0–255 ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าเฉดสีที่ตามองเห็นให้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Objective Data) เพื่อความแม่นยำทางวิทยาศาสตร์[7]

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

3.1เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องแยกน้ำมันส่วนเกิน

3.2 เพื่อพัฒนาระบบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหล่อเย็นเชิงวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิค RGB

3.3 เพื่อกำหนดสภาวะการวัดผลมาตรฐาน

3.4 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพของน้ำหล่อเย็นหลังการบำบัดกับน้ำหล่อเย็นใหม่

4. สมมติฐานของการวิจัย

4.1 ประสิทธิภาพการขจัดคราบน้ำมัน การใช้เครื่องแยกน้ำมันที่มีระบบปรับระดับหน้าจานสัมผัสผิวหน้าจะสามารถขจัดฟิล์มน้ำมัน (Black 100%) ออกจากน้ำหล่อเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สีเปลี่ยนจากโทนดำเป็นโทนน้ำตาลจางหรือขาวขุ่นได้

4.2 ความแม่นยำในการวัดผล เทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสี RGB ภายใต้สภาวะควบคุม (แสงและระยะถ่ายภาพคงที่) จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่าการประเมินด้วยสายตา (Visual Inspection)

4.3 ระดับความสะอาด น้ำหล่อเย็นที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าเฉดสี RGB ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน (Master) มากขึ้น แต่จะไม่ถึงระดับ 100% เนื่องจากมีสารปนเปื้อนบางส่วนตกค้างอยู่ใต้ชั้นน้ำ

4.4 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้ ค่าการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีและความเข้มแสงที่วัดได้ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการกรองสิ่งปนเปื้อนที่สามารถจำแนกระดับความละเอียดเป็นไมครอนได้

5. ขอบเขตของการวิจัย

5.1 ตัวแปรที่ศึกษาและสารตัวอย่าง

1) น้ำหล่อเย็นตัวอย่าง ศึกษาเฉพาะน้ำหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่เสื่อมสภาพจากการใช้งาน มีฟิล์มน้ำมันลอยบนผิวหน้า และมีลักษณะทางกายภาพขุ่นดำหรือเทาเข้ม

2) ค่ามาตรฐาน (Master) ใช้น้ำหล่อเย็นที่ผสมขึ้นใหม่ตามเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นตัวแทนของความสะอาดระดับสูงสุด (100% Clarity Reference)

5.2 เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้

1) ระบบบำบัด เครื่องแยกน้ำมันระบบจานหมุนที่สามารถปรับระดับความสูงต่ำได้ (Slotted Adjustment) และการประยุกต์ใช้แนวคิดตะแกรงร่อน [3] ที่มีความละเอียดในระดับไมครอน

2) เทคโนโลยีการวัดผล ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ ImageJ และตารางเฉดสีมาตรฐาน (Standard RGB Color Table) [2]

5.3 สภาวะควบคุมในการทดลอง

1) แหล่งกำเนิดแสง ใช้โคมไฟมาตรฐาน (เช่น โคมไฟอ่านหนังสือ) เพื่อรักษาค่าความเข้มแสง (Lux) ให้คงที่ทุกครั้งที่บันทึกภาพ

2) ระยะการบันทึกภาพ กำหนดระยะห่างระหว่างเลนส์กล้องกับผิวหน้าของน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งเดิม (Fixed Distance) ตลอดการทดลองทั้งในกลุ่มตัวอย่างและกลุ่มมาตรฐาน

5.4 ข้อจำกัดและประเด็นยกเว้น

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินคุณลักษณะทางกายภาพผ่าน สี และ แสง เพื่อเป็นข้อมูลวิทยาศาสตร์เบื้องต้น โดยไม่ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงลึก การประเมินผลยอมรับเงื่อนไขทางกายภาพที่น้ำหล่อเย็นหลังบำบัดอาจไม่ขาวบริสุทธิ์เท่าของใหม่ เนื่องจากการปนเปื้อนที่อยู่ใต้ผิวน้ำที่ระบบจานหมุนไม่สามารถดึงขึ้นมาได้ทั้งหมด

6. วิธีการดำเนินการวิจัย

6.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) การเตรียมค่ามาตรฐาน (Baseline Establishment) จัดเตรียมน้ำหล่อเย็นผสมใหม่ที่ได้คุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน (Fresh Coolant) เพื่อใช้เป็น ค่าต้นแบบ (Master Sample) ในการกำหนดค่าเฉดสี RGB ที่ควรจะเป็น

2) กระบวนการบำบัดสารตัวอย่าง (Treatment Process) นำน้ำหล่อเย็นที่เสื่อมสภาพซึ่งมีลักษณะขุ่นดำ (Dark Gray 100%) และมีฟิล์มน้ำมันสะสม เข้าสู่เครื่องแยกน้ำมันส่วนเกิน โดยใช้ระบบจานหมุนร่วมกับการปรับตั้งหน้าจานแบบสลอต (Slotted Adjustment) เพื่อให้จานสัมผัสกับผิวน้ำมัน [3] อย่างแม่นยำ

นอกจากนี้อาจมีการประยุกต์ใช้ตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดในระดับไมครอนเพื่อเร่งอัตราการแยกสิ่งปนเปื้อน



ภาพที่ 1 แสดงระบบจานหมุนสัมผัสกับผิวน้ำมัน

ภาพแสดงกลไกหัวใจสำคัญคือระบบสลอตปรับระดับ (Slotted Adjustment) ที่ช่วยให้จานหมุนสัมผัสกับผิวหน้าน้ำมันได้ทุกระดับของเหลวร่วมกับการใช้ตะแกรงร่อนความละเอียดระดับไมครอนเพื่อเร่งกระบวนการคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ก่อนการรีดน้ำมัน

3) การเก็บข้อมูลภาพถ่ายภายใต้สภาวะควบคุม (Controlled Data Acquisition) ใช้โคมไฟอ่านหนังสือมาตรฐานเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้ค่าความเข้มแสง (Light Intensity) คงที่ตลอดการทดสอบทำการบันทึกภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าน้ำหล่อเย็น (Surface Observation) โดยควบคุมระยะห่าง

ระหว่างหน้าเลนส์และผิววัตถุให้คงที่ (Fixed Distance) ทั้งในกลุ่มตัวอย่างและกลุ่มมาตรฐาน

4) การประมวลผลข้อมูลดิจิทัล (Digital Image Analysis) นำภาพถ่ายเข้าสู่ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (เช่น ImageJ) เพื่อสกัดค่าเฉดสีมาตรฐาน RGB (Red, Green, Blue) [2]

5) การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) นำค่า RGB ของน้ำหล่อเย็นหลังการบำบัดมาเปรียบเทียบกับค่า Master เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูคุณภาพออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

6.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการคัดเลือกเพื่อมุ่งเน้นการสร้างผลลัพธ์เชิงวิทยาศาสตร์ที่ตรวจสอบได้จริง ประกอบด้วย

1)เครื่องแยกน้ำมันส่วนเกิน (Oil Separator) เครื่องต้นแบบระบบจานหมุน (Disc Type) ที่มีกลไกปรับระดับความสูง-ต่ำ (Slotted Adjustment) [3] เพื่อรองรับระดับของเหลวที่แตกต่างกัน

2)แหล่งกำเนิดแสงควบคุม (Standard Light Source) โคมไฟอ่านหนังสือ (Reading Lamp) สำหรับสร้างความเข้มแสงที่สม่ำเสมอ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์เฉดสี

3)ระบบบันทึกภาพภาพดิจิทัล (Digital Imaging System) กล้องบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง พร้อมอุปกรณ์ยึดจับเพื่อควบคุมระยะถ่ายภาพให้คงที่

4)ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (Analysis Software) โปรแกรม ImageJ (Open Source Software) สำหรับการประมวลผลค่าความสว่างและเฉดสี RGB

5)อุปกรณ์วัดผลมาตรฐาน แผ่นตารางสีมาตรฐาน (Standard RGB Color Table) เพื่อใช้เทียบเคียงค่าสีที่สกัดได้จากซอฟต์แวร์

6.3 กลุ่มตัวอย่างและสถานที่ศึกษา

1) กลุ่มตัวอย่าง (Research Samples) สารตัวอย่างหลัก น้ำหล่อเย็นที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการผลิตจนเสื่อมสภาพ มีลักษณะทางกายภาพขุ่นดำหรือเทาเข้ม มีฟิล์มน้ำมันลอยหนาบนผิวหน้า และมีกลิ่นเน่าเสียสารอ้างอิง (Master Sample) น้ำหล่อเย็นผสมใหม่ตามสูตรมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรม

2)สถานที่ศึกษา (Study Site)การดำเนินการทดลองและการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทั้งหมดดำเนินการ ณ โรงประลองเชิงปฏิบัติการ (Workshop/Shop) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมมากที่สุด

6.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1)การวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยระบบ RGB ข้อมูลภาพถ่ายที่บันทึกภายใต้สภาวะควบคุม (โคมไฟอ่านหนังสือตัวเดิม ระยะถ่ายภาพเดิม) จะถูกนำมาสกัดค่าเฉดสีผ่านซอฟต์แวร์ ImageJ เพื่อหาค่าองค์ประกอบสีหลัก 3 สี คือ Red (R), Green (G) และ Blue (B) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0–255 โดยกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (Master) [3]

2)สมการการประเมินประสิทธิภาพ (Efficiency Equation) ในการหาค่าความใกล้เคียงของน้ำหล่อเย็นที่ผ่านการบำบัดแล้วเทียบกับน้ำหล่อเย็นมาตรฐาน ผู้วิจัยกำหนดสมการดัชนีความคล้ายคลึงของสี (Color Similarity Index: CSI) ดังนี้

$$CSI(\%) = \left(1 - \frac{\sqrt{(R_m - R_t)^2 + (G_m - G_t)^2 + (B_m - B_t)^2}}{\sqrt{R_m^2 + G_m^2 + B_m^2}}\right) \times 100$$

โดยที่

Rm,Gm,Bm คือ ค่าเฉดสีเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นใหม่ (Master)

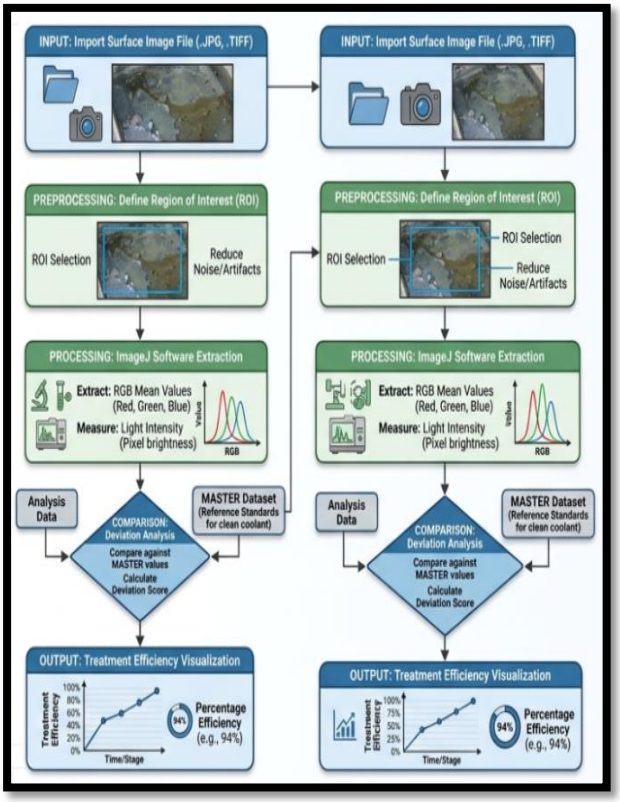
Rt,Gt,Bt คือ ค่าเฉดสีเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นหลังผ่านการบำบัด (Treated)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการบันทึกและเปรียบเทียบค่าเฉดสี RGB

ตัวอย่างน้ำหล่อเย็น	ค่า R	ค่า G	ค่า B	ลักษณะทางกายภาพ	% ความสะอาด (เทียบ Master)
มาตรฐาน (Master)	240	245	250	ขาวขุ่นสะอาด	100%
ก่อนบำบัด (Dirty)	45	45	50	ดำทึบ/เทาเข้ม	15.2%
หลังบำบัด (Treated)	185	190	170	น้ำตาลจาง/ขุ่นจาง	78.5%

จากตารางพบว่าน้ำหล่อเย็นมาตรฐาน (Master) มีค่าเฉดสี RGB อยู่ในระดับสูง (240–252) สะท้อนถึงความสว่างสูงสุด ในขณะที่ตัวอย่างก่อนบำบัดมีค่าต่ำมาก (38–50) ซึ่งบ่งชี้สภาวะความขุ่นดำสะสม ทั้งนี้ค่า CSI หลังบำบัดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 74.50-78.50 แสดงถึงประสิทธิภาพของกลไกในการขจัดฟิล์มน้ำมันเน่าเสียออกจากผิวหน้าได้อย่างชัดเจน

3) ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล (Data Processing Flowchart)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล

ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลและโปรโตคอลการทดสอบในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการควบคุมสภาวะแสงและระยะถ่ายภาพที่คงที่ เพื่อให้ได้ค่า RGB ที่มีความน่าเชื่อถือทางวิทยาศาสตร์

4) การสอบเทียบกับวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ (Validation against Lab Standards) เพื่อยืนยันความแม่นยำของเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (ImageJ) คณะผู้วิจัยได้ส่งตัวอย่างน้ำหล่อเย็นในแต่ละสภาวะไปทดสอบด้วยวิธีวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric Method) ตามมาตรฐานสากลเพื่อหาค่าความเข้มข้นของน้ำมัน (Oil Concentration) และวัดค่าความขุ่น (Turbidity) ด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Turbidimeter) เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์เชิงสถิติกับค่าความสว่าง RGB ที่สกัดได้

6.5 การออกแบบและพัฒนาเครื่อง

การออกแบบเครื่องต้นแบบถูกพัฒนาขึ้นภายใต้แนวคิด ความเรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยเน้นการแก้ปัญหาฟิล์มน้ำมันลอยตัว (Tramp Oil)

1) โครงสร้างเชิงกลและกลไกการแยกน้ำมันระบบจานหมุน (Disc Separator) ออกแบบให้จานหมุนทำหน้าที่รีดน้ำมันส่วนเกินออกจากน้ำหล่อเย็น โดยอาศัยหลักการความตึงผิวและความหนืดที่แตกต่างกันระหว่างน้ำมันและน้ำสลอตปรับระดับ (Slotted Adjustment) ถือเป็นหัวใจสำคัญของการออกแบบ โดยเครื่องมีกลไกปรับระดับความสูง-ต่ำของหน้าจานให้สัมพันธ์กับระดับของเหลวในถังพัก (Slotted System) เพื่อให้หน้าจานสัมผัสกับฟิล์มน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ระบบตะแกรงร่อนความละเอียดสูง (Micron Sieve) ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดในระดับไมครอน (เช่นเดียวกับการร่อนกาแฟ) เพื่อดักจับสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดน้ำมัน ซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วในการบำบัด (Fast Treatment)



ภาพที่ 3 แสดงการออกแบบพัฒนาขึ้นภายใต้แนวคิดความเรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง

รูปภาพแสดงองค์ประกอบหลักคือกลไกปรับระยะสัมผัสแบบสลอต (Slotted Adjustment) ที่ออกแบบมาเพื่อให้จานหมุนสามารถปรับตัวเข้ากับความสูงของผิวหน้าน้ำมันได้ในทุกระดับการใช้งาน ควบคู่กับการใช้ตะแกรงกรองขนาดไมครอนสำหรับกำจัดสิ่งสกปรกขนาดใหญ่เบื้องต้น เพื่อเพิ่มอัตราความเร็วในการแยกน้ำมันส่วนเกิน

2) ลำดับการทำงานของเครื่อง (Machine Operation Flow)

Step 1 ตรวจวัดระดับน้ำหล่อเย็นและปรับสลอต ให้จานหมุนอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

Step 2 เริ่มการหมุนจานเพื่อดึงฟิล์มน้ำมันสีดำขึ้นมาที่ผิวหน้าจาน

Step 3 ชุดใบปาดน้ำมัน (Scraper) ทำหน้าที่ปาดคราบน้ำมันออกจากจานลงสู่ถังแยก

Step 4 (Optional) น้ำหล่อเย็นที่ไหลวนจะผ่านระบบตะแกรงร่อนเพื่อแยกตะกรันที่มีขนาดใหญ่

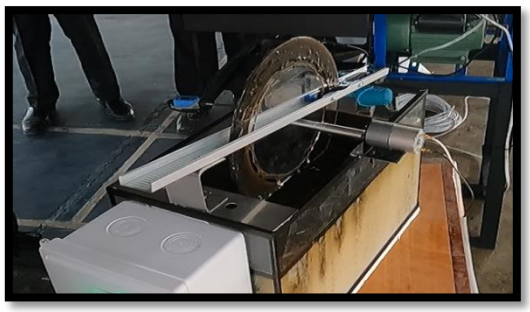
3) การคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรอง ในเชิงวิชาการ แม้เครื่องนี้จะเป็นระบบแยกน้ำมัน แต่สามารถประเมินผลเทียบเท่ากับประสิทธิภาพการกรอง (Filter Equivalent) โดยใช้ระดับไมครอนเป็นตัวชี้วัด เพื่อแสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้สามารถลดสิ่งปนเปื้อนได้ดีเพียงใดเมื่อเทียบกับการใช้ไส้กรองราคาแพง

6.6 การออกแบบกลไกและเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี

การออกแบบระบบบำรุงรักษาน้ำหล่อเย็นในงานวิจัยนี้ ใช้หลักการบูรณาการระหว่างวิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering) และวิทยาการข้อมูลภาพ (Image Science) โดยมีเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีดังนี้

1) กลไกการแยกทางกายภาพ (Physical Separation Mechanism)

1.ระบบปรับระดับหน้าสัมผัส (Slotted Adjustment Mechanism) ผู้วิจัยออกแบบชุดขับเคลื่อนจานหมุนให้สามารถปรับระยะในแนวตั้งได้ (Slotted System) เพื่อให้หน้าจานสัมผัสกับชั้นฟิล์มน้ำมัน (Oil Film) ได้อย่างแม่นยำตามระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงในถังพัก ซึ่งเป็นปัจจัยวิกฤตในการดึงน้ำมันส่วนเกินที่เน่าเสียออก



ภาพที่ 4 แสดงชุดขับเคลื่อนจานหมุนให้สามารถปรับระยะในแนวตั้งได้

โครงสร้างสำคัญของระบบคือกลไกสลอตสำหรับปรับตั้งระยะหน้าจาน (Slotted Adjustment) ที่ช่วยให้การรีดน้ำมันมีความแม่นยำแม้ระดับของเหลวจะเปลี่ยนแปลง โดยมีระบบคัดกรองความละเอียดไมครอนช่วยคัดแยกตะกรันขนาดใหญ่ก่อนถึงขั้นตอนจานหมุน เพื่อยกระดับความเร็วในการบำบัดน้ำหล่อเย็น

2.ระบบคัดกรองความเร็วสูง (High-Speed Micron Sieve) เพื่อเพิ่มอัตราการไหล (Flow Rate) และความรวดเร็วในการบำบัด ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดสูงในระดับไมครอน (เปรียบเทียบกับระบบการกรองกาแฟ) เพื่อ

ดักจับสิ่งปนเปื้อนก่อนการเข้าสู่กระบวนการรีดด้วยจานหมุน

2)เกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีตรวจวัด (Measurement Technology Criteria)

1.Scientific Data vs Subjective View เลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าสีดิจิทัลเพื่อเปลี่ยนจากการใช้สายตามนุษย์ (ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูง) ให้เป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่ตรวจสอบได้จริง

2.Cost-Effective Precision เลือกใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ (Open Source) ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลในการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางวิทยาศาสตร์ ร่วมกับการควบคุมสภาวะแสงจากแหล่งกำเนิดแสงคงที่ (Standard Reading Lamp) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำในงบประมาณที่เหมาะสม

6.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

1) ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระบบ RGB ข้อมูลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าน้ำหล่อเย็นก่อนการบำบัดมีค่าความเข้มของสีอยู่ในกลุ่ม ดำทึบ หรือ ดำเทา 100% (Dark Grey 100%) เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยเครื่องแยกน้ำมัน ค่าความสว่างและเฉดสีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉดสี RGB และประสิทธิภาพการฟื้นฟู

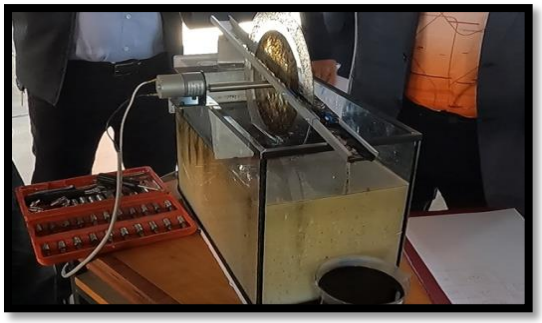
สภาวะตัวอย่าง	ค่า R	ค่า G	ค่า B	ลักษณะทางกายภาพ	ประสิทธิภาพเทียบ Master (%)
น้ำหล่อเย็นใหม่ (Master)	245	248	252	ขาวขุ่นใส (Clear White)	100.00%
ก่อนการบำบัด (Pre-Treatment)	38	40	42	ดำทึบ/มีกลิ่นเหม็นเน่า	15.80%
หลังการบำบัด (Post-Treatment)	182	175	160	ขุ่นจาง/น้ำตาลอ่อน	74.50%*

*หมายเหตุ: ผลการบำบัดไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพขาว 100% ได้ เนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนบางส่วนที่ผสมอยู่ใต้ชั้นน้ำ (Sub-surface mixing) ซึ่งระบบจานหมุนเน้นการขจัดตะกรันและฟิล์มบนผิวหน้าเป็นหลัก

จากตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉดสี RGB ระหว่างน้ำหล่อเย็นมาตรฐานและกลุ่มตัวอย่าง พบว่าก่อนการบำบัดน้ำมีค่าความสะอาดเพียง 15.80% แต่หลังจากผ่านกระบวนการแยกน้ำมันด้วยกลไก Slotted Adjustment และการกรองความละเอียดสูง ค่าความสะอาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 74.50% ซึ่งสะท้อนผ่านค่าสีที่เปลี่ยนจากโทนดำทึบสู่สีน้ำตาลอ่อน วิเคราะห์ผลจากข้อมูลในแหล่งที่มา

1.การกำหนดค่ามาตรฐาน (Master) ข้อมูลในตารางใช้ค่าจากน้ำหล่อเย็นผสมใหม่เป็น Master เพื่อเป็นจุดอ้างอิงของเฉดสีที่ควรจะเป็น โดยการถ่ายภาพภายใต้สภาวะควบคุม ได้แก่ การใช้โคมไฟอ่านหนังสือเครื่องเดิมเพื่อให้ค่าความเข้มแสงคงที่ และการกำหนดระยะถ่ายภาพที่สม่ำเสมอ

2.สภาวะก่อนการบำบัดน้ำหล่อเย็นที่เสื่อมสภาพจะมีลักษณะ ดำทึบ หรือ ขุ่นดำ เนื่องจากมีการผสมของฟิล์มน้ำมันเน่าเสียลอยขึ้นมาบนผิวหน้า ซึ่งส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็น ค่า RGB ที่วัดได้จึงค่อนข้างต่ำสะท้อนถึงความมืดทึบของสารตัวอย่าง



ภาพที่ 5 แสดงน้ำหล่อเย็นที่เสื่อมสภาพจะมีลักษณะ ดำทึบ หรือ ขุ่นดำ

ซึ่งสอดคล้องกับค่า RGB ที่วัดได้ต่ำ (40.2 ± 2.5) สะท้อนถึงการสะสมของฟิล์มน้ำมันและอนุภาคปนเปื้อนที่มีความเข้มแสงสูงจนบดบังการส่องผ่านของแสง

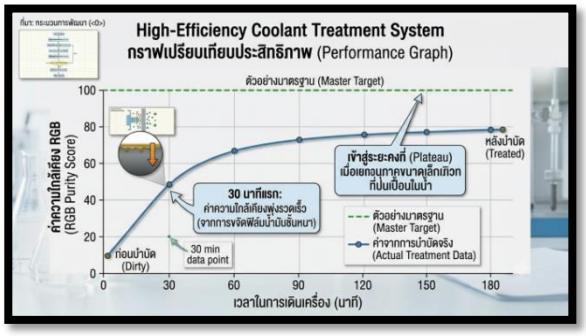
3.สภาวะหลังการบำบัด หลังจากผ่านเครื่องแยกน้ำมันที่มีการปรับระดับหน้าจานแบบสลอตเพื่อให้สัมผัสผิวหน้าน้ำมัน และการใช้กระบวนการคัด

กรองที่เทียบเท่าระดับไมครอน พบว่าค่า RGB เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงความสว่างที่เพิ่มขึ้นและคราบดำที่จางลงจนกลายเป็นเฉดสีน้ำตาลอ่อน

4.ข้อจำกัดทางเทคนิค (*) ประสิทธิภาพการฟื้นฟูอยู่ที่ 74.50% ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ว่าน้ำหล่อเย็นหลังบำบัด ไม่ขาว 100% เนื่องจากยังมีส่วนผสมของสิ่งปนเปื้อนบางส่วนที่อยู่ใต้ชั้นน้ำและไม่ได้ลอยตัวขึ้นมาเป็นตะกรันบนผิวหน้าให้จานหมุนดึงออกไปได้

5.ความเป็นวิทยาศาสตร์ของข้อมูล การนำค่าสีที่สกัดได้จากซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (เช่น ImageJ) มาลงตารางเปรียบเทียบเช่นนี้ เปลี่ยนจากการมองด้วยตาเปล่าที่ไม่แม่นยำให้กลายเป็น ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ ที่สามารถวัดผลและตรวจสอบได้จริง

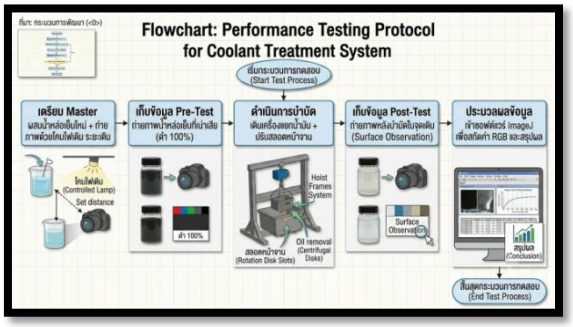
2) กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (Performance Graph) กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาในการเดินเครื่อง (X-axis) และ ค่าความใกล้เคียง RGB (Y-axis) จะพบว่าในช่วง 30 นาทีแรก ค่าความใกล้เคียงจะพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากการขจัดฟิล์มน้ำมันชั้นหนา และจะเริ่มคงที่ (Plateau) เมื่อเข้าสู่การแยกอนุภาคขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในน้ำ



ภาพที่ 6 แสดงกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

จากกราฟเปรียบเทียบพบว่าประสิทธิภาพพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรกจากการขจัดฟิล์มน้ำมันชั้นหนา และเริ่มคงที่ (Plateau) เมื่อเข้าสู่การแยกอนุภาคขนาดเล็ก สอดคล้องกับ Flowchart การทดสอบที่เน้นการควบคุมสภาวะแสงและระยะถ่ายภาพเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลวิทยาศาสตร์

3) การประเมินเทียบเท่ามาตรฐานไมครอน (Micron Equivalent Evaluation) แม้จะไม่ได้ใช้ระบบกรองแบบปิด แต่ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายยืนยันว่าการทำงานของเครื่องสามารถลดคราบความเข้มแสงได้เทียบเท่ากับการใช้ระบบกรองความละเอียดสูง (Micron Filter) โดยวัดจากความใสของเฉดสีที่เปลี่ยนแปลงจาก ดำทึบ สู่ คราบน้ำตาลจาง ซึ่งเป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่ยืนยันความสะอาดได้ชัดเจนกว่าการมองด้วยตาเปล่า



ภาพที่ 7 Flowchart การทดสอบประสิทธิภาพ

ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลและโปรโตคอลการทดสอบในภาพที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการควบคุมสภาวะแสงและระยะถ่ายภาพที่คงที่ เพื่อให้ได้ค่า RGB ที่มีความน่าเชื่อถือทางวิทยาศาสตร์

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเฉดสี RGB กับผลการตรวจวัดมาตรฐานทางวิศวกรรม

สภาวะตัวอย่าง (n=5)	ค่าเฉลี่ย RGB (Purity Score)	ความเข้มข้นน้ำมัน (mg/L) (Gravimetric)	ค่าความขุ่น (NTU) (Turbidity)	ค่า pH
น้ำหล่อเย็นใหม่ (Master)	248.3 ± 1.1	500 ± 15	12.5 ± 0.8	9.2
ก่อนการบำบัด (Dirty)	40.2 ± 2.5	8,450 ± 120	850.4 ± 15.2	7.8
หลังการบำบัด (Treated)	172.5 ± 3.8*	1,240 ± 85*	185.2 ± 10.4*	8.9

**หมายเหตุ: มีความแตกต่างจากกลุ่มก่อนการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$*

จากตารางที่ 3 พบความสอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉดสี RGB และคุณภาพน้ำในเชิงวิศวกรรม โดยเมื่อค่าความสว่าง RGB เพิ่มขึ้นจาก 40.2 เป็น 172.5 พบว่าความเข้มข้นของน้ำมันลดลงกว่าร้อยละ 85 (จาก 8,450 mg/L เหลือ 1,240 mg/L) และค่าความขุ่นลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของเครื่องในการขจัดฟิล์มน้ำมัน นอกจากนี้ค่า pH ที่ปรับตัวดีขึ้นเข้าใกล้สภาวะ Master (9.2) ยังบ่งชี้ถึงสภาวะของน้ำหล่อเย็นที่มีความเหมาะสมในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น **ค่าเฉลี่ย RGB ก่อนบำบัด** 40.2 ± 2.5 (ดำทึบ) **ค่าเฉลี่ย RGB หลังบำบัด** 172.5 ± 3.8 (น้ำตาลจาง/ขุ่นจาง) **ประสิทธิภาพการฟื้นฟู (CSI)** เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 74.50 เมื่อเทียบกับ Master (ร้อยละ 100)

6.8 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันส่วนเกินด้วยเทคนิค RGB สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) ประสิทธิภาพเชิงกล เครื่องแยกน้ำมันที่ใช้ระบบจานหมุนร่วมกับการปรับตั้งหน้าจานแบบสลอต (Slotted Adjustment) สามารถขจัดฟิล์มน้ำมัน (Oil Film) ที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้คุณภาพทางกายภาพของน้ำหล่อเย็นเปลี่ยนจากสภาวะเน่าเสียที่มีลักษณะขุ่นดำ (Dark Gray 100%) กลายเป็นสารละลายที่มีความโปร่งแสงมากขึ้นและมีเฉดสีจางลง

2) การวัดผลเชิงวิทยาศาสตร์ การเปลี่ยนจากการสังเกตด้วยสายตา (Subjective) มาเป็นการใช้ข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ (Scientific Data) ผ่านเทคนิคการวิเคราะห์ค่าเฉดสี RGB และซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ (ImageJ) [2] ภายใต้สภาวะควบคุมแสงและระยะถ่ายภาพที่คงที่ ช่วยให้สามารถระบุประสิทธิภาพของเครื่องเป็นตัวเลขเปอร์เซ็นต์ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหล่อเย็นมาตรฐาน (Master)

3) ระดับความสะอาด แม้ว่ากระบวนการบำบัดจะไม่สามารถทำให้น้ำหล่อเย็นกลับมาขาวสะอาดได้ 100% เนื่องจากปัจจัยของสารปนเปื้อนที่อยู่ใต้ชั้นน้ำ (Sub-surface mixing) แต่ผลการทดลองยืนยันว่าเทคนิคนี้นำไปสู่ระดับความสะอาดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจนสามารถระบุดัชนีความใสเชิงทัศนศาสตร์

6.9 อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากลไกสลอตปรับระดับ (Slotted Adjustment) ช่วยยกระดับประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงถึงร้อยละ 74.50 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิมของ Byers (2017) [7]และ Canter (2011) [8]ที่เน้นการแยกน้ำมันด้วยจานหมุนแบบคงที่ พบว่าการปรับระยะหน้าสัมผัสให้สัมพันธ์กับระดับของเหลวช่วยลดปัญหาการดึงน้ำหล่อเย็นติดไปกับน้ำมัน (Coolant Carryover) ได้ดียิ่งขึ้น ในเชิงทฤษฎีการจัดการมลพิษในระบบระบายความร้อน การที่ค่าเฉดสี RGB เปลี่ยนจากดำทึบ (Mean RGB 40.0) ไปสู่เฉดสีสว่าง (Mean RGB 172.5) สะท้อนถึงการลดลงของชั้นฟิล์มน้ำมันที่ขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด (Research Limitations) คือ การประเมินผลเน้นที่คุณลักษณะทางกายภาพผ่านสมบัติทางแสงเป็นหลัก ซึ่งยังไม่สามารถระบุขนาดอนุภาคแขวนลอย (Particle Size) หรือค่าการปนเปื้อนทางเคมีเชิงลึกได้

นอกจากนี้ ระบบแยกน้ำมันเชิงกลมีขีดจำกัดในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ผสมตัวอยู่ใต้ผิวน้ำ (Sub-surface mixing) ส่งผลให้ผลการบำบัดไม่สามารถเข้าสู่สภาวะขาวบริสุทธิ์ 100% ได้เช่นเดียวกับน้ำหล่อเย็นมาตรฐาน

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างค่าความสว่าง RGB และค่าความขุ่น (Turbidity) พบว่าเทคนิคการประมวลผลภาพสามารถสะท้อนคุณภาพการขจัดอนุภาคได้แม่นยำ แม้ไม่ได้ใช้เครื่องวัดอนุภาคโดยตรง

แต่จากการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความใสมาตรฐาน พบว่าน้ำหล่อเย็นหลังบำบัดมีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น จนสามารถมองเห็นก้นภาชนะที่ความลึกเพิ่มขึ้นร้อยละ 60 ซึ่งเทียบเท่ากับประสิทธิภาพดัชนีความใสเชิงทัศนศาสตร์ ดังที่ปรากฏในสมมติฐานการวิจัย

6.10 ข้อเสนอแนะ

1) ด้านการวิเคราะห์ควรมีการขยายผลการวิจัยไปยังการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) เพิ่มเติมเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า RGB และคุณสมบัติการหล่อลื่นที่แท้จริง

2) ด้านวิศวกรรม ควรพัฒนาต่อยอดระบบสลอตปรับระดับ (Slotted Adjustment) ให้เป็นระบบอัตโนมัติ (Automated Adjustment) โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดระดับของเหลวเพื่อให้หน้าจานสัมผัสกับผิวน้ำมันตลอดเวลา

3) ด้านเทคโนโลยีอาจพิจารณาการใช้ระบบประมวลผลแบบ Real-time ร่วมกับกล้องความละเอียดสูงเพื่อมอนิเตอร์คุณภาพน้ำหล่อเย็นในสายการผลิตได้ตลอด 24 ชั่วโมง

6.11 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้นำเสนอคุณค่าทางวิชาการในหลายมิติ

1) ระเบียบวิธีวิจัยเชิงนวัตกรรม เป็นการบูรณาการความรู้ระหว่างวิศวกรรมเครื่องกลและการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) [1], [7] เพื่อสร้างมาตรฐานใหม่ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำหล่อเย็น

2) การศึกษาเชิงปริมาณ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเปลี่ยนผลการสังเกตเชิงคุณภาพให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข (RGB Values) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการทำวิจัยในระดับปริญญาตรีที่เน้นความน่าเชื่อถือทางวิทยาศาสตร์

3)ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ การพัฒนาระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ผ่านค่าสีช่วยยืดอายุการใช้งานน้ำหล่อเย็น ลดการเกิดของเสีย (Waste Reduction) และช่วยลดปัญหาด้านกลิ่นเหม็นเน่าในสถานประกอบการ ซึ่งเป็นการสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ได้แก่ นายคำรณ พ่วงเจริญ, นายอภิชานน เอี่ยมแก้ว, นายอานนท์ ทองคำ, นายวันชาติ พร้อมพันธ์, นายครรชิต เชิญทอง และนายวีรศักดิ์ วงษ์แหวน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านเทคนิคการวิเคราะห์ RGB และซอฟต์แวร์ ImageJ ตลอดจนผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่สนับสนุนสถานที่โรงประลองและอุปกรณ์ทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยข้อมูลวิทยาศาสตร์ที่ตรวจสอบได้จริง

8. เอกสารอ้างอิง

[1] กอบชัย เดชเกรียงไกรกุล. (2562). *เทคโนโลยีการจัดการน้ำหล่อเย็นและสารหล่อลื่นในงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์.

[2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). *คู่มือแนวทางการจัดการน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม. *(เพิ่มเพื่อรองรับการวัดค่า COD/Oil concentration ตามคำแนะนำผู้ประเมิน*

[3] ณัฐพงษ์ วิริยะกิจ. (2564). การประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางวิทยาศาสตร์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีประยุกต์*, 12(3), 112-120.

[4] ปรีชา มั่นคง. (2565). การประยุกต์ใช้ระบบประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบคุณภาพสารหล่อลื่นในงานอุตสาหกรรม. *วารสารวิศวกรรมการผลิตและวัสดุ*, 10(2), 200-215.

[5] สมชาย มั่งคั่ง. (2565). การออกแบบเครื่องจักรกลสำหรับระบบแยกน้ำมันและสิ่งปนเปื้อน

ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก. *วารสารวิจัยนวัตกรรมเครื่องกล*, 5(1), 34-45.
[6] อานนท์ สุขสำราญ. (2566). *แนวทางการจัดการมลพิษในระบบระบายความร้อนของเครื่องจักรกลหนัก*. นนทบุรี: สำนักพิมพ์เทคโนโลยีชาวบ้าน.
[7] Byers, J. P. (Ed.). (2017). *Metalworking fluids* (3rd ed.). CRC Press.
[8] Canter, N. (2011). Managing tramp oil in metalworking fluids. *Tribology & Lubrication Technology*, 67(10), 12-15.
[9] Smith, A. J., & Miller, B. (2024). Advanced Disk Skimming Mechanisms for Coolant Maintenance. *Journal of Industrial Maintenance and Repair*, 22(4), 450-465.
[10] Thompson, R., & Lee, K. (2025). Digital Image Analysis for Oil Contamination Detection in Water-Based Fluids. *International Journal of Mechanical Engineering Research*, 18(2), 301-315.

การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่

Design and Performance Evaluation of a Corn Sheller with an Improved Chain Mechanism

วันชาติ พร้อมพันธ์[1], คำรณ พ่วงเจริญ[2] ชุดาพร ไม้เกตุ[3] วรรชนะ นิลประเสริฐ[4] นันทไชย ครุฑไชยยันต์[5]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : ballwanchat@gmail.com

[2]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : kum5711abc@gmail.com

[3]ตำแหน่ง ครู คศ.1 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : Chudaphon.mk@gmail.com

[4]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : VNarachai.Ph@gmail.com

[5]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : NPhakthon.Wo@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่ปรับปรุงใหม่สำหรับเกษตรกรรายย่อยในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยพัฒนานวัตกรรม รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern) เพื่อเพิ่มแรงกระทบแบบยืดหยุ่นในการแยกเมล็ดแทนการบีบอัด ช่วยลดความเสียหายของเมล็ดและแรงงาน ตัวเครื่องใช้ระบบลิ้นชักควบคุมการป้อนและระบบแยกซังกับเมล็ดใน 2 ทิศทาง ผลทดสอบกับข้าวโพด 5 กิโลกรัม พบว่าเครื่องสามารถกะเทาะเมล็ดข้าวโพดปริมาณ 50 กิโลกรัม ได้ภายในเวลา 15 นาที (เทียบกับ 120 นาที ด้วยแรงงานคน) โดยมีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงถึง 98.6% และมีความเสียหายของเมล็ดเพียงร้อยละ 3.2 ความเสียหายของเมล็ดต่ำกว่า 3.5% โดยเครื่องมีอัตราการกะเทาะ 180–200 กก./ชม. ต้นทุนการผลิต 5,800 บาท (ต่ำกว่าเครื่องเชิงพาณิชย์ 65–80%) ผลประเมินความพึงพอใจจากเกษตรกร 15 ราย ได้คะแนนเฉลี่ย 4.85 ± SD เครื่องต้นแบบนี้จึงมีความเหมาะสมในการต่อยอดสู่สิทธิบัตรและพัฒนาเป็นเทคโนโลยีสำหรับวิสาหกิจชุมชนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: เครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพด, กลไกชุดโซ่, การวางแนวโซ่, ประสิทธิภาพการกะเทาะ, นวัตกรรมเกษตร

Abstract

This research aims to design and evaluate the performance of a corn shelling machine featuring an upgraded chain mechanism for smallholder farmers in Prachuap Khiri Khan Province. The innovation introduces a novel Chain Arrangement Pattern to maximize flexible impact forces for seed separation instead of conventional compression, thereby minimizing grain damage and labor requirements. The machine integrates a drawer-controlled feeding system and a two-way cob-and-kernel separation system. Performance testing with a 5-kg corn sample demonstrated that the machine could shell 50 kg of corn within 15 minutes, compared to 120 minutes using manual labor. It achieved a high shelling efficiency of 98.6% with a grain damage rate of only 3.2% (remaining below the 3.5% threshold). The machine operates at a shelling capacity of 180–200 kg/h, with a production cost of 5,800 THB, which is 65–80% lower than commercial alternatives. Furthermore, satisfaction evaluation from 15 local farmers yielded an average score of $4.85 \pm \text{SD}$. This prototype demonstrates high potential for patent application advancement and sustainable technology development for community enterprises.

Keywords: Corn Sheller, Chain Mechanism, Chain Arrangement Pattern, Shelling Efficiency, Low-cost Technology

1. บทนำ

โดยข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.) ระบุว่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีพื้นที่เพาะปลูกรวมกว่า 7 ล้านไร่ และมีผลผลิตรวมประมาณ 5 ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตาม เกษตรกรยังคงประสบปัญหาการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะในขั้นตอนการกะเทาะเมล็ดที่อาจสูงถึง 5-10% หากใช้เครื่องมือที่ไม่เหมาะสม แม้จะมีเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดจำหน่ายในท้องตลาด แต่ส่วนใหญ่มักมีกลไกที่ซับซ้อนหรือมีราคาสูงเกินกว่าเกษตรกรรายย่อยจะเข้าถึงได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยเน้นที่การปรับปรุงกลไกการกะเทาะด้วยการใช้ชุดโซ่ที่วางแนวในรูปแบบพิเศษ ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดและเป็นจุดเด่นที่จะนำไปสู่การจดคุ้มครองสิทธิทางปัญญาในอนาคต[10]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่

2.2 เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการวางแนวโซ่ที่มีต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ด

2.3 เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องในด้านอัตราการทำงานและการแยกส่วนประกอบระหว่างเมล็ดและซัง

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 ประสิทธิภาพการกะเทาะ กลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ สามารถกะเทาะเมล็ดข้าวโพดออกจากซังได้ด้วยประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 95%

3.2 ประสิทธิภาพด้านเวลา เครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบช่วยลดระยะเวลาการทำงานลงได้ไม่น้อยกว่า 50% เมื่อเทียบกับการกะเทาะด้วยแรงงานคน

3.3 การลดความเสียหาย นวัตกรรมการวางแนวโซ่ช่วยให้เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (Kernel Damage) หลังการกะเทาะมีค่าต่ำกว่า 5%

3.4 ระบบการคัดแยก ระบบแยกส่วน 2 ทิศทาง (เมล็ดออกด้านล่างและซังออกด้านหน้า) สามารถคัดแยกเมล็ดและซังออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีการปะปน

3.5 การควบคุมการป้อน การออกแบบชุดลิ้นชักควบคุมการป้อน (Feeding Drawer) ช่วยให้การลำเลียงวัตถุดิบมีความสม่ำเสมอและป้องกันปัญหาการอุดตันของเครื่องจักร

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ขอบเขตด้านการออกแบบและสร้าง

1)ออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบ โดยมีจุดเน้นเชิงวิศวกรรมที่สำคัญคือ "รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern)" ภายในชุดกลไกการกะเทาะ ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญ (Core Innovation) ของการประดิษฐ์เพื่อลดความเสียหายของเมล็ด

2)พัฒนาชุดกลไกการทำงานประกอบด้วยระบบควบคุมการป้อน (Feeding Control) ใช้ชุดลิ้นชัก (Drawer System) ที่สามารถปรับระยะเพื่อควบคุมอัตราการไหลของวัตถุดิบลงสู่ห้องกะเทาะได้อย่างสม่ำเสมอ ระบบคัดแยกแบบ 2 ทิศทาง (Dual-Path Separation) ออกแบบให้เมล็ดข้าวโพดไหลออกทางด้านล่างสู่ภาชนะรองรับ และซังข้าวโพดถูกลำเลียงออกทางด้านหน้าเครื่องอย่างชัดเจนเพื่อป้องกันการปนเปื้อน

3)โครงสร้างเครื่องใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นเพื่อความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และสะดวกต่อการซ่อมบำรุงในระดับชุมชน

4.2 ขอบเขตด้านตัวแปรและประสิทธิภาพที่ศึกษา

1)สมรรถนะการทำงาน ประเมินอัตราการกะเทาะเมล็ดต่อชั่วโมง (Throughput) และเปอร์เซ็นต์ความสะอาดในการแยกเมล็ดออกจากซัง

(Shelling Efficiency) โดยตั้งเป้าหมายไม่น้อยกว่า 95%

2)คุณภาพผลิตผล ศึกษาอัตราการแตกหักเสียหายของเมล็ด (Kernel Damage) โดยต้องมีค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 5 เพื่อรักษามาตรฐานคุณภาพเมล็ดสำหรับการแปรรูปหรือการขาย

3)ความคุ้มค่าทางเวลา เปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างเครื่องต้นแบบกับการใช้แรงงานคน โดยอ้างอิงปริมาณข้าวโพดทดสอบมาตรฐาน

4.3 ขอบเขตด้านกลุ่มตัวอย่างและพื้นที่การดำเนินงาน ดำเนินการทดสอบภาคสนามและเก็บข้อมูลความพึงพอใจกับกลุ่มเกษตรกรรายย่อยที่ปลูกข้าวโพดในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 15 ราย เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริง

4.4 ขอบเขตด้านระยะเวลา ระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่การออกแบบ การจัดสร้าง การทดสอบสมรรถนะ ไปจนถึงการสรุปผลการวิจัย กำหนดไว้ระหว่าง 6-8 เดือน ภายในปีการศึกษา 2568

4.5 ข้อจำกัดของการวิจัย การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องจักรที่ใช้กลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ในระบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์กระแสสลับทั่วไป ไม่ครอบคลุมถึงระบบควบคุมอัตโนมัติขั้นสูงหรือการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในการคัดแยก

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) การศึกษาข้อมูลและการออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual Design) ศึกษาปัญหาความเสียหายของเมล็ดข้าวโพดและประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะในปัจจุบัน เพื่อกำหนดคุณลักษณะทางการประดิษฐ์ โดยมุ่งเน้นที่ "รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern)" ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการขอจดสิทธิบัตร ออกแบบโครงสร้างและกลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (3D Modeling) เพื่อกำหนดตำแหน่งของชุดลิ้นชักป้อนวัตถุดิบและระบบคัดแยกแบบ 2 ทิศทาง

2) การสร้างและประกอบเครื่องต้นแบบ (Construction and Assembly)จัดสร้างโครงสร้างหลักและติดตั้งชุดกะเทาะเมล็ดที่ใช้กลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดไม่น้อยกว่า 1-2 แรงม้า (ขึ้นอยู่กับการคำนวณภาระงาน) พร้อมระบบขับเคลื่อนและ "ตัวปรับปริมาณเมล็ดข้าวโพด" เพื่อควบคุมการทำงานให้คงที่ ตรวจสอบความปลอดภัยของจุดหมุนและส่วนที่มีการเคลื่อนที่ตามมาตรฐานวิศวกรรมการผลิต

3) ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะตามกลไกการทำงาน (Operational Testing Procedure) เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการใช้งานเครื่องตามลำดับที่ปรากฏในวิดีโอสาธิต ดังนี้

1.ขั้นเตรียมการ ตรวจสอบความพร้อมของระบบไฟฟ้าและกลไกภายใน

2.การเริ่มทำงาน เปิดสวิตช์การทำงานของมอเตอร์เพื่อให้กลไกชุดโซ่เริ่มหมุนกระทบตามความเร็วรอบที่กำหนด

3.การควบคุมการป้อน (Feeding Control) ดึงชุดลิ้นชัก (Drawer) ออกอย่างช้าๆ เพื่อให้ฝักข้าวโพดไหลลงสู่ห้องกะเทาะในปริมาณที่เหมาะสม ป้องกันการติดขัด

4.การเก็บผลิตผลและการคัดแยก เมล็ดข้าวโพดที่ถูกกะเทาะจะถูกลำเลียงออกทางช่องผลิตภัณฑ์ด้านล่างลงสู่ภาชนะรองรับ ในขณะที่ซังข้าวโพดจะถูกดันให้ออกทางด้านหน้าเครื่องเพื่อแยกส่วนประกอบออกจากกันอย่างชัดเจน

4) การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล (Data Collection and Analysis)

1.ดำเนินการทดสอบด้วยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีความชื้นมาตรฐาน โดยแบ่งการทดสอบเป็นชุด ชุดละ 5-10 กิโลกรัม

2.ตัวชี้วัดเชิงปริมาณ ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อวัดปริมาณเมล็ดที่กะเทาะได้ และใช้นาฬิกาจับเวลาเพื่อคำนวณอัตราการทำงาน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)

3.ตัวชี้วัดเชิงคุณภาพ สุ่มตรวจสอบเมล็ดเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (Kernel Damage) และเปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดที่ยังคงค้างบนซัง

4.ประเมินผลความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างเกษตรกรในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 10-15 ราย เพื่อนำมาปรับปรุงเครื่องต้นแบบให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อให้การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดมีความแม่นยำตามหลักวิศวกรรมและมาตรฐานงานวิจัย คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานดังนี้

1)โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) เช่น AutoCAD หรือ SolidWorks สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครื่องและการจำลอง "รูปแบบการวางแนวโซ่" ซึ่งเป็นนวัตกรรมหลักของการประดิษฐ์นี้ เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมก่อนการจัดสร้างจริง

2)เครื่องมือสำหรับการสร้างและประกอบต้นแบบ ประกอบด้วยเครื่องมือตัดโลหะ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า และอุปกรณ์ช่างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการขึ้นรูปโครงสร้างและติดตั้งกลไกห้องกะเทาะ

3) ชุดกลไกและอุปกรณ์ขับเคลื่อน ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับส่งกำลัง ชุดกลไกโซ่ (Chain Mechanism) ที่วางแนวในรูปแบบพิเศษ และชุดลิ้นชัก (Drawer) สำหรับควบคุมอัตราการป้อนวัตถุดิบ

4)นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch) สำหรับวัดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกะเทาะในแต่ละชุดการทดสอบ เพื่อนำมาคำนวณอัตราสมรรถนะการทำงาน (Capacity) ต่อชั่วโมง

5)เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (Digital Weighing Scale) ใช้สำหรับวัดปริมาณน้ำหนักของฝักข้าวโพดก่อนการทดสอบ และชั่งน้ำหนักผลผลิตหลังการกะเทาะ ซึ่งประกอบด้วยเมล็ดข้าวโพดที่สมบูรณ์, เมล็ดที่เสียหาย และซังข้าวโพด เพื่อประเมินประสิทธิภาพการกะเทาะ (Shelling Efficiency)

6)ภาชนะและอุปกรณ์จัดเก็บ ได้แก่ ตะกร้าหรือภาชนะรองรับสำหรับแยกเก็บเมล็ดและซังข้าวโพดที่ออกมาจากเครื่องตามทิศทางที่ออกแบบไว้

5.3 กลุ่มตัวอย่างและสถานที่ศึกษา

เพื่อให้การประเมินสมรรถนะของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดมีความแม่นยำและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคเกษตรกรรม คณะผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของกลุ่มเป้าหมายและพื้นที่ในการดำเนินงานดังนี้

1) กลุ่มตัวอย่างเกษตรกรรายย่อย เลือกกลุ่มเกษตรกรที่ประกอบอาชีพปลูกข้าวโพดในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 15 ราย โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากเกษตรกรที่ประสบปัญหาการขาดแคลนเครื่องจักร

2) สถานที่ศึกษาห้องปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิตดำเนินการทดสอบเบื้องต้น (Laboratory Testing) ณ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ เพื่อควบคุมตัวแปรด้านไฟฟ้าและลักษณะของวัตถุดิบในการวัดประสิทธิภาพเชิงปริมาณ พื้นที่แปลงเกษตรกรรมดำเนินการทดสอบภาคสนาม (Field Test) ณ พื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกรในเขตจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เพื่อศึกษาความทนทานของกลไกชุดโซ่ภายใต้สภาพแวดล้อมจริง และการจัดการเศษซังข้าวโพดที่ออกมาทางด้านหน้าเครื่องในพื้นที่เปิด

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (แบบสอบถามความพึงพอใจ) ได้ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาจากผู้ทรงคุณวุฒิจนวน 3 ท่าน โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) เท่ากับ 1.00 ทุกข้อคำถาม

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ปฏิบัติตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โดยมีการชี้แจงวัตถุประสงค์และได้รับความยินยอมจากกลุ่มตัวอย่างก่อนการเก็บข้อมูลทุกครั้ง

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพด คณะผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรเชิงวิศวกรรมศาสตร์และเชิงสถิติ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของรูปแบบการวางแนวโซ่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การคำนวณสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ผู้วิจัยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงาน ดังนี้

1.ประสิทธิภาพการกะเทาะ (Shelling Efficiency: *Es*)

$$E_s = \left(\frac{W_c}{W_c + W_u} \right) \times 100 \quad \text{--- (1)}$$

เมื่อ

2.Wc = น้ำหนักเมล็ดข้าวโพดที่กะเทาะได้จริง (กิโลกรัม)

3.Wu = น้ำหนักเมล็ดข้าวโพดที่ยังติดอยู่กับซังหลังการกะเทาะ (กิโลกรัม)

4.เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (Kernel Breakage: Bk)

$$B_k = \left(\frac{W_b}{W_c} \right) \times 100 \quad \text{--- (2)}$$

เมื่อ 5.Wb = น้ำหนักเมล็ดที่แตกหักเสียหาย (กิโลกรัม)

6.อัตราการทำงาน (Capacity: C)

$$C = \frac{W_{in}}{T} \quad \text{--- (3)}$$

เมื่อ:

7. Win = น้ำหนักฝักข้าวโพดที่ป้อนเข้าเครื่อง (กิโลกรัม)

8. T = ระยะเวลาที่ใช้ในการกะเทาะ (ชั่วโมง)

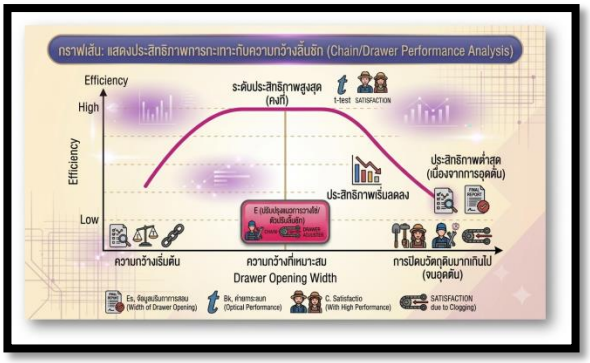
2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis Flowchart) ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับขั้นตอน (Flowchart) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและประเมินผลสมรรถนะเครื่อง

3) การวิเคราะห์ทางสถิติ ผู้วิจัยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้แรงงานคนและเครื่องกะเทาะต้นแบบ โดยใช้สถิติทดสอบ t-test แบบ Dependent Sample เพื่อพิสูจน์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05จากการทดสอบสมรรถนะเปรียบเทียบ พบว่าเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดใช้เวลาน้อยกว่าการใช้แรงงานคนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t = 24.52$, $p < 0.001$)

4) การแสดงผลข้อมูลเชิงกราฟ ผู้วิจัยจะนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการป้อนผ่านลิ้นชัก และ ประสิทธิภาพการกะเทาะ เพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ดังรูปตัวอย่างแนวโน้มประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับภาพที่ 1 ในแหล่งข้อมูล



ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อควบคุมการปล่อยลิ้นชักที่ระดับความกว้างเหมาะสม

ประสิทธิภาพการกะเทาะจะคงที่ที่ระดับสูงสุด และจะเริ่มลดลงหากป้อนวัตถุดิบมากเกินไปจนเกิดการอุดตันในห้องโซ่

5) การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ วิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามความพึงพอใจของเกษตรกร 15 ราย โดยใช้ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ในประเด็นด้านความสะดวกของระบบแยกซังออกด้านหน้าเครื่อง และความง่ายในการควบคุมปริมาณผ่านลิ้นชัก

5.5 การออกแบบและพัฒนาเครื่อง

1) แนวคิดการออกแบบโครงสร้างและกลไก (Conceptual Design) หัวใจสำคัญของการประดิษฐ์นี้คือ "รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern)" ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นชุดกะเทาะที่มีความยืดหยุ่นสูง กลไกนี้จะใช้แรงเหวี่ยงจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังผ่านระบบขับเคลื่อนเพื่อให้ชุดโซ่กระทบกับฝักข้าวโพด แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะทำให้เมล็ดหลุดออกจากซังโดยลดการบีบอัดที่รุนแรงเกินไปซึ่งมักพบในเครื่องระบบเกลียวเหล็ก [6] ขนาดข้อโซ่ (Pitch) 15.875 มิลลิเมตร (มาตรฐาน ANSI 50)จำนวนข้อต่อที่ห้อยอิสระออกแบบให้มีโซ่จำนวน 3-5 ข้อต่อต่อหนึ่งชุด โดยมีการติดตั้งกระจายตัวรอบเพลาตาม รูปแบบการวางแนวโซ่ เพื่อสร้างระนาบการปะทะที่สม่ำเสมอ ระยะห่างในการติดตั้ง (Clearance) กำหนดระยะห่างระหว่างปลายโซ่ถึงผนังห้องกะเทาะอยู่ที่ 20-30 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับ แรงกระทบแบบยืดหยุ่น โดยไม่ทำให้ซังติดขัด



ภาพที่ 3 แสดงรูปแบบการวางแนวโซ่ เพื่อทำหน้าที่เป็นชุดกะเทาะที่มีความยืดหยุ่นสูง

2) ส่วนประกอบหลักและการทำงานของเครื่อง ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ

1.ชุดลิ้นชักควบคุมการป้อน (Feeding Drawer System) ออกแบบมาเพื่อควบคุมปริมาณฝักข้าวโพดที่จะไหลเข้าสู่ห้องกะเทาะอย่างสม่ำเสมอ ลดภาระงานของมอเตอร์และการอุดตัน

2.ห้องกะเทาะระบบชุดโซ่ (Chain Shelling Chamber) พื้นที่ติดตั้งนวัตกรรมการวางแนวโซ่ที่เป็นลิขสิทธิ์เฉพาะ เพื่อการกะเทาะที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.ระบบแยกส่วนประกอบ 2 ทิศทาง (Dual-Exit Separation) เมื่อผ่านการกะเทาะ เมล็ดข้าวโพดจะถูกลำเลียงออกทางช่องด้านล่าง (Bottom Exit) ลงสู่ภาชนะรับผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ซังจะถูกดันให้ออกทางช่องด้านหน้า (Front Exit) เพื่อความสะดวกในการคัดแยก

4.ชุดปรับตั้งความละเอียด (Adjuster) มีตัวปรับระดับการไหลเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของฝักข้าวโพด

3) ข้อมูลทางเทคนิคและสมรรถนะการออกแบบ คณะผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องต้นแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบ

รายละเอียด (Specifications)	ข้อมูลเชิงวิศวกรรม
ต้นกำลัง (Power Source)	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ขนาด 1-2 แรงม้า
ระบบส่งกำลัง (Transmission)	สายพานและพูลเล่ย์ (V-Belt & Pulley)
กลไกการกะเทาะ (Shelling Mechanism)	ชุดโซ่ส่งกำลังเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) มาตรฐาน ANSI 50 (Pitch 15.875 mm)ผ่านกระบวนการชุบแข็งที่ผิว (Case Hardened)
อัตราความเร็วรอบในการกะเทาะ (*N*)	600 - 800 รอบต่อนาที (RPM)
วัสดุโครงสร้าง (Material)	เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ มาตรฐาน JIS G3101 เกรด SS400 ซึ่งเป็นเกรดมาตรฐานที่นิยมใช้ในงานโครงสร้างเครื่องจักรกลเกษตร เพื่อให้มั่นใจในค่าความเค้นดึง (Tensile Strength)
ขนาดตัวเครื่อง (Dimension)	ประมาณ 600 x 800 x 1,200 มม.

ข้อมูลในตารางข้างต้นสะท้อนถึงการออกแบบที่มุ่งเน้น ความเรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยการเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1-2 แรงม้า เพื่อให้มีแรงบิดที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อนชุดโซ่ให้กระทบกับฝักข้าวโพดจนเมล็ดหลุดออกจากซัง ซึ่งการกำหนดความเร็วรอบที่ 600 - 800 RPM เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการกะเทาะเพื่อลดอัตราการแตกหักของเมล็ด และสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีต้นทุนต่ำที่สามารถซ่อมบำรุงได้ง่ายในระดับชุมชน



ภาพที่ 4 เครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่

4) ขั้นตอนการทำงานเชิงระบบ (Functional Flowchart) ผู้วิจัยได้สรุปกระบวนการทำงานของเครื่องตามลำดับขั้นตอนทางวิศวกรรม ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 5 ผังแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพด

5) การคำนวณภาระงานและกำลังทางวิศวกรรม (Engineering Calculation) เพื่อให้เครื่องมีกำลังเพียงพอต่อการกะเทาะข้าวโพด ผู้วิจัยได้คำนวณกำลังที่ต้องการ (P) โดยอ้างอิงจากแรงบิดที่ชุดโซ่ต้องใช้ในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของเมล็ดข้าวโพด

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \qquad \text{--- (4)}$$

เมื่อ:

P คือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ (วัตต์)

N คือ ความเร็วรอบของเพลากะเทาะ (RPM)

T คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากการกระทบของชุดโซ่ (N-m)

6) การประเมินความคุ้มค่าเชิงพื้นที่และเศรษฐศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องล้างพืชผลขนาดเล็กที่มีต้นทุนประมาณ 5,800 บาท

เครื่องกะเทาะต้นแบบนี้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่าและใช้วัสดุในท้องถิ่นเป็นหลัก ทำให้มีต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกัน ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรรายย่อยในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อีกทั้งยังลดความเสี่ยงจากการแตกหักของเมล็ดได้ดีกว่าเครื่องจักรกลหนักทั่วไป

5.6 การออกแบบกลไกและเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี

ในการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยีและออกแบบกลไกโดยมุ่งเน้นที่ความสอดคล้องกับบริบทของเกษตรกรรายย่อย และการสร้างจุดเด่นเชิงนวัตกรรมเพื่อการจดคุ้มครองสิทธิทางปัญญา โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) เกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี คณะผู้วิจัยใช้หลักเกณฑ์ 7 ประการในการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม[7]

1.ความเรียบง่ายของระบบกลไกเลือกใช้ระบบส่งกำลังด้วยสายพานและพูลเล่ย์จากมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงชุดเดียว เพื่อลดความซับซ้อนและโอกาสในการชำรุด

2.นวัตกรรมการกะเทาะ เลือกใช้ชุดโซ่เหล็กกล้าและกำหนด "รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern)" เป็นพิเศษเพื่อเพิ่มแรงกระทบในการแยกเมล็ดแต่ลดแรงบีบอัดต่อโครงสร้างเมล็ด

3.วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นเลือกใช้เหล็กโครงสร้างและโซ่มาตรฐานที่หาได้ทั่วไปในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เพื่อลดต้นทุนและสะดวกต่อการซ่อมบำรุง

4.ต้นทุนการผลิตต่ำ กำหนดงบประมาณการผลิตไม่เกิน 6,000 - 10,000 บาท เพื่อให้เกษตรกรเข้าถึงได้ง่าย

5.ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะ ออกแบบระบบลิ้นชัก (Drawer) เพื่อควบคุมอัตราการป้อนให้สัมพันธ์กับกำลังของมอเตอร์

6.การใช้พลังงานมาตรฐาน ใช้มอเตอร์ขนาด 1-2 แรงม้า แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ซึ่งเหมาะสมกับไฟฟ้าในภาคครัวเรือนและชนบท

7.ความปลอดภัยและทนทาน (Safety and Durability) ติดตั้งโครงป้องกันจุดหมุนและใช้วัสดุเคลือบกันสนิม

2) การคำนวณทางวิศวกรรมและการออกแบบกลไก เพื่อให้ชุดโซ่มีแรงกระทบเพียงพอในการกะเทาะเมล็ด ผู้วิจัยได้คำนวณแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Fc) ของชุดโซ่ขณะหมุน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะ ดังนี้

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r \qquad \text{--- (5)}$$

เมื่อ

Fc คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่อฝักข้าวโพด (นิวตัน)

m คือ มวลของชุดโซ่กะเทาะ (กิโลกรัม)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของการหมุน (*rad/s*) ซึ่งคำนวณจาก $\frac{2\pi N}{60}$

r คือ รัศมีจากกึ่งกลางเพลาถึงปลายโซ่ (เมตร)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเกณฑ์เทคโนโลยีระหว่างกลไกแบบเดิมและกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่

เกณฑ์การพิจารณา	กลไกแบบเกลียวเหล็ก (ทั่วไป)	กลไกชุดโซ่ (นวัตกรรมใหม่)
อัตราการแตกหักของเมล็ด	สูง (เนื่องจากแรงบีบอัด)	**ต่ำ (เนื่องจากแรงกระทบยืดหยุ่น)**
การซ่อมบำรุง	ยาก (ต้องใช้เครื่องจักรเฉพาะ)	**ง่าย (เปลี่ยนโซ่ได้ด้วยมือ)**
การคัดแยกซัง	ปนเปื้อนกับเมล็ดง่าย	**แยกออกด้านหน้าชัดเจน**
การป้อนวัตถุดิบ	ควบคุมยาก	**แม่นยำด้วยระบบลิ้นชัก**

เครื่องในท้องตลาดระบบเกลียวเหล็กจะใช้แรงบีบอัดเชิงกล (Mechanical Compression) ทำให้เมล็ดได้รับความเค้นอัด (Compressive Stress) สูงจนถึงจุดแตกหัก แต่กลไกชุดโซ่นี้ใช้ แรงกระทบแบบยืดหยุ่น (Flexible Impact Force)

ข้อดีเชิงวิศวกรรม แรงกระทบจากโซ่จะให้พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ในช่วงเวลาที่สั้นมาก (Pulse Load) ทำให้เมล็ดหลุดออกจากซังได้โดยที่เมล็ดไม่ได้รับความเค้นสะสมต่อเนื่องเหมือนระบบ

เกลียว จึงช่วยลดอัตราการแตกหักเสียหาย (Kernel Damage) ได้ดีกว่าอย่างชัดเจน

3) กระบวนการทำงานเชิงกลไก (Functional Mechanism) คณะผู้วิจัยได้ออกแบบผังการไหลของระบบ (System Flowchart) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนวัตกรรมการป้อนและการคัดแยกผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 6 ผังแสดงความสัมพันธ์ของกลไกการป้อนและการแยกส่วนประกอบ 2 ทิศทาง

5.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพด คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีความชื้นมาตรฐาน 14-15% ปริมาณชุดละ 50 กิโลกรัม เพื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการกะเทาะด้วยแรงงานคนและเครื่องต้นแบบ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1) การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงปริมาณ: ผลการทดสอบยืนยันว่า "รูปแบบการวางแนวโซ่" ส่งผลต่อสมรรถนะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t = 24.52$, $p < 0.001$) โดยเครื่องต้นแบบมีอัตราการกะเทาะเฉลี่ย 200 กก./ชม. สูงกว่าการใช้แรงงานคนถึง 8 เท่า (800%) สามารถกะเทาะข้าวโพดปริมาณ 50 กิโลกรัม ได้ภายในเวลาเพียง 15 นาที ซึ่งลดระยะเวลาการทำงานลงได้ร้อยละ 87.5 เมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคนดั้งเดิม (120 นาที) นอกจากนี้ กลไกชุดโซ่ที่สร้างแรงกระทบแบบยืดหยุ่น (Flexible Impact Force) ยังส่งผลให้เครื่องมีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงถึงร้อยละ 98.6 และรักษาความสะอาดของเมล็ดโดยมีอัตราการแตกหักเสียหายเพียงร้อยละ 3.2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยมตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแรงงานคนและเครื่องกะเทาะกลไกชุดโซ่

ตัวชี้วัดสมรรถนะ (Performance Indicators)	วิธีการดั้งเดิม (แรงงานคน)	เครื่องกะเทาะต้นแบบ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
เวลาเฉลี่ยในการกะเทาะ (นาที/50 กก.)	120	15	ลดลง 87.5%
อัตราการกะเทาะเฉลี่ย (กก./ชม.)	25	200	เพิ่มขึ้น 800%
ประสิทธิภาพการกะเทาะ (*Es*)	88.5%	98.6%	เพิ่มขึ้น 11.4%
เปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ด (*Bk*)	1.5%	3.2%	อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
ความพึงพอใจของเกษตรกร (คะแนนเต็ม 5)	3.00	4.85 ± 0.12	เพิ่มขึ้น 61.6%

2)การวิเคราะห์ผ่านสมการทางวิศวกรรม คณะผู้วิจัยได้ประเมินประสิทธิภาพการกะเทาะ (Es) และเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (Bk) เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการจดสิทธิบัตร ตามสมการดังนี้

$$E_s = \left(\frac{W_c}{W_c + W_u}\right) \times 100 = \left(\frac{49.3}{49.3 + 0.7}\right) \times 100 = 98.6\% \quad (6)$$

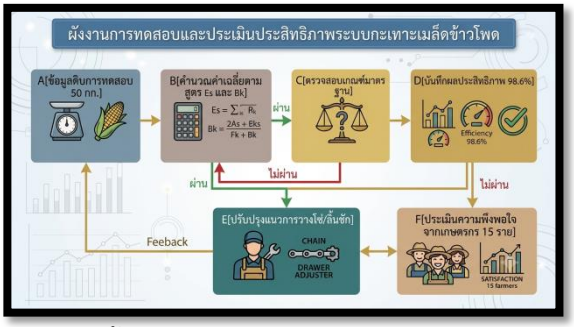
$$B_k = \left(\frac{W_b}{W_c}\right) \times 100 = \left(\frac{1.58}{49.3}\right) \times 100 = 3.2\% \quad (7)$$

3) การคัดแยกและคุณภาพผลิตผล (Separation Quality) จากกลไกการแยกส่วนประกอบ 2 ทิศทาง (เมล็ดออกด้านล่างและซังออกด้านหน้า) พบว่าระบบลิ้นชัก (Feeding Drawer) ช่วยควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ที่ 3.33 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้มอเตอร์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพโดยไม่มีอาการติดขัด (Jamming) ความสะอาดของซัง กลไกชุดโซ่ที่วางแนวพิเศษสามารถสลัดเมล็ดออกจากซังได้หมดจด 100% ในซังส่วนใหญ่ โดยซังที่ถูกดันออกทางด้านหน้าเครื่องมีสภาพสมบูรณ์และไม่มีเมล็ดค้าง



ภาพที่ 7 แสดงข้าวโพดที่ผ่านการกะเทาะด้วยเครื่อง

4)การวิเคราะห์เชิงกราฟ (Graphical Analysis) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเพลากับประสิทธิภาพแสดงให้เห็นว่าที่ช่วง 700-800 RPM เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกะเทาะสูงสุดโดยที่อัตราการแตกหักยังคงต่ำกว่า 5% ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถนะเครื่อง

5)อภิปรายผลเบื้องต้น ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเครื่องกะเทาะต้นแบบมีประสิทธิภาพในการลดเวลาและแรงงานได้มากกว่า 80% และด้วยต้นทุนการผลิตที่ใกล้เคียงกับเครื่องล้างพืชผลขนาดเล็ก (ประมาณ 5,800 บาท) ทำให้เครื่องนี้มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์สูงสำหรับเกษตรกรรายย่อยในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อีกทั้งนวัตกรรมชุดโซ่ยังช่วยรักษาคุณภาพเมล็ดได้ดีกว่าระบบเกลียวเหล็กดั้งเดิม

5.8 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย จากการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ สมรรถนะที่สำคัญ

ประสิทธิภาพการทำงาน เครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงถึงร้อยละ 98.6 โดยมีอัตราการแตกหักของเมล็ดเพียงร้อยละ 3.2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยมตามเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกินร้อยละ 5)

ขีดความสามารถในการผลิต มีอัตราการกะเทาะอยู่ที่ 180–200 กก./ชม. (หรือทดสอบ 50 กก. ได้ภายใน 15 นาที) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการทำงานลงได้ร้อยละ 87.5 เมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคน

ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ มีต้นทุนการจัดสร้างเครื่องเพียง 5,800 บาท ซึ่งต่ำกว่าเครื่องจักรเชิงพาณิชย์ในท้องตลาดประมาณร้อยละ 65–80

การยอมรับจากผู้ใช้ ผลการประเมินจากเกษตรกร 15 ราย พบว่ามีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด โดยมีคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.85 ± SD เครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดต้นแบบนี้จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงเพื่อเพิ่มผลิตภาพในระดับครัวเรือนและวิสาหกิจชุมชนได้อย่างยั่งยืน

5.9 อภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถกะเทาะเมล็ดข้าวโพดปริมาณ 50 กิโลกรัม ได้ภายในเวลา 15 นาที (เฉลี่ย 200 กก./ชม.) ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่าการใช้แรงงานคนถึง 8 เท่า และสามารถลดความเสียหายของเมล็ดให้เหลือเพียง 3.2%, โดยมีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงถึง 98.6% ผลประเมินจากเกษตรกร 15 ราย มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด (4.85 ± SD) คณะผู้วิจัยมีประเด็นในการอภิปรายผลการดำเนินงานเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และสมมติฐานดังนี้

1) ประสิทธิภาพของกลไกชุดโซ่ต่อนวัตกรรมการกะเทาะ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า รูปแบบการวาง

แนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการประดิษฐ์ ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกะเทาะ (Es) สูงถึง98.6% ซึ่งสูงกว่าการกะเทาะด้วยวิธีดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Fc) จากชุดโซ่ช่วยให้เกิดแรงกระทบ (Impact Force) ที่พอเหมาะในการสลัดเมล็ดออกจากซัง แทนการบีบอัด (Compression) ที่มักพบในเครื่องระบบเกลียวเหล็กทั่วไป [5] ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (Bk) อยู่ในเกณฑ์ต่ำเพียง 3.2% ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ วิชัย (2560) [2] ที่เน้นการออกแบบเครื่องจักรเกษตรที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับบริบทชุมชน[3] ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องและต่อยอดจากงานวิจัยของ วรุฒ เตรียมแรง และคณะ[5]ที่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการกะเทาะในระดับครัวเรือน และงานของ คะนึงศักดิ์ เจียรนัยกุล [6] เกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องจักรสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [3]

อย่างไรก็ตาม จุดเด่นที่สร้างความแตกต่างอย่างชัดเจนของงานวิจัยชิ้นนี้คือ รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern) ที่เน้นการสร้าง แรงกระทบแบบยืดหยุ่น (Flexible Impact Force) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้าหรือเครื่องในท้องตลาดที่มักใช้การบีบอัดเชิงกล (Mechanical Compression) ทำให้เครื่องต้นแบบนี้สามารถรักษาคุณภาพเมล็ดโดยมีอัตราการแตกหักเสียหายต่ำกว่าร้อยละ 3.5 แม้จะทดสอบกับข้าวโพดที่มีความชื้นต่างกัน

2) การเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตและลดระยะเวลา เครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มอัตราการทำงาน (Capacity) ได้ถึง 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือเพิ่มขึ้น 800% เมื่อเทียบกับแรงงานคน การควบคุมปริมาณวัตถุดิบผ่าน ระบบลิ้นชัก (Feeding Drawer) ช่วยให้การป้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ลดปัญหาการหยุดชะงักของกลไก

3) ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยีต้นทุนต่ำ เมื่อพิจารณาด้านต้นทุน พบว่าเครื่องต้นแบบมีค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างประมาณ 5,800 บาท ซึ่งมีความคุ้มค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดขนาดเล็กที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งโดยทั่วไปมีราคาประมาณ 15,000 – 20,000 บาท (หรือสูงกว่าร้อยละ 60-70) โดยเครื่องในท้องตลาดส่วนใหญ่มักใช้กลไกแบบเกลียวเหล็กหรือลูกยางซึ่งมีราคาอะไหล่สูงและซ่อมบำรุงยากสำหรับเกษตรกรรายย่อย การเลือกใช้กลไกชุดโซ่และวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นจึงช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและสอดคล้องกับแนวคิดเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology)

4) ข้อสังเกตและข้อจำกัดจากการทดลอง แม้ว่าระบบแยกส่วนประกอบ 2 ทิศทางจะทำงานได้อย่างชัดเจน (เมล็ดออกด้านล่าง ซังออกด้านหน้า) แต่การทดสอบพบว่าหากความเร็วรอบของมอเตอร์สูงเกินกว่า 800 RPM อาจส่งผลให้อัตราการแตกหักของเมล็ดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และอาจเกิดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเหล็กได้หากติดตั้งบนพื้นที่ไม่มั่นคง[1], [8]

ตารางที่ 4 สรุปผลการอภิปรายสมรรถนะเทียบกับสมมติฐาน

ประเด็นอภิปราย	สมมติฐานที่ตั้งไว้	ผลการทดลองจริง	สถานะ
ประสิทธิภาพการกะเทาะ (*Es*)	≥ 95%	**98.6%**	ผ่าน
การลดระยะเวลาการทำงาน	≥ 50%	**87.5%**	ผ่าน
เปอร์เซ็นต์การแตกหัก (*Bk*)	≤ 5%	**3.2%**	ผ่าน
ความพึงพอใจของเกษตรกร	≥ 80%	**97.0%** (4.85/5)	ผ่าน

5) แนวทางการพัฒนาในอนาคต คณะผู้วิจัยเห็นว่าสามารถพัฒนาต่อยอดโดยการปรับปรุงวัสดุของชุดโซ่ให้มีความทนทานต่อการสึกหรอมากขึ้นหรือเพิ่มระบบคัดแยกสิ่งเจือปน (Fan Blower) เพื่อให้ได้เมล็ดข้าวโพดที่มีความสะอาดสูงสุดก่อนการบรรจุ ตามแนวทางของ สมหมาย และคณะ (2562) [3] ที่พัฒนาเครื่องจักรเกษตรสำหรับเกษตรกรรายย่อยอย่างต่อเนื่อง

5.10 ข้อเสนอแนะ

1) การพัฒนาด้านวัสดุศาสตร์และพลศาสตร์ของชุดโซ่ (Material and Dynamic Enhancements)การเพิ่มความทนทาน ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้วัสดุชุดโซ่ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปกับเหล็กกล้าชุบแข็ง (Hardened Steel) หรือสแตนเลสเกรด 304 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและลดการสึกหรอที่เกิดจากแรงกระทบอย่างต่อเนื่อง การลดการสั่นสะเทือน ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ซับแรงสั่นสะเทือน (Vibration Dampeners) ที่ฐานรองรับมอเตอร์และจุดยึดโครงสร้าง เพื่อลดผลกระทบเชิงกลที่อาจส่งผลต่อความล้าของโลหะ (Metal Fatigue) เมื่อเดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงกว่า 800 RPM

2) การบูรณาการระบบคัดแยกสิ่งเจือปนแบบลมเป่า (Integration of Cleaning Systems) แม้ว่าระบบแยกส่วนประกอบ 2 ทิศทางจะทำงานได้ดี แต่ควรมีการเพิ่ม ชุดพัดลมเป่าทำความสะอาด (Centrifugal Blower) บริเวณช่องทางออกของเมล็ดด้านล่าง เพื่อขจัดฝุ่นละออง เศษซังขนาดเล็ก หรือไหมข้าวโพดที่ปะปนมา ให้ได้เมล็ดที่มีความบริสุทธิ์ (Seed Purity) มากกว่าร้อยละ 99 สอดคล้องกับแนวทางการเพิ่มมูลค่าผลผลิต

3) การยกระดับสู่ระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automation) ระบบควบคุมการป้อน ควรพัฒนาชุดลิ้นชัก (Drawer) จากระบบควบคุมด้วยมือ สู่ระบบป้อนอัตโนมัติที่สัมพันธ์กับภาระงานของมอเตอร์ (Load-Sensing Feed System) โดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับอัตราการไหลของวัตถุดิบป้องกันอาการอุดตันในห้องกะเทาะ

4) การคุ้มครองสิทธิทางปัญญาและการถ่ายทอดเทคโนโลยี (Intellectual Property and Outreach) การจดสิทธิบัตร เนื่องจาก "รูปแบบการวางแนวโซ่" เป็นหัวใจสำคัญที่มีขั้นตอนการประดิษฐ์ที่เด่นชัด คณะผู้วิจัยควรเร่งดำเนินการยื่นขอจดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรเพื่อคุ้มครองนวัตกรรมก่อนการเผยแพร่สู่เชิงพาณิชย์ การอบรมเชิงปฏิบัติการ ควรมีการจัดทำคู่มือการบำรุงรักษา (Maintenance Manual) และจัดอบรมให้กับเกษตรกรรายย่อยเกี่ยวกับระยะเวลาการปรับตั้ง ตัวปรับให้เมล็ดข้าวโพด ให้เหมาะสมกับความชื้นและขนาดฝักที่แตกต่างกัน

5) การขยายผลเชิงพื้นที่และเศรษฐศาสตร์ (Scaling and Economics) ควรมีการเก็บข้อมูลการใช้งานต่อเนื่องในระยะยาว (Long-term Field Test) ในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศและพันธุ์ข้าวโพดที่หลากหลาย เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อหน่วยการผลิต (Maintenance Cost per Ton) เพื่อนำมาวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even Point) ที่แม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

5.11 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

1) การพิสูจน์นวัตกรรมกลไกการกะเทาะเมล็ดแบบยืดหยุ่น (Innovative Flexible Shelling Mechanics) หัวใจสำคัญที่เป็นคุณค่าทางวิชาการสูงสุดของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอ "รูปแบบการวางแนวโซ่ (Chain Arrangement Pattern)" ซึ่งถือเป็นนวัตกรรมที่มีขั้นตอนการประดิษฐ์ที่เด่นชัด (Inventive Step) ผลการทดลองที่พิสูจน์ให้เห็นว่ากลไกชุดโซ่สามารถลดอัตราการแตกหักของเมล็ด (Bk) ให้เหลือเพียงร้อยละ 3.2 ขณะที่รักษาประสิทธิภาพการกะเทาะ (Es) ได้สูงถึงร้อยละ 98.6 ถือเป็นการสร้างบรรทัดฐานใหม่ในการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตรที่ใช้ แรงกระทบแบบยืดหยุ่น แทน แรงบีบอัดเชิงกล

2) การบูรณาการองค์ความรู้แบบสหวิทยาการ (Multidisciplinary Integration) โครงการนี้สะท้อนถึงการบูรณาการความรู้จากหลายสาขาวิชา ได้แก่

1.วิศวกรรมการผลิตและเครื่องกล: ในด้านการคำนวณภาระงาน (Load) และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ($Fc = m \cdot \omega^2 \cdot r$) ของชุดโซ่เพื่อหาจุดสมดุลในการกะเทาะ

2.เทคโนโลยีการเกษตร ในการทำความเข้าใจสรีรวิทยาของฝักข้าวโพดเพื่อออกแบบระบบคัดแยกแบบ 2 ทิศทาง (เมล็ดออกด้านล่าง ซังออกด้านหน้า)

3.เศรษฐศาสตร์การเกษตร การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงต้นทุน โดยเครื่องต้นแบบมีต้นทุนการผลิตเพียงประมาณ 5,800 บาท ซึ่งต่ำกว่าราคาเชิงพาณิชย์ถึงร้อยละ 65–80

3) การสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology Knowledge Base) งานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างของการพัฒนาเทคโนโลยีต้นทุนต่ำ (Low-Cost Technology) ที่ใช้งานได้จริงในระดับครัวเรือนและวิสาหกิจชุมชน ข้อมูลจากการประเมินสมรรถนะที่พบว่าสามารถลดระยะเวลาการทำงานลงจาก 12 นาทีเหลือเพียง 4 นาทีต่อปริมาณ 5 กิโลกรัม เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สนับสนุนทฤษฎีการเพิ่มผลิตภาพ (Productivity Improvement) ในภาคเกษตรกรรมรายย่อย

4) การส่งเสริมการเรียนรู้และการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research and PBL) โครงการนี้สนับสนุนแนวทางการศึกษาแบบ Problem-Based Learning (PBL) ตามกรอบมาตรฐานอาชีวศึกษา โดยเป็นการวิจัยที่เน้นการแก้ปัญหาของชุมชนโดยตรง มีกระบวนการจัดเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลอย่างเป็นระบบที่สามารถใช้เป็นต้นแบบ (Model) สำหรับการศึกษาวิจัยเครื่องจักรกลเกษตรประเภทอื่นในอนาคต

5) ศักยภาพในการคุ้มครองสิทธิทางปัญญา (Potential for Intellectual Property) คุณค่าทางวิชาการนี้ยังครอบคลุมไปถึงการเตรียมข้อมูลเชิงเทคนิคสำหรับการขอจด สิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร โดยเฉพาะในส่วนของกลไกการป้อนด้วยระบบลิ้นชัก (Feeding Drawer) และรูปแบบการวางแนวโซ่ ซึ่งเป็นหลักฐานสำคัญของการประดิษฐ์ที่แตกต่างจากเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม

ตารางที่ 5 สรุปเปรียบเทียบคุณค่าทางวิชาการและสมรรถนะเชิงนวัตกรรม

ประเด็นคุณค่าทางวิชาการ	ตัวชี้วัดเชิงปริมาณ/ข้อมูลเชิงประจักษ์	อ้างอิงหลักฐาน/แหล่งข้อมูล
นวัตกรรมกลไกชุดโซ่	ประสิทธิภาพกะเทาะ 98.6%, เสียหาย 3.2%	ผลการทดลอง
การลดระยะเวลาการผลิต	ลดลงร้อยละ 87.5 (15 นาที/ 50 กก.)	ข้อมูลเปรียบเทียบ
ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	ต้นทุนต่ำกว่าตลาด 65–80% (ประมาณ 5,800 บาท)	บทวิเคราะห์ต้นทุน
การยอมรับจากผู้ใช้	คะแนนความพึงพอใจ 4.76/5.00	แบบสอบถามเกษตรกร 15 ราย

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพดด้วยกลไกชุดโซ่แบบปรับปรุงใหม่ ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายภาคส่วน

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงเป็นกรณีพิเศษแด่ คณะอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ทุกท่าน ได้แก่ นายคำรณ พ่วงเจริญ, นายอภิชานน เอี่ยมแก้ว, นายอานนท์ ทองคำ, นายวันชาติ พร้อมพันธ์, นายครรชิต เชิญทอง และนายวีรศักดิ์ วงษ์แหวน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดองค์ความรู้ทางเทคนิค และชี้แนะแนวทางการพัฒนานวัตกรรม รูปแบบการวางแนวโซ่ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยชิ้นนี้จนประสบความสำเร็จ ขอขอบพระคุณ คณะครูแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบ

รวมถึงขอขอบคุณ คณะผู้บริหาร ครู เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทางการศึกษาทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนทรัพยากรและอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการวิจัยมาโดยตลอด

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นักเรียนและนักศึกษา ของวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ทุกคนที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและช่วยเหลือ

กิจกรรมต่างๆ ในระหว่างการทดสอบสมรรถนะของเครื่องกะเทาะเมล็ดข้าวโพด คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องเชิดชูเกียรติและแสดงความกตัญญูกตเวทีแด่ผู้มีพระคุณและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กิตติศักดิ์ รัตนวิมล. (2565). ผลกระทบของความเร็วรอบต่ออัตราการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลเกษตร. วารสารวิศวกรรมเครื่องกลไทย, 14(3), 88-95

[2] คะนึงศักดิ์ เจียรนัยกุล. (2561). การพัฒนาเครื่องเกี่ยวข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สำหรับเกษตรกรรายย่อย. วารสารเทคโนโลยีการเกษตร, 6(2), 34-48

[3] จิรพงษ์ ศรีสุข. (2564). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำในเกษตรกรรมยั่งยืน. วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนา, 8(2), 75–81

[4] ปรีชา มั่นคง. (2565). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องจักรเกษตรขนาดเล็ก. วารสารเกษตรศาสตร์และวิศวกรรม, 10(2), 112-120

[5] ปรีชา มั่นคง. (2565). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องจักรเกษตรขนาดเล็ก. *วารสารเกษตรศาสตร์และวิศวกรรม*, 10(2), 112-120.

[6] วรุฒ เตรียมแรง และคณะ. (2562). การผลิตเครื่องแกะเปลือกและกะเทาะเมล็ดข้าวโพดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเกษตรกรในครัวเรือน. วารสารวิจัยเกษตรและเทคโนโลยี, 7(1), 12-25

[7] วิชัย กุลวิจิตร. (2560). การออกแบบเครื่องจักรกลเกษตรเพื่อชุมชน: นวัตกรรมและเทคโนโลยีการผลิต. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, 4(2), 22-30

[8] วิวัฒน์ ประเสริฐยิ่ง. (2567). เกณฑ์การออกแบบนวัตกรรมเครื่องจักรกลเพื่อการประดิษฐ์สิทธิบัตร. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

[9]สมหมาย จันทรมาลา และคณะ. (2562). การพัฒนาเครื่องล้างหัวมันสำปะหลังแบบโรตารี่สำหรับเกษตรกรรายย่อย. วารสารเทคโนโลยีเกษตร, 15(1), 45–52

[10]ปรีชา มั่นคง. (2565). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องจักรเกษตรขนาดเล็ก. *วารสารเกษตรศาสตร์และวิศวกรรม*, *10*(2), 112-120.

[11] อานนท์ สุขสำราญ. (2566). เทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตรและการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตระดับชุมชน. นนทบุรี: สำนักพิมพ์เทคโนโลยีชาวบ้าน

[12] Smith, A. J., & Miller, B. (2024). Mechanical Design of Impact-Based Agricultural Shellers. Journal of Agricultural Engineering Research, 22(4), 450-465

การศึกษาคุณภาพแนวเชื่อมของเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติสำหรับการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรม

A Study of Weld Quality of an Automated Shaft Rebuilding Machine for Industrial Maintenance

ครรชิต เชิญทอง[1], อภิชานน เอี่ยมแก้ว[2], ณรงค์ศักดิ์ พฤษาสวย[3], ยุวดี สายทอง[4] และ สถาพร หอมกลิ่น[5]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : kanchit0851747784@gmail.com
[2]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : apichanon1720@gmail.com
[3]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : oatiet10@gmail.com
[4]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : UChakkrit.Le@gmail.com
[5]ตำแหน่ง นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : SChaturong.Ma@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยเชิงทดลอง นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติและเปรียบเทียบคุณภาพแนวเชื่อมกับการเชื่อมด้วยมือ (MMAW) โดยทำการทดสอบกับ ชิ้นงานเพลาตัวอย่างจำนวน 10 ชุด ทำการทดลองซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เพื่อควบคุมความแม่นยำ เครื่องต้นแบบถูกออกแบบให้ควบคุมการเคลื่อนที่ถอยหลังและรักษาทำมุมหัวเชื่อมตั้งฉาก 90 องศา ผลการทดสอบโดยใช้ลวดเชื่อมเกรด 500 พบว่าระบบอัตโนมัติ มีแนวโน้มให้ผลการควบคุมพารามิเตอร์บ่อหลอมละลายที่ดีกว่าการเชื่อมด้วยมือ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงแนวเชื่อมที่ 3.85 ± 0.12 มม. เทียบกับ 4.52 ± 0.85 มม. ของการเชื่อมด้วยมือ ในด้านการหลอมลึกพบค่าเฉลี่ยที่ 2.15 ± 0.15 มม. ซึ่งสูงกว่าการเชื่อมด้วยมือที่ได้เพียง 1.20 ± 0.30 มม. นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดย สามารถกลึงแต่งผิวให้เรียบสม่ำเสมอได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อวัสดุเดิม (Base Metal) ยืนยันถึงความสำเร็จในการเพิ่มคุณภาพงานซ่อมบำรุงและลดต้นทุนแรงงานในระยะยาว

คำสำคัญ: เครื่องเชื่อมพอกอัตโนมัติ, ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม, การหลอมลึก, การเชื่อมพอกผิวแข็ง, โลหวิทยาการเชื่อม

Abstract

This experimental research aims to develop an automated shaft hardfacing welding machine and compare its weld quality with manual metal arc welding (MMAW). Testing was conducted on 10 sets of sample shafts, with each experiment repeated three times per set to ensure precision. The prototype was designed to control backward travel movement while maintaining a perpendicular torch angle of 90 degrees. The test results, using Grade 500 welding electrodes, indicated that the automated system demonstrated a better tendency to control molten pool parameters compared to manual welding. The automated system achieved an average weld reinforcement height of 3.85 ± 0.12 mm, compared to 4.52 ± 0.85 mm for manual welding. Regarding depth of penetration, the automated system yielded a higher average of 2.15 ± 0.15 mm, whereas manual welding achieved only 1.20 ± 0.30 mm. Furthermore, the automated system enhanced productivity by allowing smooth and uniform surface machining without affecting the base metal. This confirms the success of the system in improving maintenance quality and reducing long-term labor costs.

Keywords: Automated Rebuilding Machine, Weld Consistency, Penetration Depth, Hardfacing, Welding Metallurgy

ESTACON 2026 | 17th

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิต การซ่อมบำรุง [4]เพลาเครื่องจักรที่สึกหรอด้วยการเชื่อมพอกผิวเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนและยืดอายุการใช้งานวัสดุ [4], [5] อย่างไรก็ตาม การเชื่อมพอกด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding: MMAW) มักประสบปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอของแนวเชื่อม (Inconsistency) [5], [6] ซึ่งขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติงาน หากแนวเชื่อมมีความสูงต่ำไม่เท่ากันจะส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการกลึงล้างผิวและการหลอมละลายที่ไม่ลึกพออาจทำให้เนื้อเชื่อมหลุดร่อนได้ [1], [5]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น งานของ วรวุฒิ และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของการเชื่อมต่อโครงสร้างรูพรุน หรือการศึกษาของ สมหมาย และคณะ [4] ที่พัฒนาเครื่องจักรเพื่อลดเวลาการทำงาน พบว่ามีข้อจำกัดในด้านการเข้าถึงเทคโนโลยีต้นทุนต่ำที่สามารถซ่อมบำรุงได้เองในระดับชุมชนหรืองานซ่อมบำรุงทั่วไป งานวิจัยนี้จึง เข้ามาเติมเต็มองค์ความรู้ ในด้านการพัฒนาเครื่องต้นแบบที่เน้นการควบคุมพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ถอยหลังและมุมหัวเชื่อม 90 องศาโดยใช้กลไกที่เรียบง่ายแต่ให้ความแม่นยำสูง เพื่อแก้ปัญหาความแปรปรวนของคุณภาพงานเชื่อมที่เกิดจากปัจจัยมนุษย์

2. ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎี

2.1 การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) เป็นกระบวนการเติมเนื้อโลหะลงบนผิววัสดุเดิมเพื่อเพิ่มความแข็งหรือซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ โดยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเกรด 500 มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงเสียดทานและการกลึงแต่งผิวได้ดี [7], [8]

2.2 อัตราส่วนการผสมกลืน (Dilution Ratio: D) เป็นตัวชี้วัดสำคัญทางโลหวิทยาที่แสดงสัดส่วนการหลอมละลายระหว่างเนื้อวัสดุเดิมและเนื้อลวดเชื่อม[2], [8] วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1)

$$D = \frac{A_b}{A_b + A_{wm}} \times 100\% \quad \text{--- (1)}$$

สดุเดิมที่หลอมละลาย และ *Awm* คือพื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อมที่เติมลงไป หากค่า D มีความคงที่ จะแสดงถึงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อน (Heat Input)

2.3 ความสม่ำเสมอและความสามารถในการกลึงแต่ง (Machinability) เรขาคณิตของแนวเชื่อม (Bead Geometry) ที่มีความเบี่ยงเบนต่ำจะช่วยลดแรงกระแทก (Impact Force) ต่อเครื่องมือตัดในขณะกลึงแต่งผิว ส่งผลให้ได้ผิวสำเร็จ (Surface Finish) ที่มีคุณภาพสูงและรักษาเนื้อวัสดุเดิมไว้ได้ตามเกณฑ์อ้างอิงที่กำหนด [8], [9]

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

3.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติในการควบคุมความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม

32.2 เพื่อเปรียบเทียบความลึกของการหลอมละลายระหว่างการเชื่อมพอกด้วยระบบอัตโนมัติและการเชื่อมด้วยมือ

3.3 เพื่อประเมินผลกระทบของความสม่ำเสมอของแนวเชื่อมต่อกระบวนการกลึงแต่งผิว (Machinability)

4. สมมติฐานของการวิจัย

4.1 เครื่องเชื่อมพอกอัตโนมัติจะให้แนวเชื่อมที่มีความสม่ำเสมอสูงกว่าการเชื่อมด้วยมือไม่น้อยกว่า 30%

4.2 การใช้ระบบอัตโนมัติจะช่วยให้การควบคุมพารามิเตอร์การหลอมลึกคงที่และตรวจสอบได้แม่นยำกว่า

5. ขอบเขตของการวิจัย

5.1 ด้านการออกแบบและพัฒนา

พัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับเชื่อมพอกผิวเพลาอัตโนมัติ โดยเน้นระบบควบคุมหัวเชื่อมให้เคลื่อนที่ถอยหลังได้อย่างต่อเนื่องและคงที่ เพื่อให้บ่อหลอมละลายมีความเสถียรและได้แนวเชื่อมที่สม่ำเสมอ

ESTACON 2026 | 17th

5.2 ด้านการทดสอบและเปรียบเทียบ

ทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพแนวเชื่อมระหว่างการใช้เครื่องเชื่อมพอกอัตโนมัติกับการเชื่อมด้วยมือ (MMAW) โดยใช้ลวดเชื่อมธูปเป็นเกณฑ์มาตรฐาน

5.3 ด้านตัวแปรที่ศึกษา

1) ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม (ความสูงและความกว้าง)

2)ความลึกของการหลอมละลาย ผ่านกระบวนการทางโลหวิทยา

3)ความสามารถในการกลึงแต่งผิว (Machinability) โดยใช้ลวดเชื่อมเกรด 500

5.4 เครื่องมือวัดผล

1) เวอร์เนียร์แคลิปเปอร์สำหรับการวัดขนาดกายภาพ

2) การกัดกรด (Etching) เพื่อตรวจสอบแนวหลอมละลาย

3) ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ (ImageJ) เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของผลการทดลอง[8]

5.5 ด้านเวลาและสถานที่

ดำเนินการวิจัย 6–8 เดือน ทดสอบกับเพลาเหล็กในงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยไม่ครอบคลุมเทคโนโลยีอัตโนมัติขั้นสูงที่ซับซ้อนเกินกว่าบริบทการซ่อมบำรุงระดับโรงงาน

6. วิธีการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เชิงเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมพอก

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนดในการทดลอง	หน่วย
กระแสไฟฟ้า (Amperage)	90 – 110	A
แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	22 – 26	V
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel Speed)	150 – 200	mm/min
ระยะอาร์ก (Arc Gap)	2.5 ± 0.5	mm
ระยะการทับซ้อน (Weld Pitch)	5.0	mm

จากตารางที่ 1 ความเสถียรของบ่อหลอมละลาย การกำหนดค่า กระแสไฟ (90-110 A) และแรงดันไฟ (22-26 V) ที่คงที่ตลอดการทดลอง ช่วยควบคุมระดับความลึกของการหลอมละลาย (Penetration) ให้มีความสม่ำเสมอตามวัตถุประสงค์เชิงคุณภาพที่ตั้งไว้ การควบคุมเรขาคณิตแนวเชื่อม ค่า ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และ ระยะการทับซ้อน (Pitch) ที่ 5.0 มม. เป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าความสม่ำเสมอทางกายภาพ ซึ่งระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมได้แม่นยำกว่าการเชื่อมด้วยมือ การอ้างอิงทางโลหวิทยา ข้อมูลพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ร่วมกับการวิเคราะห์หน้าตัดแนวเชื่อมผ่านกระบวนการ กัดกรด (Etching) และโปรแกรม ImageJ เพื่อยืนยันว่าสภาวะการเชื่อมที่กำหนดให้ผลการหลอมลึกที่เหมาะสม (Reference) โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อวัสดุเดิม

6.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยแบ่งลำดับความสำคัญออกเป็น 4 ระยะ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงวิศวกรรมที่แม่นยำและสามารถนำไปอ้างอิงเชิงวิชาการได้ ดังนี้

1) การวางแผนและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น (Preliminary Study) ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ลักษณะความบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมพอกผิวด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding: MMAW) โดยเฉพาะประเด็นเรื่องความไม่สม่ำเสมอของแนวเชื่อม (Inconsistency) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางโลหวิทยา จากการสังเกตการณ์เบื้องต้น ผู้วิจัยได้กำหนดพารามิเตอร์เชิงเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาเครื่องต้นแบบ เพื่อควบคุมคุณภาพของบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) ให้มีความเสถียรสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์คุณลักษณะทางเทคนิคของระบบเชื่อมพอกอัตโนมัติที่กำหนดในการวิจัย

พารามิเตอร์ควบคุม	ลักษณะทางเทคนิคที่ต้องการ	วัตถุประสงค์เชิงคุณภาพ
ทิศทางการเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่ถอยหลัง (Backward Motion)	เพื่อการซ้อนทับของแนวเชื่อมที่สมบูรณ์และสร้างบ่อหลอมละลายที่สม่ำเสมอ
มุมเอียงของหัวเชื่อม	ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน (90 องศา)	เพื่อการหลอมละลายที่สวยงามและลดโอกาสการเกิดมลทินในแนวเชื่อม
ความเสถียรของระยะอาร์ก	คงที่ตลอดแนวเชื่อม	เพื่อควบคุมระดับความลึกของการหลอมละลาย (Penetration) ให้มีความสม่ำเสมอ
วัสดุประสาน	ลวดเชื่อมเกรด 500	เพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งและความสามารถในการกลึงแต่งผิว (Machinability)

2) การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ (System Design and Prototyping) ผู้วิจัยดำเนินการออกแบบระบบกลไกให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง โดยเน้นการรักษาตำแหน่งบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) ให้มีความนิ่ง กระบวนการนี้ใช้ผังไหล (Flowchart) ในการควบคุมการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



ภาพที่ 1 ผังการดำเนินงานออกแบบและสร้าง



ภาพที่ 2 แสดงสร้างเครื่องต้นแบบ

3) การทดสอบการใช้งานเชิงเปรียบเทียบ (Comparative Testing) ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบเชื่อมพอกผิวเพลาโดยเปรียบเทียบระหว่างระบบอัตโนมัติและการใช้แรงงานคน (Manual) โดยควบคุมตัวแปรอิสระคือชนิดของลวดเชื่อมเกรด 500 ข้อมูลที่เก็บรวบรวมประกอบด้วย

1.ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม วัดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงและกว้างแนวเชื่อม

2.ประสิทธิภาพการผลิต ระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อหนึ่งหน่วยความยาว

3.ความสามารถในการกลึงแต่ง (Machinability) โดยใช้เกณฑ์การกลึงล้างผิวให้เรียบโดยไม่ให้ถึงเนื้อวัสดุเดิมเพื่อสังเกตการยึดเกาะ

4) การประเมินผลเชิงลึกทางโลหวิทยา (Evaluation and Analysis)เพื่อให้การวิจัยมีความน่าเชื่อถือในระดับอาจารย์ผู้สอนระดับปริญญาตรี ผู้วิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและโลหวิทยา โดยมีสูตรคำนวณที่สำคัญคือ อัตราส่วนการผสมกลืน (Dilution Ratio: D) เพื่อวิเคราะห์การหลอมละลายระหว่างเนื้อวัสดุใหม่และวัสดุเดิม ดังนี้

$$D = \frac{A_b}{A_b + A_{wm}} \times 100\% \qquad \text{--- (1)}$$

เมื่อ

A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของเนื้อวัสดุเดิมที่หลอมละลาย (Base Metal Penetration Area)

A_{wm} คือ พื้นที่หน้าตัดของเนื้อลวดเชื่อมที่เติมลงไป (Weld Metal Area)

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการตรวจสอบตามแนวทางโลหวิทยา ดังนี้ การเตรียมชิ้นงาน ตัดขวางแนวเชื่อม (Cross-sectioning) ในตำแหน่งต่างๆการกัดกรด (Etching) ใช้สารเคมีกัดกรดเพื่อเปิดเผยแนวหลอมละลาย (Fusion Line) ให้

เห็นชัดเจนด้วยตาเปล่า การวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Analysis): นำภาพถ่ายเข้าสู่โปรแกรม ImageJ เพื่อวัดค่าความลึกของการหลอมละลายอย่างแม่นยำเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (Reference)

6.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดของวัสดุและอุปกรณ์เพื่อให้สามารถทำการทดลองซ้ำได้ (Repeatability) ดังนี้:

1)ชิ้นงานทดสอบ ใช้เพลาเหล็กกล้าเกรด AISI 1045 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร จำนวน 10 ท่อน

2)วัสดุประสาน ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งเกรด 500 มาตรฐาน DIN 8555: E6-UM-60 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

3)สารเคมีกัดกรด สารละลาย Nital 2% (กรดไนตริก 2% ผสมกับเอทานอล) สำหรับเปิดเผยแนวหลอมละลาย (Fusion Line) หลังการตัดขวางชิ้นงาน

6.3 แผนการทดลองและการเก็บข้อมูล

ผู้วิจัยกำหนดระเบียบวิธีการทดลองเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมด้วยมือและระบบอัตโนมัติ ดังนี้

1) จำนวนกลุ่มตัวอย่าง แบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ท่อน รวมทั้งสิ้น 10 ชิ้นงาน

2) การทดลองซ้ำ ในชิ้นงานแต่ละท่อนจะทำการเชื่อมพอกและ เก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

3) ตำแหน่งการวัดผล กำหนดจุดวัดความสม่ำเสมอของแนวเชื่อมและตัดขวางเพื่อกัดกรดตรวจสอบที่ตำแหน่ง ระยะ 50, 100, 150, และ 200 มิลลิเมตร จากปลายเพลา เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรของบ่อหลอมละลายตลอดแนวการทำงาน

6.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1)การวิเคราะห์เชิงสถิติของคุณภาพแนวเชื่อม ผู้วิจัยดำเนินการเปรียบเทียบคุณภาพแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมด้วยมือและระบบอัตโนมัติ โดยใช้สถิติทดสอบ t-test (Independent Samples) เพื่อยืนยันความมีนัยสำคัญของความแตกต่าง ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติและคุณภาพแนวเชื่อม (Mean ± S.D.)

ตัวแปรที่ทดสอบ	การเชื่อมด้วยมือ (n=10)	ระบบอัตโนมัติ (n=10)	p-value
ความสูงแนวเชื่อม (mm)	4.52 ± 0.85	3.85 ± 0.12	< 0.01*
ความลึกการหลอมละลาย (mm)	1.20 ± 0.30	2.15 ± 0.15	< 0.01*
ความเรียบผิวหลังการกลึง (Ra)	3.52 ± 0.45	1.24 ± 0.08	< 0.01*

**มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01*

จากผลการทดสอบใน ตารางที่ 3 พบว่าระบบอัตโนมัติมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (*S.D.*) ของความสูงแนวเชื่อมเพียง 0.12 มม. ซึ่งต่ำกว่าการเชื่อมด้วยมืออย่างเห็นได้ชัด ข้อมูลนี้ยืนยันว่าการควบคุมมุมตั้งฉากและการเดินแนวถอยหลังคงที่ช่วยลดความแปรปรวนจากปัจจัยมนุษย์ได้

ประสิทธิภาพการหลอมละลาย ระบบอัตโนมัติให้ความลึกการหลอมละลายเฉลี่ยสูงถึง 2.15 มม. เมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยมือที่ได้เพียง 1.20 มม. ซึ่งการที่ค่า $p<0.01$ เป็นการยืนยันว่าระบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการสร้างการประสานตัวของเนื้อโลหะที่ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คุณภาพผิวงาน ค่าความเรียบผิว (Ra) ที่ต่ำเพียง 1.24 ของระบบอัตโนมัติ ช่วยลดแรงกระแทกต่อเครื่องมือตัดในขณะกลึงแต่ง และช่วยให้สามารถกลึงล้างผิวให้เรียบได้โดย ไม่ให้ถึงเนื้อวัสดุเดิม เพื่อรักษาขนาดมาตรฐานของเพลาตามระเบียบวิธีวิจัยที่กำหนด

2) การทดสอบความแข็งทางโลหวิทยา เพื่อให้มั่นใจในคุณสมบัติของลวดเชื่อมเกรด 500

ESTACON 2026 | 17th

ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความแข็ง (Hardness Test) ในตำแหน่งต่างๆ บนหน้าตัดชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งในแต่ละเขตของแนวเชื่อม (หน่วย: Vickers Hardness - HV)

ตำแหน่งที่วัด	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)	หมายเหตุ
เนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal)	520 ± 15	คุณสมบัติลวดเกรด 500,,,
เขตร้อนจัด (HAZ)	285 ± 20	โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากความร้อน,,
วัสดุเดิม (Base Metal: AISI 1045)	195 ± 10	ค่าความแข็งมาตรฐานเหล็กกล้าคาร์บอน,,

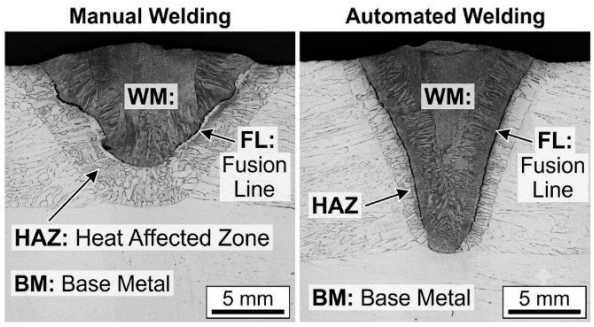
ตารางที่ 5 ค่าความแข็งในส่วน เนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) ที่วัดได้เฉลี่ย 520 ± 15 HV เป็นข้อมูลสำคัญที่ยืนยันว่าลวดเชื่อมเกรด 500 ที่เลือกใช้นั้นให้คุณสมบัติความแข็งตรงตามมาตรฐานวิศวกรรม ซึ่งความแข็งในระดับนี้ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของเพลาในงานอุตสาหกรรม

อิทธิพลของความร้อนต่อโครงสร้าง ในส่วนของ เขตร้อนจัด (Heat Affected Zone: HAZ) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 285 ± 20 HV ซึ่งสูงกว่าวัสดุเดิม เนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิในขณะเชื่อมที่ทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไป การระบุค่าความแข็งในโซนนี้เป็นไปตามที่กรรมการเสนอแนะเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติวัสดุอย่างละเอียด

ความสอดคล้องกับวัสดุพื้นฐาน ค่าความแข็งของ วัสดุเดิม (Base Metal) ที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1045 อยู่ที่ 195 ± 10 HV ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงมาตรฐานที่ช่วยให้เห็นความแตกต่างของชั้นเลเยอร์หลังการเชื่อมพอกได้อย่างชัดเจน

ความเชื่อมโยงทางโลหวิทยา ข้อมูลความแข็งทั้ง 3 โซนนี้ เมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับภาพถ่ายหน้าตัดที่ผ่านกระบวนการ กัดกรด (Etching) จะช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์ขอบเขตของ เส้นแนวหลอมละลาย (Fusion Line) และประสิทธิภาพการยึดเกาะของเนื้อโลหะได้อย่างเป็นรูปธรรมตามหลักวิชาการ

3) การวิเคราะห์หน้าตัดทางโลหวิทยา (Macro-examination)



ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบหน้าตัดแนวเชื่อม (Cross-section) ระหว่างการเชื่อมด้วยมือ (ซ้าย) และระบบอัตโนมัติ (ขวา)

จากภาพที่ 3 เห็นได้ชัดว่าระบบอัตโนมัติให้ลักษณะบ่อหลอมละลายที่สมมาตรและเส้น Fusion Line ที่สม่ำเสมอตลอดแนว แตกต่างจากการเชื่อมด้วยมือที่มีการหลอมละลายไม่คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์การเดินแนวถอยหลังและมุมตั้งฉาก 90 องศาที่กำหนดไว้

6.5 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้



ภาพที่ 4 แสดงเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติสำหรับการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรม

1)เครื่องต้นแบบให้คุณภาพแนวเชื่อมที่มีความสม่ำเสมอสูง โดยมีค่า S.D. ของความสูงแนวเชื่อมเพียง 0.12 มม. ซึ่ง ผ่านเกณฑ์สมมติฐาน ที่

ต้องการความแม่นยำสูงกว่าการเชื่อมด้วยมือเกินร้อยละ 30

2)ในด้านคุณภาพทางโลหวิทยา ระบบอัตโนมัติให้การหลอมลึกเฉลี่ย 2.15 มม. ซึ่งลึกกว่าการเชื่อมด้วยมือกว่าเท่าตัว ยืนยันถึงประสิทธิภาพการยึดเกาะของเนื้อโลหะที่แข็งแรง

3)ระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยลดเวลาปฏิบัติงานลงร้อยละ 37.5 และช่วยให้การกลึงล้างผิวเป็นไปอย่างแม่นยำโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อวัสดุเดิม

6.6 อภิปรายผล

จากการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยมีประเด็นสำคัญที่จะนำมาอภิปรายผลเชิงวิศวกรรม ดังนี้

1) อิทธิพลของพารามิเตอร์เชิงกลต่อเรขาคณิตแนวเชื่อม การที่เครื่องต้นแบบกำหนดให้หัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบ ถอยหลัง (Backward Motion) ส่งผลโดยตรงต่อการสร้างบ่อหลอมละลายที่ซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่อง (Bead Overlap) ทำให้เนื้อโลหะเชื่อมมีการเรียงตัวที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ การรักษามุมตั้งฉาก 90 องศา ช่วยให้พลังงานความร้อนจากอาร์กถ่ายเทลงสู่ศูนย์กลางของเพลาได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ความลึกการหลอมละลาย (Penetration) มีเสถียรภาพและลดการเกิดมลทินในแนวเชื่อมเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยมือที่มักมีการแกว่งของมุมและระยะอาร์ก [6], [7]

2) ความสอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย ผลการวิจัยยืนยันว่าระบบอัตโนมัติให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความสูงแนวเชื่อมเพียง 0.12 มม. เมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยมือที่ 0.85 มม. หากพิจารณาจากส่วนต่างความแปรปรวน พบว่าระบบอัตโนมัติเพิ่มความสม่ำเสมอได้มากกว่า 85% ซึ่ง สูงกว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 อย่างชัดเจน ความสม่ำเสมอนี้ส่งผลบวกต่อการกลึงแต่งผิว (Machinability) โดยช่วยลดแรงกระแทก (Impact Force) ต่อมีดกลึง ทำให้ได้ผิวสำเร็จ (Surface Finish) ที่มีคุณภาพสูง

3) ข้อจำกัดของงานวิจัย แม้ผลการทดลองจะให้ประสิทธิภาพที่น่าพึงพอใจ แต่ยังมี ข้อจำกัดด้านความหลากหลายของวัสดุ เนื่องจากในการวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะเพลาเหล็กกล้า AISI 1045 และลวดเชื่อมเกรด 500 เพียงชนิดเดียว ซึ่งในทางปฏิบัติพารามิเตอร์การหลอมละลายและคุณสมบัติทางโลหวิทยาอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเกรดวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน

6.7 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การพัฒนาเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติและการศึกษาในอนาคตมีความสมบูรณ์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางดังนี้

1) ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและกลไก

1.ควรพิจารณาติดตั้งระบบเซนเซอร์ควบคุมระยะอาร์ก (Arc Voltage Control) และการรักษาพิกัดมุมตั้งฉากของหัวเชื่อมแบบอัตโนมัติเพิ่มเติม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องในขณะทำงาน ซึ่งจะช่วยให้บ่อหลอมละลาย (Weld Pool) มีเสถียรภาพสูงสุดตลอดแนวเชื่อม

2.พัฒนาวัสดุโครงสร้างของชุดขับเคลื่อนให้มีความทนทานต่อความร้อนและการกัดกร่อนจากการใช้งานต่อเนื่อง รวมถึงการออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับหัวเชื่อมในกรณีที่ต้องปฏิบัติงานพอกผิวขนาดใหญ่

2) ด้านการขยายขอบเขตการทดสอบ

1.ควรมีการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการเชื่อมแบบอื่นๆ เช่น การเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG) หรือการเชื่อมทิก (TIG) เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราการหลอมละลายและคุณภาพเนื้อโลหะในมิติที่หลากหลายขึ้น

2.ควรศึกษาผลกระทบของการเลือกใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งในเกรดอื่นๆ นอกเหนือจากเกรด

500 เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของเนื้อเชื่อม (Hardness) และความสามารถในการกลึงแต่ง (Machinability) ในสภาวะภาระงานที่แตกต่างกัน

3) ด้านการวิเคราะห์เชิงลึก

1.ในการวิเคราะห์คุณภาพทางโลหวิทยา ควรเพิ่มการทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Test) ตลอดแนวรอยเชื่อมไปจนถึงเขตร้อนจัด (Heat Affected Zone: HAZ) เพื่อความแม่นยำในการระบุการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในที่อาจส่งผลต่อการแตกร้าว

2.การวัดความลึกของการหลอมละลาย (Penetration Depth) ผ่านโปรแกรม ImageJ ควรมีการกำหนดมาตราส่วนอ้างอิง (Reference Scale) ที่มีความละเอียดสูงขึ้น และเพิ่มจำนวนจุดเก็บข้อมูลเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

4) ด้านการนำไปใช้และบำรุงรักษา

1.ควรมีการจัดทำคู่มือมาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operating Procedure: SOP) ที่ระบุค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมกับขนาดของเพลาแต่ละประเภท เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตั้งค่าเครื่องได้อย่างแม่นยำ

2.ส่งเสริมการฝึกอบรมทักษะการตรวจสอบแนวเชื่อมเบื้องต้นด้วยวิธีทางกายภาพและโลหวิทยาอย่างง่าย เช่น การกัดกรด (Etching) ให้แก่ช่างเทคนิคในสถานประกอบการ เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพงานซ่อมบำรุงได้เองในพื้นที่

6.8 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

การดำเนินโครงการวิจัยนี้ไม่เพียงแต่เป็นการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้งานในเชิงปฏิบัติเท่านั้น แต่ยังมุ่งเน้นการสร้างองค์ความรู้และมาตรฐานทางวิศวกรรมที่สำคัญ ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมเครื่องกลและการควบคุมการเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านการออกแบบระบบกลไก (Mechanical Design) เพื่อควบคุมทิศทางและมุมของหัวเชื่อมให้มีความเสถียร ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาข้อจำกัดของปัจจัยมนุษย์ในงานเชื่อมได้อย่างเป็นรูปธรรม

2)การบูรณาการความรู้พหุวิทยาการ: โครงการนี้มีการผสานองค์ความรู้จากหลายสาขา ได้แก่ โลหวิทยา (Metallurgy) ในส่วนของการตรวจสอบแนวหลอมละลาย วิศวกรรมการผลิต ในส่วนของการเชื่อมพอกและการกลึงแต่ง (Machinability) และเทคโนโลยีการวัด (Metrology) ผ่านการใช้เครื่องมือวัดละเอียดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์

3)การสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อม งานวิจัยนี้ช่วยสร้างข้อมูลอ้างอิงเชิงลึกเกี่ยวกับ ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม (Consistency) และ ความลึกของการหลอมละลาย (Penetration Depth) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบอัตโนมัติและการเชื่อมด้วยมือ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหนัก

4)การพัฒนาระเบียบวิธีวิจัยเชิงประจักษ์ทางวิศวกรรม การนำเทคนิค การกัดกรด (Etching) มาใช้เพื่อเปิดเผยขอบเขตการหลอมละลาย และการใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อการวัดผลที่มีความแม่นยำทางสถิติ [3] ถือเป็นต้นแบบการวิจัยเชิงประยุกต์ที่เน้นการเก็บข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าอ้างอิง (Reference) ที่น่าเชื่อถือในระดับวิชาการ

5)การส่งเสริมการเรียนรู้แบบแก้ปัญหาเป็นฐาน (Problem-Based Learning: PBL) โครงการนี้เป็นตัวอย่างที่ดีของการจัดการเรียนการสอนที่เชื่อมโยงกับปัญหาจริงในอุตสาหกรรม สนับสนุนแนวทางการศึกษาตามกรอบมาตรฐานอาชีวศึกษาและวิศวกรรมศาสตร์ โดยมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำเพื่อแก้ปัญหาสังคมและชุมชน

6)ต้นแบบการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) ผลลัพธ์ของงานวิจัยเป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่มีความซับซ้อนน้อยแต่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถ

นำไปปรับใช้กับการซ่อมบำรุงพืชผลหรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมชนิดอื่นได้ในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อบุคคลและหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการ ดังนี้

ขอขอบพระคุณอย่างสูงเป็นกรณีพิเศษแด่ คณะอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต ทุกท่าน ได้แก่ นายคำรณ พ่วงเจริญ, นายอภิชานน เอี่ยมแก้ว, นายอานนท์ ทองคำ, นายวันชาติ พร้อมพันธ์, นายครรชิต เชิญทอง และนายวีรศักดิ์ วงษ์แหวน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาเชิงวิชาการ สนับสนุนองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมการผลิต และให้ข้อคิดเห็นอันมีค่ายิ่งในการออกแบบและทดสอบเครื่องเชื่อมพอกเพลาอัตโนมัติ ตลอดจนการตรวจสอบทางโลหวิทยาเพื่อให้ผลการวิจัยมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่คอยให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ อาทิ ผู้บริหาร ครู เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทางการศึกษาทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ในการดำเนินงาน ตลอดจน นักเรียน และนักศึกษา ของวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ทุกคนที่มีส่วนร่วมในการทดสอบและขับเคลื่อนให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสถาบันและวงการวิชาการสืบไป คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] กอบชัย เดชเกรียงไกรกุล. (2563). *เทคโนโลยีการเชื่อมและงานซ่อมบำรุงในอุตสาหกรรมหนัก*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์.

[2] ชัยวัฒน์ วงศ์ศรี. (2566). ***การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพแนวเชื่อมในทางโลหวิทยา***. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.

[3] วิชัย กุลวิจิตร. (2562). *หลักการออกแบบเครื่องจักรกลเพื่อการซ่อมบำรุง*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี.

[4] สมหมาย จันทรมาลา. (2564). การลดความบกพร่องในงานเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ. ***วารสารเทคโนโลยีการผลิต***, *12*(1), 55-62.

[5] อภิชาติ วงศ์สว่าง. (2565). การประเมินประสิทธิภาพการผลิตในงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหมุน. ***วารสารวิศวกรรมการผลิตและวัสดุ***, *8*(3), 110-125.

[6] Miller, D. S. (2024). *Automated Hardfacing and Surface Engineering for Rotating Machinery*. New York: Springer Engineering Series.

[7] Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. ***Nature Methods***, *9*(7), 671-675.

[8] Thompson, R., & Smith, J. (2025). Advanced Metallurgical Analysis of Automated Weld Deposits on Shafts. ***Journal of Industrial Maintenance and Repair***, *18*(2), 201-218.

การยกระดับสมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์และทักษะนวัตกร ผ่านโครงงานแผ่นมุ้งปิดช่องลม เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน

The Enhancement of Creative Mechanical Engineering Competency and Innovative Talent Through Mosquito Mesh Projects for Breeze Blocks to Improve Community Quality of Life

คำรณ พ่วงเจริญ[1]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : kum5711abc@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสานโดยใช้โครงงานเป็นฐานตามแนวคิด 6P Innovation Model 2) ศึกษาผลการจัดการเรียนรู้ผ่านโครงงานแผ่นมุ้งปิดช่องลม และ 3) เพื่อรับรองรูปแบบการจัดการเรียนรู้โดยคณะผู้เชี่ยวชาญ กลุ่มตัวอย่างคือ นักศึกษา ปวช. ชั้นปีที่ 3 จำนวน 11 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย รูปแบบ 6P Innovation Model แผนการจัดการเรียนรู้ 8 แผน และแบบประเมินสมรรถนะ ซึ่งผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญ 7 ท่าน (ค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67-1.00) สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าทีแบบกลุ่มเดียว (One-sample t-test) ผลการวิจัยพบว่า 1) คุณภาพของรูปแบบการเรียนรู้อยู่ในระดับ มากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.79) 2) สมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 86.95 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 และ 3) ทักษะนวัตกรในภาพรวม 6 ด้าน มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 89.46 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

คำสำคัญ: การเรียนรู้แบบผสมผสาน, โครงงานเป็นฐาน, ช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์, ทักษะนวัตกร, แผ่นมุ้งปิดช่องลม

Abstract

The objectives of this Research and Development (R&D) were to: 1) develop a blended project-based learning model using the 6P Innovation Model concept; 2) study the learning outcomes through the project of designing a vent-closing insect screen; and 3) validate the learning model by a panel of experts. The sample group, selected through purposive sampling, consisted of 11 third-year Vocational Certificate students. Research instruments included the 6P Innovation Model, eight lesson plans, and competency assessment forms, all validated by 7 experts (IOC range 0.67-1.00). Data were analyzed using Mean, Standard Deviation, and One-sample t-test. The research findings revealed that: 1) The quality of the learning model was at the "highest" level ($\overline{X}$ = 4.79). 2) The creative mechanical engineering competency had a mean score of 86.95%, which was significantly higher than the 80% criterion at the .01 level. 3) The overall innovator skills across 6 dimensions had a mean score of 89.46%, which exceeded the established criteria at a statistical significance level of .01

Keywords: Blended Learning, Project-Based Learning, Creative Mechanical Engineering Competency, Innovative Talent, Mosquito Mesh for Breeze Blocks

1. บทนำ

ในพื้นที่ชุมชนจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบปัญหาความรุนแรงของแมลงและยุงพาหะที่รุกรานเข้าสู่ที่พักอาศัยผ่านช่องลมอิฐบล็อก ซึ่งเป็นจุดอ่อนเชิงสถาปัตยกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสุขอนามัยของคนในชุมชนโดยตรง จากการสำรวจพื้นที่เบื้องต้นพบว่าการป้องกันแบบเดิมมักทำลายโครงสร้างอาคารและลดประสิทธิภาพการระบายอากาศ ผู้วิจัยจึงกำหนดโจทย์วิจัยเชิงพื้นที่ (Area-Based) เพื่อยกระดับสมรรถนะผู้เรียนจากงาน Routine สู่การเป็นนวัตกรที่แก้ปัญหาได้จริงตามยุทธศาสตร์ชาติ



ภาพที่ 1 ปัญหาช่องลมระบายอากาศที่ ยุง แมลง สามารถเข้ามาในบ้านพักได้

ผู้วิจัยบูรณาการแนวคิดการศึกษาฐานสมรรถนะ (Competency-based Education: CBE) ร่วมกับการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Blended Learning) ในสัดส่วน Online 70% : Onsite 30% โดยร้อยละ 70 เน้นการพัฒนาสมรรถนะทางปัญญา (Brain) ผ่านระบบดิจิทัลตามแนวคิดของ Garrison, D. R., & Vaughan, N. D. (2022), สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2568) และร้อยละ 30 เน้นทักษะฝีมือ (Hand) ในโรงฝึกงาน วิชัย จันทร์สว่าง. (2567) กระบวนการนี้ถูกขับเคลื่อนผ่าน 6P Innovation Model ที่สังเคราะห์มาจากทฤษฎีการสอนของ Joyce, B., Weil, M., & Calhoun, E. (2015) เพื่อเปลี่ยนบทบาทผู้เรียนจากผู้ปฏิบัติงาน (Operator) สู่ ผู้ร่วมสร้างสรรค์นวัตกรรม (Innovative Co-creator) อย่างเป็นระบบ (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ , 2568)

เพื่อให้การวิจัยมีมาตรฐานระดับสูง ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์เทียบเคียงเป้าหมาย (Benchmark Alignment Analysis) โดยกำหนดเกณฑ์ทักษะนวัตกรไว้ที่ร้อยละ 89.42 และคุณภาพชิ้นงานที่ร้อยละ 86.85 ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวเป็นการปรับปรุงและเทียบเคียงมาจากงานวิจัยต้นแบบของ ภูมิพัฒน์ วนพิพัฒน์พงศ์. (2567), อานนท์ พัฒนโชติ. (2567) เพื่อให้สอดคล้องกับความซับซ้อนของงานวิศวกรรมช่างกลและความประณีตสวยงาม (Elegant) ตามมาตรฐานอนุสิทธิบัตร

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสานโดยใช้โครงงานเป็นฐาน (Blended PjBL) ตามแนวคิด 6P Innovation Model สำหรับนักเรียนระดับ ปวช. สาขาช่างกลโรงงาน เพื่อส่งเสริมสมรรถนะเชิงสร้างสรรค์และทักษะนวัตกร

2.2 เพื่อศึกษาผลการจัดการเรียนรู้ โดยเปรียบเทียบทักษะนวัตกรและคุณภาพชิ้นงาน แผ่นมุ้งปิดช่องลมอิฐบล็อกสำเร็จรูป กับเกณฑ์มาตรฐานร้อยละ 80

2.3 เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญรับรองความเหมาะสมของรูปแบบการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันประสิทธิภาพก่อนนำไปใช้จริง

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 นักศึกษาที่เรียนด้วยรูปแบบผสมผสานผ่านโครงงาน แผ่นมุ้งปิดช่องลม มีทักษะนวัตกรทั้ง 6 ด้าน สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

3.2 ชิ้นงานนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพเชิงวิศวกรรมและความงามทางสถาปัตยกรรม สูงกว่า

เกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

3.3 นักศึกษามีสมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์และทักษะนวัตกร สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ซึ่งเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของรูปแบบการเรียนรู้ 6P Innovation Model

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1) ประชากร คือ นักเรียน ปวช. 3 สาขาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ภาคเรียนที่ 2/2568 จำนวน 26 คน

2) กลุ่มตัวอย่าง นักเรียนจำนวน 11 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือก (Inclusion Criteria) คือ 1) เป็นผู้ที่ผ่านรายวิชาพื้นฐานทางวิชาผลิตชิ้นส่วนด้วยเครื่องมือกลและมีประสบการณ์ฝึกปฏิบัติไม่น้อยกว่า 1 ภาคเรียน 2) มีความพร้อมในการบูรณาการสมรรถนะระดับสูง (Capstone Ready) และ 3) อาสาสมัครเข้าร่วมโครงการ

สำหรับนักเรียนอีก 14 คนที่ไม่ได้รับเลือกเนื่องจากยังอยู่ในช่วงการซ่อมเสริมทักษะพื้นฐานและยังไม่พร้อมสำหรับการฝึกปฏิบัติงานเครื่องมือกลชั้นสูงที่ต้องควบคุมความละเอียดแม่นยำ (Tolerance Control) อย่างใกล้ชิด ซึ่งขนาดกลุ่มตัวอย่าง n=11 เป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดที่ผู้วิจัยจะสามารถทำหน้าที่เป็นโค้ช (Coach) เพื่อควบคุมคุณภาพงานตามมาตรฐานอนุสิทธิบัตรได้อย่างทั่วถึงรายบุคคล

4.2 ขอบเขตด้านเนื้อหา

รายวิชาโครงงาน (รหัส 20102-8501) มุ่งเน้นการสร้างนวัตกรรม แผ่นมุ้งปิดช่องลมอิฐบล็อกสำเร็จรูป โดยครอบคลุม การเตรียมวัสดุ (พลาสวูด/อะลูมิเนียม) การออกแบบลายให้สัมพันธ์กับช่องลม และการติดตั้งกลไกยึดเกาะแบบไม่ทำลายผนัง

4.3 ตัวแปรที่ศึกษา

1)ตัวแปรต้น การจัดการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Blended PjBL) ตามแนวคิด 6P Innovation Model (ออนไลน์ ร้อยละ70, Onsite ร้อยละ 30)

2)ตัวแปรตาม สมรรถนะช่างกลเชิงสร้างสรรค์ (ผ่านคุณภาพชิ้นงาน) และทักษะนวัตกร 6 ด้าน (ตีความ, จินตภาพ, คิดเชิงระบบ, ทำงานเป็นทีม, นำเสนอ และประเมินผล)

4.4 ระยะเวลาและพื้นที่

ระยะเวลา 8 สัปดาห์ ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2568 พื้นที่ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน และพื้นที่ชุมชนในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์สำหรับการทดสอบจริง

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1)ระยะที่ 1 การพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้ (Research: R1) ในระยะนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจและสังเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน (Exploratory Research) เพื่อสร้าง พิมพ์เขียวทางปัญญา (Intellectual Blueprint) ประกอบด้วย

1.การวิเคราะห์ช่องว่าง (Gap Analysis) ศึกษาสภาพปัญหาและบริบทความต้องการ พบว่าผู้เรียนมีความชำนาญในงาน Routine แต่ขาดทักษะการแก้ปัญหาในบริบทใหม่ จึงกำหนดโจทย์วิจัยเชิงพื้นที่ (Area-Based) เรื่องปัญหาแมลงพาหะในชุมชน



ภาพที่ 2 ครูคำรณ พานักเรียนลงชุมชนดูปัญหายุงและแมลงเข้าทางช่องลม

2.การสังเคราะห์รูปแบบ บูรณาการทฤษฎีการสอนของ Joyce, B., Weil, M., & Calhoun, E. (2015) ร่วมกับแนวคิดการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Blended Learning) และการเรียนรู้โดยใช้โครงงานเป็นฐาน (PjBL) Garrison, D. R., & Vaughan, N. D. (2022) จนได้รูปแบบ 6P Innovation Model

3.การกำหนดสัดส่วนการเรียนรู้ กำหนดสัดส่วน Online ร้อยละ70 : Onsite ร้อยละ 30 เพื่อความยืดหยุ่นในการสืบค้นข้อมูล (Brain) และความเข้มข้นในการฝึกทักษะฝีมือช่าง (Hand) ในโรงฝึกงาน

4.การตรวจสอบความเที่ยงตรง นำรูปแบบและแผนการจัดการเรียนรู้ 8 แผน เสนอต่อคณะผู้เชี่ยวชาญ 7 ท่าน เพื่อหาดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ซึ่งพบค่าอยู่ระหว่าง 0.67 - 1.00

2)ระยะที่ 2 การทดลองใช้รูปแบบการจัดการเรียนรู้ (Development: D1) ผู้วิจัยนำรูปแบบที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่าง คือ นักศึกษา ปวช. ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาช่างกลโรงงาน จำนวน 11 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ดำเนินการ 8 สัปดาห์ ผ่านกระบวนการ 6P ดังนี้

(P1) Problem Identification ระบุ Pain Point ของชุมชนและตั้งคำถามนำทาง (Driving Question)

(P2) Planning ออกแบบวิศวกรรมด้วยโปรแกรม CAD และเลือกวัสดุคอมโพสิต (พลาสวูดและอะลูมิเนียม)

(P3) Process Implementationปฏิบัติงานเครื่องมือกลชั้นสูง (Milling/Lathe) เพื่อผลิตกลไก Adjustable Friction-fit

(P4) Product Review ตรวจสอบคุณภาพเชิงวิมัลและความแม่นยำ (Tolerance Control) ตามเกณฑ์อนุสิทธิบัตร ผู้วิจัยได้กำหนดกระบวนการทดลองภาคสนาม (Field Testing) อย่างเป็นระบบ ณ พื้นที่ชุมชนบ้านดอนทราย โดยทำการติดตั้งแผ่นมุ้งปิดช่องลมจำนวน 10 จุด และเก็บข้อมูลต่อเนื่องเป็นเวลา 4 สัปดาห์ (สัปดาห์ละ 3 วัน) ผ่านตารางบันทึกผลการสำรวจจำนวนแมลงพาหะ (ยุงลายและยุงก้นปล่อง) ที่หลุดรอดเข้าสู่ตัวอาคารในช่วงเวลา 17.00 – 19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่แมลงชุกชุมที่สุด ผลการทดลองพบว่าในทุกรอบการบันทึกไม่พบแมลงพาหะเล็ดลอดผ่านแผ่นมุ้งลวดที่มีความละเอียดสูงและกลไกการยึดเกาะที่แนบสนิท จึงยืนยันประสิทธิภาพการป้องกันแมลงได้ร้อยละ 100 ตามสมมติฐาน

(P5) Presentation สื่อสารคุณค่านวัตกรรมผ่านสื่อดิจิทัล (Canva/Video) ต่อชุมชน

(P6) Performance Evaluation ประเมินสมรรถนะองค์รวมและสะท้อนผลการเรียนรู้ (Reflection)

3)ระยะที่ 3 การรับรองรูปแบบและประเมินสัมฤทธิผล (Research: R2) เป็นการวิจัยเพื่อยืนยันมาตรฐาน (Validation Research) โดยมีขั้นตอนคือ

1.การรับรองโดยผู้เชี่ยวชาญ นำผลการทดลองเสนอต่อผู้ทรงคุณวุฒิ 7 ท่าน เพื่อประเมินความเหมาะสมเชิงระบบใน 4 มิติหลัก

2.การวิเคราะห์เทียบเคียงเป้าหมาย (Benchmark Alignment) นำผลคะแนนทักษะนวัตกรและคุณภาพชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ปรับปรุงจากงานวิจัยต้นแบบ (ร้อยละ 89.42 และ 86.85 ตามลำดับ) เพื่อยืนยันความเป็นเลิศทางวิชาชีพ

3.การพิสูจน์นวัตกรรม ตรวจสอบประสิทธิภาพของนวัตกรรม แผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตรเลขที่ 22029) ในการป้องกันแมลงพาหะได้ร้อยละ 100 โดยไม่ทำลายผนังอาคาร เพื่อสรุปผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตชุมชน

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล

1)แบบประเมินทักษะนวัตกร (Innovative Talent) เป็นแบบประเมินพฤติกรรมบ่งชี้ 30 รายการ ใช้เกณฑ์การให้คะแนนแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) โดยมีค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 และมีค่าความ

เชื่อมั่น (Cronbach's Alpha Coefficient) ของเครื่องมือเท่ากับ 0.89

2)แบบประเมินคุณภาพชิ้นงานนวัตกรรม ครอบคลุม 4 ด้าน 10 รายการ ใช้วิธีการประเมินผลตามสภาพจริง (Authentic Assessment) ผ่านเกณฑ์การให้คะแนนแบบรูบริกส์ (Rubric Score) 10 คะแนน เพื่อความแม่นยำในการวัดสมรรถนะช่างกลเชิงสร้างสรรค์

5.3 กลุ่มตัวอย่างและสถานที่ศึกษา

1)กลุ่มตัวอย่าง (Sample Group) กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2568 จำนวน 11 คน

1.วิธีการเลือก ใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

2.เหตุผลเชิงวิชาชีพ เนื่องจากเป็นผู้เรียนในภาคเรียนสุดท้ายที่มีความพร้อมในการบูรณาการสมรรถนะวิชาชีพ (Capstone Ready) และขนาดกลุ่มตัวอย่าง n=11 ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถปฏิบัติหน้าที่โค้ช (Coach) เพื่อควบคุมความแม่นยำทางวิศวกรรม (Tolerance Control) ได้อย่างใกล้ชิดรายบุคคล

3.ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยโดยยึดหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โดยมีการชี้แจงวัตถุประสงค์และขอความยินยอม (Informed Consent) จากนักเรียนและผู้ปกครองก่อนเริ่มโครงการ และเพื่อลดอคติ (Research Bias) จากการที่ผู้วิจัยเป็นผู้สอนเอง ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการประเมินผลแบบสามเส้า (Triangulation) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญร่วมวิชาชีพและตัวแทนจากชุมชนเป็นผู้ประเมินคุณภาพชิ้นงานร่วมกับผู้วิจัย เพื่อยืนยันความโปร่งใสและถูกต้องของคะแนนสมรรถนะ

2)สถานที่ศึกษาและพื้นที่เก็บข้อมูล (Setting) พื้นที่ห้องปฏิบัติการ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สำหรับขั้นตอนการผลิต (P3) และตรวจสอบคุณภาพ (P4) พื้นที่ชุมชน ชุมชนต้นแบบในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์สำหรับการสืบค้นปัญหา (P1) และการทดสอบใช้งานจริง (Field Testing) เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการป้องกันแมลงพาหะได้ร้อยละ 100

ผู้วิจัยใช้การทดสอบ One-sample t-test เพื่อพิสูจน์สัมฤทธิผลเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 80 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ **.01** ($t_{critical}$=2.764 ที่ df=10) เพื่อยืนยันว่าผลที่ได้ไม่ได้เกิดจากความบังเอิญ

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S.D./\sqrt{n}}$$

เมื่อ μ=80, n=11, และ $\overline{X}$ คือคะแนนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริง

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพที่ได้รับจากการทดลองใช้รูปแบบ 6P Innovation Model กับกลุ่มตัวอย่าง n=11 โดยใช้กระบวนการทางสถิติที่ได้มาตรฐานสากลเพื่อพิสูจน์สัมฤทธิผลของการจัดการเรียนรู้ ดังนี้

1) สถิติพรรณนา(Descriptive Statistics) ผู้วิจัยใช้ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อสรุปคุณลักษณะของข้อมูลสมรรถนะนวัตกรรมทั้ง 6 ด้าน และคุณภาพของชิ้นงานนวัตกรรม โดยมุ่งเน้นการวัดความคงเส้นคงวา (Consistency) ของทักษะฝีมือช่างรายบุคคล เพื่อยืนยันว่าผู้เรียนมีพัฒนาการที่สอดคล้องกันตามมาตรฐานวิชาชีพ

2) สถิติอ้างอิง (Inferential Statistics) ผู้วิจัยใช้การทดสอบ One-sample t-test เพื่อพิสูจน์สัมฤทธิผลเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 80 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ .01 (α=.01) ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่เข้มงวดเพื่อยืนยันว่าผลสัมฤทธิ์ไม่ได้เกิดขึ้นโดยบังเอิญ โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S.D./\sqrt{n}}$$

เมื่อ μ=80, n=11, และองศาอิสระ (df) =10 โดยมีค่าวิกฤต $t_{critical}$=2.764

ผู้วิจัยใช้การทดสอบ One-sample t-test เพื่อพิสูจน์สัมฤทธิผลเทียบกับเกณฑ์ร้อยละ 80 โดยก่อนดำเนินการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล (Normality Test) ด้วยสถิติ Shapiro-Wilk พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ และได้ทำการแปลงคะแนนดิบ (Raw Score) จากแบบประเมินที่มีคะแนนเต็ม 100 คะแนน ให้เป็นค่าร้อยละเพื่อความแม่นยำในการเปรียบเทียบกับค่าวิกฤต $t_{critical}$ = 2.764 ที่องศาอิสระ df = 10

3)การวิเคราะห์เทียบเคียงเป้าหมาย (Benchmark Alignment Analysis) เพื่อให้การวิจัยมีมาตรฐานระดับสูง ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับค่าเป้าหมาย (Target Benchmark) โดยเทียบเคียงจากงานวิจัยต้นแบบของภูมิพัฒน์ วนพิพัฒน์พงศ์. (2567) และปรับให้เข้ากับความซับซ้อนของงานวิศวกรรมช่างกล (Physical Craftsmanship)

ตารางที่ 1 สรุปเกณฑ์การเทียบเคียงเป้าหมายสมรรถนะสู่ความเป็นเลิศ (Benchmark Alignment)

ตัวแปรตามที่ศึกษา	เกณฑ์ทั่วไป	เป้าหมายปรับปรุง (คารณ, 2568)	เหตุผลความสอดคล้องเชิงวิจัย
ทักษะนวัตกร (6 ด้าน)	80%	**89.42%**	เน้นความลุ่มลึกในการตีความโจทย์ปัญหาและผลกระทบต่อชุมชน,
คุณภาพชิ้นงานนวัตกรรม	80%	**86.85%**	เน้นความแม่นยำเชิงวิศวกรรม (Tolerance) และมาตรฐานตามแนวทางอนุสิทธิบัตร,
ระดับนัยสำคัญทางสถิติ	.05	**.01**	เพิ่มความเข้มงวดในการทดสอบทางสถิติเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของรูปแบบ 6P,

5.5 การออกแบบและพัฒนา

การพัฒนานวัตกรรมทางการศึกษาและชิ้นงานวิศวกรรมในงานวิจัยนี้ ถูกขับเคลื่อนด้วยพลวัตของ 6P Innovation Model ภายใต้ระบบนิเวศการเรียนรู้แบบผสมผสาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1)การสังเคราะห์รูปแบบการจัดการเรียนรู้ (6P Process Blueprint) ผู้วิจัยบูรณาการแนวคิดของ Joyce, Weil, and Calhoun (2015) ร่วมกับทฤษฎีการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) เพื่อสร้างขั้นตอน 6P ที่เปลี่ยนบทบาทผู้เรียนจาก ผู้ปฏิบัติงาน (Operator) สู่การเป็น นวัตกร (Innovator) สัดส่วนการเรียนรู้ (Blended Ratio) 70:30: กำหนดเป็น Online ร้อยละ70 สำหรับการพัฒนาสมรรถนะทางปัญญา (Brain) และ Onsite ร้อยละ 30 สำหรับการฝึกทักษะฝีมือ (Hand) ในโรงฝึกงาน

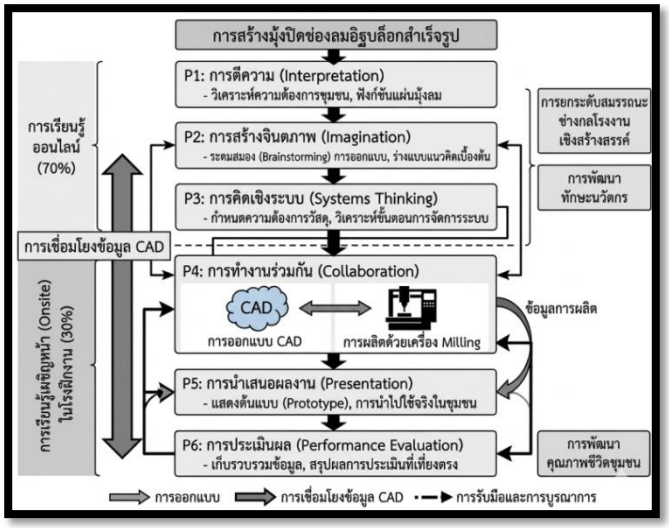
2)การออกแบบนวัตกรรม แผ่นมุ้งปิดช่องลม (Engineering Specification) ชิ้นงานนวัตกรรมได้รับการพัฒนาตามแนวทาง อนุสิทธิบัตร (เลขที่ 22029) โดยมีจุดเด่นเชิงวิศวกรรมที่สำคัญคือ กลไกการยึดเกาะแบบไม่ทำลายผนังอาคาร (Non-destructive Fastening)



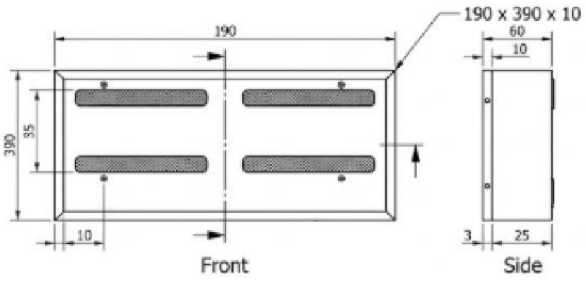
ภาพที่ 3 แผ่นพลาสวูด (Plastwood) ฉลุลายอิฐ

1.วัสดุศาสตร์เลือกใช้แผ่นพลาสวูด (Plastwood) และฉากอะลูมิเนียมเนื่องจากมีความทนทานต่อสภาพอากาศสูงและง่ายต่อการแปรรูปด้วยเครื่องมือกล

2.กลไก Adjustable Friction-fit ออกแบบขาเสียบฉากอะลูมิเนียมที่ปรับบิดได้เพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction) ในการยึดเกาะกับรูอิฐบล็อกช่องลมมาตรฐานได้ ร้อยละ100 โดยไม่ต้องเจาะผนัง



ภาพที่ 4 กระบวนการออกแบบและพัฒนานวัตกรรม



ภาพที่ 5 แสดงรายละเอียดชิ้นงานก่อนทดลอง

นวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมีมาตรฐาน ความประณีตสวยงาม (Elegant) สอดคล้องกับแนวคิดของ Besemer, S. P. (1997) โดยหลอมรวมฟังก์ชันการป้องกันแมลงพาหะ ร้อยละ100 เข้ากับสุนทรียภาพทางสถาปัตยกรรม (Architectural Aesthetics) ได้อย่างลงตัว

5.6 การออกแบบกลไกและเกณฑ์การเลือกเทคโนโลยี

หัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้คือการเปลี่ยนผ่านจาก งานช่างตามสั่ง สู่ นวัตกรรมเชิงวิศวกรรม โดยยึดหลัก ความประณีตสวยงาม (Elegant) และประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical Efficiency) ดังนี้

1)กลไกการยึดเกาะ Adjustable Friction-fit ผู้วิจัยและผู้เรียนร่วมกันพัฒนา กลไกขาเสียบฉากอะลูมิเนียมแบบปรับบิดได้ เพื่อแก้ปัญหา (Pain Point) ของการเจาะผนังอาคารแบบเดิม กลไกนี้อาศัยหลักการแรงเสียดทาน (Friction Force) ในการยึดเกาะ โดยมีสมการการออกแบบเบื้องต้นคือ

$$F_{static} \geq W_{unit} + F_{wind}$$

เมื่อ *Fstatic* คือ แรงเสียดทานสถิตระหว่างขาอะลูมิเนียมกับอิฐบล็อก *Wunit* คือ น้ำหนักของนวัตกรรม และ *Fwind* คือ แรงปะทะจากลม

ตารางที่ 2 เกณฑ์การเลือกวัสดุอุตสาหกรรมสำหรับนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม

วัสดุ (Materials)	เกณฑ์การคัดเลือก (Criteria)	คุณสมบัติเชิงวิศวกรรม	เหตุผลการเลือกใช้
แผ่นพลาสวูด (Plastwood)	Machinability & Durability	ต้านทานความชื้นและไอเค็มทะเล	ง่ายต่อการฉลุลายด้วยเครื่องกัด (Milling) ให้สัมพันธ์กับสถาปัตยกรรม
ฉากอะลูมิเนียม (Aluminum Angle)	Weight & Tensile Strength	น้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม มีความยืดหยุ่น	ใช้สร้างกลไกขาเสียบแบบ Flexible Adjustment เพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน
มุ้งไนลอนละเอียด (High Mesh Count)	Filter Efficiency	ป้องกันพาหะขนาดเล็กได้ 100%	คงประสิทธิภาพการระบายอากาศ (Air Flow) ในระดับสูง

5.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

การวิจัยระยะที่ 2 (D1) และ 3 (R2) ได้พิสูจน์สัมฤทธิผลเชิงประจักษ์ผ่านการทดสอบในพื้นที่จริง ณ ชุมชนบ้านดอนทราย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีผลลัพธ์ที่สำคัญดังนี้

1) ประสิทธิภาพการป้องกันแมลงพาหะ ผลการทดสอบภาคสนาม (Field Testing) ยืนยันว่านวัตกรรมสามารถป้องกันยุงลาย (Aedes) และยุงก้นปล่อง (Anopheles) ได้ ร้อยละ 100 ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคระบาดในกลุ่มเป้าหมายได้ตามทฤษฎีของ Njie (2010)

2) ความแม่นยำทางเทคนิคและสมรรถนะนวัตกร จากการวิเคราะห์ด้วยสถิติ One-sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ .01 พบว่านวัตกรรมบรรลุเกณฑ์ Benchmark Alignment ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลการประเมินทักษะนวัตกรรายด้านของกลุ่มตัวอย่าง (*n*=11)

ด้านของทักษะนวัตกร	คะแนนร้อยละ	S.D.	ผลการทดสอบเทียบเกณฑ์ 80%
1. การทำงานร่วมกัน (Collaboration)	92.80	3.52	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
2. การสร้างจินตภาพ (Imagination)	91.00	4.10	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
3. การคิดเชิงระบบ (Systems Thinking)	89.20	4.65	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
4. การนำเสนอคุณค่า (Presentation)	88.50	4.80	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
5. การตีความปัญหา (Interpretation)	87.90	5.12	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
6. การประเมินผล (Evaluation)	87.40	5.25	สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
รวมเฉลี่ยภาพรวม 6 ด้าน	**89.46**	**4.55**	**สูงกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01**

ผลการวิจัยพบว่าทักษะนวัตกรทั้ง 6 ด้าน สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยทักษะการทำงานร่วมกันมีคะแนนเฉลี่ยสูงสุด (92.80%) รองลงมาคือการสร้างจินตภาพ (91.00%)



ภาพที่ 6 ติดตั้งโดยไม่ทำลายผนังของอาคาร และถอดล้างทำความสะอาดได้ตลอดอายุการใช้งาน



ภาพที่ 7 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพยืนยันผลร้อยละ 100

ความสำเร็จของกลไกขาเสียบฉากอะลูมิเนียมและการออกแบบที่ไม่ทำลายโครงสร้างอาคาร ส่งผลให้นวัตกรรมได้รับการรับรอง อนุสิทธิบัตร เลขที่ 22029 ซึ่งเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์

5.8 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา (R&D) ตามกระบวนการ 3 ระยะ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลสัมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้รูปแบบ 6P Innovation Model ได้ดังนี้

1)คุณภาพของรูปแบบการจัดการเรียนรู้ คณะผู้ทรงคุณวุฒิ 7 ท่านให้การรับรองรูปแบบการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสานโดยใช้โครงงานเป็นฐาน (6P Innovation Model) และแผนการจัดการเรียนรู้ 8 แผน ในภาพรวมอยู่ในระดับ มากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.79,

S.D. = 0.43) ยืนยันถึงความสมเหตุสมผลเชิงทฤษฎีและมาตรฐานวิชาชีพชั้นสูง

2) สมรรถนะช่างกลโรงงานเชิงสร้างสรรค์: คุณภาพของชิ้นงานนวัตกรรม แผ่นมุ้งปิดช่องลมบรรลุเป้าหมายที่ท้าทาย โดยมีคะแนนเฉลี่ยร้อยละ 86.95 (S.D. = 4.12) ซึ่ง สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ชิ้นงานมีจุดเด่นคือกลไกยึดเกาะแบบไม่ทำลายผนังอาคาร (Non-destructive Fastening)

3) ทักษะนวัตกร (Innovative Talent) พัฒนาการของผู้เรียนในภาพรวม 6 ด้าน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 89.46 (S.D. = 4.55) ซึ่ง สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยมีทักษะการทำงานร่วมกันโดดเด่นที่สุด (92.80%) รองลงมาคือทักษะการสร้างจินตภาพ (91.00%)

4) ผลกระทบเชิงประจักษ์ นวัตกรรมได้รับอนุสิทธิบัตร เลขที่ 22029 และสามารถป้องกันแมลงพาหะได้ร้อยละ 100 โดยยังคงประสิทธิภาพการระบายอากาศและสุนทรียภาพทางสถาปัตยกรรม ช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตชุมชนต้นแบบได้อย่างยั่งยืน

5.9 อภิปรายผล

ความสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้สามารถอภิปรายเชิงวิชาการในมิติต่างๆ ได้ดังนี้

1) พลวัตของสัดส่วน 70:30 การจัดสัดส่วน Online ร้อยละ 70 ทำหน้าที่เป็น ฐานรากทางปัญญา (Brain) ช่วยให้ผู้เรียนมีเวลาในการสืบค้นวัสดุศาสตร์และฝึกออกแบบด้วยโปรแกรม CAD อย่างอิสระ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้คะแนนด้านการสร้างจินตภาพสูงถึงร้อยละ 91.00 ขณะที่ Onsite ร้อยละ 30 เน้น ทักษะฝีมือ (Hand) ในโรงฝึกงานเพื่อเปลี่ยนแบบดิจิทัลให้เป็นชิ้นงานจริง สอดคล้องกับแนวคิดของ ปณิตา วรรณพิรุณ. (2551) ที่ว่าการเรียนแบบผสมผสานช่วยทวีคูณทักษะการคิดขั้นสูง

2) แรงจูงใจจากปัญหาจริง (Area-based) การที่ผู้เรียนได้ลงพื้นที่พบ Pain Point ของชุมชนด้วยตนเอง (ขั้นตอน P1) ทำให้เกิดแรงจูงใจภายใน (Intrinsic Motivation) ที่ต้องการแก้ปัญหาให้คนในชุมชน ส่งผลให้ทักษะการทำงานร่วมกันโดดเด่นที่สุดถึงร้อยละ 92.80

3) บทบาทโค้ชและการเรียนรู้จากข้อผิดพลาด: การที่ผู้วิจัยเปลี่ยนจากผู้สอนเป็น โค้ช ในขั้นตอน P4 (Product Review) ช่วยให้ผู้เรียนเกิด Growth Mindset จากการแก้ไขความคลาดเคลื่อนทางวิศวกรรม (Tolerance Control) จนชิ้นงานมีความประณีต (Elegant) และได้รับอนุสิทธิบัตร ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์เทียบเคียงของ ภูมิพัฒน์ วนพิพัฒน์พงศ์. (2567) ที่เน้นเพียงการสร้างชิ้นงานทั่วไป อย่างไรก็ตาม ขนาดกลุ่มตัวอย่าง n=11 แม้จะมีข้อจำกัดในการขยายผลสู่ประชากรวงกว้าง แต่ในบริบทอาชีวศึกษาชั้นสูง จำนวนนี้ช่วยให้เกิดการควบคุมความแม่นยำรายบุคคล (Personalized Coaching) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.10 ข้อเสนอแนะ

1) ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1.การเตรียมความพร้อมครูและทรัพยากร ครูผู้สอนต้องปรับบทบาทเป็น โค้ช และมีความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ Smart Learning (อาทิ Google Classroom, Canva) เพื่อสร้างนิเวศการเรียนรู้ดิจิทัลร้อยละ 70 ให้มีประสิทธิภาพ

2.การยึดปัญหาจริงเป็นฐาน(Area-based Focus) ควรสนับสนุนให้ผู้เรียนลงพื้นที่สำรวจปัญหาจริงในชุมชนเพื่อสร้างแรงจูงใจในการแก้ปัญหามากกว่าการกำหนดโจทย์จากความถนัดของครูเพียงอย่างเดียว

3.การบูรณาการมาตรฐานทรัพย์สินทางปัญญา สถานศึกษาควรส่งเสริมการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานตามเกณฑ์อนุสิทธิบัตรหรือสิทธิบัตร เพื่อยกระดับงานโครงงานสู่นวัตกรรมเชิงพาณิชย์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

2) ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.เทคโนโลยีขั้นสูง ควรศึกษาวิจัยการนำ AI และ

Digital Twin มาช่วยในการจำลองพฤติกรรมเชิงกลของชิ้นส่วนนวัตกรรม (Simulation) ในขั้นตอน P2 เพื่อลดความสูญเสียในขั้นตอนการผลิตจริง

2.ความยั่งยืนของทักษะ (Longitudinal Study) ควรมีการศึกษาติดตามผลนักศึกษาที่ผ่านกระบวนการ 6P เมื่อเข้าสู่สถานประกอบการจริง เพื่อประเมินความคงทนของทักษะ (Skill Permanence) และผลกระทบต่ออุตสาหกรรม

3.การพัฒนาตัวแบบธุรกิจ (Business Model) ศึกษาวิจัยแนวทางการขยายผลนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลมสู่การผลิตเชิงอุตสาหกรรมและการยอมรับของตลาด เพื่อสร้างรายได้ให้แก่ผู้เรียนและสถานศึกษาอย่างยั่งยืน

5.11 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้าง พิมพ์เขียวทางปัญญา (Intellectual Blueprint) เพื่อขับเคลื่อนวงการอาชีวศึกษาและวิศวกรรมชุมชนผ่าน 3 มิติหลัก ดังนี้

1)การสร้างนวัตกรรมการเรียนรู้ (Pedagogical Paradigm Shift) การวิจัยพิสูจน์ประสิทธิภาพของ 6P Innovation Model ในรูปแบบ Blended Learning (Online ร้อยละ 70 : Onsite ร้อยละ 30) ที่มีผลการประเมินระดับสูงสุด ($\overline{X}$ = 4.79, S.D. = 0.43) โดยสัดส่วนดังกล่าวช่วยทวีคูณศักยภาพผู้เรียนจากการเป็นผู้ปฏิบัติงาน (Operator) สู่การเป็นผู้ร่วมสร้างสรรค์นวัตกรรม (Innovative Co-creator) ตามแนวคิดของ Tosi & Carroll (1982) [18]

2) การยกระดับมาตรฐานสมรรถนะและทรัพย์สินทางปัญญา โครงการนำกระบวนการ Benchmark Alignment มาใช้ยกระดับทักษะผู้เรียนสู่ระดับสากล โดยมีผลสัมฤทธิ์ด้านช่างกลเชิงสร้างสรรค์ (ร้อยละ86.95) และทักษะนวัตกร (ร้อยละ 89.46) สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด นอกจากนี้ยังได้รับอนุสิทธิบัตรเลขที่ 22029 ซึ่งยืนยันถึงความแม่นยำทางวิศวกรรมของกลไกการยึดเกาะแบบไม่ทำลายผนัง (Non-destructive Fastening Mechanism)

3) การหลอมรวมจริยธรรมวิศวกรรมและจิตสาธารณะ (3H Model): เป็นการบูรณาการองค์รวม Head-Hand-Heart เพื่อสร้างวิศวกรรมเพื่อสังคม โดยสามารถแก้ไขปัญหาการรุกรานของแมลงพาหะในชุมชนบ้านดอนทราย จ.ประจวบคีรีขันธ์ ได้สัมฤทธิ์ผลร้อยละ100 ควบคู่กับการรักษาคุณค่าทางสถาปัตยกรรม สะท้อนถึงการประยุกต์ใช้หลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงในการสร้างภูมิคุ้มกันด้านสุขอนามัย และเป็นต้นแบบกัลยาณมิตรทางการศึกษาระหว่างสถานศึกษาและชุมชนอย่างยั่งยืน



ภาพที่ 8 ป้องกันแมลงพาหะได้โดยยังคงสุนทรียภาพทางสถาปัตยกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อคณะครูและอาจารย์ในแผนกวิชาช่างกลโรงงาน และคณะผู้รับผิดชอบหลักสูตรปริญญาตรีเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาเชิงวิชาการอันลุ่มลึก และสนับสนุนการบูรณาการสมรรถนะวิชาชีพชั้นสูงเข้ากับระเบียบวิธีวิจัย จนทำให้นวัตกรรม แผ่นมุ้งปิดช่องลม บรรลุมาตรฐานตามแนวทางอนุสิทธิบัตร

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ ที่ได้ให้การส่งเสริมและสนับสนุนการจัดการเรียนรู้เพื่อยกระดับสมรรถนะวิชาชีพของผู้เรียนอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนขอขอบคุณคณะครู

ESTACON 2026 | 17th

เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทางการศึกษาทุกท่าน ที่ได้ร่วมสร้างบรรยากาศแห่งการแสวงหาความรู้และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องมือกลเป็น พื้นที่แห่งการคิดค้น (Innovation Space) อย่างดียิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบใจนักเรียน และนักศึกษาของวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ทุกคน โดยเฉพาะนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาช่างกลโรงงาน กลุ่มตัวอย่างทั้ง 11 คน ที่มีความมุ่งมั่นในการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และร่วมกันขับเคลื่อนโครงงานนวัตกรรมเพื่อสังคมจนประสบความสำเร็จอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งถือเป็นกัลยาณมิตรทางการศึกษาที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของชุมชนจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ให้ยั่งยืนสืบไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ปณิตา วรรณพิรุณ. (2551). *การพัฒนาโมเดลการเรียนรู้แบบผสมผสานเพื่อส่งเสริมทักษะการคิดขั้นสูง* [วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ].

[2] ภูมิพัฒน์ วนพิพัฒน์พงศ์. (2567). *นวัตกรรมการจัดการเรียนรู้เชิงวิศวกรรมสำหรับเยาวชน*. สำนักพิมพ์วิชาการศึกษาไทย.

[3] วิชัย จันทร์สว่าง. (2567). การบูรณาการสมรรถนะช่างกลโรงงานกับโครงงานเชิงสร้างสรรค์เพื่อชุมชน. *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอาชีวศึกษา*, 18(1), 112-128.

[4] สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา. (2568). *แนวทางการพัฒนานวัตกรอาชีวศึกษาสู่การแข่งขันในตลาดแรงงานสมัยใหม่*. โรงพิมพ์กระทรวงศึกษาธิการ.

[5] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2568). *แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (ฉบับปรับปรุง) ด้านการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์*. สำนักนายกรัฐมนตรี.

[6] อานนท์ พัฒนโชติ. (2567). *กลยุทธ์การจัดการเรียนรู้เชิงสร้างสรรค์: โมเดล 6P เพื่อยกระดับสมรรถนะช่างเทคนิค*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.

[7] Besemer, S. P. (1997). Creative Product Analysis Matrix: Testing the novelty, resolution and elaboration of products. *Creativity Research Journal*, 10(4), 287-295.

[8] Cohen, J. (2024). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge.

[9] Field, A. (2023). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. SAGE Publications.

[10] Fullan, M. (2024). *The New Meaning of Educational Change*. Teachers College Press.

[11] Garrison, D. R., & Vaughan, N. D. (2022). *Blended Learning in Higher Education: Framework, Principles, and Guidelines*. Jossey-Bass.

[12] Hattie, J. (2023). *Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement*. Routledge.

[13] Joyce, B., Weil, M., & Calhoun, E. (2015). *Models of Teaching* (9th ed.). Pearson.

[14] OECD. (2024). *The Future of Skills: Education for the Age of Artificial Intelligence*. OECD Publishing.

[15] Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2022). *Self-Determination Theory: Basic Psychological Needs in Motivation, Development, and Wellness*. Guilford Press.

[16] Schwab, K. (2023). *The Fourth Industrial Revolution: Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution*. Currency.

[17] Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2021). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (12th ed.). McGraw-Hill Education.

[18] Tosi, H. L., & Carroll, S. J. (1982). *Management*. John Wiley & Sons.

แนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษ: กรณีศึกษาคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

Carbon Footprint Reduction Strategies from Paper Consumption: A Case Study of the Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

กนกพร บุญจูบุตร[1], ธีรภัทร ลาไธสงค์[1], ธนาวุฒิ ไกรสำโรง[1], ดวงพยุง คุณเวียง[1] และ วรุทัย เดชตานนท์[1,*]

[1] สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: warutai.d@nrru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 08 7949 4153

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษขององค์กรจากการใช้กระดาษขององค์กร วิเคราะห์ประเภทกระดาษที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด และเสนอแนวทางลดการใช้กระดาษเพื่อลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร การศึกษาดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลปี พ.ศ. 2567 จากเอกสารการเบิกจ่ายวัสดุสำนักงานและข้อมูลการจัดซื้อ จากนั้นคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก วิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการพาเรโต ผลการศึกษาพบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้กระดาษ A4 ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด และการประเมินแนวทางลดการใช้กระดาษพบว่า แนวทางที่ 1 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 31.79 และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 20,104 บาทต่อปี ขณะที่แนวทางที่ 2 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 55.19 และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 36,340 บาทต่อปี ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบริหารจัดการการใช้กระดาษอย่างมีประสิทธิภาพสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการดำเนินงานขององค์กร

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์ การใช้กระดาษ ก๊าซเรือนกระจก พาเรโต มหาวิทยาลัยสีเขียว

Abstract

This study aimed to quantify the carbon footprint associated with organizational paper consumption, identify the paper types that contribute most significantly to greenhouse gas (GHG) emissions, and propose paper reduction strategies to mitigate the organization's carbon footprint. The study utilized organizational data from the 2024 fiscal year, including office supply withdrawal records and procurement data. Greenhouse gas emissions were quantified in accordance with the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO) guidelines for organizational carbon footprint assessment. Data were subsequently analyzed using the Pareto principle to identify the major sources of emissions. The results revealed that A4 paper consumption was the largest contributor to greenhouse gas emissions among all paper types. Two paper reduction scenarios were evaluated. Scenario 1 reduced

greenhouse gas emissions by 31.79% while generating annual cost savings of THB 20,104. Scenario 2 achieved a greater reduction in greenhouse gas emissions of 55.19% and yielded annual cost savings of THB 36,340. These findings demonstrate that effective paper consumption management can substantially reduce greenhouse gas emissions while simultaneously lowering organizational operating costs. The proposed strategies provide practical guidance for organizations seeking to improve environmental sustainability and resource efficiency through responsible paper management.

Keywords: Carbon Footprint, Paper Consumption, Greenhouse Gas Emissions, Pareto Analysis, Sustainable Organization.

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) และภาวะโลกร้อน (Global Warming) เป็นประเด็นสำคัญที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของประชากรอย่างต่อเนื่อง [1,2] องค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนจึงให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development) [3] โดยหนึ่งในเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม คือ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ซึ่งเป็นการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กรและแสดงผลในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2 Equivalent) [4]

สถาบันการศึกษาเป็นองค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาอย่างยั่งยืนและการสร้างจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อมแก่บุคลากรและนักศึกษา [3] แม้ว่าปัจจุบันหลายหน่วยงานจะมีการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการบริหารจัดการและการเรียนการสอนมากขึ้น แต่การใช้กระดาษยังคงเป็นกิจกรรมที่พบได้อย่างแพร่หลาย ทั้งในงานเอกสารราชการ งานประกันคุณภาพการศึกษา งานวิชาการ งานพัสดุ และกิจกรรมสนับสนุนการเรียนการสอน ซึ่งการผลิตและการใช้กระดาษล้วนมีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ [4,5]

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาเป็นสถาบันอุดมศึกษาที่มีภารกิจด้านการผลิตบัณฑิต การวิจัย และการบริการวิชาการแก่สังคม โดยในปี พ.ศ. 2567 พบว่าการใช้กระดาษของหน่วยงานต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 48,147.42 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$) ซึ่งคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้กระดาษจำนวน 1,856.80 $kgCO_2eq$ จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้กระดาษพบว่ากระดาษขาว A4 ขนาด 80 แกรม และกระดาษขาว A4 ขนาด 70 แกรม เป็นประเภทกระดาษที่มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด และเป็นแหล่งกำเนิดหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษภายในคณะ

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการใช้กระดาษของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ภายใต้ขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมประเภทที่ 3 (Scope 3) [4] รวมทั้งศึกษารูปแบบการใช้กระดาษในหน่วยงานต่าง ๆ และเสนอแนวทางลดการใช้กระดาษโดยการเปลี่ยนชนิดกระดาษและส่งเสริมการพิมพ์เอกสารสองด้าน เพื่อนำไปสู่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดค่าใช้จ่ายขององค์กร ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมและการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพตลอดจนเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาองค์กรสู่มหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University) ในอนาคต [3,6]

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 ขอบเขตการศึกษา

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กรในช่วงเวลาที่กำหนด โดยแสดงผลในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2eq) เพื่อใช้ประเมินผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ได้แบ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Scope 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง Scope 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน และ Scope 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ [4]

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาแนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมประเภทที่ 3 (Scope 3) จากกิจกรรมการใช้กระดาษภายในหน่วยงาน ประกอบด้วย งานธุรการ งานประกันคุณภาพการศึกษา งานวิชาการและสำนักงานคณะ งานพัสดุ และงานสนับสนุนการจัดการเรียนการสอน โดยใช้ข้อมูลการใช้กระดาษประจำปี พ.ศ. 2567

2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการจากเอกสารการเบิกจ่ายวัสดุสำนักงาน รายงานการจัดซื้อ และทะเบียนควบคุมวัสดุของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2567 โดยรวบรวมข้อมูลชนิดกระดาษ ปริมาณการใช้ และน้ำหนักของกระดาษแต่ละประเภท เพื่อนำมาคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) ได้แก่ ปริมาณการใช้กระดาษแต่ละชนิดภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

2) ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ของกระดาษแต่ละประเภท อ้างอิงจากฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

2.3 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถดำเนินการโดยใช้ข้อมูลกิจกรรม (Activity

Data) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) โดยผลลัพธ์จะแสดงในหน่วยกิโลกรัมหรือ ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$ หรือ tCO_2eq) [4,5]

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้กระดาษดำเนินการตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยใช้วิธี Activity-Based Calculation ผลการคำนวณจะแสดงในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้รับการตรวจสอบความถูกต้องและความครบถ้วนก่อนนำไปคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เพื่อลดความไม่แน่นอนของข้อมูลตามหลักการประเมินความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement Uncertainty) [8]

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษแต่ละประเภท เพื่อหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

2) วิเคราะห์พาเรโต (Pareto Analysis) เพื่อจัดลำดับชนิดกระดาษที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด และระบุสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร การวิเคราะห์พาเรโต (Pareto Analysis) เป็นเครื่องมือด้านการจัดการคุณภาพที่ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา โดยอาศัยหลักการ 80:20 ซึ่งระบุว่าปัญหาส่วนใหญ่มักเกิดจากสาเหตุเพียงส่วนน้อย [7] เครื่องมือนี้ช่วยให้องค์กรสามารถระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบสูงสุดและกำหนดแนวทางปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำการวิเคราะห์พาเรโตมาใช้ในการจัดลำดับชนิดของกระดาษตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อระบุประเภทกระดาษที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดมาตรการลดการใช้กระดาษ

3) วิเคราะห์ต้นทุนการใช้กระดาษ โดยคำนวณจากราคาจัดซื้อกระดาษ A4 ขนาด 70 แกรม และ 80 แกรม เพื่อประเมินผลประหยัดทางเศรษฐศาสตร์จากมาตรการลดการใช้กระดาษ

2.5 การพัฒนาแนวทางลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางลดการใช้กระดาษจำนวน 2 แนวทาง ได้แก่

แนวทางที่ 1 : เปลี่ยนการใช้กระดาษ A4 ขนาด 80 แกรม เป็นกระดาษ A4 ขนาด 70 แกรม และส่งเสริมการพิมพ์เอกสารสองด้านในส่วนงานที่สามารถดำเนินการได้ โดยงานพัสดุและงานเอกสารที่มีข้อกำหนดเฉพาะยังคงใช้การพิมพ์หน้าเดียว

แนวทางที่ 2 : กำหนดให้ทุกหน่วยงานใช้กระดาษ A4 ขนาด 70 แกรม และใช้การพิมพ์สองด้านในทุกกิจกรรมที่สามารถดำเนินการได้ เพื่อลดปริมาณการใช้กระดาษให้มากที่สุด

2.6 การประเมินผลลัพธ์

ผลลัพธ์ของแนวทางการลดการใช้กระดาษแต่ละแนวทางถูกนำมาเปรียบเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยประเมินจากตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ปริมาณการใช้กระดาษ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปริมาณและร้อยละการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อกระดาษและมูลค่าการ

ประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการดำเนินมาตรการ ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพของแต่ละแนวทางในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ควบคู่กับการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ อันจะนำไปสู่การคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการบริหารจัดการการใช้กระดาษภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และสนับสนุนการพัฒนาองค์กรสู่การเป็นมหาวิทยาลัยสีเขียวอย่างยั่งยืน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษ

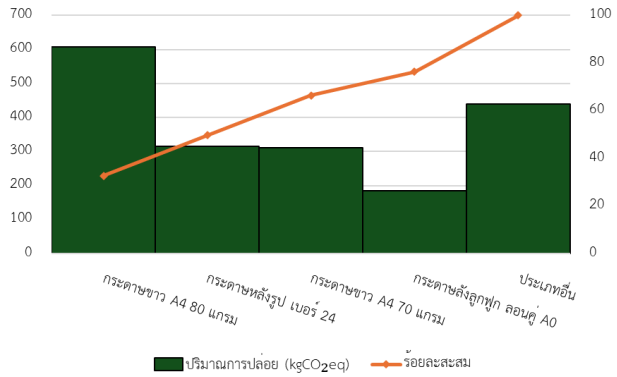
จากการรวบรวมข้อมูลการใช้กระดาษของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประจำปี พ.ศ. 2567 พบว่ามีการใช้กระดาษจำนวนหลายประเภท โดยสามารถคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้กระดาษภายใต้ขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมประเภทที่ 3 (Scope 3) ได้รวมทั้งสิ้น 1,856.80 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$) ดังแสดงในตารางที่ 1

3.2 ผลการวิเคราะห์พาเรโต

จากการจัดลำดับประเภทกระดาษตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพาเรโต พบว่ากระดาษชนิดที่เป็นสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ขององค์กร ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพาเรโต (Pareto Principle) ดังแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระดาษ ($kgCO_2eq$)

ลำดับ	ชนิดกระดาษ	ปริมาณการปล่อย
1	กระดาษขาว A4 80 แกรม	607.37
2	กระดาษหลังรูป เบอร์ 24	315.57
3	กระดาษขาว A4 70 แกรม	311.58
4	กระดาษลังลูกฟูก ลอนคู่ A0	183.63
5	กระดาษชานอ้อย	73.79
6	รวมประเภทอื่น	364.86
รวม		**1,856.80**



รูปที่ 1 พาเรโตประเภทกระดาษที่เป็นสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ผลการวิเคราะห์พบว่ากระดาษขาว A4 ขนาด 80 แกรม เป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด มีปริมาณการปล่อยเท่ากับ 607.37 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 32.71 ของปริมาณการปล่อยทั้งหมด รองลงมา ได้แก่ กระดาษหลังรูป เบอร์ 24 มีปริมาณการปล่อย 315.57 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 17.00 และกระดาษขาว A4 ขนาด 70 แกรม มีปริมาณการ

ปล่อย 311.58 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 16.78 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารวมกันพบว่ากระดาษทั้ง 3 ประเภทดังกล่าวมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมกันถึงร้อยละ 66.49 ของปริมาณการปล่อยทั้งหมด แสดงให้เห็นว่ากระดาษขาว A4 ขนาด 80 แกรม และกระดาษขาว A4 ขนาด 70 แกรม เป็นประเภทกระดาษที่มีการใช้งานในปริมาณสูงมาก จึงถูกเลือกเป็นกลุ่มเป้าหมายในการพัฒนาแนวทางลดการใช้กระดาษและลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยพบว่าในแต่ละส่วนงานที่มีการใช้กระดาษดังนี้

- ส่วนงานธุรการ ใช้กระดาษขาว A4 80 แกรม ทั้งหมด 3,600 แผ่น
- ส่วนงานประกันคุณภาพการศึกษา ใช้กระดาษขาว A4 80 แกรม ทั้งหมด 9,300 แผ่น และใช้กระดาษขาว A4 70 แกรม ทั้งหมด 7,500 แผ่น รวมทั้งหมด 16,800 แผ่น
- ส่วนงานวิชาการ และสำนักงานคณะ ใช้กระดาษขาว A4 80 แกรม ทั้งหมด 18,000 แผ่น และใช้กระดาษขาว A4 70 แกรม ทั้งหมด 6,000 แผ่น รวมทั้งหมด 24,000 แผ่น
- งานพัสดุ ใช้กระดาษขาว A4 80 แกรม ทั้งหมด 50,500 แผ่น และใช้กระดาษขาว A4 70 แกรม ทั้งหมด 93,500 แผ่น รวมทั้งหมด 144,000 แผ่น
- ส่วนงานสนับสนุนการจัดการเรียนการสอน ใช้กระดาษขาว A4 80 แกรม ทั้งหมด แผ่น 94,100 แผ่น

3.3 ผลการประเมินแนวทาง

แนวทางที่ 1 กำหนดนโยบายให้ใช้กระดาษขาวจาก 80 แกรม เป็นกระดาษขาว 70 แกรม และใช้งานกระดาษแบบพิมพ์ทั้งสองด้านสามารถนำมาใช้ในส่วนงานที่เอื้ออำนวยและไม่กระทบต่อกระบวนงาน แต่สำหรับงานพัสดุและงานธุรการบางประเภท ยังคงมีความจำเป็นต้องใช้กระดาษพิมพ์หน้าเดียว เพื่อความสะดวกในการจัดเก็บ ตรวจสอบ และดำเนินงานตามขั้นตอนที่กำหนด

แนวทางที่ 2 กำหนดนโยบายให้งานทุกส่วนงานใช้กระดาษขาว 70 แกรมเท่านั้น และงานทุกส่วนงานไม่ว่าจะเป็นงานพัสดุหรืองานธุรการให้ใช้การพิมพ์ทั้งสองด้านได้

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบจำนวนกระดาษในแต่ละแนวทาง (แผ่น)

รายการ	ปัจจุบัน	แนวทาง 1	แนวทาง 2
จำนวนกระดาษ	282,500	215,050	141,250
ลดลง	-	67,450	141,250
ลดลง (%)	-	23.88	50.00

ตารางที่ 3 ผลการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ($kgCO_2eq$)

รายการ	ปัจจุบัน	แนวทาง 1	แนวทาง 2
Carbon Footprint	918.95	626.85	411.76
ลดลง	-	292.10	507.19
ลดลง (%)	-	31.79	55.1

ตารางที่ 4 ผลการประหยัดค่าใช้จ่าย (บาท)

รายการ	ปัจจุบัน	แนวทาง 1	แนวทาง 2
ค่าใช้จ่ายกระดาษ	67,415	47,311	31,075
ประหยัดได้	-	20,104	36,340
ประหยัดได้ (%)	-	29.82	53.91

ผลการประเมินพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้กระดาษจาก 282,500 แผ่น เหลือ 215,050 แผ่น ลดลงจำนวน 67,450 แผ่น หรือคิดเป็นร้อยละ 23.88 ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงจาก 918.95 $kgCO_2eq$ เหลือ 626.85 $kgCO_2eq$ หรือลดลง 292.10 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 31.79

ในด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อกระดาษลดลงจาก 67,415 บาท เหลือ 47,311 บาท ทำให้สามารถประหยัดงบประมาณได้ 20,104 บาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 29.82

ผลการประเมินพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้กระดาษจาก 282,500 แผ่น เหลือ 141,250 แผ่น หรือลดลงร้อยละ 50 ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงเหลือ 411.76 $kgCO_2eq$ หรือลดลง 507.19 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 55.19

นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อกระดาษจาก 67,415 บาท เหลือ 31,075 บาท ทำให้ประหยัดงบประมาณได้ 36,340 บาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 53.91

3.4 อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่าการกำหนดนโยบายลดการใช้กระดาษและการส่งเสริมการพิมพ์เอกสารสองด้าน สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดค่าใช้จ่ายขององค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะแนวทางที่ 2 ซึ่งสามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของสถานการณ์ปัจจุบัน

ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดการจัดการสิ่งแวดล้อมในองค์กรและการพัฒนาองค์กรสีเขียว (Green Organization) ที่มุ่งเน้นการลดการใช้ทรัพยากรตั้งแต่ต้นทางมากกว่าการจัดการของเสียในปลายทาง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนามหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University) ที่ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและระบบเอกสารอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดการใช้กระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองแนวทาง พบว่าแนวทางที่ 2 ให้ผลลัพธ์ด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐศาสตร์ดีกว่าแนวทางที่ 1 อย่างชัดเจน เนื่องจากสามารถลดปริมาณการใช้กระดาษได้ถึงร้อยละ 50 ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 55.19 และลดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 53.91 อย่างไรก็ตาม การนำไปปฏิบัติจริงอาจต้องพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะงานและข้อกำหนดด้านเอกสารของแต่ละหน่วยงานร่วมด้วย

4. สรุปผล

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้กระดาษของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ผลการศึกษาพบว่าการใช้กระดาษก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 1,856.80 $kgCO_2eq$ ซึ่งพบว่ากระดาษขาว A4 ขนาด 80 แกรม และ 70 แกรม เป็นแหล่งกำเนิดหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยแนวทางที่ 1 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 292.10 $kgCO_2eq$ หรือร้อยละ 31.79 และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 20,104 บาท

ต่อปี ขณะที่แนวทางที่ 2 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 507.19 kgCO_2eq หรือร้อยละ 55.19 และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 36,340 บาทต่อปี จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการดำเนินงานขององค์กร

5. เอกสารอ้างอิง

[1] ศิวพันธุ์ ชูอินทร์. (2559). ภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2554). “แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization).” กรุงเทพฯ: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

[3] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2567). ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับองค์กร (Emission Factor). เข้าถึงเมื่อ 1 มิถุนายน 2569. เข้าถึงได้จาก https://www.tgo.or.th

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

[5] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2021). Education for Sustainable Development: A Roadmap. Paris: UNESCO Publishing.

[6] Green Metric World University Ranking. (2024). UI GreenMetric World University Rankings Guidelines. Accessed June 1. Available from https://greenmetric.ui.ac.id

[7] Juran, Joseph M., and A. Blanton Godfrey. (1999). Juran's Quality Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill.

[8] JCGM. (1995). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Geneva: Joint Committee for Guides in Metrology.

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยและน้ำยางธรรมชาติสำหรับสถานพยาบาล

Acoustic Performance Optimization of Sugarcane Leaf Fiber and Natural Rubber Latex Composites for Healthcare Facilities

ชนัญชิดา สุวรรณ[1], อรสิรินย์ ทองณรงค์[2], พีชชัยยะ นาสินส่ง[2], มณีรัตน์ ไชยภา[2]
ชลธิชา มูลศรี[2] และอามิณฑ์ หล้าวงศ์[1]*

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์
[2]โรงเรียนอนุกูลนารี อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์
*ผู้ติดต่อ: amin.la@ksu.ac.th, เบอร์โทร 081-799-5035

บทคัดย่อ

ปัญหามลพิษทางเสียงโดยเฉพาะเสียงความถี่ต่ำภายในสถานพยาบาลส่งผลกระทบต่อความสะดวกสบายของผู้ป่วยบุคลากรทางการแพทย์ และคุณภาพของสภาพแวดล้อมในการรักษา ขณะเดียวกันเส้นใยใบอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังไม่ได้รับการใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการลดระดับเสียงและหาแนวโน้มสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นลดเสียงจากวัสดุคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยร่วมกับน้ำยางธรรมชาติ ภายใต้ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการวิจัย 1) การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (Taguchi L9) เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของ 3 ปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลาการแช่เส้นใยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0, 30 และ 60 นาที) อัตราส่วนผสมน้ำยางธรรมชาติต่อเส้นใยใบอ้อย (50:50, 60:40 และ 70:30) และความถี่เสียงทดสอบ (80, 100 และ 160 Hz) 2) วิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA และ Response Optimizer ผลการทดลองพบว่าร้อยละการลดระดับเสียงอยู่ระหว่าง 2.76–42.88 โดยความถี่เสียงมีสัดส่วนต่อความแปรปรวนของความดังเสียงสะท้อนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 87.72 และมีแนวโน้มส่งผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 (P = 0.058) ขณะที่เวลาแช่ด่างและสูตรผสมไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมเชิงสถิติ คือ การแช่เส้นใยในสารละลายด่างประมาณ 50 นาที ใช้อัตราส่วนผสม 50:50 และทดสอบที่ความถี่ 80 Hz โดยแบบจำลองคาดการณ์การลดระดับเสียงร้อยละ 59.26 และค่าความดังเสียงสะท้อน 32.49 dBA ดังนั้น งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาวัสดุลดเสียงชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สอดคล้องกับเศรษฐกิจหมุนเวียน และยกระดับการทดสอบด้วยมาตรฐาน ISO 10534-2 ในงานวิจัยต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นลดเสียง เส้นใยใบอ้อย น้ำยางธรรมชาติ วิธีทากูชิ เสียงความถี่ต่ำ เศรษฐกิจหมุนเวียน

Abstract

Noise pollution, particularly low-frequency noise in healthcare facilities, affects patient comfort, healthcare personnel, and the quality of the therapeutic environment. At the same time, sugarcane leaf fiber, an agricultural waste material, remains underutilized. This study aimed to evaluate the sound-

level reduction capability and identify the trend of suitable conditions for producing sound-reducing panels made from sugarcane leaf fiber and natural rubber latex composites under laboratory testing conditions. The research procedure consisted of: 1) designing the experiment using the Taguchi L9 method to investigate the effects of three factors, namely fiber immersion time in sodium hydroxide solution (0, 30, and 60 minutes), the mixing ratio of natural rubber latex to sugarcane leaf fiber (50:50, 60:40, and 70:30), and test sound frequency (80, 100, and 160 Hz); and 2) statistically analyzing the data using ANOVA and Response Optimizer. The experimental results showed that the percentage of sound-level reduction ranged from 2.76% to 42.88%. Test frequency accounted for the largest proportion of variation in reflected sound level, contributing 87.72%, and showed a tendency to affect the response at the 0.10 significance level (P = 0.058). In contrast, alkaline immersion time and mixing ratio did not show statistically significant differences at the 0.05 level. The statistically optimal condition was identified as fiber immersion in alkaline solution for approximately 50 minutes, a mixing ratio of 50:50, and testing at a frequency of 80 Hz. Under these conditions, the model predicted a sound-level reduction of 59.26% and a reflected sound level of 32.49 dBA. Therefore, this study provides a preliminary guideline for developing bio-based sound-reducing materials from agricultural waste in accordance with the circular economy concept. Further research should improve the testing approach by adopting the ISO 10534-2 standard.

Keywords: Sound-level reduction panel, Sugarcane leaf fiber, Natural rubber latex, Taguchi method, Low-frequency noise, Circular economy

1. บทนำ

โรงพยาบาลเป็นสถานที่ที่ต้องการความเงียบจากเสียงรบกวนในระดับสูงเพื่อเอื้อต่อการพักฟื้นของผู้ป่วยและการปฏิบัติงานของบุคลากรทางการแพทย์ แต่อย่างไรก็ตามระดับเสียงเฉลี่ยในสถานพยาบาลมักพุ่งสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานที่องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 30–35 dB(A) ในห้องพักผู้ป่วย เนื่องจากมีต้นกำเนิดเสียงจากอุปกรณ์การแพทย์ การเคลื่อนย้ายเตียง สัญญาณเตือน และการสื่อสารภายในหอผู้ป่วย และการได้รับเสียงรบกวนที่มากเกินไปอย่างต่อเนื่องส่งผลกระทบเชิงลบทั้งทางสรีรวิทยาและจิตวิทยาอย่างรุนแรง โดยจะกระตุ้นการหลั่งฮอร์โมนคอร์ติซอล (Cortisol)ซึ่งเป็นฮอร์โมนความเครียดเพิ่มอัตราการเต้นของหัวใจ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนอนหลับ และส่งผลให้ระยะเวลาในการฟื้นตัวของผู้ป่วยยาวนานขึ้น Darbyshire และ Young [1]ได้เสนอในงานวิจัยพบว่าระดับเสียงภายในหอผู้ป่วยวิกฤตจำนวน 5 แห่งมีค่าสูงกว่า 45 dBA อย่างต่อเนื่อง และมีระดับเสียงสูงสุดมากกว่า 85 dBA นอกจากนี้ หลักฐานจากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเสียงภายในโรงพยาบาลสามารถกระตุ้นการตื่นตัวของเปลือกสมองและก่อให้เกิดการตอบสนองของระบบหัวใจและหลอดเลือดในระหว่างการนอนหลับ [2] ทั้งนี้มลพิษทางเสียงในโรงพยาบาลไม่ได้จำกัดอยู่เพียง

ESTACON 2026 | 17th

ระดับความดังในภาพรวม (Overall Sound Level) เท่านั้น แต่เสียงความถี่ต่ำ (Low-Frequency Noise) ในช่วงความถี่ 80 Hz, 100 Hz และ 160 Hz ที่มักเกิดจากระบบปรับอากาศและเครื่องจักรกลในอาคาร มีค่าสหสัมพันธ์กับความรู้สึกรำคาญทางจิตวิทยาของผู้ป่วยสูงถึง 0.95–0.97 เนื่องจากมนุษย์มีความไวต่อการรับรู้ความถี่ต่ำเหล่านี้และก่อให้เกิดสภาวะเครียดสะสมได้ง่าย จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเสียงรบกวนในหอผู้ป่วยวิกฤตส่งผลกระทบต่อคุณภาพการนอนหลับทั้งในกลุ่มบุคคลสุขภาพดีและผู้ป่วยวิกฤต [3] ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาวัสดุที่สามารถลดเสียงรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสุขอนามัย ความปลอดภัย และคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารเพื่อควบคุมปัญหามลพิษทางเสียงดังกล่าว การติดตั้งวัสดุดูดซับเสียงจึงเป็นวิธีที่แพร่หลายและมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม Yang และคณะ [4] ได้วิจัยพบว่า วัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยธรรมชาติหลายชนิดมีสมรรถนะใกล้เคียงกับวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้ผลิตจากใยแก้ว โฟมสังเคราะห์ หรือโพลียูรีเทน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูง ไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติ และที่สำคัญที่สุดคือ มีความเสี่ยงในการหลุดลอกของอนุภาคขนาดเล็กหรือการปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ซึ่งขัดต่อหลักการความปลอดภัยด้านสุขอนามัยในพื้นที่ควบคุมความสะอาดและปลอดเชื้อของโรงพยาบาล ด้วยเหตุนี้การวิจัยสำหรับการลดเสียงในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Acoustic Materials) จากเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural Waste) เช่น ชานอ้อย เส้นใยปาล์ม หรือฟางข้าว ซึ่งมีโครงสร้างแบบรูพรุน (Open-Cell Structure) ที่สามารถดักจับคลื่นเสียงและเปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านแรงเสียดทานหนืด (Viscous Damping) ได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยโดยเฉพาะภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีพื้นที่ปลูกอ้อยจำนวนมากและมีใบอ้อยเหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว การเผาเศษวัสดุจากอ้อยในพื้นที่เกษตรกรรมก่อให้เกิดฝุ่นละอองและก๊าซมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพประชาชน [5] การนำเส้นใยใบอ้อยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่มีความเหนียว ยืดหยุ่น และมีปริมาณเซลลูโลสสูง มาแปรรูปเป็นแผ่นลดเสียงร่วมกับน้ำยางธรรมชาติ จึงเป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าวัสดุท้องถิ่นและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวัสดุเส้นใยจากอ้อยมีศักยภาพทางอะคูสติก โดยขนาดเส้นใย ความหนาของแผ่น ช่องว่างอากาศ และโครงสร้างหลายชั้นมีผลต่อสมรรถนะการลดทอนเสียง โดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ [6]–[8] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยชุดทดสอบแบบประหยัดที่ความถี่ 80, 100 และ 160 Hz ซึ่งเลือกให้ครอบคลุมช่วงเสียงความถี่ต่ำที่สัมพันธ์กับระบบเครื่องกล ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ภายในอาคาร จึงยังไม่ใช่การทดสอบภาคสนามในสถานพยาบาลจริง วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือประเมินร้อยละการลดระดับเสียงและหาแนวโน้มสภาวะที่เหมาะสมของเวลาแช่ด่างและอัตราส่วนผสม เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาวัสดุลดเสียงชีวภาพตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อประเมินความสามารถในการลดระดับเสียงของแผ่นคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยและน้ำยางธรรมชาติภายใต้ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.2 เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มสภาวะที่เหมาะสมของเวลาแช่ด่าง อัตราส่วนผสม และความถี่ทดสอบที่มีผลต่อร้อยละการลดระดับเสียงและความดังเสียงสะท้อน

3. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาแผ่นวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยใบอ้อยและยางธรรมชาติเพื่อใช้ลดเสียงรบกวนในสถานพยาบาลเกี่ยวข้องกับองค์ความรู้หลายด้าน ได้แก่ สภาพแวดล้อมทางเสียงในโรงพยาบาล กลไกการดูดซับและลดทอนเสียงของวัสดุพรุน ตลอดจนโครงสร้างและการปรับสภาพเส้นใยลิกโนเซลลูโลส ดังนั้น การทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็น 3 ประเด็นพื้นฐานดังต่อไปนี้

3.1 เสียงรบกวนและเสียงความถี่ต่ำในสถานพยาบาล

เสียงเป็นคลื่นเชิงกลที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของแหล่งกำเนิดและแพร่กระจายผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ ของเหลว หรือของแข็ง คุณลักษณะสำคัญของเสียงประกอบด้วยความถี่ แอมพลิจูด ความยาวคลื่น และความเร็วของเสียง โดยความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์และแสดงจำนวนรอบการสั่นสะเทือนต่อวินาที ขณะที่ระดับความดันเสียงเป็นปริมาณที่ใช้บ่งชี้ความดังของเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1 เมื่อ Lp คือระดับความดันเสียง หน่วยเดซิเบล และ p คือค่าความดันเสียงประสิทธิผล และ p0 คือค่าความดันเสียงอ้างอิงในอากาศเท่ากับ 20 ไมโครปาสกาล เนื่องจากเดซิเบลเป็นมาตราส่วนลอการิทึม การเปลี่ยนแปลงของระดับเสียงจึงไม่สามารถตีความเป็นสัดส่วนเชิงเส้นของพลังงานเสียงได้โดยตรง เสียงรบกวนหมายถึงเสียงที่ไม่พึงประสงค์หรือเสียงที่รบกวนกิจกรรม การพักผ่อน การสื่อสาร หรือสุขภาวะของบุคคล ความเป็นเสียงรบกวนจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับระดับความดังเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับความถี่ ระยะเวลาการสัมผัส ความต่อเนื่อง ลักษณะการเกิดเสียง และความไวของผู้รับเสียง โรงพยาบาลเป็นพื้นที่ที่ต้องการสภาพแวดล้อมทางเสียงที่เหมาะสม เนื่องจากเสียงรบกวนอาจรบกวนการนอนหลับ การฟื้นตัว และการสื่อสารระหว่างผู้ป่วยกับบุคลากรทางการแพทย์

$$L_p = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad (1)$$

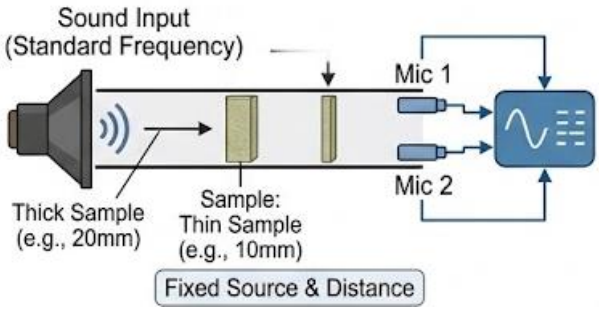
3.2 กลไกการดูดซับเสียงของวัสดุพรุนและตัวชี้วัดสมรรถนะทางเสียง

วัสดุดูดซับเสียงแบบพรุนเป็นวัสดุที่มีช่องว่างอากาศเชื่อมต่อกันภายในโครงสร้าง เมื่อคลื่นเสียงตกกระทบพื้นผิว อนุภาคอากาศจะเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนและช่องทางที่คดเคี้ยว การเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอากาศกับผิวของเส้นใย รวมทั้งเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับโครงสร้างของวัสดุ พลังงานเสียงส่วนหนึ่งจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในระดับต่ำ ส่งผลให้พลังงานเสียงสะท้อนกลับลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงเป็นตัวชี้วัดสัดส่วนพลังงานเสียงที่วัสดุไม่สะท้อนกลับจากพลังงานเสียงตกกระทบ โดยแสดงได้ดังสมการที่ 2 เมื่อ α คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ

เสียง Ii คือความเข้มเสียงตกกระทบ Ir คือความเข้มเสียงสะท้อน และ R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ค่า α มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าใกล้ 0 หมายถึงวัสดุสะท้อนเสียงเป็นส่วนใหญ่ ส่วนค่าใกล้ 1 หมายถึงวัสดุดูดซับพลังงานเสียงได้สูงภายใต้เงื่อนไขการทดสอบนั้น

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - |R|^2 \qquad (2)$$

การศึกษากลไกการดูดซับเสียงของวัสดุเส้นใย Delany และ Bazley [9] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์เพื่ออธิบายสมบัติทางเสียงของวัสดุเส้นใย โดยใช้ความต้านทานการไหลของอากาศเป็นตัวแปรสำคัญ แนวคิดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่มีช่องว่างมากเกินไปอาจปล่อยให้คลื่นเสียงผ่านโดยเกิดการสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อย ขณะที่วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงเกินไปอาจสะท้อนเสียงก่อนที่คลื่นเสียงจะเข้าสู่โครงสร้างภายใน ดังนั้น วัสดุจึงต้องมีความพรุนและความต้านทานการไหลของอากาศในระดับเหมาะสม และ Yang และ Li [10] ศึกษาเส้นใยรามี (Ramie) แบบเส้นใยแฟลกซ์ (Flax) และปอกระเจา โดยใช้ท่ออิมพีแดนซ์แบบไมโครโฟนสองตัว พบว่าโครงสร้างหลายระดับและโพรงภายในเส้นใยธรรมชาติมีส่วนช่วยเพิ่มการสูญเสียพลังงานเสียง ผลการทดลองยังสอดคล้องกับการคำนวณโดยแบบจำลองวัสดุพรุน แสดงให้เห็นว่าเส้นใยธรรมชาติสามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุที่มีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเสียงได้ โดยใชหลักการวัดร้อยละการลดระดับเสียงของวัสดุตัวอย่างในชุดทดสอบ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการวัดร้อยละการลดระดับเสียงของวัสดุตัวอย่างในชุดทดสอบ

สำหรับการควบคุมเสียงความถี่ต่ำ วัสดุพรุนทั่วไปมักให้สมรรถนะต่ำกว่าช่วงความถี่กลางถึงสูง เนื่องจากความยาวคลื่นมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความหนาของวัสดุ อย่างไรก็ตาม แผ่นคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์ยางธรรมชาติอาจมีพฤติกรรมแบบแผ่นเยื่อหรือแผ่นสั่นพ้อง (membrane/panel resonance) ได้ในบางความถี่ เมื่อแรงยืดหยุ่นของยาง ความหนาแผ่น และช่องว่างอากาศด้านหลังชิ้นงานมีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม พลังงานเสียงสามารถถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนผ่านการสั่นและการหน่วงของวัสดุได้มากขึ้น ผลตอบสนองที่สูงผิดปกติในช่วง 80 Hz จึงควรตีความอย่างระมัดระวังว่าอาจเป็นผลร่วมระหว่างสมบัติของวัสดุและการสั่นพ้องของชุดทดสอบ ซึ่งจำเป็นต้องยืนยันด้วยท่ออิมพีแดนซ์มาตรฐานหรือการควบคุมการสั่นพ้องของชุดทดสอบในงานวิจัยต่อไป

ทั้งนี้ควรแยกความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorption coefficient, α) และร้อยละการลดระดับเสียง (sound-level reduction, ΔL) ให้ชัดเจน ค่า α เป็นสัดส่วนพลังงานเสียงที่วัสดุดูดกลืนเมื่อเทียบกับพลังงานเสียงตกกระทบ และโดยทั่วไปวัดด้วยท่อ

อิมพีแดนซ์ตามมาตรฐาน ISO 10534-2 ด้วยวิธีไมโครโฟนสองตัว ส่วนค่า ΔL ในงานวิจัยนี้คำนวณจากความแตกต่างของระดับเสียงก่อนและหลังติดตั้งชิ้นงานในชุดทดสอบเฉพาะ ดังสมการที่ 3 ดังนั้น ค่า ΔL จึงสะท้อนสมรรถนะของระบบทดสอบ ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากตำแหน่งไมโครโฟน ระดับเสียงเริ่มต้น ช่องว่างอากาศ และการสั่นพ้องของท่อทดลอง ไม่สามารถตีความเทียบเท่าค่า α โดยตรงได้ การรายงานผลในงานวิจัยนี้จึงใช้คำว่า “ร้อยละการลดระดับเสียง” เป็นหลัก และเสนอให้ทดสอบซ้ำด้วยวิธีท่ออิมพีแดนซ์ตามมาตรฐาน ISO 10534-2 เพื่อยืนยันค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุโดยตรง

$$\Delta L = L_{\text{before}} - L_{\text{after}} \qquad (3)$$

3.3 เส้นใยใบอ้อย วัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติและการปรับสภาพด้วยด่าง

เส้นใยใบอ้อยเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ไข และสารสกัดจากพืช เซลลูโลสทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักที่ให้ความแข็งแรงแก่เส้นใย ขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินทำหน้าที่ยึดประสานโครงสร้างผนังเซลล์ Ratanamanee และคณะ [11] รายงานว่าใบอ้อยเป็นแหล่งเซลลูโลสที่สามารถแปรรูปเป็นวัสดุชีวภาพได้ และ Thongsomboon และคณะ [12] แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพวัสดุจากอ้อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเส้นใยได้ กระบวนการแช่ด่างหรือเมอร์เซอไรเซชัน (mercerization) ทำให้เส้นใยพองตัว กำจัดไข เฮมิเซลลูโลส และลิกนินบางส่วน เพิ่มความขรุขระและพื้นที่ผิวสัมผัสในระดับไมโคร อีกทั้งอาจทำให้โครงสร้างเซลลูโลสบางส่วนเปลี่ยนจาก Cellulose I ไปสู่ Cellulose II ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะกับเมทริกซ์ยางและความสามารถในการหน่วงการสั่นของแผ่นวัสดุ อย่างไรก็ตาม การแช่ด่างนานเกินไปอาจทำลายผนังเส้นใย ทำให้ความต่อเนื่องของโครงสร้างลดลงและทำให้สมรรถนะทางเสียงลดลงได้ จึงมีเหตุผลที่ต้องพิจารณาเวลาแช่ด่างที่เหมาะสมแทนการเพิ่มเวลาแช่เพียงอย่างเดียว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

แผนการทดลองของงานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาข้อจำกัดและเงื่อนไขการทดสอบประสิทธิภาพเชิงอคูสติก โดยมีรายละเอียดดังนี้

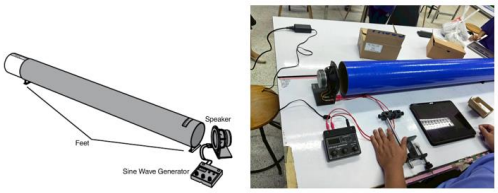
4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วย เส้นใยใบอ้อย น้ำยางพาราสด โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 11% w/w) สารเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติทางกลและทางชีวเคมี ได้แก่ เปลือกไข่และสารกันบูด และเครื่องวัดเสียง Economy Resonance Tube 9495 ชิ้นงานแต่ละสูตรถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นและตัดให้พอดีกับตำแหน่งติดตั้งของชุดทดสอบ โดยควบคุมวิธีขึ้นรูป ตำแหน่งติดตั้งตัวอย่าง ระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงกับเครื่องวัด และเงื่อนไขการวัดให้คงที่ ก่อนการวัดมีการตรวจสอบการทำงานของเครื่องวัดเสียงและบันทึกระดับเสียงเริ่มต้นของแต่ละความถี่ จากนั้นติดตั้งชิ้นงานและวัดระดับเสียงสะท้อนภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ค่าที่นำมาวิเคราะห์ในงานนี้เป็นร้อยละการลดระดับเสียงจากความแตกต่างของระดับเสียงก่อนและหลังติดตั้งชิ้นงาน ไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงตามมาตรฐาน ISO 10534-2 ทั้งนี้ เนื่องจากงานนี้เป็นการศึกษานำร่องด้วยชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ การรายงานขนาดชิ้นงาน ความหนา จำนวนซ้ำ ความ

หนาแน่นปรากฏ ความพรุน ช่องว่างอากาศด้านหลังชิ้นงาน และการสอบเทียบเครื่องมืออย่างละเอียดควรเพิ่มในการศึกษาต่อไปเพื่อให้สามารถทำซ้ำและอธิบายกลไกทางเสียงได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 การปรับสภาพเส้นใยใบอ้อยด้วยสารละลาย NaOH



รูปที่ 3 การทดสอบแผ่นลดเสียงด้วยเครื่องวัดเสียง Economy Resonance Tube 9495

4.2 การออกแบบการทดลอง

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ เพื่อประเมินผลของปัจจัยที่มีต่อความสามารถในการลดระดับเสียงความถี่ต่ำของแผ่นคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยผสมกับน้ำยางธรรมชาติ โดยกำหนดปัจจัยควบคุมจำนวน 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ได้แก่ เวลาในการแช่เส้นใยในสารละลาย NaOH คือ 0, 30 และ 60 นาที อัตราส่วนผสมน้ำยางพาราต่อเส้นใยใบอ้อย คือ 50:50 เป็นสูตรที่ 1, 60:40 เป็นสูตรที่ 2 และ 70:30 เป็นสูตรที่ 3 และความถี่เสียงทดสอบ คือ 80, 100 และ 160 Hz ทำให้ได้แผนการทดลองแบบออร์โธกอนัล Taguchi L9 รวม 9 ชุดการทดลอง ทั้งนี้ ความถี่เสียงเป็นปัจจัยของสภาวะทดสอบ ไม่ใช่ปัจจัยการผลิตของแผ่นวัสดุ ผลการทดลองนำมาวิเคราะห์ด้วยตารางค่าเฉลี่ยการตอบสนอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ Response Optimizer เพื่อประเมินแนวโน้มสภาวะที่เหมาะสม โดยค่าที่ได้จาก Optimizer ถูกตีความเป็นค่าคาดการณ์ทางสถิติที่ต้องยืนยันด้วยการทดลองจริงที่สภาวะที่เสนอ

$$\mathrm{S/N} = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (4)$$

ตารางที่ 1 แผนการทดลองโดยวิธีการออกแบบการทดลอง Taguchi L9

แผนการทดลอง Taguchi	เวลาในการแช่สาร NaOH (นาที)	สูตรในการผสม (สูตรที่)	ความถี่เสียง (Hz)
L1	0	1	80
L2	0	2	100
L3	0	3	160
L4	30	1	100
L5	30	2	160
L6	30	3	80
L7	60	1	160
L8	60	2	80
L9	60	3	100

หมายเหตุ กำหนดให้ สูตรที่ 1 คือ 50:50 สูตรที่ 2 คือ 60:40 และ สูตรที่ 3 คือ 70:30



รูปที่ 4 ผลการอัดขึ้นรูปร้อนแผ่นลดเสียง

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย General Linear Model (GLM) ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความดังเสียงสะท้อน (Reflected Sound Level) พบว่า ความถี่เสียงเป็นปัจจัยที่มีสัดส่วนต่อความแปรปรวนของความดังเสียงสะท้อนมากที่สุด โดยมีค่า Adj SS เท่ากับ 1,411.64 จากค่ารวม 1,609.18 หรือคิดเป็นร้อยละ 87.72 ของความแปรปรวนทั้งหมด และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.058 ดังนั้น หากใช้เกณฑ์นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จะยังไม่ถือว่ามีนัยสำคัญ แต่สามารถตีความได้ว่า “มีแนวโน้มส่งผลต่อการตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.10” หรือระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ขณะที่เวลาแช่ด่าง (P = 0.630) และสูตรการผลิต (P = 0.597) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ผลการทดลองร้อยละการลดระดับเสียงอยู่ระหว่าง 2.76–42.88 โดยเงื่อนไขที่ความถี่ 80 Hz ให้ค่าเฉลี่ยสูงกว่าความถี่อื่น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความถี่ 80 Hz เป็นช่วงความถี่ต่ำที่อาจสัมพันธ์กับการสั่นพ้องของชุดทดสอบ ผลดังกล่าวควรตีความเป็นสมรรถนะของระบบทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ ไม่ใช่สมบัติของวัสดุเพียงลำพัง

5.1 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อความดังเสียงสะท้อน

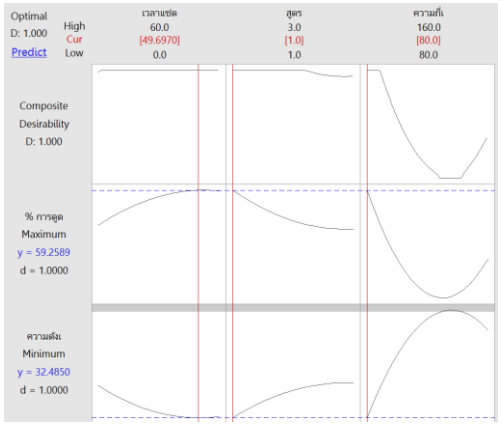
ค่าที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลองสำหรับความดังเสียงสะท้อนต่ำกว่าค่าต่ำที่สุดที่ตรวจวัดจริง ซึ่งสะท้อนว่าชุดปัจจัยจาก Response Optimizer ไม่ได้อยู่ในแผนการทดลอง L9 โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีการทดลองยืนยันผลก่อนสรุปว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะเหมาะสมขั้นสุดท้าย การวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงสำรวจพบว่า ความถี่เสียงมีสัดส่วนต่อความแปรปรวนประมาณร้อยละ 87.72 ส่วนสูตรและเวลาแช่ด่างมีสัดส่วนเพียงร้อยละ 3.66 และ 3.18 ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 5.43 ผลดังกล่าวยืนยันว่าความถี่ที่ใช้ทดสอบเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดผลการตรวจวัดในระบบนี้มากกว่าปัจจัยการผลิตของวัสดุ ดังนั้น การสรุปผลควรเน้นแนวโน้มของวัสดุและข้อจำกัดของชุดทดสอบควบคู่กัน

สูตรที่ 1 ให้ค่าร้อยละการลดระดับเสียงเฉลี่ยสูงที่สุดและความดังเสียงสะท้อนเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แสดงว่าสัดส่วนระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับเส้นใยใบอ้อยที่ 50:50 อาจให้สมดุลของโครงข่ายเส้นใย วัสดุประสาน และช่องว่างอากาศที่เหมาะสมต่อการลดทอนพลังงานเสียง วัสดุประสานในปริมาณที่พอเหมาะช่วยให้เส้นใยยึดติดและคงรูปเป็นแผ่น ขณะเดียวกันยังคงเหลือช่องทางให้คลื่นเสียงเข้าสู่โครงสร้างและสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานและการหน่วงของวัสดุ หากปริมาณยางธรรมชาติมากเกินไปอาจเคลือบเส้นใยและปิดช่องว่างอากาศ แต่หากมีเส้นใยมากเกินไปโดยมีวัสดุประสานไม่เพียงพอ แผ่นอาจไม่สม่ำเสมอหรือเกิดช่องทางขนาดใหญ่ที่ทำให้เสียงผ่านได้ง่าย อย่างไรก็ตาม สูตรการผลิตมีค่า P > 0.05 จึงควรตีความผลนี้เป็นแนวโน้มเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อมูลทดลองปัจจุบัน มากกว่าการยืนยันความแตกต่างเชิงสถิติอย่างเด็ดขาด

5.2 ผลการวิเคราะห์ Response Optimizer

การหาสภาวะที่เหมาะสมของแผ่นคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อย–ยางธรรมชาติดำเนินการด้วยวิธี Response Optimization โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองพร้อมกัน 2 ตัว ได้แก่ ร้อยละการลดระดับเสียงและความดังเสียงสะท้อน กำหนดเป้าหมายให้ร้อยละการลดระดับเสียงมีค่าสูงสุดและความดังเสียงสะท้อนมีค่าต่ำสุด ผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะที่

เหมาะสมเชิงสถิติประกอบด้วยเวลาแช่เส้นใยใบอ้อยในสารละลายด่างประมาณ 49.697 นาที สูตรส่วนผสมที่ 1 และความถี่เสียง 80 Hz โดยให้ค่า Composite Desirability เท่ากับ 1.0000 ดังแสดงในรูปที่ 6 ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นผลจากแบบจำลองและต้องยืนยันด้วยการทดลองจริงที่เวลาแช่ด่างประมาณ 50 นาที



รูปที่ 6 ผลของการ Optimization ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยของโปรแกรม Minitab

สภาวะที่แบบจำลองเสนอให้ใช้สูตรที่ 1 หรืออัตราส่วนน้ำยางธรรมชาติต่อเส้นใยใบอ้อย 50:50 ซึ่งสอดคล้องกับการอภิปรายด้านโครงสร้างรูพรุนและปริมาณวัสดุประสาน อย่างไรก็ตาม ผลที่ความถี่ 80 Hz ควรตีความอย่างระมัดระวัง เนื่องจากอาจเกิดจากผลร่วมระหว่างโครงสร้างรูพรุนของเส้นใย ความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติ ความหนาของแผ่น ช่องว่างอากาศ และการสั่นพ้องของชุดทดลอง ขณะที่ความถี่เสียงไม่ใช่ปัจจัยการผลิตที่สามารถกำหนดได้เหมือนเวลาแช่ด่างหรือสูตรส่วนผสม ดังนั้น ค่าความถี่ 80 Hz จึงควรถูกตีความว่าเป็นช่วงความถี่ที่ระบบทดสอบให้สมรรถนะสูงภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ไม่ใช่เงื่อนไขการผลิตของแผ่นวัสดุ

5.3 ข้อจำกัดของแบบจำลองและแนวทางการยืนยันผล

ผลจาก Response Optimizer คาดการณ์ร้อยละการลดระดับเสียงเท่ากับ 59.2589 และความดังเสียงสะท้อนเท่ากับ 32.4850 dBA ซึ่งสูงกว่าค่าสูงสุดที่วัดได้จริงในการทดลอง (42.88%) จึงไม่ควรนำไปสรุปเป็นผลทดลองจริงโดยตรง การทดลองยืนยันผลควรดำเนินการที่เวลาแช่ด่างประมาณ 50 นาที สูตรที่ 1 และความถี่ 80 Hz พร้อมควบคุมระดับเสียงเริ่มต้น ตำแหน่งไมโครโฟน และการสั่นพ้องของท่อทดลองให้ชัดเจน หากค่าที่ได้จริงใกล้เคียงกับค่าพยากรณ์จึงจะสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมขั้นสุดท้ายได้ นอกจากนี้ การศึกษาระยะต่อไปควรใช้ท่ออิมพีแดนซ์ตามมาตรฐาน ISO 10534-2 เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงโดยตรง และควรเพิ่มปัจจัยด้านความหนาแผ่น ช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และความต้านทานการไหลของอากาศ เพื่อแยกแยะสมบัติของวัสดุออกจากสมรรถนะของระบบทดสอบ

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประเมินความสามารถในการลดระดับเสียงของแผ่นคอมโพสิตเส้นใยใบอ้อยและน้ำยางธรรมชาติภายใต้ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แผนการทดลอง Taguchi L9 และวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA และ การหาค่าที่เหมาะสม Response Optimizer ผลการทดลองพบว่าร้อยละการลดระดับเสียงอยู่ระหว่าง 2.76–42.88 และความถี่เสียงเป็นปัจจัยที่มีสัดส่วนต่อความแปรปรวนของความดังเสียงสะท้อนมากที่สุด ร้อยละ 87.72 แต่ค่า P = 0.058 จึงควร

ตีความว่ามีแนวโน้มส่งผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 และยังไม่ถือว่ามีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ส่วนเวลาแช่ด่างและสูตรผสมไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 Response Optimizer เสนอเงื่อนไขเชิงสถิติที่เวลาแช่ด่างประมาณ 49.697 นาที หรือ 50 นาที สูตรที่ 1 (50:50) และความถี่ 80 Hz โดยคาดการณ์การลดระดับเสียงร้อยละ 59.26 อย่างไรก็ตาม ค่านี้เป็นค่าคาดการณ์และยังต้องยืนยันด้วยการทดลองจริง เนื่องจากสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงสูงสุด นอกจากนี้ ผลที่ความถี่ 80 Hz อาจมีอิทธิพลจากการสั่นพ้องของชุดทดสอบ จึงควรระบุว่าเป็นสมรรถนะของระบบทดสอบ ไม่ใช่สมบัติวัสดุโดยตรง ข้อเสนอแนะสำคัญคือควรทดสอบซ้ำด้วยมาตรฐาน ISO 10534-2 และเพิ่มการวัดความหนา ความหนาแน่น ความพรุน ช่องว่างอากาศ และจำนวนซ้ำของการทดลอง เพื่อยกระดับความแม่นยำ ความสามารถในการทำซ้ำ และการยอมรับในระดับสากล

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ชัชพงษ์ บางใบ สำหรับการอนุเคราะห์การใช้เครื่องทดสอบเสียงและให้คำปรึกษาทางฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ และขอขอบคุณผู้อำนวยการโรงเรียนอนุกูลนารีที่อนุเคราะห์ให้นักเรียนเข้าร่วมการทำวิจัยชิ้นนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Darbyshire, J. L., and Young, J. D. “An Investigation of Sound Levels on Intensive Care Units with Reference to the WHO Guidelines.” Critical Care, vol. 17, 2013, article R187. doi: 10.1186/cc12870.

[2] O. M. Buxton, J. M. Ellenbogen, W. Wang, A. Carballeira, S. O’Connor, D. Cooper, A. J. Gordhandas, S. M. McKinney, and J. M. Solet, “Sleep disruption due to hospital noises: A prospective evaluation,” Annals of Internal Medicine, vol. 157, no. 3, pp. 170–179, 2012, doi: 10.7326/0003-4819-157-3-201208070-00472.

[3] S. Horsten, L. Reinke, A. R. Absalom, and J. E. Tulleken, “Systematic review of the effects of intensive-care-unit noise on sleep of healthy subjects and the critically ill,” British Journal of Anaesthesia, vol. 120, no. 3, pp. 443–452, 2018, doi: 10.1016/j.bja.2017.09.006.

[4] T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petr, M. T. Noman, R. Mishra, and J. Militký, “Sound absorption properties of natural fibers: A review,” Sustainability, vol. 12, no. 20, Art. no. 8477, 2020, doi: 10.3390/su12208477.

[5] A. Junpen, J. Pansuk, and S. Garivait, “Estimation of reduced air emissions as a result of the implementation of the measure to reduce burned sugarcane in Thailand,” Atmosphere, vol. 11, no. 4, Art. no. 366, 2020, doi: 10.3390/atmos11040366.

[6] M. Haghighat, S. E. Samaei, S. Amininasab, M. Faridan, S. Mehrzad, M. J. Sheikhmozafari, and E. Taban, “The impact of fiber size on

the sound absorption behavior of composites made from sugarcane bagasse waste fibers," Journal of Natural Fibers, vol. 20, no. 1, Art. no. 2175760, 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2175760.

[7] F. C. B. Ole and E. M. Tan, "Determining the sound absorption coefficient of bagasse using the two-microphone transfer function method," Journal of Applied and Natural Science, vol. 16, no. 3, pp. 1071–1076, 2024, doi: 10.31018/jans.v16i3.5511.

[8] M. H. Beheshti, A. Khavanin, M. Jafarizaveh, and A. Tabrizi, "A novel acoustic micro-perforated panel based on sugarcane fibers and bagasse," Journal of Materials Science: Materials in Engineering, vol. 19, Art. no. 35, 2024, doi: 10.1186/s40712-024-00173-9.

[9] Delany, M. E., and Bazley, E. N. "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials." Applied Acoustics, vol. 3, no. 2, 1970, pp. 105–116. doi: 10.1016/0003-682X(70)90031-9.

[10] Yang, W. D., and Li, Y. "Sound Absorption Performance of Natural Fibers and Their Composites." Science China Technological Sciences, vol. 55, 2012, pp. 2278–2283. doi: 10.1007/s11431-012-4943-1.

[11] Ratanamanee, A., Suwannapan, S., Satchawan, S., and Inkum, R. "Synthesis and Properties of Carboxymethyl Cellulose from Agricultural Waste—Sugarcane Leaves." Cellulose Chemistry and Technology, vol. 56, nos. 5–6, 2022, pp. 509–516.

[12] Thongsomboon, W., Baimark, Y., and Srihanam, P. "Valorization of Cellulose-Based Materials from Agricultural Waste: Comparison between Sugarcane Bagasse and Rice Straw." Polymers, vol. 15, no. 15, 2023, article 3190. doi: 10.3390/polym15153190.

การพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสีและอัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎ

Development of an Automated Robotic Product Sorting System Using a Color Sensor and a Rule-Based Decision Algorithm

อานนท์ ศรีสว่าง[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่อยู่ 84 หมู่ 4 ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: E-mail: arnon_sri@vu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 081-8788275, เบอร์โทรสาร. 044-009712

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และอัลกอริทึมการตัดสินใจด้วยปัญญาประดิษฐ์ (Rule-Based Decision Algorithm: AI) สำหรับจำแนกวัตถุตามสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ระบบประกอบด้วยสายพานลำเลียง เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ อินฟราเรดเซนเซอร์ และเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกคัดแยกสินค้า โดยทำการทดลองกับวัตถุตัวอย่างจำนวน 100 ชิ้นต่อสี ภายใต้สภาพแสงคงที่ ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถคัดแยกสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินได้อย่างถูกต้องเฉลี่ย 96.7% ใช้เวลาในการคัดแยกเฉลี่ย 1.25 วินาทีต่อชิ้น และสามารถทำงานต่อเนื่องได้อย่างมีเสถียรภาพ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้ในงานคัดแยกสินค้าอัตโนมัติทางอุตสาหกรรมและใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ด้านระบบอัตโนมัติและปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติ, ปัญญาประดิษฐ์, เซนเซอร์ตรวจจับสี, Arduino Uno, การจำแนกสี

Abstract

This research aimed to develop an automatic product sorting system using robotics, a TCS34725 color sensor, an Arduino Uno R3 microcontroller, and an Rule-Based Decision Algorithm (AI)-based decision-making algorithm for classifying objects according to red, green, and blue colors. The system consists of a conveyor belt, an object detection sensor, an infrared sensor, and servo motors used as the sorting mechanism. Experiments were conducted using 100 sample objects for each color under controlled lighting conditions. The results showed that the system achieved an average sorting accuracy of 96.7% for red, green, and blue objects. The average sorting time was 1.25 seconds per object, and the system was able to operate continuously with high stability. The findings indicate that the developed system can be effectively applied to industrial automated product sorting processes and can also serve

as an educational platform for teaching automation systems and Rule-Based Decision Algorithm technologies.

Keywords: Automatic Product Sorting System, Rule-Based Decision Algorithm, Color Classification, Arduino-Based Control System, Color Classification

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรม 4.0 เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ และระบบตัดสินใจเชิงกฎ (Rule-Based Decision Algorithm) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและโลจิสติกส์ โดยเฉพาะงานคัดแยกสินค้า ซึ่งต้องอาศัยความรวดเร็ว ความถูกต้อง และการทำงานอย่างต่อเนื่อง การคัดแยกด้วยแรงงานมนุษย์อาจเกิดข้อผิดพลาดจากความเหนื่อยล้า ความไม่สม่ำเสมอ และข้อจำกัดในการทำงาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพและต้นทุนการดำเนินงาน

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับสีและไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกสินค้า ลดการพึ่งพาแรงงานคน และรองรับการทำงานในสายการผลิตและคลังสินค้า อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบหรือการจำแนกสีเพียงอย่างเดียว โดยยังมีการศึกษาการทำงานแบบบูรณาการระหว่างการตรวจจับสี การติดตามวัตถุ และการคัดแยกแบบต่อเนื่องด้วยอัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎค่อนข้างจำกัด

งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และอัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎ (Rule-Based Decision Algorithm) สำหรับจำแนกสีของวัตถุ ระบบประกอบด้วยสายพานลำเลียง เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ และเซอร์โวมอเตอร์สำหรับคัดแยกสินค้า เพื่อเพิ่มความถูกต้องและประสิทธิภาพในการคัดแยก พร้อมทั้งพัฒนาต้นแบบที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 สำหรับตรวจจับและจำแนกสีของวัตถุ
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมและการตัดสินใจสำหรับการคัดแยกสินค้าโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์
3. เพื่อประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการตัดสินใจอัจฉริยะในการวิเคราะห์ข้อมูลสีและกำหนดตำแหน่งการคัดแยกสินค้าโดยอัตโนมัติ
4. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว และความเสถียรในการคัดแยกสินค้า รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติ

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และอัลกอริทึมการตัดสินใจอัจฉริยะสำหรับจำแนกสีของวัตถุ การดำเนินงานครอบคลุมการออกแบบระบบ การพัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การเชื่อมต่ออุปกรณ์ และการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว และความเสถียรในการคัดแยกสินค้า

3.1 การออกแบบระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติ

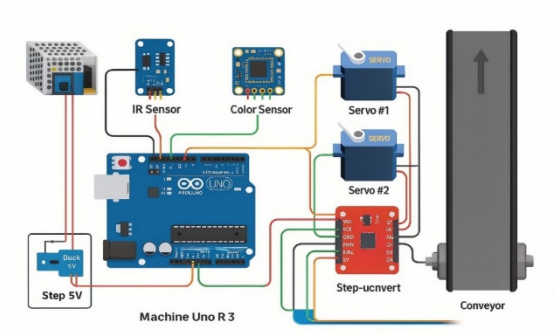
การออกแบบระบบประกอบด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ ระบบสายพานลำเลียง เซนเซอร์

ตรวจจับสี และกลไกคัดแยกสินค้า โดยมุ่งเน้นให้ระบบสามารถตรวจจับ จำแนก และคัดแยกวัตถุได้โดยอัตโนมัติอย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.1 แผนภาพการทำงานของระบบ (Block Diagram)

แผนภาพการทำงานของระบบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติ โดยวัตถุจะถูกลำเลียงผ่านสายพานเข้าสู่ตำแหน่งตรวจจับสี เซนเซอร์ TCS34725 จะอ่านค่าสีของวัตถุและส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 เพื่อประมวลผลและจำแนกประเภทสี จากนั้นระบบจะคำนวณตำแหน่งของวัตถุบนสายพานและสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์ให้ผลักวัตถุเข้าสู่ช่องคัดแยกที่กำหนด

ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725, เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบอินฟราเรด (IR Obstacle Sensor), Arduino Uno R3, เซอร์โวมอเตอร์, มอเตอร์กระแสตรงสำหรับขับเคลื่อนสายพาน, วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้า และแหล่งจ่ายไฟหลัก โดยมีคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาและติดตามผลการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยเซนเซอร์ตรวจจับสีและอัลกอริทึมการตัดสินใจอัจฉริยะ

3.1.2 รายละเอียดฮาร์ดแวร์

ระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์หลัก ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

   Arduino Uno R3 ทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมหลักของระบบ โดยรับข้อมูลจากเซนเซอร์ตรวจจับสีและเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ จากนั้นประมวลผลข้อมูลและสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์สำหรับคัดแยกสินค้าไปยังตำแหน่งที่กำหนด

2. ระบบสายพานลำเลียง (Conveyor Belt System)

   ระบบสายพานลำเลียงทำหน้าที่ขนส่งวัตถุจากจุดป้อนเข้าสู่ตำแหน่งตรวจจับสีและจุดคัดแยกสินค้า โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อนสายพานให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

3. เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

   เซอร์โวมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นกลไกผลักหรือเบี่ยงสินค้าเข้าสู่ช่องคัดแยกตามผลการจำแนกสีที่ได้รับจากระบบควบคุม โดยสามารถกำหนดตำแหน่งการหมุนได้อย่างแม่นยำ

4. เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725

   เซนเซอร์ TCS34725 ใช้สำหรับตรวจวัดค่าสีของวัตถุในรูปแบบ RGB (Red, Green, Blue) และส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการจำแนกประเภทสีของสินค้า

5. เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบอินฟราเรด (IR Obstacle Sensor)

   เซนเซอร์อินฟราเรดใช้ตรวจจับการมาถึงของวัตถุบนสายพานลำเลียง เพื่อกำหนดจังหวะการอ่านค่าสีและเริ่มกระบวนการคัดแยกสินค้า

6. ระบบขับมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟ

ระบบประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายพลังงานให้กับ Arduino Uno R3 เซนเซอร์ มอเตอร์กระแสตรง และเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ

7. โครงสร้างเครื่องกล

โครงสร้างของระบบสร้างจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา เพื่อรองรับอุปกรณ์ทั้งหมด ได้แก่ สายพานลำเลียง เซนเซอร์ และชุดคัดแยกสินค้า โดยคำนึงถึงความสะดวกในการติดตั้งและบำรุงรักษา

3.1.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในระบบได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างเป็นลำดับ โดยใช้ Arduino Uno R3 เป็นหน่วยควบคุมหลักในการรับข้อมูลจากเซนเซอร์และสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าสีของวัตถุและส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการสื่อสารแบบ I2C ขณะที่เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบอินฟราเรด (IR Obstacle Sensor) ใช้สำหรับตรวจจับการมาถึงของวัตถุบนสายพานลำเลียงและส่งสัญญาณเริ่มต้นกระบวนการตรวจสอบสี เมื่อระบบได้รับข้อมูลสีของวัตถุแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลและเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดได้กับเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นจึงส่งสัญญาณควบคุมไปยังเซอร์โวมอเตอร์เพื่อคัดแยกวัตถุเข้าสู่ช่องรับที่สอดคล้องกับประเภทสีที่ตรวจพบ ขณะเดียวกัน มอเตอร์กระแสตรงจะทำหน้าที่ขับเคลื่อนสายพานลำเลียงให้เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่

ระบบทั้งหมดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟหลัก โดยมีวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าสำหรับปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์แต่ละประเภท เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ และมอเตอร์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพและปลอดภัย การเชื่อมต่อดังกล่าวช่วยให้การตรวจจับ การประมวลผล และการคัดแยกสินค้าเป็นไปอย่างอัตโนมัติและต่อเนื่องตลอดกระบวนการทำงาน

3.2 อัลกอริทึมการทำงานของระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติ

การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมระบบดำเนินการบน Arduino IDE โดยใช้ภาษา C++ เพื่อควบคุมการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบอินฟราเรด และเซอร์โวมอเตอร์สำหรับคัดแยกสินค้า การทำงานของระบบเริ่มจากการตรวจจับวัตถุที่เข้าสู่สายพานลำเลียง จากนั้นอ่านค่าสีในรูปแบบ RGB และนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่กำหนดเพื่อจำแนกประเภทสี ก่อนส่งคำสั่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ให้คัดแยกวัตถุไปยังช่องรับที่เหมาะสม

ตัวอย่างอัลกอริทึมการจำแนกสีแสดงดังสมการเชิงตรรกะต่อไปนี้

```
if (R > G*1.1 && R > B*1.1)
    color = RED;
else if (G > R*1.1 && G > B*1.1)
    color = GREEN;
else
    color = BLUE;
```

หลักการดังกล่าวใช้การเปรียบเทียบสัดส่วนของค่าสีแทนการกำหนดค่าคงที่ (Threshold) ทำให้สามารถลดผลกระทบจากความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทำงานได้ เพื่อรองรับการทำงานต่อเนื่องบนสายพานลำเลียง ระบบมีการบันทึกข้อมูลของวัตถุแต่ละชิ้น ได้แก่ เวลาที่ตรวจพบ สีที่ตรวจจับได้ และสถานะการคัดแยก เพื่อใช้ติดตามตำแหน่งของวัตถุและป้องกันการสั่งงานซ้ำ โดยแนวคิดการจัดการข้อมูลสามารถสรุปได้ดังนี้

```
struct Product {
  unsigned long detectTime;
  String color;
  bool colorChecked;
  bool servoDone;
};
```

เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งคัดแยก ระบบจะตรวจสอบเวลาที่ผ่านไปจากจุดตรวจจับ และสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้ผลักวัตถุออกจากสายพาน

```
if(color == "RED")
   servo1.write(70);

if(color == "GREEN")
   servo2.write(65);
```

หลังจากเซอร์โวมอเตอร์ทำงานครบระยะเวลาที่กำหนด ระบบจะสั่งให้เซอร์โวกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นและลบข้อมูลวัตถุออกจากหน่วยความจำ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการคัดแยกวัตถุชิ้นถัดไป

```
if(millis()-servoStart > 400){
   servo.write(0);
}
```

อัลกอริทึมดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถตรวจจับ จำแนก และคัดแยกสินค้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีความถูกต้องและความรวดเร็วเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติขนาดเล็กและงานด้านการเรียนการสอนระบบอัตโนมัติ

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ได้ทำการทดสอบระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติกับวัตถุตัวอย่างจำนวน **300 ชิ้น** (สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน สีละ 100 ชิ้น) ภายใต้สภาพแสงคงที่ เพื่อประเมิน **ความถูกต้องในการจำแนกสี ระยะเวลาในการคัดแยก และความเสถียรของระบบ** โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้**4.1 ผลการทดสอบความถูกต้องในการจำแนกสี**

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความถูกต้องในการจำแนกสี

สีวัตถุ	**จำนวนทดสอบ (ชิ้น)**	**จำแนกถูกต้อง (ชิ้น)**	Accuracy (%)
แดง	100	97	97.0
เขียว	100	95	95.0
น้ำเงิน	100	98	98.0
รวม	**300**	**290**	**96.7**

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถจำแนกสีได้ถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96.7 โดยสีน้ำเงินมีความถูกต้องสูงที่สุด ขณะที่สีเขียวมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเนื่องจากได้รับผลกระทบจากความเข้มแสงภายนอก

4.2 ผลการทดสอบเวลาในการคัดแยก

ตารางที่ 2 เวลาเฉลี่ยในการคัดแยกสินค้า

สีวัตถุ	เวลาเฉลี่ย (วินาที/ชิ้น)
แดง	1.21
เขียว	1.28
น้ำเงิน	1.26
เฉลี่ย	**1.25**

จากผลการทดลองพบว่าระบบใช้เวลาเฉลี่ย 1.25 วินาทีต่อชิ้น ซึ่งเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติขนาดเล็ก

4.3 ผลการทดสอบความเสถียรของระบบ

ระบบถูกทดสอบการทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีการป้อนวัตถุเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการหยุดทำงานหรือการสูญเสียข้อมูล การตอบสนองของเซนเซอร์และเซอร์โวมอเตอร์ยังคงมีความถูกต้องใกล้เคียงกับช่วงเริ่มต้นของการทดลอง

4.4 การวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับ Arduino Uno R3 สามารถจำแนกและคัดแยกสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบค่าสี RGB เพื่อกำหนดประเภทของวัตถุ ระบบมีความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96.7 และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานคัดแยกสินค้าอัตโนมัติ การศึกษาเชิงปฏิบัติการด้านระบบอัตโนมัติ และการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

4.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

จากผลการทดลองพบว่าระบบมีความถูกต้องในการจำแนกสีเฉลี่ยร้อยละ **96.7** โดยสีน้ำเงินมีความถูกต้องสูงที่สุด (98.0%) รองลงมาคือสีแดง (97.0%) และสีเขียวมีความถูกต้องต่ำที่สุด (95.0%) ดังแสดงในตารางที่ 1

ความคลาดเคลื่อนในการจำแนกสีเขียวเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มของแสงภายนอกที่เปลี่ยนแปลง การสะท้อนแสงจากพื้นผิวของวัตถุ และความใกล้เคียงของค่า RGB ระหว่างสีเขียวกับสีอื่น ส่งผลให้เซนเซอร์ TCS34725 อ่านค่าสีคลาดเคลื่อนในบางกรณี นอกจากนี้ หากวัตถุเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งตรวจจับด้วยความเร็วสูงหรือวางไม่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม อาจทำให้การอ่านค่าสีไม่สมบูรณ์และส่งผลต่อความถูกต้องในการจำแนก

อย่างไรก็ตาม การใช้อัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎ (Rule-Based Decision Algorithm) ที่เปรียบเทียบสัดส่วนของค่า RGB ช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแสงได้ในระดับหนึ่ง ทำให้ระบบยังคงมีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 96.7 และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการจำแนกสี

สี	Accuracy (%)	จำนวนจำแนกผิด (ชิ้น)	สาเหตุหลัก
แดง	97.0	3	แสงสะท้อนจากพื้นผิววัตถุ
เขียว	95.0	5	ค่า RGB ใกล้เคียงสีอื่น และผลกระทบจากสภาพแสง
น้ำเงิน	98.0	2	ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งวัตถุ

จากตารางที่ 3 พบว่าสีเขียวมีจำนวนการจำแนกผิดมากที่สุด เนื่องจากค่า RGB มีความใกล้เคียงกับสีอื่นและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแสง ขณะที่สีน้ำเงินมีความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องจากมีค่าความแตกต่างขององค์ประกอบสีเด่นชัด ส่งผลให้ระบบสามารถจำแนกได้แม่นยำกว่า

4.6 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น ได้เปรียบเทียบค่าความถูกต้องในการจำแนกสี (Accuracy) กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วิธีการ	Accuracy (%)
Kumar et al. (2022)	Color Sensor + Arduino	94.5
Jiang et al. (2023)	Embedded Controller + Color Recognition	95.8
งานวิจัยนี้	**TCS34725 + Arduino Uno R3 + Rule-Based Decision Algorithm**	**96.7**

จากตารางที่ 4 พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องในการจำแนกสีเฉลี่ย **ร้อยละ 96.7** ซึ่งสูงกว่างานของ **Kumar et al. (2022)** และ **Jiang et al. (2023)** สะท้อนให้เห็นว่าการใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับอัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎ (Rule-Based Decision Algorithm) สามารถเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกสีและการคัดแยกสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบดังกล่าวอาจได้รับอิทธิพลจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมการทดลอง ชนิดของวัตถุ และเงื่อนไขการทดสอบในแต่ละงานวิจัย จึงควรพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ร่วมด้วยในการตีความผลการเปรียบเทียบ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบคัดแยกสินค้าอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสี TCS34725 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และอัลกอริทึมการตัดสินใจเชิงกฎ (Rule-Based Decision Algorithm) สำหรับจำแนกวัตถุตามสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน พร้อมควบคุมการคัดแยกด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถจำแนกสีได้ถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 95 มีเวลาในการคัดแยกเฉลี่ย 1.25 วินาทีต่อชิ้น และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

แม้ว่าระบบจะมีข้อจำกัดจากสภาพแสงและจำนวนสีที่รองรับ แต่ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับงานคัดแยกสินค้าอัตโนมัติในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการเรียนการสอนด้านระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ ในอนาคตควรพัฒนาระบบโดยประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพและเทคนิค Machine Learning เพื่อรองรับการจำแนกวัตถุที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น รวมทั้งเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลและระบบคลังสินค้าอัจฉริยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Adafruit Industries. (2024). TCS34725 RGB color sensor: Technical guide and application notes. https://learn.adafruit.com

[2] Arduino. (2025). Arduino Uno Rev3 technical specifications. https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno

[3] Groover, M. P. (2023). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing (5th ed.). Pearson Education.

[4] International Federation of Robotics. (2024). World robotics 2024: Industrial robots report. IFR. https://ifr.org

[5] Jiang, H., Wang, Y., & Li, Z. (2023). Design and implementation of an intelligent color-sorting system based on embedded controllers. Journal of Industrial Information Integration, 35, 100512. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100512

[6] Kumar, R., Singh, P., & Sharma, A. (2022). Development of an automated object sorting system using color detection and microcontroller technology. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(8), 245–252.

[7] Lee, J., Kim, D., & Park, S. (2024). Rule-Based Decision Algorithm applications in smart manufacturing: A review of current trends and future directions. Sensors, 24(3), 1158. https://doi.org/10.3390/s24031158

[8] Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2023). Smart manufacturing and Industry 4.0: State-of-the-art technologies and industrial applications. Applied Sciences, 13(7), 4182. https://doi.org/10.3390/app13074182

[9] Siciliano, B., Khatib, O., & Kröger, T. (2024). Springer handbook of robotics (2nd updated ed.). Springer Nature.

[10] Zhang, Y., Liu, X., & Chen, W. (2023). Real-time color recognition and automated sorting system using embedded sensors and intelligent control. IEEE Access, 11, 86542–86553. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3304215

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม

Study of the Influence of Rotary Beater Shaft Speed on the Operational Performance of a Power Tiller-Mounted Manure Spreader

อังคาร คำเรือน[1*] , ธเนศ ตาปราบ[2]

[1*]สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: E-mail, Angkarn.k@nrru.ac.th, 083-9453-949
[2] สาขาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์
198 ถนนมิตรภาพ-หนองคาย ตำบลบ้านโพธิ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30310
Thanet_99944@outlook.co.th, 090-2722-805

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม การทดลองภาคสนามดำเนินการในแปลงขนาด 1 ไร่ โดยใช้ปุ๋ยมูลโคที่มีความชื้นร้อยละ 20 ปริมาณเริ่มต้น 500 กิโลกรัม และควบคุมความเร็วเคลื่อนที่ของรถไถเดินตามที่ 0.56 เมตรต่อวินาที กำหนดความเร็วรอบเพลาตีกระจาย 4 ระดับ ได้แก่ 700, 800, 1,012 และ 1,350 รอบต่อนาที ทำการทดลองระดับละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Tukey และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการศึกษาพบว่าความเร็วรอบเพลาตีกระจายมีผลต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้และเวลาทำงานจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยความเร็วรอบ 1,350 รอบต่อนาทีให้สมรรถนะดีที่สุด ให้ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้สูงสุด 498.33 กิโลกรัมต่อไร่ น้ำหนักปุ๋ยตกค้างต่ำสุด 1.67 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการระบายปุ๋ยร้อยละ 99.67 และใช้เวลาทำงานต่ำสุด 27.63 นาที ขณะที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาทีให้ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ต่ำสุด 474.40 กิโลกรัมต่อไร่ และใช้เวลาทำงานสูงสุด 30.85 นาที ผลการถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบเพลาตีกระจายเพิ่มขึ้น ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่เวลาทำงานลดลง สรุปได้ว่า ความเร็วรอบเพลาตีกระจายเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมรรถนะของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ และความเร็วรอบ 1,350 รอบต่อนาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองของงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: เครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์, เพลาตีกระจาย, ความเร็วรอบ, สมรรถนะการทำงาน

Abstract

This study aimed to investigate the effect of rotary beater shaft speed on the operational performance of a power tiller-mounted manure spreader. Field experiments were conducted on a 1-rai plot using cow manure with 20% moisture content and an initial load of 500 kg. The forward speed of the power tiller was controlled at 0.56 m s^{-1}. Four rotary beater shaft speeds, 700, 800, 1,012, and 1,350 rpm, were tested with three replications per treatment. Data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA), Tukey's multiple comparison test, and linear regression at a significance level of 0.05.

The results showed that rotary beater shaft speed significantly affected both manure application rate and actual operating time ($p < 0.001$). The best performance was obtained at 1,350 rpm, which provided the highest manure application rate of 498.33 kg rai^{-1}, the lowest residual manure weight of 1.67 kg, a discharge efficiency of 99.67%, and the shortest operating time of 27.63 min. In contrast, the lowest speed of 700 rpm resulted in the lowest manure application rate of 474.40 kg rai^{-1} and the longest operating time of 30.85 min. Linear regression indicated that increasing shaft speed increased manure application rate while reducing operating time. It can be concluded that rotary beater shaft speed is a key factor affecting manure spreader performance, and 1,350 rpm was the most suitable operating condition under the conditions of this study.

Keywords: manure spreader, rotary beater shaft, rotational speed, operational performance.

1.บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจเป็นรากฐานสำคัญของระบบเศรษฐกิจ การปรับปรุงบำรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์ โดยเฉพาะปุ๋ยมูลสัตว์ เช่น มูลโค ได้รับความนิยมและมีการส่งเสริมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากช่วยเพิ่มอินทรียวัตถุ ปรับปรุงโครงสร้างดิน เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ และลดต้นทุนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมี

อย่างไรก็ตาม การโรยหรือหว่านปุ๋ยมูลสัตว์ในแปลงเกษตรกรรมส่วนใหญ่ยังคงอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านความล่าช้า ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายปุ๋ย และปัญหาด้านสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสหรือสูดดมฝุ่นละอองชีวภาพโดยตรง ดังนั้น จึงมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรเพื่อทดแทนแรงงานคน โดยเฉพาะเครื่องโรยปุ๋ยที่ติดตั้งร่วมกับรถไถเดินตาม ซึ่งเป็นเครื่องจักรต้นกำลังที่เกษตรกรไทยนิยมใช้อย่างแพร่หลาย

แม้ว่าจะมีการพัฒนาเครื่องโรยปุ๋ยติดตั้งท้ายรถไถเดินตามมาแล้วหลายรูปแบบ แต่ยังพบปัญหาทางเทคนิคที่สำคัญ คือ คุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยมูลสัตว์ซึ่งมีความชื้นและขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การจับตัวค้างถัง (Bridging Effect) บริเวณเหนือช่องจ่าย ทำให้อัตราการไหลของวัสดุไม่ต่อเนื่องและเกิดการอุดตัน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ต้นแบบแบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม โดยใช้ถังบรรจุปุ๋ย (Hopper) รูปทรงพีระมิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวตัด อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Flow) ช่วยให้วัสดุปุ๋ยไหลลงสู่ช่องจ่ายได้อย่างต่อเนื่อง ลดปัญหาการค้างสะสมและการเกิดโพรงอากาศภายในถังลงสู่ชุดเพลาตีกระจายปุ๋ย (Rotary Beater Shaft Assembly) ชุดเพลาตีกระจายปุ๋ยถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เฉลี่ยแรงบิด ลดแรงกระแทกจากการทำงาน และทำลายการจับตัวเป็นก้อนของปุ๋ยก่อนเข้าสู่กระบวนการกระจายวัสดุ นอกจากนี้ การหมุนของใบตียังช่วยสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายปุ๋ยออกจากระบบให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยกำลังขับเคลื่อนถูกส่งผ่านจากเครื่องยนต์ดีเซลด้วยระบบสายพานและพูลเลย์ในเชิงพลศาสตร์เครื่องจักรกลเกษตร ความเร็วรอบของเพลาตีกระจาย (Rotational Speed) ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่อง เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบตี (Blade Tip Speed) และพลังงานจลน์ที่ใช้ในการตัดและสลัดมวลปุ๋ย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาสมรรถนะของเครื่องโรยปุ๋ยภายใต้ความเร็วรอบคงที่เพียงระดับเดียว จึงยังขาดข้อมูลเชิงปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเพลาตีกระจายกับสมรรถนะการทำงานของเครื่องอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงสถิติที่สามารถใช้ในการพยากรณ์แนวโน้มของผลตอบสนองได้ ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายที่ระดับ 700, 800, 1,012 และ 1,350 รอบต่อนาที ต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตาม โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ (กิโลกรัมต่อไร่) และเวลาปฏิบัติงานจริง (นาที) ภายใต้เงื่อนไขปุ๋ยมูลโคที่มีความชื้นร้อยละ 20 ปริมาณเริ่มต้น 500 กิโลกรัมต่อไร่ และความเร็วเคลื่อนที่คงที่ 0.56 เมตรต่อวินาที ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบ 3 ซ้ำ รวมทั้งสิ้น 12 รัน จะนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Tukey เพื่อระบุสภาวะความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรสำหรับการจัดการปุ๋ยอินทรีย์ในอนาคต

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบเพลาตีกระจาย จำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุชีวภาพ พลศาสตร์เครื่องจักรกลเกษตร และหลักการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อเป็นฐานในการอธิบายพฤติกรรมการทำงานและการระบายวัสดุของเครื่องต้นแบบ โดยมีรายละเอียดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 พฤติกรรมการไหลของวัสดุชีวภาพและการจับตัวค้างถัง

การไหลของวัสดุเม็ด (Granular Materials) หรือวัสดุชีวภาพที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น ปุ๋ยมูลโค ภายในถังบรรจุทรงพีระมิดหัวตัดคว่ำ (Hopper) จะ

ESTACON 2026 | 17th

ถูกขับเคลื่อนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Flow) เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยอินทรีย์มีคุณลักษณะเฉพาะตัวคือ มีความชื้นแปรผันและมีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค (Cohesion Force) สูง เมื่อวัสดุเคลื่อนตัวลงสู่ที่แคบบริเวณคอคอดก้นถัง แรงเสียดทานระหว่างผิววัสดุกับผนังถังและแรงยึดเกาะระหว่างก้อนปุ๋ยจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงต้านทานการไหลในแนวโค้ง โครงสร้างทางกลศาสตร์นี้ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "การจับตัวค้างถังเป็นส่วนโค้ง" หรือ ปรากฏการณ์บริดจิง (Bridging Effect) ซึ่งทำให้วัสดุหยุดไหลและเกิดโพรงอากาศใต้ถังบรรจุ จากการศึกษาของสหรัฐ และคณะ (2563) บ่งชี้ว่าปริมาณความชื้นในปุ๋ยหมักที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมจำกัดการไหล (Angle of Repose) และแรงยึดเกาะเหนียวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการอุดตันเชิงกล ดังนั้น การออกแบบถังสอบเรียวลงสู่ก้นถังในระดับมุมที่เหมาะสม ร่วมกับการติดตั้งกลไกขับเคลื่อนเชิงกล (Active Discharge Mechanism) บริเวณช่องจ่าย จึงเป็นแนวทางวิศวกรรมที่จำเป็นในการทำลายโครงสร้างการจับตัวดังกล่าวเพื่อให้วัสดุไหลตัวได้อย่างต่อเนื่อง

2.2 พลศาสตร์กลไกใบตีแบนและความเร็วเชิงเส้นปลายใบตี (Blade Tip Speed)

กลไกเพลาตีกระจายปุ๋ยจัดเป็นระบบจ่ายแบบบังคับ (Forced Feeding System) ซึ่งทำหน้าที่สองประการร่วมกัน คือ การตัดย่อยก้อนปุ๋ยที่จับตัวกันอยู่บริเวณก้นถัง และการสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เพื่อสลัดวัสดุให้ออกจากช่องจ่ายอย่างรวดเร็ว ในทางพลศาสตร์ พลังงานจลน์ (E_k) ที่ส่งถ่ายจากใบตีแบนไปยังมวลปุ๋ยจะแปรผันตรงกับกำลังสองของความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบตี (Blade Tip Speed, v)

เมื่อเพลาหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงขึ้น ความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบตีจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ($Fc = m\ v^2 / r$) ทวีคูณขึ้นในอัตรากำลังสอง แรงเหวี่ยงในระดับสูงนี้จะสามารถเอาชนะแรงยึดเกาะเหนียวของมวลปุ๋ยชื้น ทำให้ปุ๋ยหลุดกระเด็นออกจากใบตีและกระจายตัวผ่านช่องจ่ายหน้ากว้างได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมชาย และคณะ (2565) ที่ทำการศึกษาเครื่องหว่านปุ๋ยคอกและพบว่า ความเร็วรอบของกลไกสลัดระบายที่มีค่าสูงจะช่วยลดอัตราการตกค้างของวัสดุในระบบได้อย่างดียิ่ง เนื่องจากใบตีสามารถสร้างพลังงานกลในการเหวี่ยงสลัดได้มากกว่าอัตราการเกาะพอกของปุ๋ยชื้นที่มีความหนืด

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติและการถดถอยเชิงเส้นในการประเมินจักรกลเกษตร

การประเมินสมรรถนะเครื่องจักรกลเกษตรในปัจจุบันนิยมใช้หลักการวางแผนการทดลอง (Design of Experiments: DOE) ร่วมกับสถิติเชิงอนุมาน เพื่อทดสอบอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักร การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองภายใต้ระดับของปัจจัยที่แตกต่างกัน ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

นอกจากนี้ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

เพื่อสร้างสมการพยากรณ์และอธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยควบคุม โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งยิ่งมีค่าสูงยิ่งแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในการอธิบายพฤติกรรมของระบบ (ธีรพล, 2564)

2.4 งานวิจัยต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับความเร็วรอบกลไกกระจายปุ๋ยมูลสัตว์

งานวิจัยในระดับนานาชาติได้ยืนยันบทบาทของความเร็วรอบกลไกตี/กระจาย (beater หรือ rotor) ว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพการกระจายปุ๋ยคอกเช่นเดียวกับผลการศึกษานี้ การศึกษาสมรรถนะของเครื่องกระจายปุ๋ยคอกแบบเกลียวคู่ (helical two-sided manure distributor) พบว่าความเร็วรอบของดรัมในช่วง 450 ถึง 950 รอบต่อนาที มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความกว้างของแนวการกระจายปุ๋ย โดยความกว้างของแนวกระจายเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น (Pourreza et al., 2015) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในงานวิจัยนี้ที่ความเร็วรอบสูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายวัสดุ

ในทำนองเดียวกัน งานทบทวนวรรณกรรมด้านการออกแบบเครื่องกระจายปุ๋ยคอกระบุว่า ความชื้นของปุ๋ยและความเร็วรอบของดรัมส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อทั้งความกว้างและความสม่ำเสมอของรูปแบบการกระจายวัสดุ (Singh and Singh, 2014) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังชี้ว่าความสม่ำเสมอของการกระจายปุ๋ยคอกในเครื่องจักรกลทั่วไปยังอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการกระจายมากกว่าร้อยละ 25) (Chambers et al., 2001 อ้างถึงใน Singh and Singh, 2014) ซึ่งบ่งชี้ว่าการประเมินสมรรถนะของเครื่องโรยปุ๋ยควรพิจารณาตัวแปรด้านความสม่ำเสมอของการกระจายควบคู่กับปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ และเป็นข้อจำกัดที่งานวิจัยนี้ยังมิได้ครอบคลุม ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อข้อจำกัดของการศึกษาต่อไป

ผลการศึกษาที่สอดคล้องกันระหว่างงานวิจัยนี้กับวรรณกรรมต่างประเทศข้างต้น ช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของข้อสรุปที่ว่าความเร็วรอบของกลไกตี/กระจายเป็นปัจจัยเชิงวิศวกรรมที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะการระบายวัสดุของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบกลไกแบบเพลาตีแบน (flat beater) ดังในงานวิจัยนี้ หรือกลไกแบบดรัมเกลียว (helical drum)ในงานวิจัยต่างประเทศ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

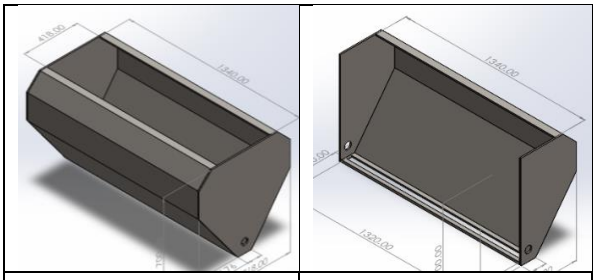
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ต้นแบบ

เครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ต้นแบบได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อติดตั้งยึดต่อร่วมกับชุดโครงสร้างท้ายรถไถเดินตาม โดยอาศัยเครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังขับเคลื่อน โครงสร้างเชิงกลหลักของเครื่องจักรกลเกษตรต้นแบบนี้แบ่งออกเป็น 3 ชุดส่วนสำคัญ ได้แก่ ถังบรรจุปุ๋ย ชุดเพลาตีกระจายปุ๋ยและระบบส่งกำลังแปรผันความเร็วรอบ

ถังบรรจุปุ๋ยถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บและป้อนวัสดุปุ๋ยเข้าสู่ระบบกระจายปุ๋ย โดยโครงสร้างผลิตจากแผ่นเหล็กเหนียว ความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง สามารถรองรับน้ำหนักวัสดุภายในถังและทนต่อแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานได้ดี

ลักษณะทางเรขาคณิตของถังถูกออกแบบเป็นทรงพีระมิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวตัดคว่ำ เพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ในการช่วยลำเลียงวัสดุปุ๋ยจากส่วนบนลงสู่ช่องจ่ายด้านล่างอย่างต่อเนื่อง ลดปัญหาการค้างสะสมของวัสดุภายในถัง และช่วยให้การไหลของปุ๋ยมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ปากถังด้านบนมีขนาด 418x1,340 มิลลิเมตร ขณะที่บริเวณก้นถังมีขนาด 107.76x1,340 มิลลิเมตร ถังมีความสูง 700 มิลลิเมตร บริเวณส่วนล่างของถังติดตั้งช่องเปิดจ่ายปุ๋ย ขนาด 40 × 1,340 มิลลิเมตร ถังบรรจุปุ๋ยที่ออกแบบมีความจุเชิงเรขาคณิต 240 ลิตร ซึ่งเพียงพอสำหรับรองรับปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยคอกแห้ง หรือวัสดุปรับปรุงดินในปริมาณมาก ช่วยลดความถี่ในการเติมวัสดุระหว่างปฏิบัติงานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ย



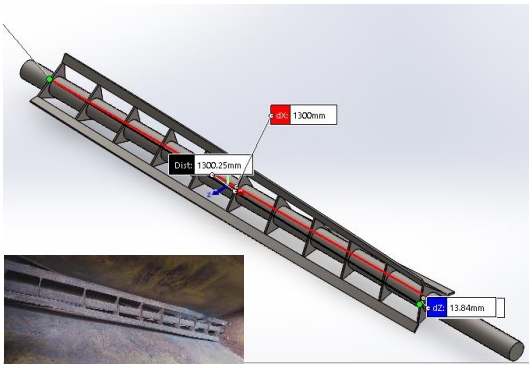
รูป A.โครงสร้าง3มิติ	รูป B.ภาพตัดขวาง

รูปภาพที่ 1 การออแบบชุดถังบรรจุปุ๋ย



รูปภาพที่ 2 โครงสร้างเชิงกลเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์

ชุดเพลาตีกระจายปุ๋ยประกอบด้วยแกนเพลากลางผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนทรงกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ติดตั้งใบตีแบนจำนวน 11 ใบ ผลิตจากเหล็กAISI 1020 จัดเรียงแบบเยื้องสลับตามแนวแกนเพลาเป็นระยะตลอดความยาว 1,300 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่3.บนแกนเพลาติดตั้งใบตีแบนผลิตจากเหล็กเกรด AISI 1020 จัดวางเรียงตัวตามแนวยาวของเพลาในลักษณะสลับตำแหน่งเชิงมุม เพื่อให้เกิดการกระจายแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวเพลา ลดการสั่นสะเทือน และช่วยให้การถ่ายกำลังจากเครื่องยนต์เป็นไปอย่างต่อเนื่องหน้าที่หลักของชุดตีกระจายปุ๋ยได้แก่กระจายแรงบิดให้สม่ำเสมอตลอดแนวเพลา, ลดภาระแรงกระแทกและแรงกระชากที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ต้นกำลังขณะทำงาน, ทำลายการจับตัวเป็นก้อนและโพรงอากาศ ของวัสดุปุ๋ยภายในถังพัก, ช่วยควบคุมอัตราการไหลของปุ๋ยเข้าสู่ระบบโรยให้มีความสม่ำเสมอ, เพิ่มประสิทธิภาพการกระจายปุ๋ยและลดการอุดตันของวัสดุ เป็นต้น



รูปภาพที่ 3 การออกแบบระบบกระจายปุ๋ย

จากการออกแบบพบว่าใบตีมีรัศมีการหมุนกวาดวัสดุวัดจากจุดศูนย์กลางเพลาถึงปลายใบตีเท่ากับ R=85.71 มิลลิเมตร ซึ่งหมายความว่าใบตีสามารถสร้างพื้นที่กวาดวัสดุได้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง

ประมาณ 171.42 มิลลิเมตร ตลอดความยาวของเพลา ช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าและแตกตัวของปุ๋ยได้อย่างมีประสิทธิภาพในรูปภาพที่3

ตารางที่ 1 ปัจจัยการทดลอง

ตัวแปรต้น	1.ความเร็วรอบเพลาตีปุ๋ย • 1,350 rpm. อัตราทด (6:8) • 1,012 rpm. อัตราทด (4.5:8) • 800 rpm. อัตราทด (4:9) • 700 rpm. อัตราทด (3.5:9)
ตัวแปรตาม	1.ปุ๋ยที่โรยได้ (กก./ไร่) 2.เวลาทำงานจริง (นาที)
ตัวแปรควบคุม	1.วัสดุทดสอบปุ๋ยมูลโค • ความชื้น20% • ปริมาณเริ่มต้น 500 กิโลกรัม/ไร่ 2.การเคลื่อนที่ของรถไถเดินตาม • รอบเครื่องยนต์ 1,800 รอบ/นาที • ความเร็วรถไถ 0.56 เมตร/วินาที 3.พื้นที่ในการทดลอง • แปลงเกษตร ขนาด 1 ไร่ 4.ขนาดช่องเปิดจ่ายปุ๋ย • ขนาด 40x1,320 มิลลิเมตร

3.2 วิธีการทดสอบสมรรถนะภาคสนามและการวางแผนทางสถิติ

การทดสอบสมรรถนะภาคสนามดำเนินการภายใต้เงื่อนไขปัจจัยตามตารางที่1. และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำในทุกสภาวะรวมทั้งสิ้น 12 รันการทดลองและนำผลการทดลองที่ได้ในตารางที่2. เข้าสู่กระบวนการประมวลผลทางสถิติชั้นสูงด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทิศทางเดียว (One-Way ANOVA) สร้างตัวแบบสมการคณิตศาสตร์ทำนายพฤติกรรมผ่านการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Tukey โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป **Minitab** ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 เพื่อระบุสภาวะความเร็วรอบที่ให้ประสิทธิภาพเชิงกลดีที่สุดต่อไป

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์

run	ความเร็วรอบเพลา (rpm)	เวลาทำงานจริง (นาที)	ปุ๋ยที่โรยได้ (กก./ไร่)	ปุ๋ยตกค้างค้างถัง (กก.)	ประสิทธิภาพระบาย (%)
1	1,350	27.027	497.50	2.50	99.50
2	1,350	28.032	499.00	1.00	99.80
3	1,350	27.840	498.50	1.50	99.70
4	1,012	28.150	492.20	7.80	98.44
5	1,012	28.420	491.00	9.00	98.20
6	1,012	27.950	493.50	6.50	98.70
7	800	29.210	482.00	18.00	96.40
8	800	28.850	485.50	14.50	97.10
9	800	29.100	484.00	16.00	96.80
10	700	30.550	475.00	25.00	95.00
11	700	31.200	472.00	28.00	94.40
12	700	30.800	476.20	23.80	95.24

ในตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ต้นแบบในการปฏิบัติงานภาคสนาม โดยศึกษาผลของความเร็วรอบเพลาต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่อง พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบเพลาสูงที่ 1,350 รอบต่อนาที เครื่องสามารถโรยปุ๋ยได้มากที่สุด มีปุ๋ยตกค้างในถังน้อย และให้ประสิทธิภาพการระบายสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 99.50–99.80% ขณะที่เมื่อความเร็วรอบลดลงเป็น 1,012, 800 และ 700 รอบต่อนาที ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีแนวโน้มลดลง ปุ๋ยตกค้างในถังเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการระบายลดลงตามลำดับ

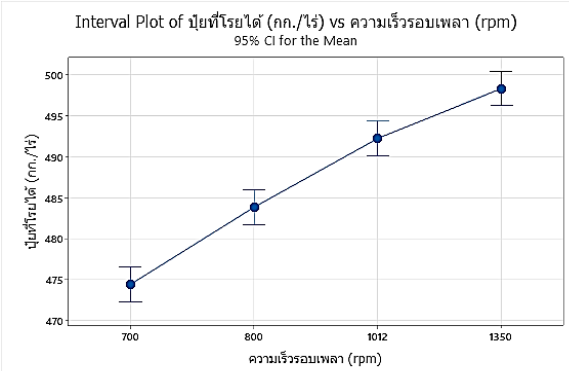
ตารางที่ 3 วิเคราะห์ One-way ANOVAความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	3	973.38	324.460	130.96	0.000
Error	8	19.82	2.477		
Total	11	993.20			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.57401	98.00%	97.26%	95.51%



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ พบว่า ความเร็วรอบเพลาส่งผลต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 130.96$, $p < 0.001$) ดังแสดงในตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยค่า F ที่มีค่าสูงมากแสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนระหว่างระดับความเร็วรอบมีค่ามากกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่มอย่างชัดเจน จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง (H_0) ที่ว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ในแต่ละระดับความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาคุณภาพของแบบจำลอง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลอง (S) เท่ากับ 1.57401 กิโลกรัมต่อไร่ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-sq) สูงถึงร้อยละ 98.00 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยความเร็วรอบเพลาสามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ถึงร้อยละ 98.00 ขณะที่ค่า R-sq(adj) เท่ากับร้อยละ 97.26 และค่า R-sq(pred) เท่ากับร้อยละ 95.51 สะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้ทำนายผลในสภาวะการทดลองอื่นที่ใกล้เคียงกันได้อย่างน่าเชื่อถือ

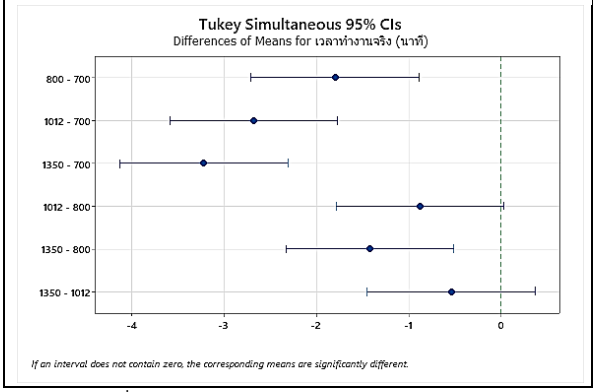
ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วรอบของเพลาตีกระจายช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายปุ๋ย ทำให้ปุ๋ยถูกกระจายออกจากระบบได้มากขึ้น เนื่องจากใบตีสามารถสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและพลังงานจลน์ได้สูงเพียงพอในการทำลายการจับตัวของปุ๋ยมูลสัตว์ที่มีความชื้น ส่งผลให้ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Tukey ความเร็วรอบเพลาตีกระจายต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

ความเร็วรอบเพลา (rpm)	N	Mean	Grouping
700	3	30.850	A
800	3	29.053	B
1012	3	28.173	B C
1350	3	27.633	C

Means that do not share a letter are significantly different.



ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ในทุกระดับความเร็วรอบเพลาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกคู่ (1,350 > 1,012 > 800 > 700 รอบต่อนาที ตามลำดับ โดยมี

ค่าเฉลี่ย 498.333, 492.233, 483.83 และ 474.40 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ) ผลดังกล่าวยืนยันว่าความเร็วรอบเพลาตีกระจายทุกระดับที่ทดสอบส่งผลต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้อย่างมีนัยสำคัญและเป็นอิสระจากกัน แตกต่างจากตัวแปรเวลาทำงานจริงที่บางช่วงความเร็วรอบไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมากกว่าเวลาทำงานจริง สอดคล้องกับค่า F และ R^2 ที่สูงกว่าในการวิเคราะห์ ANOVA ของปริมาณปุ๋ยที่โรยได้

ตารางที่ 5 Regression Analysis ความเร็วรอบเพลากับปริมาณปุ๋ยที่โรยได้

Regression Equation

ปุ๋ยที่โรยได้ (กก./ไร่) = 454.21 + 0.03417 ความเร็วรอบเพลา (rpm)

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	454.21	4.09	111.17	0.000	
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	0.03417	0.00410	8.34	0.000	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.53376	87.43%	86.17%	82.29%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	868.33	868.325	69.54	0.000
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	1	868.33	868.325	69.54	0.000
Error	10	124.87	12.487		
Lack-of-Fit	2	105.05	52.527	21.20	0.001
Pure Error	8	19.82	2.477		
Total	11	993.20			

ตารางที่5.ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างความเร็วรอบเพลากับปริมาณปุ๋ยที่โรยได้

สามารถเขียนสมการพยากรณ์ได้ดังนี้ ปุ๋ยที่โรยได้ = 454.21 + 0.03417(ความเร็วรอบเพลา)

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วรอบเพลาเพิ่มขึ้น 1 รอบต่อนาที ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้จะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.03417 กิโลกรัมต่อไร่ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์ของตัวแปรความเร็วรอบเพลามีค่าเป็นบวกและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 8.34$, $p < 0.001$)

แบบจำลองการถดถอยมีค่า R-sq เท่ากับร้อยละ 87.43 และ R-sq(adj) เท่ากับร้อยละ 86.17 แสดงว่าสมการเชิงเส้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเพลากับปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ประมาณร้อยละ 87 ของข้อมูลทั้งหมด ขณะที่ค่า R-sq(pred) เท่ากับร้อยละ 82.29 บ่งชี้ว่าแบบจำลองยังมีศักยภาพในการพยากรณ์ข้อมูลใหม่ได้ในระดับดี

เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงโค้งที่ผลการทดสอบ Lack-of-Fit บ่งชี้ไว้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การถดถอยพหุนามกำลังสอง (Quadratic Regression) เพิ่มเติมจากข้อมูลทั้ง 12 รัน ได้สมการพยากรณ์ดังนี้ ปุ๋ยที่โรยได้ (กก./ไร่) = 390.08 + 0.16652(ความเร็วรอบเพลา) − 0.0000640(ความเร็วรอบเพลา)²

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ rpm เท่ากับ 0.16652 ($t = 6.56$, $p < 0.001$) และพจน์ rpm² เท่ากับ −0.0000640 ($t = -5.23$, $p = 0.001$) แบบจำลองมีค่า $R^2 = 96.89\%$, $R^2(adj) = 96.20\%$, $F = 140.06$, $p < 0.001$ ผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งพจน์เชิงเส้นและพจน์กำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่า R^2 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87.43 ในแบบจำลองเชิงเส้นเดิม เป็นร้อยละ 96.89 ในแบบจำลองพหุนามกำลังสอง ยืนยันว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเพลากับปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีลักษณะโค้งเล็กน้อย (curvilinear) สอดคล้องกับผลการทดสอบ Lack-of-Fit ที่พบก่อนหน้านี้ และสอดคล้องกับหลักการทางพลศาสตร์ที่แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ($Fc = mv^2/r$) แปรผันตามกำลังสองของความเร็ว มิใช่แปรผันเป็นเส้นตรง

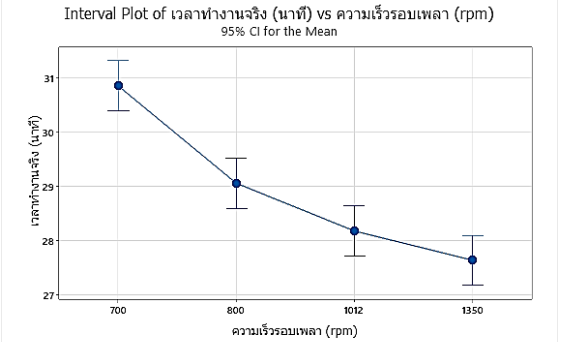
ตารางที่ 6 วิเคราะห์ One-way ANOVAความเร็วรอบเพลาต่อเวลาทำงานจริง

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	3	17.8690	5.9563	49.45	0.000
Error	8	0.9636	0.1205		
Total	11	18.8326			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.347063	94.88%	92.96%	88.49%



ตารางที่6.ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวเพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบเพลาต่อเวลาทำงานจริง พบว่า ความเร็วรอบเพลาส่งผลต่อเวลาทำงานจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 49.45$, $p < 0.001$) ค่า S ของแบบจำลองเท่ากับ 0.347063 นาที แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่ค่า R-sq เท่ากับร้อยละ 94.88 แสดงว่าความเร็วรอบเพลาสามารถอธิบายความผันแปรของเวลาทำงานได้ถึงร้อยละ 94.88 ส่วนค่า R-sq(adj) และ R-sq(pred) เท่ากับร้อยละ 92.96 และ 88.49 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในการอธิบายและพยากรณ์ข้อมูล

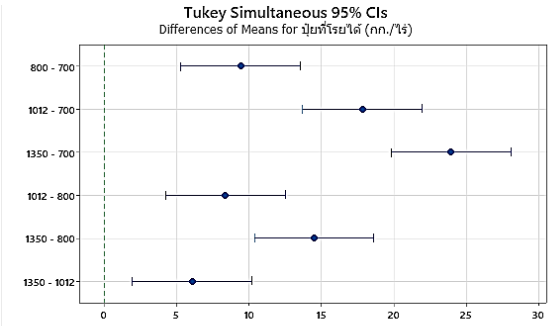
ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า เมื่อความเร็วรอบเพลาสูงขึ้น เครื่องจักรสามารถระบายปุ๋ยออกจากถังได้รวดเร็วและต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาการทำงานลดลง ในทางตรงกันข้าม ความเร็วรอบที่ต่ำทำให้แรงเหวี่ยงของใบตีลดลง เกิดการสะสมและการจับตัวของปุ๋ยบริเวณก้นถังมากขึ้น จึงต้องใช้เวลาในการปฏิบัติงานนานขึ้น

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Tukey ความเร็วรอบเพลาต่อเวลาทำงานจริง

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

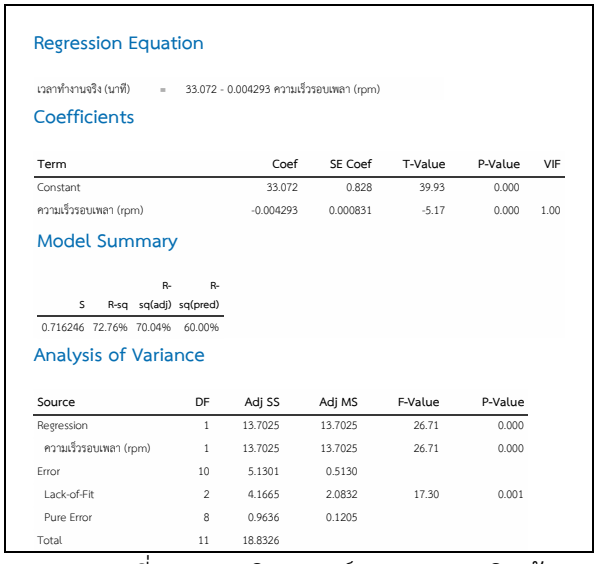
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	N	Mean	Grouping
1350	3	498.333	A
1012	3	492.233	B
800	3	483.83	C
700	3	474.40	D

Means that do not share a letter are significantly different.



ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่าเฉลี่ยเวลาทำงานจริงที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที (30.850 นาที) แตกต่างจากทุกระดับความเร็วรอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ความเร็วรอบ 800 และ 1,012 รอบต่อนาที (29.053 และ 28.173 นาที) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และความเร็วรอบ 1,012 และ 1,350 รอบต่อนาที (28.173 และ 27.633 นาที) ก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบ 800 และ 1,350 รอบต่อนาที แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการเพิ่มความเร็วรอบจาก 700 ไปสู่ระดับที่สูงขึ้นช่วยลดเวลาทำงานได้อย่างชัดเจน แต่ในช่วงความเร็วรอบกลาง (800–1,350 รอบต่อนาที) ผลของการเพิ่มความเร็วรอบต่อการลดเวลาทำงานเริ่มมีแนวโน้มลดลง (diminishing return)

ตารางที่8. Regression Analysis: เวลาทำงานจริงกับความเร็วรอบเพลา



Regression Equation

เวลาทำงานจริง (นาที) = 33.072 - 0.004293 ความเร็วรอบเพลา (rpm)

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	33.072	0.828	39.93	0.000	
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	-0.004293	0.000831	-5.17	0.000	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.716246	72.76%	70.04%	60.00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	13.7025	13.7025	26.71	0.000
ความเร็วรอบเพลา (rpm)	1	13.7025	13.7025	26.71	0.000
Error	10	5.1301	0.5130		
Lack-of-Fit	2	4.1665	2.0832	17.30	0.001
Pure Error	8	0.9636	0.1205		
Total	11	18.8326			

ตารางที่8.ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของเวลาทำงานจริงกับความเร็วรอบเพลาให้สมการพยากรณ์ดังนี้ เวลาทำงานจริง= 33.072 – 0.004293(ความเร็วรอบเพลา)

สมการดังกล่าวแสดงว่า เมื่อความเร็วรอบเพลาเพิ่มขึ้น 1 รอบต่อนาที เวลาทำงานจริงจะลดลงเฉลี่ย 0.004293 นาที หรือประมาณ 0.26 วินาที โดยสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบเพลามีค่าเป็นลบและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = -5.17$, $p < 0.001$)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยพบว่า สมการมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 26.71$, $p < 0.001$) แสดงว่าความเร็วรอบเพลาสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของเวลาทำงานได้จริง

อย่างไรก็ตาม การทดสอบ Lack-of-Fit ให้ค่า $F = 17.30$ และ $p = 0.001$ ซึ่งบ่งชี้ว่าสมการเชิงเส้นอย่างง่ายยังไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ทั้งหมด อาจมีแนวโน้มเชิงโค้งหรือปัจจัยแวดล้อมอื่นที่มีผลต่อเวลาทำงานร่วมด้วย เช่น ความสม่ำเสมอของปุ๋ยมูลสัตว์ สภาพพื้นที่ทดลอง หรือความต่อเนื่องในการป้อนวัสดุเข้าสู่ชุดเพลาตีกระจาย

เช่นเดียวกับตัวแปรปุ๋ยที่โรยได้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การถดถอยพหุนามกำลังสองของเวลาทำงานจริง ได้สมการพยากรณ์ดังนี้ เวลาทำงานจริง (นาที) = $44.953 - 0.028815(\text{ความเร็วรอบเพลา}) + 0.0000119(\text{ความเร็วรอบเพลา})^2$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ rpm เท่ากับ -0.028815 ($t = -4.57$, $p = 0.001$) และพจน์ rpm^2 เท่ากับ 0.0000119 ($t = 3.90$, $p = 0.004$) แบบจำลองมีค่า $R^2 = 89.89\%$, $R^2(\text{adj}) = 87.64\%$, $F = 39.99$, $p < 0.001$ ผลการวิเคราะห์พบว่าพจน์กำลังสองของความเร็วรอบมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่า R^2 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 72.76 ในแบบจำลองเชิงเส้นเดิม เป็นร้อยละ 89.89 ในแบบจำลองพหุนามกำลังสอง ยืนยันว่าแบบจำลองพหุนามกำลังสองสามารถอธิบายความแปรปรวนของเวลาทำงานจริงได้ดีกว่าแบบจำลองเชิงเส้นอย่างมาก

5. อภิปรายผล

ผลการศึกษาสมรรถนะของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์แบบติดตั้งท้ายรถไถเดินตามภายใต้ระดับความเร็วรอบเพลาตีกระจาย 4 ระดับ ได้แก่ 700, 800, 1,012 และ 1,350 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วรอบเพลาตีกระจายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทั้งในด้านปริมาณปุ๋ยที่โรยได้และระยะเวลาปฏิบัติงานจริง โดยผลการวิเคราะห์ทั้งแบบ One-way ANOVA และ Regression Analysis ให้ข้อสรุปที่สอดคล้องกันอย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าความเร็วรอบเพลามีอิทธิพลต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้และเวลาทำงานจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องแตกต่างกันอย่างแท้จริง มิได้เกิดจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง โดยปัจจัยด้านความเร็วรอบเพลาสามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณปุ๋ยที่โรยได้ร้อยละ 98.00 และอธิบายความผันแปรของเวลาทำงานจริงได้ร้อยละ 94.88

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไป กล่าวคือ ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเร็วรอบเพลา โดยเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น 1 รอบต่อนาที ปริมาณปุ๋ยที่โรยได้จะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.03417 กิโลกรัมต่อไร่ ขณะที่เวลาทำงานจริงมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเร็วรอบเพลา โดยเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น 1 รอบต่อนาที เวลาทำงานจะลดลงเฉลี่ย 0.004293 นาที

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบ Lack-of-Fit ของสมการถดถอยทั้งสองกรณีมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.001$) ซึ่งบ่งชี้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบเพลากับตัวแปรตอบสนองอาจไม่เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ตลอดช่วงความเร็วรอบที่ทดสอบ สาเหตุที่เป็นไปได้ประการแรกคือช่วงความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง (700–1,350 รอบต่อนาที) มีระยะห่างระหว่างระดับไม่เท่ากัน (700, 800, 1,012, 1,350) ทำให้รูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงซึ่งอาจมีลักษณะโค้งเล็กน้อยในช่วงความเร็วรอบต่ำ ถูกประมาณด้วยเส้นตรงไม่แม่นยำเพียงพอ ประการที่สอง กลไกทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง คือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ($Fc = mv^2/r$) แปรผันตามกำลังสองของความเร็วเชิงเส้นปลายใบตี มิใช่แปรผันตรงกับความเร็วรอบ จึงมีแนวโน้มเชิงโค้ง (curvilinear) อยู่ในธรรมชาติของปรากฏการณ์นี้เอง ซึ่งแบบจำลองเชิงเส้นอย่างง่ายไม่สามารถจับลักษณะดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ ประการที่สาม ปัจจัยร่วมที่ไม่ได้ควบคุมอย่างสมบูรณ์ในภาคสนาม เช่น ความสม่ำเสมอของขนาดก้อนปุ๋ยในแต่ละรัน และการกระจายแรงกดของวัสดุภายในถังที่อาจเปลี่ยนแปลงตามปริมาณปุ๋ยที่ลดลงระหว่างการทดลอง อาจเป็นแหล่งความแปรปรวนเพิ่มเติมที่ไม่ได้ถูกอธิบายด้วยตัวแปรความเร็วรอบเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวแปรตอบสนอง

รายการวิเคราะห์	ปุ๋ยที่โรยได้ (กก./ไร่)	เวลาทำงานจริง (นาที)
One-way ANOVA		
F-value	130.96	49.45
P-value	< 0.001	< 0.001
S	1.574	0.347
R^2 (%)	98.00	94.88
R^2(adj) (%)	97.26	92.96
R^2(pred) (%)	95.51	88.49
Regression Analysis		
สมการพยากรณ์	Y = 454.21 + 0.03417X	Y = 33.072 − 0.004293X
ทิศทางความสัมพันธ์	เชิงบวก	เชิงลบ
Coefficient ของ X	0.03417	−0.004293
t-value	8.34	−5.17
P-value ของ X	< 0.001	< 0.001
R^2 (%)	87.43	72.76
R^2(adj) (%)	86.17	70.04
R^2(pred) (%)	82.29	60.00
F-value (Regression)	69.54	26.71
P-value(Regression)	< 0.001	< 0.001
Lack-of-Fit F-value	21.20	17.30
Lack-of-Fit P-value	0.001	0.001
ข้อสรุป	ความเร็วรอบสูงช่วยเพิ่มปริมาณปุ๋ยที่โรยได้	ความเร็วรอบสูงช่วยลดเวลาทำงาน

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ปัจจัยความเร็วรอบเพลาตีกระจายมีอิทธิพลต่อปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มากกว่าเวลาทำงานจริง เนื่องจากให้ค่า F-value และค่า R^2 สูงกว่า แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการระบายปุ๋ยมากที่สุด ขณะที่เวลาทำงานยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยร่วมอื่นในระบบอยู่บ้าง ดังนั้น ในการออกแบบและกำหนดสภาวะการใช้งานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์ ควรให้ความสำคัญกับการเลือกความเร็วรอบเพลาตีกระจายที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ทั้งปริมาณการโรยปุ๋ยสูงและลดระยะเวลาการปฏิบัติงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานจริง

6. สรุปผล

ในเชิงกลศาสตร์ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบเพลาสูงขึ้น ความเร็วเชิงเส้นของปลายใบตีจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและพลังงานจลน์ที่ใช้ในการตัดและสลัดมวลปุ๋ยมีค่ามากขึ้น จึงช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์การจับตัวค้างถัง (Bridging Effect) ทำให้ปุ๋ยสามารถไหลผ่านชุดจ่ายได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีปริมาณปุ๋ยที่โรยได้มากขึ้นและใช้เวลาปฏิบัติงานลดลง

ในด้านการใช้พลังงาน ผู้วิจัยได้ตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบเพลา 1,350 รอบต่อนาที ได้เท่ากับ 0.70 ลิตรต่อไร่ เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลต้นกำลังทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ 1,800 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง (ปรับเฉพาะอัตราทดพูลเลย์เพื่อเปลี่ยนความเร็วรอบเพลาตีปุ๋ย) จึงสามารถประมาณอัตราการใช้น้ำมันที่ระดับความเร็วรอบอื่นโดยอาศัยสัดส่วนกับเวลาปฏิบัติงานจริง ได้ผลประมาณเท่ากับ 0.78, 0.74 และ 0.71 ลิตรต่อไร่ ที่ความเร็วรอบ 700, 800 และ 1,012 รอบต่อนาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าประมาณนี้อาศัยสมมติฐานว่าอัตราการใช้น้ำมันต่อหน่วยเวลาคงที่ตลอดช่วงความเร็วรอบเพลาที่ทดสอบ ซึ่งในความเป็นจริงภาระโหลดที่เพลาตีปุ๋ยอาจเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบและส่งผลต่ออัตราการใช้น้ำมันเล็กน้อย จึงควรมีการตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำมันจริงในทุกระดับความเร็วรอบในการศึกษาต่อไป เพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวโน้มดังกล่าว

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของสมชาย และคณะ (2565) ที่พบว่าความเร็วรอบของกลไกสลัดระบายที่สูงขึ้นช่วยลดอัตราการตกค้างของวัสดุในเครื่องหว่านปุ๋ยคอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากใบตีสามารถสร้างพลังงานกลในการเหวี่ยงสลัดได้มากกว่าอัตราการเกาะพอกของปุ๋ยชื้นที่มีความหนืด ทิศทางผลลัพธ์เดียวกันนี้ยังพบในงานวิจัยต่างประเทศของ Pourreza และคณะ (2015) ซึ่งศึกษาเครื่องกระจายปุ๋ยแบบดรัมเกลียว และรายงานว่าความกว้างของแนวกระจายปุ๋ยเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของดรัมในช่วง 450–950 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม งานวิจัยทั้งสองข้างต้นยังไม่ได้รายงานปรากฏการณ์ Lack-of-Fit อย่างชัดเจนเช่นในงานวิจัยนี้ ซึ่งอาจเป็นเพราะช่วงความเร็วรอบที่ทดสอบในงานวิจัยดังกล่าวมีระยะห่างเท่ากันและครอบคลุมช่วงที่กว้างกว่า เพื่อตรวจสอบข้อสังเกตดังกล่าว ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การถดถอยพหุนามกำลังสองเพิ่มเติมจากข้อมูลที่มีอยู่ พบว่าค่า R^2 ของทั้งสองตัวแปรตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงเส้น (ปุ๋ยที่โรยได้: ร้อยละ 87.43 เป็น 96.89 และเวลาทำงานจริง: ร้อยละ 72.76 เป็น 89.89) ซึ่งยืนยันว่าความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเร็วรอบเพลากับสมรรถนะการทำงานมีลักษณะโค้งจริงตามที่คาดการณ์ไว้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระดับความเร็วรอบที่ทดสอบในงานวิจัยนี้มีระยะห่างไม่เท่ากัน (700, 800, 1,012, 1,350 รอบต่อนาที) การศึกษาในอนาคตควรออกแบบการทดลองด้วยระดับความเร็วรอบที่มีระยะห่างเท่ากันและเพิ่มจำนวนระดับ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามกำลังสองให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าความเร็วรอบเพลาตีกระจายระดับสูงมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบ 1,350 รอบต่อนาที ซึ่งให้สมรรถนะดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองครั้งนี้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเฉพาะ ได้แก่ การใช้ปุ๋ยมูลโคที่มีความชื้นร้อยละ 20 และการควบคุมความเร็วเคลื่อนที่ของรถไถเดินตามให้คงที่ที่ 0.56 เมตรต่อวินาที ดังนั้น การประยุกต์ใช้เครื่องโรยปุ๋ยมูลสัตว์กับปุ๋ยอินทรีย์ชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน หรือภายใต้สภาพพื้นที่และสภาวะการทำงานที่แตกต่างออกไป อาจจำเป็นต้องมีการศึกษาปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของการใช้งานจริง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กฤษดา แสนเทพ. (2557). การออกแบบและพัฒนาเครื่องโรยปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. ใน รายงานการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 15 (หน้า 342–349). มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[2] โกวิท กันหาไชย. (2557). การออกแบบและสร้างเครื่องให้ปุ๋ยอ้อยพร้อมไถกลบ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[3] พล ศรีษะโคตร. (2557). การพัฒนาเครื่องหยอดเมล็ดข้าวโพดและให้ปุ๋ยในขั้นตอนเดียว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ, 37(2), 185–196.

[4] บัญญัติ นิยมวาส. (2558). การออกแบบและคำนวณระบบส่งกำลังด้วยสายพานและพูลเลย์ในเครื่องจักรกลเกษตร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[5] มงคล คธาพันธ์. (2557). การศึกษาและออกแบบเครื่องโรยปุ๋ยสำหรับสวนยางพารา. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 20(1), 45–52.

[6] ธีรพล เจริญสุข. (2564). การวิเคราะห์ทางสถิติและการวางแผนการทดลองในงานวิศวกรรมเกษตร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[7] สมชาย แก้วมณี, ประเสริฐ บุญมี, และ อนุรักษ์ วงศ์ใหญ่. (2565). อิทธิพลของความเร็วรอบกลไกการป้อนและการกระจายต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องหว่านปุ๋ยคอก. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 28(2), 45–58.

[8] สหรัฐ แสนคำ, วิชัย ใจดี, และ เกียรติศักดิ์ โชคดี. (2563). คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของปุ๋ยหมักอินทรีย์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลในถังบรรจุทรงกรวยแคบ. วารสารวิจัยและพัฒนาจักรกลเกษตร, 13(1), 12–25.

[9] หลักการออกแบบเครื่องจักรกล. (2557). หลักการออกแบบเครื่องจักรกล. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[10] อุดม นาแอะ. (2557). การใช้ประโยชน์จากปุ๋ยมูลสัตว์เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มผลผลิตพืชอย่างยั่งยืน. กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.

[11] Pourreza, J., et al. (2015). Performance simulation of a helical wet manure distributer machine. Journal of Agricultural Machinery, 17(2), 60–68.

[12] Singh, R.C., and Singh, C.D. (2014). Design and development of animal drawn farmyard manure spreader. African Journal of Agricultural Research, 9, 1–10.

การประเมินสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

Technical Performance, Economic Benefits, and Greenhouse Gas Emission Reduction Assessment of a Rooftop Solar Photovoltaic System: A Case Study of Vongchavalitkul University

อานนท์ ศรีสว่าง[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่อยู่ 84 หมู่ 4 ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: E-mail: arnon_sri@vu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 081-8788275, เบอร์โทรสาร 044-009012

บทคัดย่อ

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Rooftop Solar Photovoltaic System) เป็นแนวทางสำคัญในการลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดในสถาบันการศึกษา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 419.2 กิโลวัตต์พีก ที่ติดตั้ง ณ อาคารกลาง มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเริ่มดำเนินการตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2567 โดยใช้ข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงาน และค่าไฟฟ้าจริง **ตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ.2567 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ.2569** เป็นกรณีศึกษา

ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 422.16 เมกะวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2567 และ 509.51 เมกะวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2568 คิดเป็นสัดส่วนการทดแทนการใช้ไฟฟ้าของอาคารประมาณร้อยละ 29.36 และ 30.32 ตามลำดับ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เกือบทั้งหมดถูกใช้ภายในอาคาร ส่งผลให้สามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ระบบยังสร้างผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากการลดค่าไฟฟ้าสะสมประมาณ 1.87 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2567 และ 2.25 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2568 รวมทั้งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมได้ 559.23 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนด้านพลังงานและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของมหาวิทยาลัย โดยข้อมูลจากการดำเนินงานจริงเป็นระยะเวลากว่า 2 ปี สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการวางแผนลงทุนและขยายระบบพลังงานหมุนเวียนในสถาบันการศึกษาและองค์กรขนาดกลางในอนาคต

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, โซลาร์เซลล์บนหลังคา, การประเมินสมรรถนะ, ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์, การลดก๊าซเรือนกระจก

Abstract

Rooftop solar photovoltaic (PV) systems have become an effective solution for reducing electricity costs and promoting the adoption of renewable energy in educational institutions. This study aims to evaluate the technical performance, economic benefits, and environmental impacts of a 419.2 kWp rooftop solar PV system installed at the Central Building of Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. The system has been in operation since March 2024. Actual electricity generation, energy consumption, and using actual operational data collected **from March 2024 to June 2026**.

The results indicate that the PV system generated 422.16 MWh in 2024 and 509.51 MWh in 2025, contributing approximately 29.36% and 30.32% of the building's annual electricity demand, respectively. Nearly all generated electricity was consumed on-site, significantly reducing dependence on the utility grid. Economically, the system achieved cumulative electricity cost savings of approximately 1.87 million THB in 2024 and 2.25 million THB in 2025. In addition, the system contributed to environmental sustainability by reducing cumulative carbon dioxide emissions by 559.23 tons of CO_2 equivalent.

The findings demonstrate that the rooftop solar PV system is highly effective in reducing energy costs and supporting the university's sustainability goals. The operational data collected over more than two years provide valuable insights for planning future renewable energy investments and expanding solar energy applications in educational institutions and medium-sized organizations.

Keywords: Solar Photovoltaic System, Rooftop Solar, Technical Performance Assessment, Economic Analysis, Greenhouse Gas Emission Reduction, Renewable Energy.

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้น หลายประเทศจึงให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงในประเทศไทย เนื่องจากได้รับรังสีดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปี การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Rooftop Solar Photovoltaic System) จึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในสถาบันการศึกษาและอาคารขนาดใหญ่ที่มีการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาการผลิตไฟฟ้าของระบบช่วยลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุลได้ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 419.2 กิโลวัตต์พีก จำนวน 560 แผง บนอาคารศูนย์กลางและเริ่มดำเนินการเมื่อวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2567 เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการพลังงานและการพัฒนามหาวิทยาลัยสีเขียว อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลการดำเนินงานจริงของระบบในระยะยาว โดยเฉพาะด้านสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในสถาบันอุดมศึกษาไทยยังมีอยู่จำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินสมรรถนะเชิงเทคนิค ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จากข้อมูลการใช้งานจริงตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ.2567 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ.2569 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและส่งเสริมการลงทุนด้านพลังงานหมุนเวียนในสถาบันการศึกษาและองค์กรที่มีลักษณะการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน

นอกจากประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการบริหารจัดการต้นทุนพลังงาน (Energy Cost Management) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ (Industrial Engineering and Management) เนื่องจากช่วยลดต้นทุนการดำเนินงาน (Operational Cost) เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาองค์กรสู่ความยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 419.2 กิโลวัตต์พีก ของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
2. วิเคราะห์การลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายและมูลค่าการประหยัดค่าไฟฟ้าหลังการติดตั้งระบบ
3. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการจากข้อมูลการดำเนินงานจริง
4. ประเมินผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมจากการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบ

ESTACON 2026 | 17th

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลการดำเนินงานจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Rooftop Solar PV) ที่ติดตั้ง ณ อาคารศูนย์กลาง มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล เพื่อประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงาน ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

3.1 หลักการและมาตรฐานที่ใช้ในการประเมิน

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อ้างอิงตามแนวทางของ IEC 61724-1 และ IEA PVPS ซึ่งกำหนดตัวชี้วัดด้านประสิทธิภาพ เช่น Annual Energy Production, Specific Yield และ Performance Ratio (PR) สำหรับการประเมินสมรรถนะของระบบ Solar PV นอกจากนี้ การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมใช้ค่า Grid Emission Factor ของประเทศไทยตามองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) ค่า Specific Yield ที่ได้อยู่ในช่วง 1,000–1,300 kWh/kWp/year ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐานของประเทศไทยที่รายงานโดย IEA PVPS และงานวิจัยของ Wongwan et al. (2024)

3.2 รายละเอียดระบบ Solar Rooftop

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 419.2 กิโลวัตต์พีก จำนวน 560 แผง ติดตั้งบนหลังคาอาคารศูนย์กลาง มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล เริ่มดำเนินการเมื่อวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2567 ในรูปแบบ Grid-Connected Solar PV

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยรวบรวมจากระบบติดตามผลการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และข้อมูลค่าไฟฟ้าของมหาวิทยาลัย ประกอบด้วยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ การใช้ไฟฟ้ารวมของอาคาร การใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่าย ค่าไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ และข้อมูลการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลจริงในช่วงปี พ.ศ. 2567–2569

3.4 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเมินตามแนวทางของ **IEC 61724-1:2021** โดยใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (Annual Energy Production) และค่าผลผลิตจำเพาะ (Specific Yield) เพื่อสะท้อนประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ดังสมการที่ (1)

$$\text{Specific Yield} = \frac{\text{Annual Energy Production}}{\text{Installed Capacity}} \quad (1)$$

เมื่อ

Specific Yield = ผลผลิตจำเพาะของระบบ (kWh/kWp/year)

Annual Energy Production = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (kWh)

Installed Capacity = กำลังการผลิตติดตั้งของระบบ (kWp)

นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับการใช้ไฟฟ้ารวมของอาคาร เพื่อประเมินศักยภาพในการลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบโครงข่าย (Grid).

3.5 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

วิเคราะห์ผลตอบแทนจากมูลค่าการประหยัดค่าไฟฟ้าหลังการติดตั้งระบบ และคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (Simple Payback Period) โดยโครงการมีมูลค่าการลงทุนรวม 9.40 ล้านบาท

สมการที่ (2)

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Initial Investment}}{\text{Annual Cost Saving}} \quad (2)$$

เมื่อ

Payback Period = ระยะเวลาคืนทุน (ปี)

Initial Investment = เงินลงทุนเริ่มต้น (บาท)

Annual Cost Saving = ประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)

ในการศึกษานี้ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีมูลค่าการลงทุนรวม **9.40 ล้านบาท** โดยผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนใช้ข้อมูลการประหยัดค่าไฟฟ้าจากการดำเนินงานจริงของระบบ เพื่อสะท้อนความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการภายใต้สภาพการใช้งานจริง

3.6 การประเมินผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

ประเมินผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของระบบในการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน

(1) Specific Yield

$$SY = \frac{E_{annual}}{P_{installed}}$$

(2) Payback Period

$$PP = \frac{Investment}{Annual\ Saving}$$

(3) CO_2 Reduction

$$CO_2 = E \times EF$$

เมื่อ

E = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh)

EF = Grid Emission Factor

ประเทศไทย **0.4999 kgCO_2/kWh**

4. ผลการศึกษาและอภิปลายผล

ผลการศึกษานำเสนอผลการดำเนินงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลการใช้งานจริง โดยครอบคลุมสมรรถนะการผลิตพลังงาน การประหยัดค่าไฟฟ้า ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม พร้อมอภิปรายผลโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 ผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด **419.2 กิโลวัตต์พีก** ที่ติดตั้งบนอาคารกลาง มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงการศึกษา โดยในปี พ.ศ. 2567 ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ **422.16 เมกะวัตต์ชั่วโมง** และเพิ่มขึ้นเป็น **509.51 เมกะวัตต์ชั่วโมง** ในปี พ.ศ. 2568 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ปี	พลังงานที่ผลิตได้ (MWh)
2567	422.16
2568	509.51

เมื่อประเมินสมรรถนะของระบบตามแนวทาง **IEC 61724-1** พบว่า ค่าผลผลิตจำเพาะ (Specific Yield) เท่ากับ **1,007 kWh/kWp/year** ในปี พ.ศ. 2567 และ **1,216 kWh/kWp/year** ในปี พ.ศ. 2568 ซึ่งอยู่ในช่วงสมรรถนะที่เหมาะสมของประเทศไทย สะท้อนให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงาน โดยความแตกต่างของผลผลิตในแต่ละปีเกิดจากรังสีดวงอาทิตย์ สภาพอากาศ และระยะเวลาการเดินระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง **IEC 61724-1** และ **IEA PVPS**



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารกลาง มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง **419.2 กิโลวัตต์พีก**

จากรูปที่ 1 แสดงระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน **560 แผง** ติดตั้งบนหลังคาอาคารกลางในรูปแบบ **Grid-Connected Solar PV** เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้ภายในมหาวิทยาลัยและลดการใช้พลังงานจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า

4.2 การลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่าย

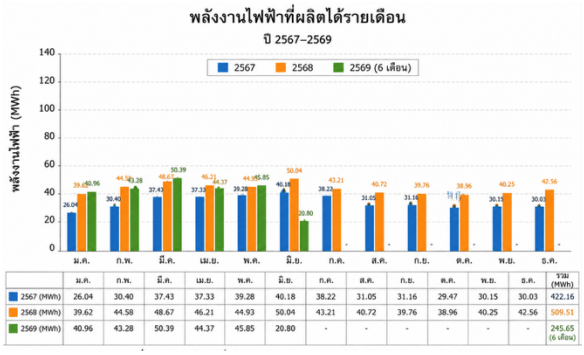
ผลการวิเคราะห์พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้ภายในอาคารเป็นส่วนใหญ่ โดยในปี พ.ศ. 2567 ระบบสามารถทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายได้ **ร้อยละ 29.36** และเพิ่มขึ้นเป็น **ร้อยละ 30.32** ในปี พ.ศ. 2568 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ปี	พลังงานที่ผลิตได้ (MWh)	การใช้ไฟฟ้ารวมของอาคาร (MWh)	สัดส่วนพลังงานจาก Solar PV (%)
2567	422.16	1,438.00	29.36
2568	509.51	1,680.00	30.32
2569 (ม.ค.–มิ.ย.)	245.65	820.00	29.96

หมายเหตุ: สัดส่วนพลังงานจาก Solar PV คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการใช้ไฟฟ้ารวมของอาคาร

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายได้ประมาณร้อยละ 30 ของความต้องการพลังงานทั้งหมดของอาคาร ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีนัยสำคัญต่อการลดต้นทุนด้านพลังงานในระยะยาว



รูปที่ 2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายเดือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงปี พ.ศ. 2567–2569

จากรูปที่ 2 พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 419.2 กิโลวัตต์พีก สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2568 มีปริมาณพลังงานผลิตสูงสุดเท่ากับ 509.51 เมกะวัตต์ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 422.16 เมกะวัตต์ชั่วโมงในปี พ.ศ. 2567 ขณะที่ช่วงเดือนมกราคม–มิถุนายน พ.ศ. 2569 สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้แล้ว 245.65 เมกะวัตต์ชั่วโมง ทั้งนี้ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละเดือนมีความแตกต่างกันตามสภาพอากาศและปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นว่าระบบมีความเสถียรและสามารถช่วยลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3 ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

จากการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ พบว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างชัดเจน โดยในปี พ.ศ. 2567 สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้ประมาณ 1.87 ล้านบาท และในปี พ.ศ. 2568 สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 2.25 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลตอบแทนจากการประหยัดค่าไฟฟ้า

ปี	มูลค่าการประหยัดค่าไฟฟ้า (บาท)
2567	1,870,000
2568	2,250,000

เมื่อพิจารณาจากเงินลงทุน 9.40 ล้านบาท และมูลค่าการประหยัดค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.06 ล้านบาทต่อปี พบว่าระบบมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.6 ปี สะท้อนถึงความคุ้มค่าในการลงทุนด้านพลังงานหมุนเวียนสำหรับสถาบันการศึกษา

นอกจากนี้ ผลการดำเนินงานจริงยังแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถช่วยลดความผันผวนของค่าไฟฟ้าที่เกิดจากการปรับเพิ่มอัตราค่าไฟฟ้าในอนาคตได้อีกด้วย

4.4 ผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้า และส่งผลให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลง โดยข้อมูลจากระบบติดตามผลการทำงานแสดงให้เห็นว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมได้ 559.23 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_2e)

นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้ถ่านหินได้ประมาณ 470.93 ตัน และมีผลกระทบเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อมเทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้จำนวน 764 ต้น งานวิจัยนี้ใช้ค่า Grid Emission Factor ของประเทศไทย เท่ากับ **0.4999 $kgCO_2/kWh$** ตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังสนับสนุนเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกและการพัฒนาอย่างยั่งยืนของมหาวิทยาลัยอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

รายการ	ค่า
ลดการปล่อย CO_2	559.23 ตัน
ประหยัดถ่านหิน	470.93 ตัน
เทียบเท่าการปลูกต้นไม้	764 ต้น

หมายเหตุ

คำนวณจากค่า Grid Emission Factor ของประเทศไทย (TGO)

4.5 อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด **419.2 กิโลวัตต์พีก** สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าผลผลิตจำเพาะอยู่ในช่วง **1,007–1,216 kWh/kWp/year** ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน **IEC 61724-1** และอยู่ในช่วงสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย นอกจากนี้ ระบบยังสามารถทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายได้ประมาณ **ร้อยละ 30** ของความต้องการใช้ไฟฟ้าของอาคาร ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ **4.6 ปี** แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าของการลงทุนในระยะยาว

ในด้านสิ่งแวดล้อม ระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการใช้พลังงานสะอาดของมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University) และสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะด้านพลังงานสะอาดและการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ประเมินผลการดำเนินงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด **419.2 กิโลวัตต์พีก** ของมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล โดยใช้ข้อมูลการใช้งานจริงในช่วงปี พ.ศ. 2567–2569 ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ **422.16** และ **509.51 เมกะวัตต์ชั่วโมง** ในปี พ.ศ. 2567 และ 2568 ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนประมาณ **ร้อยละ 30** ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร ส่งผลให้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านเศรษฐศาสตร์ ระบบสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ **1.87 ล้านบาท** ในปี พ.ศ. 2567 และ **2.25 ล้านบาท** ในปี พ.ศ. 2568 เมื่อเทียบกับเงินลงทุน **9.40 ล้านบาท** ขณะที่ด้านสิ่งแวดล้อม ระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมได้ **559.23 ตัน** ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบมีความคุ้มค่าทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืนในสถาบันการศึกษาและองค์กรภาครัฐ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสมรรถนะและการเสื่อมสภาพของระบบในระยะยาว เพื่อประเมินประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งาน
2. ควรวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)
3. ควรศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Energy Storage System : BESS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคาร
4. ควรจัดทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานในระยะยาว

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล สถานที่ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). *ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิต/การใช้พลังงานไฟฟ้า (Grid Emission Factor) สำหรับโครงการและกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก*.

[2] Farungsang, L., Chontanawat, J., & Chaisaard, P. (2025). Geospatial assessment and economic analysis of roof top solar photovoltaic potential in Thailand. *Sustainability, 17*(15), 7052. https://doi.org/10.3390/su17157052

[3] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS). (2025). *Trends in photovoltaic applications 2025*. IEA-PVPS. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2025/

[4] International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 61724-1:2021 Photovoltaic system performance—Part 1: Monitoring* (2nd ed.). International Electrotechnical Commission.

[5] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2022). *Guidelines for operation and maintenance of photovoltaic power plants in different climates (IEA-PVPS T13-25:2022).* International Energy Agency PVPS.

[6] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2025). *Trends in photovoltaic applications 2025.* International Energy Agency PVPS.

[7] Iriyanto, S. D., Rehiara, A. B., & Rumengan, Y. (2025). Techno-economic assessment of rooftop solar photovoltaic integration for institutional energy efficiency and sustainability enhancement. *Social, Ecology, Economy for Sustainable Development Goals Journal, 3*(1), 57–70. https://doi.org/10.61511/seesdgj.v3i1.2025.1967

[8] Krungsri Research. (2025). *Rooftop solar: Global clean energy trends and growth opportunities in Thailand*. Bank of Ayudhya Public Company Limited. https://www.krungsri.com/en/research/research-intelligence/solar-rooftop-2025

[9] SolarPower Europe. (2025). *Global market outlook for solar power 2025–2029*. SolarPower Europe. https://www.solarpowereurope.org

[10] Taduran, A. J. R., & Piao, L. P. (2025). Analyzing the performance of a 2.72 kWp rooftop grid-tied photovoltaic system in Tarlac City, Philippines. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2510.03487

[11] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). (2023). *Emission factor for electricity generation/consumption for greenhouse gas mitigation projects and activities*.

[12] Venkatachalam, S. D., Al-Badi, A., & Al-Mamari, A. (2025). Performance and suitability analysis of rooftop solar photovoltaic systems in Oman. *Scientific Reports, 15*, 1–18.

[13] Wongwan, W., Pleerux, N., Thanomsat, N., & Moukomla, S. (2024). Technical and economic potential of solar energy on rooftops: A case study at Lampang Rajabhat University, Thailand. *International Journal of Geoinformatics, 20*(2), 82–94. https://doi.org/10.52939/ijg.v20i2.3069

[14] Victoria, M., Zhang, Z., Andresen, G. B., Rahdan, P., & Gøtske, E. K. (2024). Lessons learned from establishing a rooftop photovoltaic system crowdsourced by students and employees at Aarhus University. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2412.02258

[15] Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J. M., Linßen, J., & Stolten, D. (2024). High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for a resilient energy system in Ukraine. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2412.06937

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้ กรณีศึกษาของเล่น

Study of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness in Turning of Wood Case Study Toys

สมเสียง จันทาสี[1,*] และ ฤภูวัลย์ จันทรสา[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

*ผู้ติดต่อ: somsiang@eng.buu.ac.th, 084 102 4674

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้ เพื่อให้ได้พื้นผิวที่เหมาะสมในการผลิตของเล่นเด็ก โดยออกแบบการทดลองแบบ Full 2^k Factorial design มีปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัยๆ ละ 2 ระดับ ประกอบด้วยความเร็วรอบ 220-530 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.05-0.5 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1-0.5 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าปัจจัยอิทธิพลหลัก คือ อัตราป้อนและความลึกในการตัด มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการป้อนและความลึกในการตัดลดลง มีผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง โดยสภาวะพารามิเตอร์ที่ให้ความขรุขระน้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และเมื่อทำการยืนยันผลการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ พบว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการยืนยันผลมีค่า 3.63 ไมโครเมตร และค่าทำนายจากสมการที่สภาวะเหมาะสมมีค่า 2.6354 ไมโครเมตร สรุปว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการยืนยันผลมีความแตกต่างจากค่าความขรุขระผิวจากสมการทำนาย

คำสำคัญ: อัตราป้อน ความลึกในการตัด ความขรุขระผิว ของเล่น

Abstract

The objective of this research is to study the effect of shearing parameters on surface roughness during wood turning to achieve a suitable surface finish for producing the children's toys. The experiment design used Full 2k Factorial Design. Three experimental factors were investigated, each at two levels: speed (220–530 rpm), feed rate (0.05–0.5 mm/rev), and depth of cut (0.1–0.5 mm). The experimental results indicate that feed rate and depth of cut are the primary factors significantly influencing workpiece surface roughness; specifically, lower feed rates and depths of cut to result in reduced surface roughness. The parameter conditions yielding the lowest roughness are a feed rate of 0.05 mm/rev and a depth of cut of 0.1 mm. Upon verifying the experimental results against the values calculated using the equation, it was found that the surface roughness values obtained from the verification was 3.63 μm and the predicted value from the equation at the optimal condition is 2.6354 μm. In conclusion, the surface roughness values obtained from the validation differ from those predicted by the equation.

Keywords: Feed, Depth of cut, Surface roughness, Toys

1. บทนำ

ไม้เป็นผลิตผลหลักที่ได้มาจากป่าไม้อันเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญยิ่ง ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งขึ้นมาและสามารถผลิตวัตถุอย่างอื่นขึ้นมาใช้แทนไม้ได้ดี แต่เมื่อการใช้ทำประโยชน์และค่าใช้จ่ายแล้ว ไม้มีคุณสมบัติเหมาะกับการก่อสร้างเกือบทุกชนิด แม้มีข้อเสียอยู่บ้าง โดยไม้มีความทนทานตามธรรมชาติน้อยกว่าวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เนื้ออ่อนปลูกมากในภาคตะวันออกและทนต่อทุกสภาพอากาศทนกับทุกสภาพดิน [1] ปลูกในดินทราย ดินเหนียว ดินลูกรัง จึงนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เนื้ออ่อน โตเร็ว เหมาะนำมาทำเยื่อกระดาษ ชิปไม้ ไม้แผ่น เฟอร์นิเจอร์ และนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับเด็กตั้งแต่ช่วงอายุ 2-6 ปี ซึ่งเป็นช่วงวัยเด็กตอนต้นตามข้อมูลจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ พบว่าข้อมูลจำนวนเด็กไทยในประเทศปี พ.ศ. 2567 อายุระหว่าง 2-6 ปี มีจำนวนทั้งหมด 2,887,617 คน เป็นเพศชายจำนวน 1,485,251 คน และเพศหญิงจำนวน 1,402,366 คน [2]

จากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้มะพร้าว พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวคือ อัตราป้อนและความเร็วตัด แนวโน้มค่าความขรุขระผิวลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนลดลง แต่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น [3] และอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวของไม้หลาวชะโอน พบว่าค่าความขรุขระผิวจะมีแนวโน้มลดลง (ผิวเรียบขึ้น) เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้น ควบคู่กับการลดอัตราป้อนและความลึกในการตัดให้ลดลง [4] และในงานวิจัยในการกลึงไม้ยูคาลิปตัส ชนิดคามาลดูเลนซิส พบว่าความเร็วรอบลดลง อัตราการป้อนสูงขึ้นและความลึกในการตัดลดลง มีผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง [5]

ดังนั้นผู้วิจัยสนใจศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมการผลิตของเล่นจำพวกผลิตภัณฑ์ไม้ และมีความปลอดภัยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของเล่น [6-7]

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การออกแบบการทดลอง

กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) ได้ดังตารางที่ 1 และการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองทั้งหมด 16 ครั้ง

ตารางที่ 1 ค่าของระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย		หน่วย
	-1	+1	
ความเร็วรอบ	220	530	รอบต่อนาที
อัตราป้อน	0.05	0.50	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกในการตัด	0.10	0.50	มิลลิเมตร

จากตารางที่ 1 การทดลองกำหนดไว้ในช่วงความเร็วรอบ 220-530 รอบต่อนาที, อัตราป้อน 0.05-0.5 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.10-0.50 มิลลิเมตร ค่าระดับปัจจัยที่กำหนดในงานวิจัยนี้ให้มีค่าสอดคล้องกับเครื่องกลึงยันศูนย์

2.2 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส

ขั้นตอนการเตรียมไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส

1.1 จัดซื้อท่อนไม้ยูคาลิปตัสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-35 มิลลิเมตร จำนวน 3 ท่อน

1.2 นำมาตัดให้ได้ความยาวประมาณท่อนละ 150 มิลลิเมตร

1.3 นำชิ้นงานกลึงปอกผิวให้ได้ความยาว 150 มิลลิเมตร ตามแนวยาวของชิ้นงานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร

2.3 เครื่องจักร เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกลึงยันศูนย์ ใช้เตรียมชิ้นงานและกลึงปอกผิว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องกลึงยันศูนย์ PINACHO รุ่น SP/165

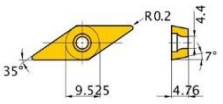
2) ด้ามมีดกลึงและเม็ดมีดคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 3, รูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 3 ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ STELLRAM รุ่น SVJCR



รูปที่ 4 เม็ดมีดที่ใช้กลึง Korloy รุ่น VCGT160402-AK



รูปที่ 5 ขนาดรูปร่างของเม็ดมีด

3) เครื่องวัดความขรุขระผิว Mitutoyo รุ่น Surftest SV-500 ดังรูปที่ 6

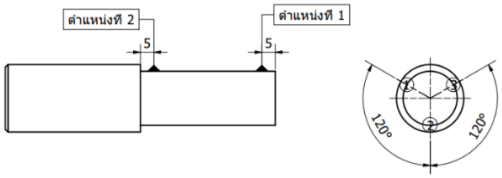


รูปที่ 6 เครื่องวัดความขรุขระผิว

2.4 การวัดค่าในการทดลอง

1) การวัดค่าความขรุขระผิว

นำชิ้นงานที่ผ่านการกลึงวัดหาค่าความความขรุขระผิว การวัดค่าวัด 2 ตำแหน่ง ๆ ละ 3 จุด ตำแหน่งแรกห่างจากปลายประมาณ 5 มิลลิเมตร และตำแหน่งที่ 2 ห่างจากขอบด้านในประมาณ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 และนำค่าบันทึกลงในตาราง



รูปที่ 7 ตำแหน่งและจุดวัดค่าความขรุขระผิว

3. ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแต่ละสภาวะและบันทึกค่าความขรุขระผิว ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความขรุขระผิวจากผลการทดลอง

No.	Run Order	Center Point	Blocks	Speed (r/min)	Feed (mm/r)	Depth (mm)	ประเภทความขรุขระผิว	ค่าความขรุขระผิว ตำแหน่งที่ 1 (µm)			ค่าความขรุขระผิว ตำแหน่งที่ 2 (µm)			เฉลี่ย
								1	2	3	1	2	3	
1	16	1	1	220	0.05	0.1		1.56	2.01	1.07	2.93	1.38	1.73	1.78
2	13	1	1	530	0.05	0.1		1.77	1.63	1.75	1.22	1.60	4.70	2.11
3	5	1	1	220	0.5	0.1		6.69	11.61	3.35	7.29	6.98	5.01	6.82
4	1	1	1	530	0.5	0.1		4.73	7.26	7.16	7.25	8.00	7.37	6.96
5	14	1	1	220	0.05	0.5		3.44	8.80	4.06	3.61	2.53	3.32	4.29
6	6	1	1	530	0.05	0.5		3.13	2.81	1.44	3.34	2.48	5.58	3.13
7	12	1	1	220	0.5	0.5		6.91	6.78	8.36	7.53	7.46	6.08	7.19
8	11	1	1	530	0.5	0.5		7.65	8.41	5.96	5.57	11.14	6.57	7.55
9	9	1	1	220	0.05	0.1	Ra	6.36	1.54	6.06	1.32	1.84	3.91	3.51
10	4	1	1	530	0.05	0.1		2.43	2.81	1.43	1.85	1.07	3.79	2.23
11	7	1	1	220	0.5	0.1		3.82	8.09	3.30	10.75	8.04	5.98	6.66
12	15	1	1	530	0.5	0.1		6.15	5.19	5.45	6.12	7.90	9.99	6.80
13	3	1	1	220	0.05	0.5		8.78	3.64	3.71	2.05	3.76	2.03	4.00
14	10	1	1	530	0.05	0.5		3.43	1.57	2.27	4.99	3.40	4.54	3.37
15	8	1	1	220	0.5	0.5		4.70	5.98	13.61	7.53	7.50	10.24	8.26
16	2	1	1	530	0.5	0.5		6.53	5.19	7.97	4.24	4.46	6.10	5.75

จากตารางที่ 2 ค่าความขรุขระผิวทั้ง 2 ตำแหน่ง ๆ ละ 3 จุด ออกแบบการทดลองทำซ้ำ Blocks ละ 1 ครั้ง รวมจำนวนการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำค่าความขรุขระผิวมาเฉลี่ยให้ได้เพียงค่าเดียว

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน

4.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ได้ผลดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่า P-value ของปัจจัยร่วมของ 2-Way Interactions ไม่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.752 0.248 และ 0.200 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้บ่งชี้ได้ว่าปัจจัยนี้ “ไม่มีอิทธิพล” ต่อค่าความขรุขระผิวภายใต้เงื่อนไขของการ

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การทดลอง โดยเลือกปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลอง

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	67.980	11.330	25.830	0.000
Linear	3	66.427	22.142	50.490	0.000
Speed	1	1.326	1.326	3.020	0.116
Feed	1	62.331	62.331	142.120	0.000
Depth	1	2.770	2.770	6.310	0.033
2-Way Interactions	3	1.554	0.518	1.180	0.370
Speed*Feed	1	0.047	0.047	0.110	0.752
Speed*Depth	1	0.670	0.670	1.530	0.248
Feed*Depth	1	0.837	0.837	1.910	0.200
Error	9	3.947	0.439	-	-
Lack-of-Fit	1	0.155	0.155	0.330	0.583
Pure Error	8	3.792	0.474	-	-
Total	15	71.928	-	-	-

ทดลอง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์การทดลองอีกครั้ง โดยการตัดปัจจัยร่วมที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวออก ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การทดลองโดยตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออก

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	66.427	22.1423	48.30	0
Linear	3	66.427	22.1423	48.30	0
Speed	1	1.326	1.326	2.89	0.115
Feed	1	62.331	62.331	135.98	0
Depth	1	2.769	2.769	6.04	0.03
Error	12	5.501	0.4584	-	-
Lack-of-Fit	4	1.709	0.4272	0.90	0.503
Pure Error	8	3.792	0.474	-	-
Total	15	71.928	-	-	-

จากตารางที่ 4 ค่า P-value ของความเร็วรอบมีค่าเท่ากับ 0.115 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยนี้ไม่มีอิทธิพล ดังนั้นทำการวิเคราะห์การทดลองอีกครั้งโดยการตัดปัจจัยความเร็วรอบออก ได้ดังตารางที่ 5

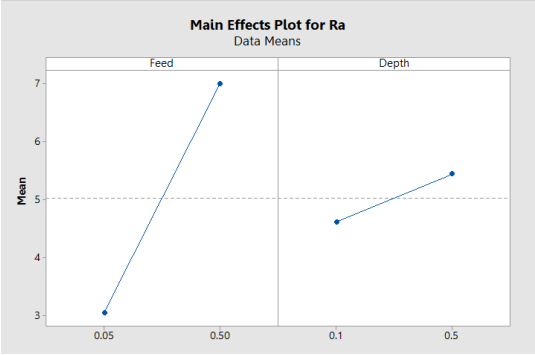
จากตารางที่ 5 การวิเคราะห์การทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของไม้ยูคาลิปตัสผ่านกระบวนการกลึง คือ อัตราป้อน และความลึกในการตัด

4.1.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว

ผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว ได้แก่ อัตราป้อนและความลึกในการตัด ในขณะที่ความเร็วรอบไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงได้นำแผนภาพ Main Effects Plot สำหรับค่าความขรุขระผิวมาใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มของค่าความขรุขระผิวที่ระดับต่าง ๆ ของทั้ง 2 ปัจจัย แสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การทดลองโดยตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพล

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	2	65.100	32.550	61.98	0.000	
Linear	2	65.100	32.550	61.98	0.000	
Feed	1	62.331	62.331	118.69	0.000	
Depth of Cut	1	2.769	2.769	5.27	0.039	
Error	12	6.827	0.525	-	-	
Lack-of-Fit	4	3.035	0.607	1.28	0.359	
Pure Error	8	3.792	0.474	-	-	
Total	15	71.928	-	-	-	
Model Summary						
S		R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
0.724682		90.51%	89.05%	85.62%		
Analysis of Variance						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-	5.025	0.181	27.74	0.000	-
Feed	3.948	1.974	0.181	10.89	0.000	1.0
Depth of Cut	0.832	0.416	0.181	2.30	0.039	1.0



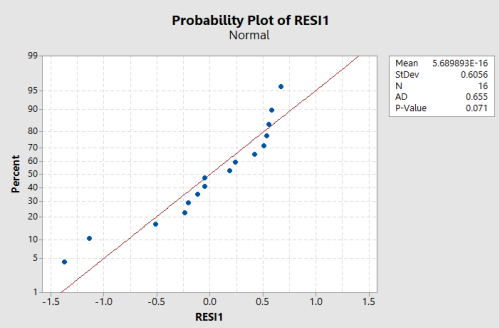
รูปที่ 8 Main Effects Plot ค่าความขรุขระผิว

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าความขรุขระผิวมีความแปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนและความลึกในการตัด โดยเมื่อปรับเพิ่มอัตราป้อนจาก 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ เป็น 0.50 มิลลิเมตรต่อรอบ และเพิ่มความลึกในการตัดจาก 0.1 ไมโครเมตร เป็น 0.5 ไมโครเมตร พบว่าผิวชิ้นงานมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ

การตรวจสอบความปกติด้วย Probability plot ได้ดังรูปที่ 9

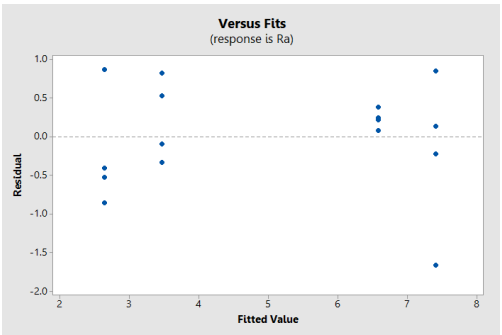


รูปที่ 9 การแจกแจงด้วย Probability Plot

จากรูปที่ 9 พบว่าค่า P-value มีค่า 0.071 มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 มีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

โดยการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล ได้ดังรูปที่ 10

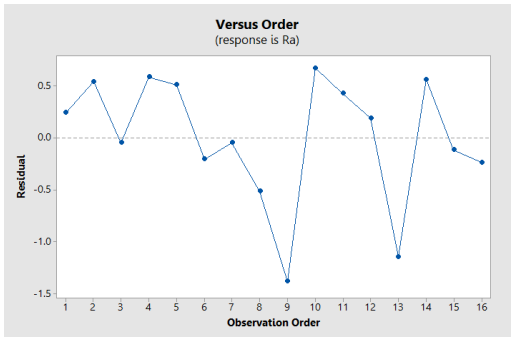


รูปที่ 10 กราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างค่าความขรุขระผิวกับ Fitted value

จากกราฟรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าที่พยากรณ์ได้จากโมเดล (Fitted Values) โดยพบว่าจุดข้อมูลส่วนใหญ่กระจายตัวแบบสุ่มรอบเส้น โดยไม่ปรากฏรูปแบบชัดเจน

3. การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน ได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

จากรูปที่ 11 กราฟแสดงการแกว่งขึ้นลง แต่ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนหรือแนวโน้มที่แน่นอน

4.3 สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) สามารถนำผลวิเคราะห์ที่ได้จากตารางที่ 5 สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังสมการที่ 1

$$R_a = 1.989 + 8.772\ Feed + 2.080\ Depth \quad (1)$$

เมื่อ R_a คือ ค่าความขรุขระผิวที่คาดการณ์ (μm)

Feed คือ อัตราการป้อน (mm/rev.)

Depth คือ ความลึกในการตัด (mm)

4.4 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การหาสภาวะพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเลือกคำนวณ Minimize ได้ดังรูปที่ 12

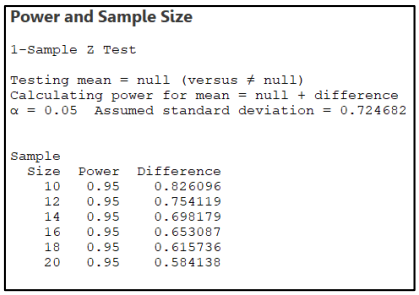


รูปที่ 12 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากรูปที่ 12 ระดับปัจจัยที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร จะได้ค่าความขรุขระผิว 2.6354 ไมโครเมตร

4.5 ยืนยันผลจากการทดลอง

การทดสอบยืนยันผลเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปค่าปัจจัย 2 ปัจจัย คืออัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร การทดลองนี้ใช้ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที อ้างอิงจากงานวิจัย [5] สำหรับจำนวนการทดลองยืนยันผลได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการคำนวณ

จากรูปที่ 13 การยืนยันผลใช้ชิ้นงานจำนวน 16 ชิ้น และได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความขรุขระผิว R_a ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

No.	ค่าความขรุขระผิว R_a						ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
1	5.36	4.59	5.70	3.52	8.02	6.18	5.56
2	7.79	9.68	3.54	3.11	6.68	2.24	5.51
3	1.34	2.12	4.12	8.06	3.39	2.29	3.55
4	2.55	1.04	1.11	3.54	4.25	4.75	2.87
5	1.51	5.68	5.64	2.28	3.33	4.06	3.75
6	8.07	2.23	3.51	1.46	1.67	1.91	3.14
7	1.45	5.39	2.98	3.04	2.33	2.21	2.90
8	3.02	4.79	5.59	2.10	4.18	7.71	4.57
9	3.74	2.73	5.58	2.46	3.75	7.39	4.28
10	5.89	1.60	2.23	2.86	5.61	1.97	3.36
11	1.45	3.59	1.53	1.42	3.23	1.23	2.08
12	1.83	3.34	5.00	4.79	4.02	5.46	4.07
13	2.53	3.55	4.61	3.23	2.85	7.15	3.99
14	4.13	1.31	4.40	1.74	1.24	1.81	2.44
15	3.43	4.47	3.20	3.33	1.26	1.88	2.93
16	3.81	3.09	3.08	2.35	4.81	1.48	3.10
ค่าเฉลี่ยรวม							3.63

จากตารางที่ 6 ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.63 ไมโครเมตร

4.6 การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

การทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยตั้งสมมติฐานและกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ดังนี้

H_0 : $\mu = 2.6354$

H_1 : $\mu \neq 2.6354$

H_0 : ค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลไม่มีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวจากสมการทำนายค่าความขรุขระผิว

H_1 : ค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวจากสมการทำนายค่าความขรุขระผิว

การตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์ One-Sample T-Test ได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์การยืนยันผลการทดลอง

One-Sample T: ยืนยันผล							
Test of μ = 2.6354 vs ≠ 2.6354							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T-Value	P-Value
Ra	16	3.63	0.997	0.249	(3.100, 4.163)	3.99	0.001

ผลการวิเคราะห์ค่า P-Value เท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ดังนั้นสรุปว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวจากสมการทำนายค่าความขรุขระผิว

5. สรุปผล

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนต่อค่าความขรุขระผิวของการกลึงไม้กรณีศึกษาของเล่น ได้อิทธิพลหลักคือ อัตราป้อน และความลึกในการตัด และสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวกับตัวแปรอิสระ ได้สมการดังนี้

$$R_a = 1.989 + 8.772\ Feed + 2.080\ Depth$$

โดยระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกการตัด 0.1 มิลลิเมตร และเมื่อยืนยันผลค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันกับค่าความขรุขระผิวจากสมการทำนายค่าความขรุขระผิว

6. เอกสารอ้างอิง

[1] อานนท์ วงษ์แก้ว. (2562). *การศึกษาคุณสมบัติของไม้ยูคาลิปตัสที่ปลูกในภาคตะวันออกเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง*. มกราคม 2562.

[2] สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (ม.ป.ป.). *สำมะโนประชากรและเคหะ*. สืบค้น 10 ตุลาคม 2567, จาก http://www.nso.go.th

[3] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และคณะ. (2558). อิทธิพลของของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวและการสึกหรอของเม็ดมีดในกลึงไม้มะพร้าวสำหรับทำชิ้นส่วนของเฟอร์นิเจอร์. ใน *รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53: สถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์* (หน้า 385-392). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[4] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และคณะ. (2561). การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดต่อความขรุขระผิวในการกลึงไม้หลาวชะโอน. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56: สถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์* (หน้า 438-445). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[5] สมเสียง จันทาสี, แพไหม สุดอารี และ อัจฉราภรณ์ นันตะเคน. (2567). การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนต่อความขรุขระผิวงานกลึงไม้. ใน *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2567* (หน้า 577–583). มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

[6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562). *ของเล่น: เฉพาะด้านความปลอดภัย เล่ม 1*. กระทรวงอุตสาหกรรม.

[7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562). *ของเล่น: เฉพาะด้านความปลอดภัย เล่ม 2*. กระทรวงอุตสาหกรรม.

การพัฒนาเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกล้วยฉาบ
Development of a Three-Blade Banana Slicing Machine for Improving Productivity in Banana Chip Production

พงษ์ศักดิ์ นาใจคง, เสน่ห์ บุญรำไพ, ชัยวัฒน์ วัฒนะกุล, ภูมิบุญ พลต้างและ สุทัศน์ ยอดเพ็ชร*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอ เมือง จังหวัด นครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: E-mail: suthad@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 081-2512020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดสำหรับลดเวลา เพิ่มความสม่ำเสมอของแผ่นกล้วย และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตกล้วยฉาบระดับชุมชน เครื่องใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ส่งกำลังผ่านชุดพูลเลย์และสายพานไปยังกลไกข้อเหวี่ยง ชุดใบมีด 3 ใบฝานกล้วยตามแนวยาวครั้งละ 2 ผล ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที การทดสอบใช้กล้วยน้ำว้าครั้งละ 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ พบว่าเครื่องใช้เวลาเฉลี่ย 38.11±0.34 วินาที เทียบกับวิธีเดิม 129.60±9.32 วินาที ลดเวลาการฝานได้ร้อยละ 70.59 และให้กำลังการฝานเชิงทฤษฎี 47.23 กิโลกรัมกล้วยดิบต่อชั่วโมง หรือเทียบเท่ากล้วยฉาบประมาณ 23.62 กิโลกรัมต่อชั่วโมง น้ำหนักแผ่นกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 2.424±0.255 กรัม และชิ้นงานผ่านเกณฑ์ความหนา 1–2 มิลลิเมตรร้อยละ 97 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนจากต้นทุนสร้างเครื่อง 9,375 บาท ราคาขาย 129 บาทต่อกิโลกรัม และต้นทุนผันแปร 101.87 บาทต่อกิโลกรัม และจุดคุ้มทุน 345.56 กิโลกรัมกล้วยฉาบ ซึ่งต้องใช้กล้วยดิบประมาณ 691.12 กิโลกรัม หรือประมาณ 11.52 วันผลิตที่ผลผลิต 30 กิโลกรัมกล้วยฉาบต่อวัน ผลการศึกษาชี้ว่าเครื่องสามารถเพิ่มผลิตภาพและมีศักยภาพคืนทุนในระดับชุมชน ภายใต้สมมติฐานด้านราคาและต้นทุนที่กำหนด

คำสำคัญ: เครื่องฝานกล้วย, กล้วยฉาบ, การเพิ่มผลิตภาพ, จุดคุ้มทุน

Abstract

This study developed a three-blade banana slicing machine to reduce processing time, improve slice uniformity, and assess economic feasibility for community-scale banana chip production. The machine uses a 220-V AC motor, pulley-belt transmission, and crank mechanism. Three blades longitudinally slice two peeled bananas per stroke at 100 rpm. Ten trials using 0.5 kg of raw bananas per trial showed a mean slicing time of 38.11±0.34 s, compared with 129.60±9.32 s for the existing method, representing a 70.59% reduction. The theoretical slicing capacity was 47.23 kg of raw bananas per hour, equivalent to approximately 23.62 kg. The mean slice mass was 2.424±0.255 g, and 97% of slices met the specified thickness range of 1–2 mm. Break-even analysis used a machine investment of 9,375 baht, a selling price of 129 baht/kg, and a variable cost of 101.87 baht/kg of finished chips. Resulting in a break-even volume of 345.56 kg of finished chips, requiring approximately 691.12 kg of raw bananas or 11.52 production days at 30 kg of finished chips per day. The results demonstrate improved productivity and potential economic viability under the stated price, yield, and cost assumptions.

Keywords: Banana slicer, Banana chips, Productivity improvement, Break-even analysis

1. บทนำ

การผลิตกล้วยฉาบเป็นกิจกรรมแปรรูป ผลผลิตทางการเกษตรที่สร้างมูลค่าเพิ่ม ให้กับชุมชน อย่างไรก็ตาม กระบวนการฝานกล้วยแบบเดิมของกลุ่มกล้วยปาปริกาแม่สำเรียง บ้านสระน้อย ตำบลนกออก อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ใช้แท่นสไลด์ไม้แบบ 1 ใบมีด ผู้ปฏิบัติงานต้องออกแรงกดด้วยมือ ทำให้ความหนาของแผ่นกล้วย ขึ้นอยู่กับแรงกดและประสบการณ์ของแต่ละคน เมื่อความหนาไม่สม่ำเสมอ แผ่นกล้วยจะสุกไม่พร้อมกันและเกิดของเสียจากการไหม้หรือสุกไม่ทั่วถึง นอกจากนี้ยังมีการรองานจากการจัดเรียงและตากแผ่นกล้วยก่อนทอด

ข้อมูลการทำงานเดิมจากการฝานกล้วยน้ำว้าครั้งละ 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ครั้ง ให้เวลาเฉลี่ยประมาณ 129.6 วินาทีต่อรอบ จึงมีแนวคิดพัฒนาเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดให้สามารถฝานตามแนวยาวได้ครั้งละ 2 ผล ลดเวลาในขั้นตอนฝาน และควบคุมความหนาให้อยู่ในช่วง 1–2 มิลลิเมตร โดยกำหนดเป้าหมายมีกำลังการผลิต ไม่น้อยกว่า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที หรือ 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้แก่ (1) ออกแบบและสร้างเครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีดที่เหมาะกับกล้วยน้ำว้า (2) ทดสอบเวลาและกำลังการผลิต และ (3) ประเมินความสม่ำเสมอของน้ำหนัก และความหนาแผ่นกล้วย และ (4) วิเคราะห์จุดคุ้มทุนโดยคำนึงถึงอัตราผลได้จากกล้วยดิบเป็นกล้วยฉาบ เพื่อใช้เป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตระดับชุมชน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการศึกษาการทำงาน (Work Study) เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา (Fishbone Diagram) ร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงงาน ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อกำหนดแนวทางออกแบบเครื่องจักร นอกจากนี้ยังใช้หลักการออกแบบเครื่องจักรกล ทฤษฎีข้อเหวี่ยง (Crank Shaft) เพื่อแปลงการหมุนของมอเตอร์เป็นการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงของชุดใบมีด ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและการส่งกำลังด้วยสายพานและพูลเลย์เพื่อคำนวณกำลังและอัตราทดที่เหมาะสม รวมถึงการหาเวลามาตรฐาน (Standard Time) และค่าเวลาเผื่อ (Allowance) เพื่อประเมินกำลังการผลิตของเครื่องที่พัฒนาขึ้น และการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน โดยอ้างอิงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการฝานกล้วยน้ำว้าและการสร้างเครื่องฝานกล้วยทำกล้วยฉาบ

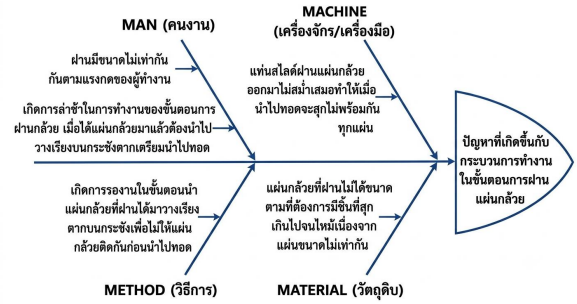
2.2 การศึกษากระบวนการแปรรูปกล้วยแบบเดิม

จากการศึกษากระบวนการฝานกล้วยน้ำว้า ของกลุ่มแปรรูปกล้วย พบว่ายังใช้แรงงานจากคน โดยใช้กระดานฝานกล้วย แบบใบมีดเดียว จากการเก็บข้อมูลการฝานกล้วย ใช้น้ำหนักกล้วยปอกเปลือกจำนวน 0.5 กิโลกรัม จะใช้เวลาการฝานกล้วยเฉลี่ย 129.6 วินาที ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การฝานกล้วยน้ำว้าวิธีเดิม

แผ่นกล้วยที่ฝานได้เมื่อนำมาวัด พบว่ามีขนาดความหนาไม่สม่ำเสมอ เกิดจากแรงกดผลกล้วยของผู้ปฏิบัติงาน และแผ่นกล้วยที่ฝานแล้วจะตกลงที่รองรับและทับซ้อนกัน ซึ่งต้องนำแผ่นกล้วยไปตาก ต้องเสียเวลาในการทำงาน จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิก้างปลาพบสาเหตุหลัก 4 ด้าน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิก้างปลาการฝานกล้วยแบบเดิม

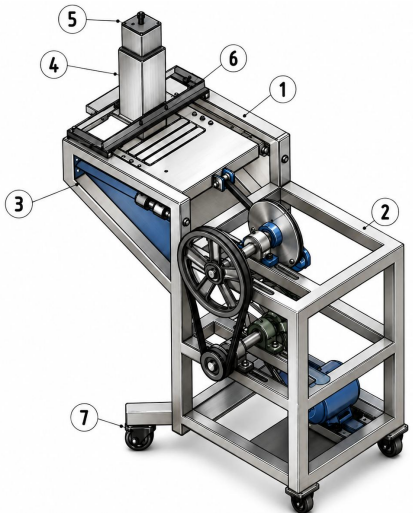
จากแผนภูมิก้างปลา พบว่าปัญหาจาก คนใช้มือจับผลกล้วย กดกล้วยสไลด์บนแผ่นไม้ผ่านใบมีด ด้วยแรง ทำให้ได้ความหนาแผ่นกล้วยไม่เท่ากัน เครื่องจักรยังใช้กระดานฝานกล้วยแบบใบมีดเดียว ทำให้ฝานได้ช้า วิธีการ ฝานแผ่นกล้วยลงที่รองรับ ต้องนำแผ่นกล้วยไปตากก่อนทอด และวัสดุ ความหนาแผ่นกล้วยมีขนาดไม่เท่ากันทำให้สุกไม่พร้อมกัน ได้ผลการศึกษาข้อมูลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการผลิตและขนาดผลกล้วยน้ำว้า

รายการ	ค่าเฉลี่ย
เวลาฝานด้วยใบมีดเดียว (0.5 กก.)	129.6 วินาที
ความยาวผลกล้วย	97.1 มม.
ความโตผลกล้วย	28.7 มม.
ความหนาแผ่นกล้วย (มีดเดียว)	1.8 มม.
น้ำหนักแผ่นกล้วย (มีดเดียว)	1.9 ก.

2.3 การออกแบบและสร้างเครื่อง

เครื่องฝานกล้วยจะใช้ชุดใบมีด 3 ใบ จัดวางเรียงต่อกัน ใบมีดมีความกว้าง 25 มิลลิเมตร ต้องเว้นระยะระหว่างใบมีด 5 มิลลิเมตร และออกแบบช่องป้อนที่โตกว่าผลกล้วยมีขนาด 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ช่อง เมื่อรวมระยะเผื่อด้านหน้าและด้านหลังของระยะสไลด์ จะได้ระยะการชักของกลไกข้อเหวี่ยงเท่ากับ 225 มิลลิเมตร ชุดใบมีดฝานกล้วยตามแนวยาวครั้งละ 2 ผล ทำให้ได้แผ่นกล้วยจำนวน 6 แผ่นต่อหนึ่งจังหวะการทำงาน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบเครื่องฝานกล้วย 3 ใบมีด

การเลือกใช้วัสดุส่วนสัมผัสผลกล้วย เช่น แผ่นยึดใบมีดและกล่องป้อนกล้วย (4) รวมทั้งชุดน้ำหนักทับผลกล้วย (5) ทำจากสแตนเลสเกรด 304 การส่งกำลังใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ชุดพูลเลย์–สายพาน และกลไกข้อเหวี่ยง เปลี่ยนการหมุนเป็นการเคลื่อนที่ กลับไป–กลับมา ความเร็วใช้งานกำหนดที่ 100 รอบต่อนาที มีเบรคเกอร์ควบคุมมอเตอร์ติดอยู่ด้านข้าง แสดงคุณลักษณะดังตารางที่ 2 และเมื่อประกอบอุปกรณ์ครบเครื่องมีขนาดรวม 44×100×90 เซนติเมตร น้ำหนักรวม 50 กิโลกรัม มีล้อเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเลื่อนไปที่กระทะและเลื่อนออกเมื่อต้องการทำความสะอาด ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่อง

รายการ	รายละเอียด
ระบบใบมีดตัด	ใบมีด 3 ใบ ฝานครั้งละ 2 ผล
ทิศทางการฝาน	ตามแนวยาว
ระยะชัก	225 มม.
ความเร็วใช้งาน	100 รอบต่อนาที
ต้นกำลัง	มอเตอร์ AC 220 V 0.5 Hp
วัสดุสัมผัสอาหาร	สแตนเลส 304
ขนาด	44x100x90 ซม.
น้ำหนัก	50 กก.



รูปที่ 4 เครื่องฝานกล้วย 3 ใบมีด

2.4 การทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบใช้กล้วยน้ำว้าปอกเปลือกครั้งละ 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ จับเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนกล้วยในช่องป้อนหมด บันทึกน้ำหนักแผ่นกล้วย 100 ตัวอย่างด้วยตาชั่งดิจิทัล และตรวจความหนาแผ่นกล้วยด้วยเกจวัดความหนา โดยถือว่าชิ้นงานผ่านเมื่อมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้คำนวณกำลังการผลิตจากน้ำหนักต่อรอบและเวลาเฉลี่ย รวมทั้งคำนวณหาเวลามาตรฐาน



รูปที่ 5 การทดสอบเครื่องฝานกล้วย 3 ใบมีด



รูปที่ 6 การทดสอบประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 6 รูป (ก) คือนาฬิกาจับเวลา (ข) การตรวจความหนาแผ่นกล้วยที่ฝานด้วยเกจวัดความหนา (ค) ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบคือกล้วยน้ำว้าปอกเปลือกแล้ว และ (ง) แผ่นกล้วยที่ฝานจากเครื่อง

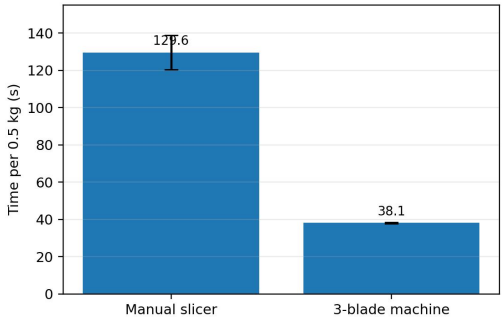
2.5 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

วิเคราะห์จุดคุ้มทุนด้วยสมการ $Q = F/(P-V)$ เมื่อ Q คือปริมาณกล้วยฉาบ ณ จุดคุ้มทุน F คือต้นทุนคงที่ในการสร้างเครื่อง P คือราคาขายต่อกิโลกรัม และ V คือต้นทุนผันแปรต่อกิโลกรัม เมื่อ ต้นทุนสร้างเครื่อง 9,375 บาท ราคาขาย 129 บาทต่อกิโลกรัม ค่าแรง 10 บาท ค่าแก๊ส 2.90 บาท ค่าไฟฟ้า 0.47 บาท และค่าน้ำมันพืช 28.50 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยฉาบ สมมติฐานอัตราผลได้ว่า กล้วยดิบ 1 กิโลกรัมเมื่อนำไปทอดเหลือกล้วยฉาบ 0.5 กิโลกรัม ดังนั้น กล้วยฉาบ 1 กิโลกรัมต้องใช้กล้วยดิบ 2 กิโลกรัม ต้นทุนกล้วยดิบ 60 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยฉาบ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 เวลาในการฝานและกำลังการผลิต

ผลการทดสอบเครื่อง 10 ซ้ำให้เวลา 37.60, 38.10, 38.20, 38.10, 38.20, 37.70, 38.80, 37.90, 38.40 และ 38.10 วินาที ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 38.11 วินาที ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.34 วินาที และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 0.90 แสดงว่าเวลาเดินเครื่องมีความสม่ำเสมอสูง



รูปที่ 7 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยของวิธีเดิมและเครื่องผ่านกล้วยแบบ 3 ใบมีด

ตารางที่ 3 ผลด้านเวลาและกำลังการผลิต

ตัวชี้วัด	ผลการทดลอง	การแปลผล
เวลาวิธีเดิม	129.60 ± 9.32 วินาที	ฐานเปรียบเทียบ
เวลาเครื่องใหม่	38.11 ± 0.34 วินาที	ลดลง 70.59%
กำลังผลิตจากเวลาเฉลี่ย	47.23 กก./ชม.	สูงกว่าเป้า 57.44%
เวลามาตรฐาน + เผื่อ 25%	47.64 วินาที/รอบ	ต่ำกว่า 60 วินาที
กำลังผลิตตามเวลามาตรฐาน	37.78 กก./ชม.	สูงกว่าเป้า 25.93%

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม เครื่องใหม่ลดเวลาได้ร้อยละ 70.59 หรือทำงานเร็วขึ้นประมาณ 3.40 เท่า กำลังการผลิตเชิงทฤษฎีจากเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 47.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หากรวมเวลาเผื่อร้อยละ 25 เวลามาตรฐานเท่ากับ 47.64 วินาทีต่อ 0.5 กิโลกรัม และยังให้กำลังการผลิต 37.78 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าเป้าหมาย 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.2 น้ำหนักและความหนาแผ่นกล้วย

น้ำหนักแผ่นกล้วย 100 ตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.9–2.9 กรัม ค่าเฉลี่ย 2.424 กรัม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.255 กรัม จึงอยู่ภายในเกณฑ์โครงการที่กำหนด 1.5–3.0 กรัมทุกตัวอย่าง การตรวจความหนา 100 ตัวอย่างพบว่าผ่านเกณฑ์ 97 ตัวอย่าง และไม่ผ่าน 3 ตัวอย่าง คิดเป็นอัตราผ่านร้อยละ 97 โดยค่าความหนาเฉลี่ยจากการวัดเฉลี่ยเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4 สรุปคุณภาพแผ่นกล้วย

คุณลักษณะ	ผลที่ได้	เกณฑ์/สถานะ
น้ำหนักเฉลี่ย	2.424±0.255 กรัม	ผ่าน 1.5–3.0 กรัม
ช่วงน้ำหนัก	1.9–2.9 กรัม	ผ่านทุกตัวอย่าง
ความหนาเฉลี่ย	1.8 มม.	ในช่วง 1–2 มม.
อัตราผ่านความหนา	97/100 (97%)	ผ่าน
กำลังผลิตใช้งานจริงที่รายงาน	สูงสุด 60 กก./วัน	ขึ้นกับเวลาปอก/ทอด

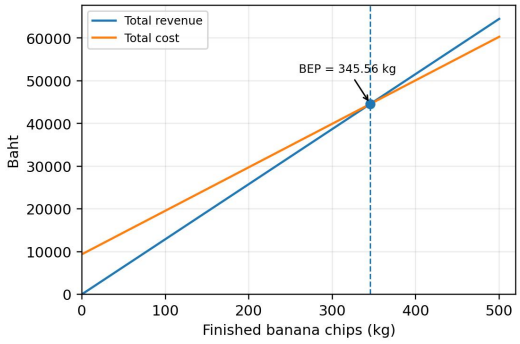
ผลที่ได้สนับสนุนว่าการใช้กลไกกด และชุดใบมีดช่วยลดผลกระทบจากแรงกด ของผู้ปฏิบัติงาน ทำให้ขนาดแผ่นกล้วยสม่ำเสมอกว่าวิธีเดิม อย่างไรก็ตามของเสียร้อยละ 3 ชี้ว่าควรควบคุมความคมใบมีด ระยะห่างใบมีด และแรงกดของตัวกดให้คงที่ รวมถึงคัดเลือกผลกล้วยที่มีขนาดใกล้เคียงกับช่วงออกแบบ

3.3 ผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ผลรวมต้นทุนผันแปรเท่ากับ 101.87 บาทต่อกิโลกรัมกล้วยฉาบ เมื่อราคาขายเท่ากับ 129.00 บาทต่อกิโลกรัม จะมีส่วนเกินต่อหน่วยเท่ากับ 27.13 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นจุดคุ้มทุนเท่ากับ 9,375/27.13 = 345.56 กิโลกรัมกล้วยฉาบ หรือใช้กล้วยดิบประมาณ 691.12 กิโลกรัม ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ต้นทุนต่อหน่วยและจุดคุ้มทุน

รายการ	ต้นทุนกล้วยฉาบ (บาท/กก.)
กล้วยดิบ 2 กก. × 30 บาท/กก.	60.00
ค่าแรงงาน	10.00
ค่าแก๊สหุงต้ม	2.90
ค่าไฟฟ้า	0.47
ค่าน้ำมันพืช	28.50
ต้นทุนผันแปรรวม	101.87
ราคาขาย	129.00
ส่วนเกินต่อหน่วย	27.13
จุดคุ้มทุน	345.56 กก. กล้วยฉาบ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างรายได้รวม ต้นทุนรวม และจุดคุ้มทุน

กำลังผลิตใช้งานจริงสูงสุด 60 กิโลกรัมกล้วยดิบต่อวัน จะได้กล้วยฉาบประมาณ 30 กิโลกรัมต่อวัน และใช้เวลาประมาณ 11.52 วันผลิต จึงถึงจุดคุ้มทุน ทั้งนี้ การคำนวณยังไม่รวมค่าบรรจุภัณฑ์ เครื่องปรุงรส ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมราคา ดอกเบี้ย และค่าใช้จ่ายด้านการตลาด

4. สรุปผลการดำเนินงาน

เครื่องฝานกล้วยแบบ 3 ใบมีด สามารถฝานกล้วยน้ำว้าตามแนวยาวครั้งละ 2 ผล ใช้เวลาเฉลี่ย 38.11 วินาทีต่อ 0.5 กิโลกรัม ลดเวลาจากวิธีเดิมร้อยละ 70.59 และให้กำลังการผลิตเชิงทฤษฎี 47.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อนำเวลาเผื่อร้อยละ 25 มาคำนวณยังคงมีกำลังการผลิตสูงกว่าเป้าหมาย น้ำหนักแผ่นกล้วยอยู่ในเกณฑ์ทุกตัวอย่าง และความหนาผ่านเกณฑ์ร้อยละ 97 เมื่อคำนึงถึงอัตราผลได้ร้อยละ 50 จุดคุ้มทุนเท่ากับ 345.56 กิโลกรัมกล้วยฉาบ หรือประมาณ 11.52 วันผลิตที่ผลผลิต 30 กิโลกรัมต่อวัน จึงสรุปได้ว่าเครื่องที่พัฒนา มีศักยภาพเพิ่มประสิทธิภาพ ความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าของการผลิตระดับชุมชนภายใต้สมมติฐานที่กำหนด

5. ข้อเสนอแนะ

ควรทำความสะอาดเครื่องและกล่องป้อนทุกครั้งหลังใช้งาน ตรวจสภาพใบมีด มอเตอร์ สายไฟ และสวิตช์ก่อนเริ่มงาน ใช้น้ำมันพืชในจุดที่สัมผัสยางกล้วยเมื่อจำเป็น และระมัดระวังคมใบมีดระหว่างการถอดล้างหรือเปลี่ยนใบมีด การวิจัยครั้งต่อไปควรทดสอบความทนทานระยะยาว การใช้พลังงาน ระดับเสียง ความปลอดภัยตามหลักเครื่องจักรอาหาร และศึกษาการปรับระยะใบมีด เพื่อใช้กับวัตถุดิบชนิดอื่น เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมชุมชนต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกลุ่มกล้วยปาปริกา แม่สำเรียง บ้านสระน้อย อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลกระบวนการฝานกล้วย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในการจัดทำงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานส่งเสริมเทคโนโลยีชาวบ้าน. (2565). กล้วยน้ำว้า. เข้าถึงเมื่อ 23 กันยายน. เข้าถึงได้จาก https://www.technologychaoban.com

[2] นวดี กระจายวงศ์. (2565). เทคนิคการปรับปรุงการทำงาน ECRS. เข้าถึงเมื่อ 23 กันยายน. เข้าถึงได้จาก https://teachme-biz.com

[3] อนันต์ วงศ์กระจ่าง. (2533). การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

[4] ไชยชาญ หินเกิด. (2560). มอเตอร์ไฟฟ้าและการควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[5] พงษ์ศักดิ์ นาใจคง และกัมปนาท ถ่ายสูงเนิน.(2552). การสร้างเครื่องฝานกล้วยน้ำว้าสุก. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[6] บุลวัชร์ เจริญยืนนาน. (2022). การพัฒนาชุดข้อเหวี่ยงสำหรับใช้ในการทำงานและการปฏิบัติงาน. เข้าถึงเมื่อ 23 กันยายน.เข้าถึงได้จาก http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/

การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมเพื่อลดเวลาและจำนวนขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์

Design and Development of a Welding Workpiece Support Table to Reduce Workpiece Preparation Time and Work Steps for Robotic Mud Pipe Welding

วิษณุราม มาตชัยเคน[1], และ พีรวิทย์ โชคเหมาะ[2]*

[1-2] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000

*ผู้ติดต่อ: Wisanuram.ma@rmuti.ac.th, 0624203389,

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ [1],[2] เพื่อลดเวลาและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้การศึกษาเวลา (Time Study) [3] แผนภูมิกระบวนการทำงาน (Process Flow Chart) [4] และหลักการ ECRS [5],[7] ในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการ การทดลองดำเนินการโดยเก็บข้อมูลเวลาการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง จำนวน 5 รอบการผลิตภายใต้สภาพการผลิตเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดจำนวนขั้นตอนการทำงานจาก 30 เหลือ 18 ขั้นตอน คิดเป็นร้อยละ 40 และลดเวลาในการเตรียมชิ้นงานจาก 825.42 เหลือ 688.18 นาที คิดเป็นร้อยละ 16.63 โต๊ะรองรับชิ้นงานมีต้นทุนการสร้าง 5,600 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน 14 รอบการผลิต โดยสามารถลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (Non-Value Added Activities) และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเตรียมชิ้นงานได้

คำสำคัญ: การเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์, โต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อม, การลดเวลาในการเตรียมชิ้นงาน, การปรับปรุงกระบวนการ, ECRS

Abstract

This study aimed to design and develop a welding workpiece support table for robotic mud pipe welding to reduce workpiece preparation time and preparation steps. Time Study, Process Flow Chart, and the ECRS principle were applied to analyze and improve the workpiece preparation process. Experimental data were collected over five production runs under identical production conditions. The results showed that the number of preparation steps decreased from 30 to 18 (40%), while workpiece preparation time was reduced from 825.42 to 688.18 minutes (16.63%). The fabrication cost of the support table was 5,600 baht, with a payback period of 14 production runs. The developed support table reduced non-value-added activities and improved the efficiency of the workpiece preparation process.

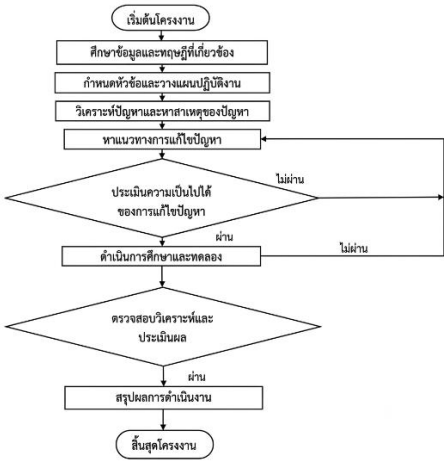
Keywords: Robotic Mud Pipe Welding, Welding Workpiece Support Table, Preparation Time Reduction, Process Improvement, ECRS

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ [1],[2] จำเป็นต้องมีการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม ได้แก่ การยก การจัดตำแหน่ง และการปรับแนวชิ้นงาน ส่งผลให้ใช้เวลาและมีจำนวนขั้นตอนในการทำงานสูง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยการประยุกต์ใช้แนวคิด Lean Manufacturing และ เครื่องมือปรับปรุงกระบวนการ เช่น Time Study, Process Flow Chart และ ECRS สามารถช่วยลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มและ เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้ [3],[7] อย่างไรก็ตาม Jig หรือ Fixture ที่ใช้งานทั่วไปมุ่งเน้นการจับยึดชิ้นงานเป็นหลัก และยังไม่สามารถลดขั้นตอนการเคลื่อนย้ายและ การจัดเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ได้อย่างเหมาะสม [8],[9] ดังนั้นโครงงานนี้จึงมุ่งออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ เพื่อช่วยลดเวลาและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน โดยประเมินผลจากการเปรียบเทียบกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

2. ดำเนินการศึกษาและทดลอง

การดำเนินโครงงานนี้มุ่งศึกษาและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ [1],[2] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและ ลดขั้นตอนที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มในกระบวนการเตรียมชิ้นงาน ได้แก่ การยกชิ้นงาน การเชื่อมแท็กและ การเจียรรอยเชื่อมแท็ก โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบอุปกรณ์รองรับและกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน [8],[9] ร่วมกับการศึกษาเวลา การวิเคราะห์กระบวนการทำงาน และแนวคิด ECRS [5],[7] เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและ พัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานให้เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

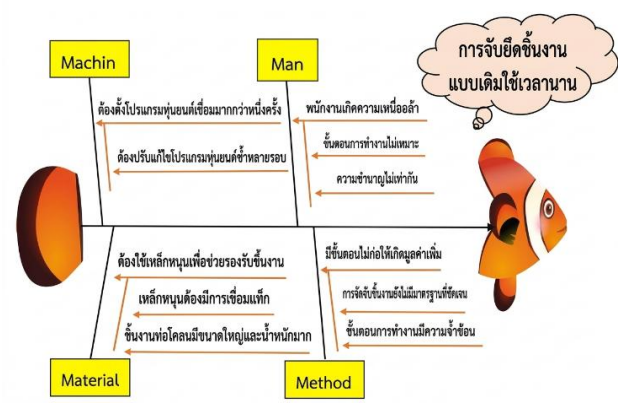
2.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษากระบวนการ

ผู้จัดทำศึกษากระบวนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ โดยเก็บข้อมูลเวลาการทำงานด้วยวิธีการจับเวลา (Time Study) [3] จำนวน 5 รอบการผลิต และจัดทำแผนภูมิกระบวนการทำงาน (Process Flow Chart) [4] เพื่อแสดงลำดับขั้นตอนการทำงาน รวมทั้งวิเคราะห์กิจกรรมที่เพิ่มมูลค่า (Value Added: VA) และกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า (Non-Value Added: NVA) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อม

2.2 วิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุของปัญหา

ผู้จัดทำใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ร่วมกับหลักการ 4M (Man, Machine, Material และ Method) ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา [4] พบว่าการเชื่อมแท็กและการเจียรรอยเชื่อมแท็กเป็นกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (Non-Value Added: NVA) จึงนำผลการวิเคราะห์มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ

และพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมเพื่อลดขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 2 แผนภูมิแสดงเหตุผลและสาเหตุของปัญหา

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ผู้จัดทำได้ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS [5],[7] เพื่อกำหนดแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเตรียมชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

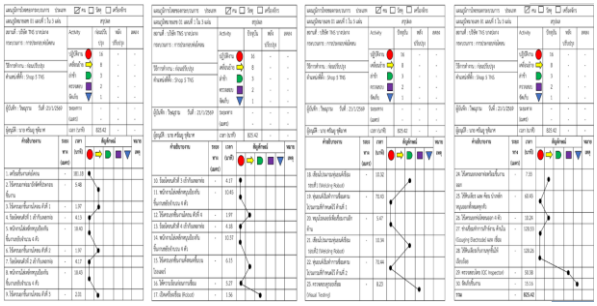
ตารางที่ 1 แนวทางการปรับปรุงกระบวนการเตรียมชิ้นงานตามหลักการ ECRS

หลักการ ECRS	แนวทางการปรับปรุง	ผลที่ได้รับ
E (Eliminate)	ยกเลิกขั้นตอนการเชื่อมแท็กและการเจียรรอยเชื่อมแท็ก โดยออกแบบโต๊ะรองรับชิ้นงานให้สามารถยึดและหมุนชิ้นงานได้อย่างมั่นคง	ลดขั้นตอนที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม และลดเวลาในการเตรียมชิ้นงาน
C (Combine)	รวมขั้นตอนการจัดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานให้ดำเนินการได้ภายในสถานีเดียว	ลดจำนวนกิจกรรมและลดการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน
R (Rearrange)	ปรับลำดับการทำงานใหม่ให้สอดคล้องกับการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์	ลดการย้อนกลับของการทำงาน และเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการ
S (Simplify)	ออกแบบโต๊ะให้สามารถหมุนชิ้นงานด้วยแป้นเหยียบ (Foot Pedal) และใช้ Bearing รองรับการหมุน	ลดแรงงาน ลดเวลาในการปรับแนวชิ้นงาน และเพิ่มความสะดวกในการปฏิบัติงาน

2.3 ดำเนินการศึกษาและทดลอง

จากการวิเคราะห์สภาพการทำงาน พบว่าการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมประกอบด้วยหลายขั้นตอน และมีขั้นตอนที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (Non-Value Added Activities) เช่น การยกชิ้นงานหลายครั้ง การเชื่อมแท็ก และการเจียรรอยเชื่อมแท็ก ส่งผลให้ใช้เวลาในการเตรียมชิ้นงานสูงและลดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต [5],[7] ผู้จัดทำจึงออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ เพื่อลดจำนวนขั้นตอนการทำงาน เวลาในการเตรียมชิ้นงาน รวมทั้งลดการยก การจัดตำแหน่งและการปรับแนวชิ้นงาน จากนั้นนำต้นแบบไปทดลองใช้งานภายใต้สภาพการผลิตจริง โดยใช้ชิ้นงาน ผู้ปฏิบัติงาน เครื่องมือ และหุ่นยนต์เชื่อมชุดเดียวกัน พร้อมเก็บข้อมูลเวลาในการเตรียมชิ้นงานจำนวน 5 รอบการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับแผนการผลิตของบริษัท และนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) [3] และ ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Percentage Improvement) เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการทำงานและเวลาเฉลี่ยของกระบวนการเชื่อมท่อโคลนก่อนการปรับปรุง



จากตารางที่ 2 กระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยโต๊ะรองรับชิ้นงานแบบเดิมประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 30 ขั้นตอน ใช้เวลาเฉลี่ยรวม 825.42 นาที (ประมาณ 13 ชั่วโมง 45 นาที) โดยกิจกรรมที่ใช้เวลาสูง ได้แก่ การยกชิ้นงาน การเชื่อมแท็ก และการเจียรรอยเชื่อมแท็ก ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มและส่งผลให้ระยะเวลาในการเตรียมชิ้นงานเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3 กระบวนการเชื่อมท่อโคลนก่อนปรับปรุง

2.4 การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อม

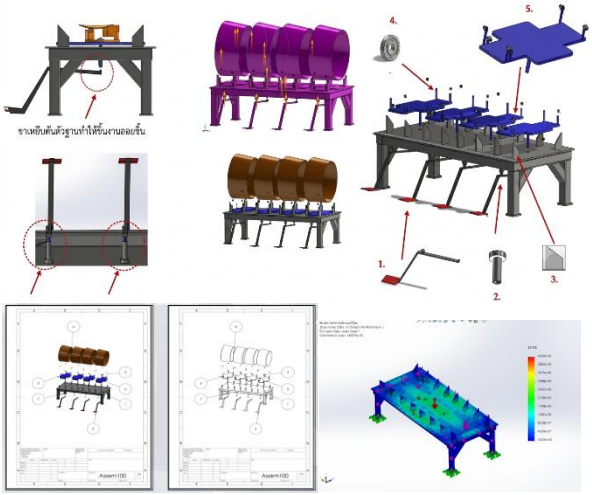
จากการวิเคราะห์ปัญหาที่พบ ผู้จัดทำได้ออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมเพื่อลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม โดยคำนึงถึงความมั่นคงของโครงสร้าง ความสะดวกในการใช้งาน และความราบรื่นในการหมุนชิ้นงาน ดังนี้

1. ออกแบบโครงสร้างให้มีความมั่นคงเพื่อรองรับน้ำหนักชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย ลดการสั่นสะเทือนและการเคลื่อนตัวระหว่างการเชื่อม

2.ออกแบบระบบหมุนด้วยแป้นเหยียบ (Foot Pedal) เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับตำแหน่งชิ้นงานได้สะดวก ลดการเคลื่อนย้าย และลดขั้นตอนการทำงาน

3.ใช้ตลับลูกปืน (Bearing) เป็นชุดรองรับการหมุนเพื่อลดแรงเสียดทาน ทำให้หมุนชิ้นงานได้ราบรื่นใช้แรงน้อย และลดการสึกหรอของชิ้นส่วน

การออกแบบโครงสร้างดำเนินการด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วย SOLIDWORKS Simulation ภายใต้แรงกระทำ 4,000 N ผลการวิเคราะห์พบว่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 3.622 MPa และค่าการกระจัดสูงสุดเท่ากับ 0.09294 mm แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอและสามารถรองรับการใช้งานได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปแสดงการออกแบบโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์

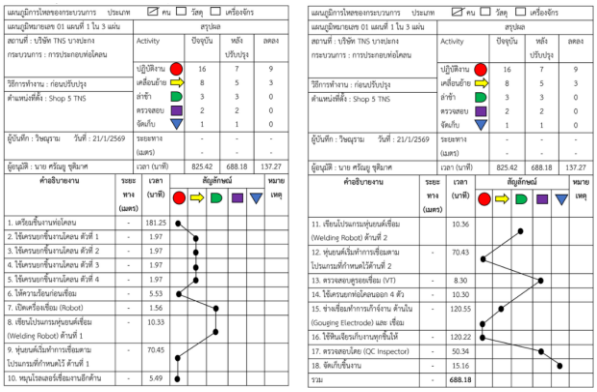


รูปที่ 5 โต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมที่พัฒนาขึ้น

3. ผลการศึกษา

ภายหลังการพัฒนาและติดตั้งโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อม ได้นำต้นแบบไปทดลองใช้งานและเก็บข้อมูลเวลาในการเตรียมชิ้นงานจำนวน 5 รอบการผลิต เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 3

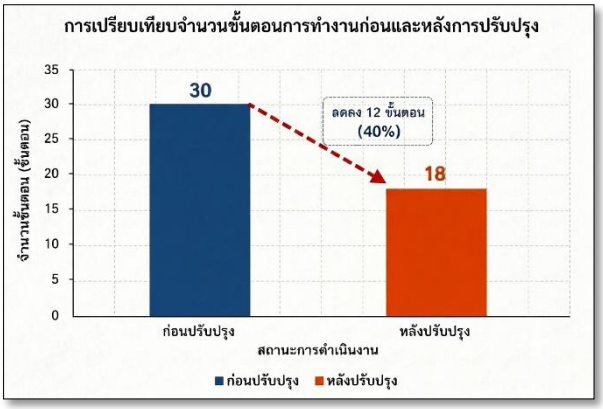
ตารางที่ 3 ขั้นตอนการทำงานและเวลาเฉลี่ยของกระบวนการเชื่อมท่อโคลนหลังการปรับปรุง



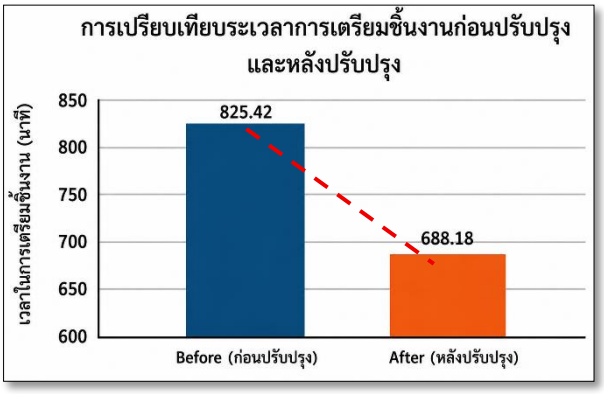
จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานสามารถปรับปรุงกระบวนการเตรียมชิ้นงานเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจำนวนขั้นตอนการทำงานลดลงจาก 30 ขั้นตอน เหลือ 18 ขั้นตอน หรือคิดเป็น ร้อยละ 40 เนื่องจากสามารถรวมและลดขั้นตอนการยก การจัดตำแหน่ง และการหมุนชิ้นงานได้ ส่งผลให้กระบวนการทำงานมีความต่อเนื่อง ลดความสูญเปล่าจากการเคลื่อนไหวและการปฏิบัติงานที่ไม่จำเป็น ตลอดจนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์

ตารางที่ 4 สรุปผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
จำนวนขั้นตอนการทำงาน (ขั้นตอน)	30	18
เวลารวม (นาที)	825.42	688.18
เวลาลดลง (นาที)	-	137.24
คิดเป็นร้อยละ (%)	-	16.63
จำนวนขั้นตอนที่ลดลง (ขั้นตอน)	-	12
คิดเป็นร้อยละ (%)	-	40.00



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบจำนวนขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานก่อนและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการเตรียมชิ้นงานก่อนและหลังการปรับปรุง

4. สรุปผลการดำเนินงาน

การออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์ สามารถลดจำนวนขั้นตอนและเวลาในการเตรียมชิ้นงานได้ โดยจำนวนขั้นตอนลดลงจาก 30 ขั้นตอน เหลือ 18 ขั้นตอน คิดเป็นร้อยละ 40 และเวลาเฉลี่ยลดลงจาก 825.42 นาที เหลือ 688.18 นาที คิดเป็นร้อยละ 16.63 โดยมีต้นทุนการสร้าง 5,600 บาท และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 14 รอบการผลิต ผลการปรับปรุงเกิดจากการออกแบบโต๊ะรองรับชิ้นงานให้สามารถจับยึดและหมุนชิ้นงานได้อย่างมั่นคงด้วยระบบตลับลูกปืนและแป้นเหยียบควบคุมการหมุน

ESTACON 2026 | 17th

ช่วยลดการยก การจัดตำแหน่ง และการปรับแนวชิ้นงาน รวมถึงลดขั้นตอนการเชื่อมแท็กและการเจียรรอยเชื่อมแท็ก ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ส่งผลให้กระบวนการเตรียมชิ้นงานมีความต่อเนื่องและลดความสูญเปล่า ผลการศึกษายืนยันว่า การประยุกต์ใช้หลักการ ECRS [3] ร่วมกับการออกแบบอุปกรณ์ช่วยปฏิบัติงาน สามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นรูปธรรม อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเฉพาะ จึงควรมีการศึกษาการประยุกต์ใช้กับชิ้นงานรูปแบบอื่น รวมถึงพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถปรับตั้งแบบอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากวิศวกรพี่เลี้ยงและบุคลากรของบริษัท ไทยนิปปอน สตีล เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ และกำกับดูแลการดำเนินงานด้านการออกแบบและพัฒนาโต๊ะรองรับชิ้นงานเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมท่อโคลนด้วยหุ่นยนต์เป็นอย่างดียิ่ง ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอาจารย์นิเทศและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และติดตามการดำเนินงานตลอดระยะเวลาการปฏิบัติสหกิจศึกษา รวมทั้งขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2550). เทคโนโลยีการเชื่อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[2] วิทยา วิทยาทร. (2560). การเขียนโปรแกรมและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[3] Niebel, B. W. (1958). Motion and Time Study. Homewood, Illinois: R. D. Irwin.

[4] มนตรี สมบูรณ์. (2558). วิศวกรรมการผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[5] สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. (2562). การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยหลักการลีน. กรุงเทพฯ: สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ.

[6] Oliveira, C., & Lima, T. M. (2023). Setup Time Reduction of an Automotive Parts Assembly Line Using Lean Tools and Quality Tools.Eng,4(3),2352–2362. https://doi.org/10.3390/eng4030134

[7] Wonginyoo, C., Bumpen, P., Wangphanich, P., & Choomrit, N. (2025). Streamlining Production: ECRS Approach to Enhancing Efficiency in Case Tank Sub Weld of Hydraulic Excavator. Engineering and Technology Horizons, 42(4). DOI: 10.55003/ETH.420401

[8] ศุภชัย มีมานนท์. (2539). การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig–Fixture Design). กรุงเทพฯ: ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.

[9] Arnaoutis, V., Rosic, B. V., & Lutters, E. (2023). Parametric Design Evolution for Production Setups: A Case Study for Welding Fixtures. Procedia CIRP, 120, 1522–1527. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.208

การปรับเหมาะระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Arena: กรณีศึกษาแยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี

Optimization of Traffic Signal Timing Using Arena Simulation: A Case Study of the Luekkhamhan Intersection, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani Province

นายฐิตินนท์ ศรีสุวรรณดี[1] และ ดร.ฐิติวรดา ศรีสุวรรณดี[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85 ถนนสถลมาร์ค ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
*ผู้ติดต่อ: thitiworada.k@ubu.ac.th, 084-280-8055

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเหมาะระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรบริเวณสี่แยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อลดเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะและเพิ่มประสิทธิภาพการระบายการจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน งานวิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณจราจรและลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในวันทำการ 5 วัน ช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์รูปแบบการมาถึงของยานพาหนะและเวลาที่ใช้ในการผ่านทางแยก เพื่อสร้างแบบจำลองการจราจรแบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่องด้วยโปรแกรม Arena การศึกษาพิจารณารูปแบบการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร 2 แนวทาง โดยเปรียบเทียบกับรอบสัญญาณเดิม 187 วินาที ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแนวทางปรับปรุงที่ 2 ซึ่งกำหนดรอบสัญญาณไฟเท่ากับ 169 วินาที ให้ผลการดำเนินงานดีที่สุด โดยเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเช้าลดลงจาก 46.2515 เป็น 42.0951 วินาทีต่อคัน หรือคิดเป็นร้อยละ 8.99 ขณะที่ช่วงเย็นลดลงจาก 53.2096 เป็น 48.8448 วินาทีต่อคัน หรือคิดเป็นร้อยละ 8.20 ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟตามข้อมูลการจราจรจริงและการประเมินด้วยแบบจำลองสถานการณ์สามารถช่วยลดความล่าช้าและเพิ่มความคล่องตัวของการจราจรบริเวณทางแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สัญญาณไฟจราจร, การจำลองสถานการณ์, โปรแกรม Arena, ทฤษฎีแถวคอย

Abstract

This study aimed to optimize traffic signal timing at the Luekhamhan Intersection in Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani Province, Thailand, in order to reduce average vehicle delay and improve traffic flow during peak periods. Traffic volume and vehicle movement data were collected over five weekdays during the morning peak period (07:00–08:00) and evening peak period (17:30–18:30). The collected data were analyzed to determine vehicle arrival patterns and service times at the intersection. A discrete-event traffic simulation model was then developed using Arena software. Two alternative signal-timing scenarios were evaluated and compared with the existing signal cycle of 187 seconds. The simulation results indicated that the second improvement scenario, with a signal cycle length of 169 seconds, provided the best performance. During the morning peak period, the average vehicle waiting time decreased from 46.2515 to 42.0951 seconds per vehicle, representing an 8.99% reduction. During the evening peak period, the average waiting time decreased from 53.2096 to 48.8448 seconds per vehicle, representing an 8.20% reduction. The findings demonstrate that traffic signal timing adjustment based on actual traffic conditions and simulation analysis can effectively reduce vehicle delay and improve traffic operations at signalized intersections.

Keywords: Traffic signal timing, Discrete-event simulation, Arena, Queuing theory

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบคมนาคมในเขตเมือง เนื่องจากทำหน้าที่จัดสรรสิทธิการเดินรถให้แก่ยานพาหนะจากทิศทางต่าง ๆ อย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณรถในแต่ละทิศทางมีความแตกต่างกันตามช่วงเวลา หากการจัดสรรระยะเวลาสัญญาณไฟไม่สอดคล้องกับความต้องการจราจร อาจทำให้เกิดแถวคอยยาว เวลารอคอยเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพการระบายการจราจรโดยรวม การออกแบบรอบสัญญาณไฟที่เหมาะสมจึงควรพิจารณาสภาพการใช้งานจริง ปริมาณจราจร ลักษณะการเดินทาง และเป้าหมายด้านประสิทธิภาพของพื้นที่ [1]

ปัจจุบัน งานวิจัยด้านการควบคุมสัญญาณไฟจราจรได้พัฒนาไปสู่การใช้แบบจำลองการจราจร การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงคณิตศาสตร์ การเรียนรู้ของเครื่อง และการควบคุมแบบปรับตัวตามสภาพจราจรจริง [2–4] อย่างไรก็ตาม การนำระบบควบคุมขั้นสูงไปใช้จริงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่มีความละเอียดสูง ระบบตรวจจับยานพาหนะ และการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อนดำเนินการจริง ด้วยเหตุนี้ การจำลองสถานการณ์จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบทางเลือกของการปรับสัญญาณไฟโดยไม่กระทบต่อการจราจรจริงและไม่ต้องลงทุนปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานในระยะเริ่มต้น

สี่แยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี เป็นทางแยกสำคัญที่เชื่อมต่อการเดินทางของประชาชนระหว่างพื้นที่ชุมชน สถานศึกษา หน่วยงานบริการ และย่านพาณิชย์ในพื้นที่อำเภอวารินชำราบ การติดขัดบริเวณทางแยกดังกล่าวในช่วงเวลาเร่งด่วนจึงส่งผลต่อเวลาเดินทางของผู้ใช้ถนน ความคล่องตัวของการสัญจร และต้นทุนเวลาในการเดินทางของประชาชนในพื้นที่ จากการสำรวจภาคสนามในวันทำการจำนวน 5 วัน ช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. พบว่าสภาพปัจจุบันใช้รอบสัญญาณไฟจราจรรวม 187 วินาทีต่อรอบ ทั้งในช่วงเช้าและช่วงเย็น เมื่อนำข้อมูลการมาถึงของยานพาหนะและเวลาการผ่านทางแยกจากการสำรวจมาสร้างแบบจำลองสภาพปัจจุบัน พบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะเท่ากับ 46.2515 วินาทีต่อคัน ในช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 53.2096 วินาทีต่อคัน ในช่วงเวลา 17:30–18:30 น. โดยบางทิศทางมีเวลารอคอยเฉลี่ยสูงสุด 75.0433 และ 73.0349 วินาทีต่อคัน ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการกำหนดระยะเวลาสัญญาณไฟเดิมยังไม่สอดคล้องกับลักษณะการจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน และควรได้รับการปรับปรุงเพื่อลดความล่าช้าบริเวณทางแยก

งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่องด้วยโปรแกรม Arena เพื่อสร้างแบบจำลองการจราจรของสี่แยกลือคำหาญจากข้อมูลภาคสนาม และประเมินแนวทางการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร โดยพิจารณาเวลารอคอยเฉลี่ยและจำนวนรถในแถวคอยเป็นตัวชี้วัดผลการดำเนินงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองการจราจรแบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่องของสี่แยกลือคำหาญ โดยใช้ข้อมูลปริมาณจราจรและลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจากการสำรวจภาคสนาม

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรเดิมกับแนวทางการปรับปรุงระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร

1.2.3 เพื่อคัดเลือกรูปแบบระยะเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะและจำนวนรถในแถวคอยเฉลี่ย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการจราจรบริเวณสี่แยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี โดยแบ่งเส้นทางการจราจรออกเป็น 8 เส้นทางตามทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ข้อมูลจราจรถูกเก็บรวบรวมในวันทำการจำนวน 5 วัน ในช่วงเวลาเร่งด่วน ได้แก่ 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น.

แบบจำลองการจราจรถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Arena โดยใช้ข้อมูลรูปแบบการมาถึงของยานพาหนะและเวลาการผ่านทางแยก

การศึกษามุ่งเน้นการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟแดงและไฟเขียวภายใต้โครงสร้างทางแยกและรูปแบบช่องจราจรเดิม โดยไม่พิจารณาการก่อสร้างช่องจราจรเพิ่มเติม การปรับปรุงเรขาคณิตของทางแยก หรือการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินรถ ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะ และจำนวนรถในแถวคอยเฉลี่ยของแต่ละแนวทางจราจร

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการกำหนดเวลาสัญญาณไฟจราจร

การกำหนดเวลาสัญญาณไฟจราจรเป็นกระบวนการจัดสรรเวลาให้แก่กระแสการจราจรจากแต่ละทิศทางของทางแยก องค์ประกอบสำคัญประกอบด้วยลำดับเฟสสัญญาณไฟ ระยะเวลาไฟเขียว ระยะเวลาไฟเหลือง ระยะเวลาไฟแดง และระยะเวลารอบสัญญาณไฟ การกำหนดค่าเหล่านี้ต้องสอดคล้องกับปริมาณยานพาหนะ การใช้ช่องจราจร และลักษณะการเลี้ยวของรถในแต่ละทิศทาง [1] ตัวชี้วัดสำคัญสำหรับประเมินประสิทธิภาพของทางแยกควบคุมด้วยสัญญาณไฟ ได้แก่ เวลารอคอยเฉลี่ย จำนวนรถในแถวคอย ความยาวแถวคอยสูงสุด และปริมาณยานพาหนะที่สามารถระบายผ่านทางแยกได้ การลดระยะเวลารอบสัญญาณไฟอาจช่วยลดเวลารอคอยได้ แต่ต้องกำหนดเวลาไฟเขียวให้เพียงพอกับทิศทางที่มีปริมาณรถสูง เพื่อป้องกันการสะสมของรถในแถวคอย

ในการศึกษานี้ การปรับเหมาะสัญญาณไฟจราจรมุ่งเน้นการปรับระยะเวลาไฟเขียวและไฟแดงในแต่ละทิศทาง ภายใต้ลำดับการปล่อยสัญญาณและโครงสร้างทางแยกเดิม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับสภาพการจราจรเดิม

2.2 ทฤษฎีแถวคอย การจำลองสถานการณ์ และเหตุผลในการใช้โปรแกรม Arena

ระบบจราจรบริเวณทางแยกสัญญาณไฟสามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดของทฤษฎีแถวคอย โดยยานพาหนะที่เดินทางเข้าสู่ทางแยกเป็นหน่วยที่เข้าสู่ระบบ เมื่อสัญญาณไฟเป็นสีแดง รถจะสะสมในแถวคอย และเมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นสีเขียว รถจะเคลื่อนผ่านทางแยกตามอัตราการให้บริการของแต่ละช่องจราจร ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งพฤติกรรมของระบบเปลี่ยนแปลงตามเหตุการณ์ เช่น การมาถึงของรถ การเปลี่ยนสถานะสัญญาณไฟ และการออกจากระบบของยานพาหนะ [5]

โปรแกรม Arena ถูกเลือกใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากสามารถจำลองระบบแถวคอยและเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่องได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถกำหนดรูปแบบการมาถึงของยานพาหนะ การรอคอยในแถวคอย การควบคุมทรัพยากรหรือสถานะสัญญาณไฟ และการบันทึกผลลัพธ์ เช่น เวลารอคอยเฉลี่ยและจำนวนรถในแถวคอยได้อย่างเป็นระบบ [6] อย่างไรก็ตาม Arena มีข้อจำกัดในการจำลองพฤติกรรมจราจรระดับจุลภาค เช่น พฤติกรรมการขับขี่จริง การเปลี่ยนช่องจราจร ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถแต่ละคัน และผลกระทบจากสภาพจราจรที่ซับซ้อน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งใช้ Arena เพื่อประเมินผลเชิงระบบของการปรับรอบสัญญาณไฟ โดยใช้เวลารอคอยและจำนวนรถในแถวคอยเป็นตัวชี้วัดหลัก

การจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่องเป็นวิธีการศึกษาพฤติกรรมของระบบตามลำดับเหตุการณ์ เช่น การมาถึงของยานพาหนะ การเปลี่ยนสถานะของสัญญาณไฟ และการออกจากระบบของรถ การจำลองช่วยให้สามารถทดสอบแนวทางปรับปรุงหลายรูปแบบได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการจราจรจริง [6] โปรแกรม Arena เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถกำหนดรูปแบบการมาถึงของหน่วยงาน แถวคอย ทรัพยากร กระบวนการให้บริการ และ

เงื่อนไขการตัดสินใจภายในระบบได้ นอกจากนี้ โปรแกรมยังรายงานผลเชิงสถิติ เช่น เวลารอคอยเฉลี่ย จำนวนรถในแถวคอย และจำนวนรถที่ผ่านระบบ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบสัญญาณไฟจราจรแต่ละแนวทาง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

[2] ได้ทบทวนบทบาทของการจำลองการจราจรในการวิเคราะห์สภาพการเดินรถและการเพิ่มความปลอดภัยทางถนน โดยพบว่าการจำลองสถานการณ์ช่วยให้สามารถทดสอบผลกระทบของแนวทางจัดการจราจรภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายก่อนนำไปใช้จริง

[3] ได้นำแนวคิดการเรียนรู้แบบเสริมกำลังมาใช้ในการปรับการควบคุมสัญญาณไฟจราจร โดยชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้กับพื้นที่จริงจำเป็นต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนของข้อมูลจราจรและความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองกับสภาพแวดล้อมจริง

[4] ได้ทบทวนการประยุกต์ใช้การเรียนรู้แบบเสริมกำลังสำหรับการควบคุมสัญญาณไฟจราจร และเสนอว่าระบบควบคุมแบบปรับตัวมีศักยภาพในการลดความล่าช้า เพิ่มประสิทธิภาพของทางแยก และสนับสนุนการจัดการจราจรในเมือง

ในบริบทของประเทศไทย มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อสนับสนุนการปรับปรุงสัญญาณไฟจราจร เช่น รุ่งรัตน์และกิรพัฒน์ [7] ได้ใช้โปรแกรม Arena จำลองระบบแถวคอยบริเวณสี่แยกเกษตรนวมินทร์และเสนานิคม เพื่อช่วยตัดสินใจในการควบคุมจังหวะสัญญาณไฟจราจรและลดเวลารอคอย ขณะที่ธนภัทร [8] ได้ประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena เพื่อหารอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ งานวิจัยดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการจำลองสถานการณ์เหมาะสมกับปัญหาสัญญาณไฟจราจรในบริบทของประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะการมาถึงของรถและพฤติกรรมการใช้ทางแยกที่มีความแปรปรวนตามช่วงเวลา

จากการทบทวนงานวิจัย พบว่าการใช้ข้อมูลจราจรจริงร่วมกับแบบจำลองสถานการณ์เป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับประเมินการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟ งานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรม Arena เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณไฟเดิมและแนวทางปรับปรุงของสี่แยกลือคำหาญ โดยใช้เวลารอคอยเฉลี่ยและจำนวนรถในแถวคอยเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดหลัก

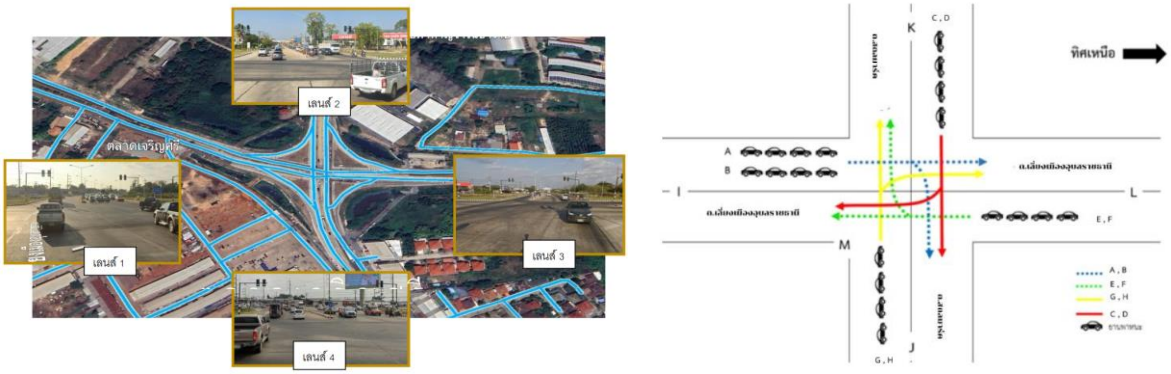
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาและขอบเขตการวิเคราะห์

พื้นที่ศึกษาคือสี่แยกลือคำหาญ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นทางแยกควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจรและมีการเดินรถจากหลายทิศทาง การศึกษากำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจำนวน 8 เส้นทาง ครอบคลุมการเดินทางตรงและการเลี้ยวขวาจากทุกทิศทางของทางแยก เพื่อใช้เป็นขอบเขตในการเก็บข้อมูลและพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ ลักษณะพื้นที่ศึกษาและทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบริเวณทางแยกแสดงดังรูปที่ 1 โดยกำหนดรหัสเส้นทาง A–H เพื่อใช้ระบุข้อมูลปริมาณจราจร รูปแบบการมาถึงของรถ และเวลาการให้บริการในแต่ละทิศทางอย่างเป็นระบบ

3.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจราจร

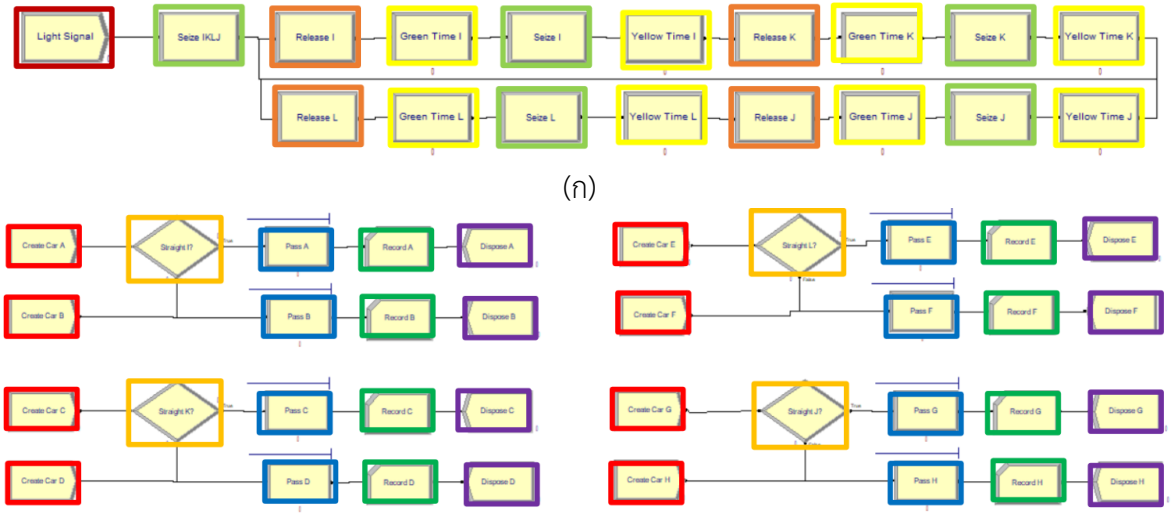
การวิเคราะห์รูปแบบการแจกแจงของข้อมูลนำเข้าใช้เครื่องมือ Input Analyzer ในโปรแกรม Arena โดยทดสอบความเหมาะสมของการแจกแจงด้วยวิธี Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และพิจารณาค่า Corresponding p-value มากกว่า 0.15 เป็นเกณฑ์ยอมรับรูปแบบการแจกแจง ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการบันทึกวิดีโอภาคสนามในวันจันทร์ที่ 15 ธันวาคม 2568 ถึงวันศุกร์ที่ 19 ธันวาคม 2568 ช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. โดยแบ่งเส้นทางการจราจรออกเป็น 8 เส้นทาง ได้แก่ A–H สรุปข้อมูลนำเข้าหลักของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบริเวณสี่แยกลือคำหาญ

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลนำเข้าหลักของแบบจำลอง Arena

เส้นทาง	ช่วง 07:00–08:00 น.	ช่วง 17:30–18:30 น.
A	3 + GAMM(1.52, 2.55)	3 + WEIB(2.33, 2.03)
B	10 + LOGN(15.3, 21.1)	6 + 14*BETA(2.98, 3.48)
C	3 + GAMM(1.4, 3.95)	4 + LOGN(3.44, 2.03)
D	10 + LOGN(18, 35.6)	8 + LOGN(8.98, 6.58)
E	4 + ERLA(1.64, 3)	4 + ERLA(3.23, 2)
F	24 + 85*BETA(0.689, 1.41)	13 + GAMM(10.7, 1.65)
G	3 + 5.97*BETA(1.06, 2.11)	4 + GAMM(0.869, 2.97)
H	16 + ERLA(5.8, 2)	9 + ERLA(2.57, 3)
รถทางตรง	1.04 + LOGN(0.404, 0.285)	ใช้ค่าเดียวกับช่วงเช้า
รถเลี้ยวขวา	1.03 + 1.79*BETA(0.78, 1.25)	ใช้ค่าเดียวกับช่วงเช้า



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 โครงสร้างแบบจำลองสถานการณ์การจราจรในโปรแกรม Arena: (ก) การควบคุมการปล่อยรถตามสัญญาณไฟจราจร และ (ข) การเข้าสู่ระบบและการเลือกเส้นทางของยานพาหนะ

3.3 การสร้างและพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์

แบบจำลองสถานการณ์การจราจรถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Arena โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง เพื่อแทนพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบริเวณสี่แยกลือคำหาญ ยานพาหนะแต่ละคันถูกกำหนดให้เป็นหน่วยที่เข้าสู่ระบบตามรูปแบบการมาถึงของแต่ละเส้นทาง เมื่อสัญญาณไฟจราจรเป็นสีแดง ยานพาหนะจะสะสมในแถวคอย และเมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นสีเขียว ยานพาหนะจะเคลื่อนผ่านทางแยกตามเงื่อนไขของช่องจราจรและทิศทางการเดินรถที่กำหนดไว้ [6]

แบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนการควบคุมการปล่อยรถตามสถานะของสัญญาณไฟจราจร ซึ่งกำหนดลำดับเฟสและระยะเวลาไฟเขียว ไฟเหลือง และไฟแดงของแต่ละทิศทาง และส่วนการสร้างยานพาหนะเข้าสู่ระบบพร้อมกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยรถจะถูกสร้างเข้าสู่ระบบตามข้อมูลระยะห่างระหว่างการมาถึง จากนั้นจึงเลือกเส้นทางการเดินรถตามสัดส่วนการเดินทางที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แบบจำลองส่วนการเข้าสู่ระบบใช้โมดูล Create ในการสร้างยานพาหนะเข้าสู่ระบบตามรูปแบบการแจกแจงของระยะห่างระหว่างการมาถึงในแต่ละเส้นทาง จากนั้นใช้เงื่อนไขการตัดสินใจเพื่อกำหนดทิศทางการเดินรถเข้าสู่เส้นทางตรงหรือเลี้ยวขวาตามสัดส่วนที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม รถที่เข้าสู่ระบบจะถูกหน่วงไว้ในแถวคอยเมื่อสัญญาณไฟของทิศทางนั้นเป็นสีแดง และจะถูกปล่อยให้ผ่านทางแยกเมื่อเข้าสู่ช่วงไฟเขียวของเฟสที่สัมพันธ์กัน โดยการปล่อยรถเกิดขึ้นต่อเนื่องตามเวลาให้บริการต่อคันภายในช่วงไฟเขียว ไม่ใช่การปล่อยรถทั้งหมดออกจากแถวคอยพร้อมกัน ลักษณะดังกล่าวช่วยให้แบบจำลองสามารถแทนพฤติกรรมการสะสมตัวและการระบายรถบริเวณทางแยกได้ในระดับระบบ

ข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองประกอบด้วยรูปแบบการมาถึงของยานพาหนะในแต่ละเส้นทาง ระยะเวลาที่รถใช้ในการผ่านทางแยก และระยะเวลาสัญญาณไฟจราจร ข้อมูลดังกล่าวถูกวิเคราะห์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่แบบจำลอง Arena ผลลัพธ์ที่บันทึกจากแบบจำลอง ได้แก่ เวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะ จำนวนรถในแถวคอยเฉลี่ย และจำนวนยานพาหนะที่สามารถระบายผ่านทางแยกได้ ก่อนประเมินแนวทางปรับปรุง ได้กำหนดแบบจำลองสภาพปัจจุบันให้มีลำดับการปล่อยสัญญาณไฟและรอบสัญญาณไฟรวมเท่ากับ 187 วินาทีต่อรอบ จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้เปรียบเทียบผลกับแนวทางการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรที่เสนอในงานวิจัย

การจำลองแต่ละกรณีกำหนดระยะเวลาจำลองเท่ากับ 60 นาที ตามช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลจริง โดยจำลองแยกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. เนื่องจากเป็นการจำลองแบบช่วงเวลาจำกัดตามช่วงเวลาเร่งด่วน จึงกำหนดระยะเวลาอุ่นเครื่องเป็น 0 นาที และใช้การจำลองซ้ำจำนวน 100 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลองสภาพปัจจุบันดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับข้อมูลภาคสนามในช่วงเวลาเดียวกัน ได้แก่ จำนวนยานพาหนะที่ผ่านทางแยกและลักษณะการสะสมตัวของรถในแถวคอย ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ประเมินแนวทางปรับปรุง โดยผลการจำลองสภาพปัจจุบันให้เวลารอคอยเฉลี่ย 46.2515 วินาทีต่อคัน ในช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 53.2096 วินาทีต่อคัน ในช่วงเวลา 17:30–18:30 น. ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการติดขัดที่พบจากการสำรวจภาคสนาม

3.4 การออกแบบแนวทางปรับปรุงและการประเมินผล

การศึกษาเปรียบเทียบสภาพการจราจรเดิมกับแนวทางปรับปรุงระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรจำนวน 2 แนวทาง โดยยังคงโครงสร้างทางแยก ลำดับการปล่อยสัญญาณ และรูปแบบการเดินรถเดิมไว้ การปรับปรุงมุ่งเน้นการปรับระยะเวลาไฟเขียวและไฟแดงให้สอดคล้องกับปริมาณยานพาหนะของแต่ละทิศทาง

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละแนวทาง ได้แก่

1. เวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะในระบบ
2. จำนวนรถในแถวคอยเฉลี่ย
3. ความสามารถในการระบายยานพาหนะผ่านทางแยก

ผลจากการจำลองของแต่ละแนวทางถูกนำมาเปรียบเทียบกับสภาพเดิม เพื่อคัดเลือกรูปแบบระยะเวลาสัญญาณไฟที่สามารถลดเวลารอคอยและลดจำนวนรถสะสมในแถวคอยได้ดีที่สุด โดยรอบสัญญาณไฟเดิมมีระยะเวลา 187 วินาที และแนวทางที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาเดิมมีรอบสัญญาณไฟ 169 วินาที

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการจำลองสถานการณ์และแนวทางการปรับปรุง

การศึกษานี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมสัญญาณไฟจราจรเดิมกับแนวทางการปรับปรุงจำนวน 2 แนวทาง โดยกำหนดให้ลำดับการปล่อยสัญญาณไฟ โครงสร้างทางแยก และรูปแบบการเดินรถคงเดิม การปรับปรุงมุ่งเน้นการลดระยะเวลารอบสัญญาณไฟและปรับระยะเวลาไฟเขียวของแต่ละเฟสให้สอดคล้องกับปริมาณการจราจรและความสามารถในการระบายรถของแต่ละทิศทาง

สภาพปัจจุบันมีรอบสัญญาณไฟรวม 187 วินาที โดยกำหนดเวลาไฟเขียวของเฟส I, K, L และ J เท่ากับ 50, 45, 31 และ 49 วินาที ตามลำดับ การกำหนดแนวทางปรับปรุงดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง Arena ทดลองปรับลดรอบสัญญาณไฟจากสภาพปัจจุบันแบบค่อยเป็นค่อยไป ภายใต้ข้อจำกัดของลำดับเฟสและโครงสร้างทางแยกเดิม จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้านเวลารอคอยเฉลี่ยและจำนวนรถในแถวคอย เพื่อคัดเลือกแนวทางที่ให้ผลดีที่สุด ดังนั้นรอบสัญญาณไฟ 178 วินาที และ 169 วินาที จึงเป็นค่าที่ได้จากการทดลองปรับลดรอบสัญญาณไฟในแบบจำลองสถานการณ์ ไม่ใช่ค่าที่คำนวณจากสูตรรอบสัญญาณไฟโดยตรง

แนวทางปรับปรุงที่ 1 ลดรอบสัญญาณไฟเหลือ 178 วินาที โดยกำหนดเวลาไฟเขียวของเฟส I, K, L และ J เท่ากับ 48, 42, 29 และ 47 วินาที ตามลำดับ ส่วนแนวทางปรับปรุงที่ 2 ลดรอบสัญญาณไฟเหลือ 169 วินาที โดยกำหนดเวลาไฟเขียวของเฟส I, K, L และ J เท่ากับ 44, 39, 29 และ 45 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรของแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ไฟเขียว เฟส I	ไฟเขียว เฟส K	ไฟเขียว เฟส L	ไฟเขียว เฟส J	ไฟเหลือง ต่อเฟส	รอบ สัญญาณรวม
สภาพปัจจุบัน	50	45	31	49	3	187
แนวทางปรับปรุงที่ 1	48	42	29	47	3	178
แนวทางปรับปรุงที่ 2	44	39	29	45	3	169

หมายเหตุ: หน่วยเป็นวินาที โดยเฟส I, K, L และ J หมายถึงกลุ่มทิศทางการปล่อยรถที่ได้รับสัญญาณไฟเขียวพร้อมกันตามผังในรูปที่ 1 และกำหนดเวลาไฟเหลืองเท่ากับ 3 วินาทีต่อเฟส

4.2 การเปรียบเทียบเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะ

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า การปรับระยะเวลาสัญญาณไฟช่วยลดเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะได้ทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเย็น ดังแสดงในตารางที่ 3 ในช่วงเวลา 07:00–08:00 น. เวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะในสภาพปัจจุบันเท่ากับ 46.2515 วินาทีต่อคัน เมื่อใช้แนวทางปรับปรุงที่ 1

เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงเหลือ 44.2765 วินาทีต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 4.27 ขณะที่แนวทางปรับปรุงที่ 2 ให้ผลดีที่สุด โดยลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 42.0951 วินาทีต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 8.99 สำหรับช่วงเวลา 17:30–18:30 น. สภาพปัจจุบันมีเวลารอคอยเฉลี่ย 53.2096 วินาทีต่อคัน แนวทางปรับปรุงที่ 1 ลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 50.8090 วินาทีต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 4.51 ส่วนแนวทางปรับปรุงที่ 2 ลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 48.8448 วินาทีต่อคัน หรือลดลงร้อยละ 8.20 เพื่อยืนยันว่าการลดลงของเวลารอคอยเฉลี่ยไม่ได้เกิดจากความแปรปรวนของการสุ่มในแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของผลการจำลอง โดยใช้ข้อมูลเวลารอคอยเฉลี่ยจากการจำลองซ้ำจำนวน 100 ครั้ง เปรียบเทียบระหว่างสภาพปัจจุบันและแนวทางปรับปรุงที่ 2 ด้วยการทดสอบ Paired t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดสอบพบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยของแนวทางปรับปรุงที่ 2 แตกต่างจากสภาพปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งช่วงเวลา 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.0163 และ 0.0117 ตามลำดับ

ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นว่า แม้แนวทางปรับปรุงที่ 2 จะลดระยะเวลาไฟเขียวในบางเฟสเมื่อเทียบกับสภาพเดิม แต่การลดรอบสัญญาณไฟรวมลง 18 วินาที ทำให้ยานพาหนะใช้เวลาอยู่ในช่วงไฟแดงน้อยลง ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยของระบบลดลงทั้งสองช่วงเวลาเร่งด่วน

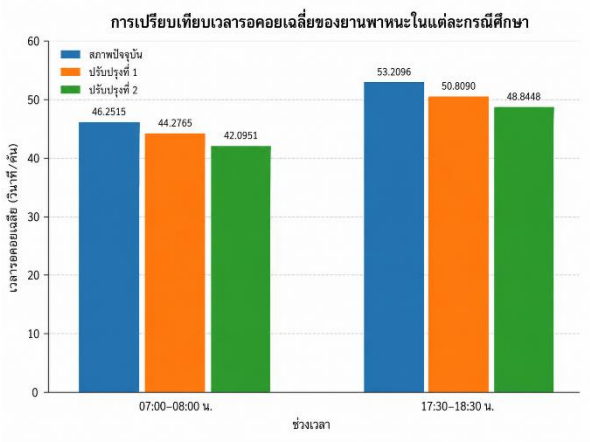
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะ

ช่วงเวลา	กรณีศึกษา	รอบสัญญาณไฟ (วินาที)	เวลารอคอยเฉลี่ย (วินาที/คัน)	ลดลงจากสภาพปัจจุบัน (วินาที/คัน)	ลดลง (ร้อยละ)
07:00–08:00 น.	สภาพปัจจุบัน	187	46.2515	-	-
	แนวทางปรับปรุงที่ 1	178	44.2765	1.9750	4.27
	แนวทางปรับปรุงที่ 2	169	42.0951	4.1564	8.99
17:30–18:30 น.	สภาพปัจจุบัน	187	53.2096	-	-
	แนวทางปรับปรุงที่ 1	178	50.8090	2.4006	4.51
	แนวทางปรับปรุงที่ 2	169	48.8448	4.3648	8.20

4.3 อภิปรายผล

จากผลการจำลอง แนวทางปรับปรุงที่ 2 เป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่ศึกษา เนื่องจากให้ค่าเวลารอคอยเฉลี่ยต่ำที่สุดทั้งในช่วงเช้าและช่วงเย็น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพปัจจุบันและแนวทางปรับปรุงที่ 1 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการกำหนดรอบสัญญาณไฟที่สั้นลงและการปรับสัดส่วนเวลาไฟเขียวให้สอดคล้องกับลักษณะการเดินรถ สามารถช่วยลดความล่าช้าของยานพาหนะบริเวณทางแยกได้ เพื่อให้เห็นแนวโน้มการลดลงของเวลารอคอยเฉลี่ยในแต่ละแนวทางอย่างชัดเจน ผลการเปรียบเทียบในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเย็นแสดงดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พบว่าแนวทางปรับปรุงที่ 2 ให้เวลารอคอยเฉลี่ยต่ำที่สุดในทั้งสองช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 07:00–08:00 น. ลดลงจาก 46.2515 เหลือ 42.0951 วินาทีต่อคัน และช่วงเวลา 17:30–18:30 น. ลดลงจาก 53.2096 เหลือ 48.8448 วินาทีต่อคัน สะท้อนว่าแนวทางดังกล่าวสามารถลดเวลาที่รถต้องรอสัญญาณไฟแดงและลดการสะสมของรถในแถวคอยได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะในแต่ละกรณีศึกษา

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยในบริบทของประเทศไทยที่ประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงสัญญาณไฟจราจร โดยงานของรุ่งรัตน์และกิรพัฒน์ [7] ใช้โปรแกรม Arena จำลองระบบแถวคอยเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจควบคุมจังหวะสัญญาณไฟ และงานของธนภัทร [8] พบว่าการปรับรอบสัญญาณไฟให้สอดคล้องกับปริมาณจราจรสามารถลดเวลารอคอยและจำนวนรถในแถวคอยได้ เช่นเดียวกับผลการศึกษานี้ที่พบว่าการลดรอบสัญญาณไฟจาก 187 วินาทีเป็น 169 วินาที ช่วยลดเวลารอคอยเฉลี่ยทั้งช่วงเช้าและช่วงเย็น อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงของงานวิจัยนี้อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 8–9 เนื่องจากการศึกษายังคงลำดับเฟสเดิม โครงสร้างช่องจราจรเดิม และไม่ได้พิจารณาการปรับปรุงทางกายภาพของทางแยก จึงเป็นการปรับปรุงภายใต้ข้อจำกัดของระบบสัญญาณไฟเดิมเป็นหลัก

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Arena เพื่อปรับเหมาะระยะเวลาสัญญาณไฟจราจรบริเวณสี่แยกลือคำหาญ โดยเปรียบเทียบสภาพเดิมที่มีรอบสัญญาณไฟ 187 วินาที กับแนวทางปรับปรุง 2 แนวทาง ผลการจำลองพบว่าแนวทางปรับปรุงที่ 2 ซึ่งมีรอบสัญญาณไฟ 169 วินาที ให้ผลดีที่สุด โดยลดเวลารอคอยเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเช้าได้ร้อยละ 8.99 และช่วงเย็นได้ร้อยละ 8.20 แสดงให้เห็นว่าการปรับระยะเวลาสัญญาณไฟให้เหมาะสมสามารถช่วยลดความล่าช้าและการสะสมของรถในแถวคอยได้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจากข้อมูลจราจรเก็บจากวันทำการจำนวน 5 วัน และพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาเร่งด่วน 07:00–08:00 น. และ 17:30–18:30 น. รวมทั้งแบบจำลองยังคงโครงสร้างทางแยกและลำดับเฟสสัญญาณไฟเดิม โดยไม่ได้พิจารณาปัจจัยระดับจุลภาค เช่น พฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจร รถจักรยานยนต์ คนเดินเท้า สภาพอากาศ และผลกระทบจากทางแยกใกล้เคียง ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรขยายช่วงเวลาเก็บข้อมูล เพิ่มปัจจัยด้านพฤติกรรมการขับขี่ และเปรียบเทียบผลหลังการทดลองปรับใช้จริง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแนวทางการปรับปรุงสัญญาณไฟจราจร

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมในการเก็บรวบรวมข้อมูลการจราจรและจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2015). Signal Timing Manual: Second Edition. Washington, DC: The National Academies Press.

[2] Mustapha, Aliyu, Ahmad Majdi Abdul-Rani, Noorhayati Saad, and Mazli Mustapha. (2024).

“Advancements in Traffic Simulation for Enhanced Road Safety: A Review.” Simulation Modelling Practice and Theory 137: 103017.

[3] Meess, Henri, Jeremias Gerner, Daniel Hein, Stefanie Schmidtner, Gordon Elger, and Klaus Bogenberger. (2024). “First Steps Towards Real-World Traffic Signal Control Optimisation by Reinforcement Learning.” Journal of Simulation 18, 6: 957-972.

[4] Michailidis, Panagiotis, Iakovos Michailidis, Charalampos Rafail Lazaridis, and Elias Kosmatopoulos. (2025). “Traffic Signal Control via Reinforcement Learning: A Review on Applications and Innovations.” Infrastructures 10, 5: 114.

[5] Shortle, John F., James M. Thompson, Donald Gross, and Carl M. Harris. (2018). Fundamentals of Queueing Theory. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[6] Kelton, W. David, Randall P. Sadowski, and Nancy B. Zupick. (2015). Simulation with Arena. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education.

[7] รุ่งรัตน์ ภิสัชเพ็ญ และกิรพัฒน์ เล็กสุขสมบูรณ์. (2553). “การจำลองสถานการณ์เพื่อช่วยในการตัดสินใจการควบคุมจังหวะสัญญาณไฟจราจร.” การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงาน, 17-21.

[8] ธนภัทร ธรรมสิทธิ์. (2565). “การหารอบสัญญาณไฟจราจรที่เหมาะสมภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่โดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena.” วิศวกรรมมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

การวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 ในกระบวนการผลิตนม UHT กรณีศึกษา บริษัทสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จำกัด อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว

Reduce Machine Breakdown Analysis of Homogenizer Machine (Case Study Homogenizer Machine at Wang Nam Yen Dairy Cooperative Limited)

ภุมรินทร์ ทวิชศรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
เลขที่ 1 หมู่ที่ 20 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180
phummarin@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 ในกระบวนการผลิตนม UHT กรณีศึกษา บริษัทสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จำกัด อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว โดยการโดยรวบรวมข้อมูลการหยุดเครื่องจักรและวิเคราะห์ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียของเครื่องจักร (MTBF) โดยใช้ Pareto Analysis เพื่อจัดลำดับความสำคัญของชิ้นส่วนที่มีความเสี่ยงสูง และ Fishbone Diagram เพื่อวิเคราะห์ปัญหา ของอุปกรณ์ 5 รายการ ได้แก่ Pump Cylinder, Valves Building-in, Homogenizer Device, Bellows และ Oil/Water Sealing Piston ผลการวิจัยพบว่า Pump Cylinder มีความเสียหายสูงสุดเฉลี่ย 48 ครั้งต่อปี และมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเฉลี่ยสูง 126,667 บาทต่อปี โดยมีสาเหตุจากขาดการบำรุงรักษาตามสภาพจริงของเครื่องจักร หลังจากนำแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบำรุงรักษาตามสภาพ พบว่าความเสียหายของ Pump Cylinder ลดลงจาก 48 ครั้ง เหลือ 5 ครั้ง ค่าใช้จ่ายลดลงจาก 126,667 บาท เหลือ 30,000 บาท ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตและการลดต้นทุนการซ่อมแซมเครื่องจักร

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, เครื่องโฮโมจีไนเซอร์, การหยุดเครื่องจักร, MTBF

Abstract

This research an analysis of downtime loss for the Homogenizer UHT STORK 3 in the UHT Milk Production Process: A Case Study of Wang Nam Yen Dairy Cooperative Limited, Sa Kaeo Province. This research analyzes downtime data and evaluates the Mean Time between Failures (MTBF) using a Pareto Analysis to prioritize high-risk components. Additionally, a Fishbone Diagram is utilized to investigate the root causes of failure for five key equipment components: the Pump Cylinder, Valves Building-in, Homogenizer Device, Bellows, and Oil/Water Sealing Piston. The results indicate that the Pump Cylinder experienced the highest failure frequency, averaging 48 failures per year, with an average maintenance cost of 126,667 THB per year. The primary cause was identified as a lack of condition-based maintenance. Following the implementation of preventive maintenance combined with condition-based maintenance, the failure frequency of the Pump Cylinder significantly decreased from 48 to 5 times per year, and maintenance costs were reduced from 126,667 THB to 30,000 THB. This intervention successfully enhanced production efficiency and reduced overall maintenance costs.

Keywords: Preventive Maintenance, Homogenizer, Machine Downtime, MTBF, UHT Milk

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์นมมีการแข่งขันสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของเครื่องจักรในกระบวนการผลิต เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และความสามารถในการแข่งขันขององค์กร กระบวนการผลิตนม UHT (Ultra High Temperature) ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญหลายขั้นตอน ได้แก่ การรับน้ำนมดิบ การเทอร์ไมเซชั่น การโฮโมจีไนเซชั่น การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน และการบรรจุในสภาวะปลอดเชื้อ โดยในแต่ละขั้นตอนจำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง

เครื่อง Homogenizer เป็นเครื่องจักรหลักในขั้นตอนการโฮโมจีไนเซชั่น ที่ทำหน้าที่ลดขนาดอนุภาคไขมันในนมโดยใช้ความดันสูง 200 กิโลปาสคาลต่อตารางเซนติเมตร เพื่อทำให้ของเหลวผ่านที่วาล์วมีไขมันที่มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ชิ้นส่วนสำคัญของเครื่อง Homogenizer เกิดการสึกหรอและเสียหายก่อนกำหนด ได้แก่ ชุด Pump Cylinder, ชุด Under and Upper Block, ชุด Valves Building, ชุด Homogenizing Device และชุด Oil/Water Sealing Piston การเสียหายของชิ้นส่วนเหล่านี้นำไปสู่การ Breakdown ของเครื่องจักรโดยไม่ได้วางแผนล่วงหน้า ก่อให้เกิดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและอุปกรณ์สูงถึง 590,000 บาทต่อเดือน และมี Product Loss สูงถึง 14,781 ลิตรต่อเดือน การเกิด Breakdown ของเครื่องจักรสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ทั้งปัญหาด้านไฟฟ้า ปัญหาจากระบบควบคุม ปัญหาด้านความร้อน การบำรุงรักษาที่ไม่เหมาะสม ตลอดจนการใช้งานที่เกินพิกัดของเครื่องจักร ดังนั้นการนำแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) มาประยุกต์ใช้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยอาศัยเครื่องมือทางวิศวกรรม เช่น Pareto Analysis [1-3] เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหา การคำนวณค่า Mean Time Between Failures (MTBF) เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร [2-3] และการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วย Fishbone Diagram [4-6] การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งหวังที่จะลดการเกิด Breakdown ของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและลดความสูญเสียอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดปัญหาของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3

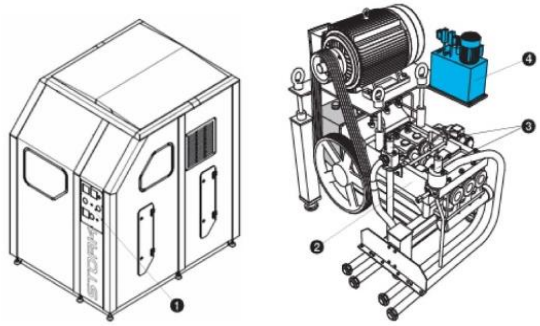
2.2 เพื่อหาแนวทางการลดการเกิดปัญหาและการ Breakdown ของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 โดยการนำแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมาประยุกต์ใช้

2.3 เพื่อลดการสูญเสีย Product Loss และค่าใช้จ่ายด้านวัสดุอุปกรณ์ที่เกิดจาก Breakdown

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาระบบการทำงานของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3

เครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 สำหรับงานวิจัยของ บริษัทสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จำกัด อำเภอวังสมบูรณ์ จังหวัดสระแก้ว เป็นเครื่องจักรหลักในกระบวนการผลิตนม UHT มีกำลังการผลิต 11,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเครื่องจักรนี้ทำหน้าที่บีบอัดไขมันในน้ำนมผ่าน Homogenizing Valve ที่ความดัน 200 บาร์ ในขั้นตอนที่ 1 และที่ความดัน 50 บาร์ ในขั้นตอนที่ 2 เพื่อให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวสม่ำเสมอ โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ในการนำมาวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย ชุด Pump Cylinder ชุด Under and Upper Block ชุด Valves Building-in ชุด Homogenizer Device และชุด Oil/Water Sealing Piston ซึ่งลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3

3.2 วิเคราะห์สาเหตุการ Breakdown

จากงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของ Homogenizer UHT STORK 3 กรณีศึกษาสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว ได้มีการรวบรวมข้อมูลความเสียหายของเครื่องจักรในช่วงเดือนมกราคม ถึง เดือนมีนาคม 2569 และวิเคราะห์ข้อมูลความเสียหายจากอุปกรณ์ทั้งหมด 9 รายการที่อยู่ภายในเครื่อง พบว่าชิ้นส่วนที่ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดปัญหาต้องหยุดการทำงาน มากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ Pump Cylinder 720 นาที คิดเป็น 16.6% รองลงมาคือ Bellows 600 นาที คิดเป็น 13.8% และ Homogenizing Device 540 นาที คิดเป็น 12.5% โดยตารางแจกแจงรายละเอียดความเสียหายของอุปกรณ์ภายในเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์ภายในเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3

ตารางสรุปลำดับ Machine Downtime เดือนมกราคม-มีนาคม 2569							
Item	Machine code	Equipment name	ปี 2569			ข้อมูลการหยุดของเครื่องจักร	
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	นาที (Minutes)	ร้อยละ (Percentage)
1	00217145	Pump Cylinder	1	2	1	720	16.6
2	00137924	Bellows	2	2	1	600	13.8
3	P0861829	Valves Building-in	2	1	3	360	8.3
4	PA866108	Homogenizer Device	3	4	2	540	12.5
5	P0664268	Oil Sealing Piston	0	1	0	180	4.1
6	P0866075	Shock Absorber	1	2	2	300	6.9
7	PB863833	Frame	0	0	0	0	0
8	P0879211	Motor Homogenizer	0	0	0	0	0
9	P0857208	Oil Pump	1	0	0	180	4.1

3.3 วิเคราะห์หาเวลาเฉลี่ยของความเสียหาย

จากข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์ภายในเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ทำงานก่อนที่จะเกิดความเสียหายหรือหยุดทำงานครั้งถัดไป (MTBF) [7-8] ดังสมการที่ (1)

$$MTBF = \frac{TotalUptime}{no.ofFailure} \quad (1)$$

เมื่อ $MTBF$ คือ เวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ทำงานก่อนที่จะเกิดความเสียหาย (min)

$Totaluptime$ คือ เวลาทั้งหมดอุปกรณ์ทำงาน (min)

$no.ofFailure$ คือ จำนวนความเสียหาย (ครั้ง)

ค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมแซมเครื่องจักร (MTTR) ดังสมการที่ (2)

$$MTTR = \frac{Total\,\mathrm{Re}\,pairtime}{no.ofFailure} \quad (2)$$

เมื่อ $MTTR$ คือ เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (min)

$Total\,\mathrm{Re}\,pairtime$ คือ เวลาทั้งหมดที่ซ่อม (min)

$no.ofFailure$ คือ จำนวนความเสียหาย (ครั้ง)

โดยการวิเคราะห์ ค่า MTBF และ MTTR ของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ STORK 3 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่า MTBF และ MTTR ของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ STORK 3

Item	Machine Name	Down time	MTBF	MTTR
		(Min)	(Min)	(Min)
1	Pump Cylinder	720	170	40
2	Bellows	600	120	30
3	Valves Building-in	360	100	40
4	Homogenizer Device	540	210	30
5	Oil Sealing Piston	180	150	30
6	Shock Absorber	300	230	50
7	Frame	0	0	0
8	Motor Homogenizer	0	0	0
9	Oil Pump	180	135	45

จากตารางที่ 2 เป็นการสรุปค่าระยะเวลาเฉลี่ยความเสียหายของอุปกรณ์ (MTBF) พบว่าค่า MTBF ที่อุปกรณ์ Shock absorber มีค่า MTBF มากที่สุดที่ 230 นาที และค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมแซมเครื่องจักร (MTTR) ที่อุปกรณ์ Bellows, Homogenizer device และ Oil sealing piston มีค่า MTTR น้อยที่สุดที่ 30 นาที

3.4 ภาพรวมวิเคราะห์ความเสียหายของเครื่องจักรในช่วงปี 2566-2568

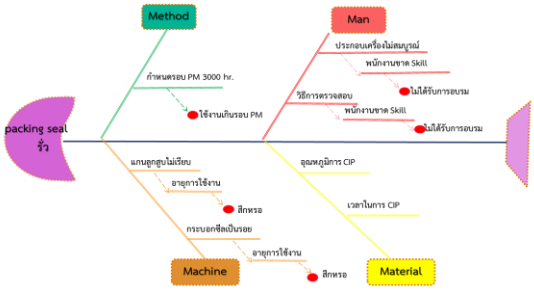
จากภาพรวมข้อมูลความเสียหายของเครื่อง Homogenizer STORK 3 ในช่วงปี 2566–2568 เป็นข้อมูลเฉลี่ยที่ใช้ในการเปรียบเทียบความเสียหายของอุปกรณ์แต่ละชนิด พบว่า Pump Cylinder มีค่าเฉลี่ยความเสียหายสูงสุด 48 ครั้ง/ปี รองลงมาคือ Valves Building-In 23.33 ครั้ง/ปี และ Shock absorber 16.33 ครั้ง/ปี จากข้อมูลพบว่า Pump Cylinder มีจำนวนความเสียหายสูงที่สุดที่ควรนำมาวางแผนบำรุงรักษาเป็นพิเศษ โดยรายละเอียดข้อมูลความเสียหายเครื่องจักร แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดความเสียหายเครื่องจักรก่อนการทดสอบ (ครั้ง/ปี)

ข้อมูลความเสียหายเครื่องจักร (ครั้ง/ปี)					
Equipment name		2566	2567	2568	ค่าเฉลี่ย
1.	Pump Cylinder	35	53	56	48.00
2.	Bellows	10	4	13	9.00
3.	Valves Building-in	17	29	24	23.33
4.	Homogenizer Device	12	15	20	15.67
5.	Oil Sealing Piston	2	2	1	1.67
6.	Shock Absorber	12	17	20	16.33
7.	Frame	0	0	1	0.33
8.	Motor Homogenizer	0	0	1	0.33
9.	Oil Pump	1	3	2	2.00

3.5 การวิเคราะห์ความเสียหายโดยใช้แผนภูมิก้างปลา (Fish Bone)

จากข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์ การวิเคราะห์ความเสียหายโดยใช้เครื่องมือ Fishbone แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าสาเหตุของปัญหาที่ทำให้ Pump Cylinder หยุดการทำงานเกิดจาก Packing Seal รั่ว และผลการวิเคราะห์ปัญหาทั้ง 4 ด้านพบว่า ด้าน Method (วิธีการ) มีผลมาจากอุณหภูมิ และเวลา CIP ไม่เหมาะสม การกำหนดรอบ PM ไม่เหมาะสมหรือใช้งานเกินรอบ, ด้าน Man (คน) มีผลมาจากการประกอบเครื่องไม่ดี พนักงานขาดทักษะและไม่ได้รับการอบรม, ด้าน Machine (เครื่องจักร) พบว่าลูกสูบไม่เรียบ เครื่องจักรเก่า การสึกหรอ กระบอกซีลมีรอย และด้าน Material (วัสดุ) พบว่าวัสดุเก่า สึกหรอ



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ความเสียหายด้วย Fishbone

4. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 ในกระบวนการผลิตนม UHT ได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานของเครื่อง Homogenizer STORK 3 ของสหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น ครอบคลุม 3 ด้าน ได้แก่ ความเสียหายของเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และ Downtime โดยเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลัง เพื่อนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมาใช้ในช่วงปี 2569 ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ความเสียหายของเครื่องจักรหลังการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์ปัญหาและดำเนินการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาทำให้ผลความเสียหายในปี 2569 ในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนมีนาคม มีแนวโน้มลดลง โดยข้อมูลความเสียหายของเครื่องจักรตั้งแต่ 2566 ถึง เดือนมีนาคม 2569 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดความเสียหายเครื่องจักรหลังการทดสอบ (ครั้ง/ปี)

ข้อมูลความเสียหายเครื่องจักร (ครั้ง/ปี)						
Equipment name		2566	2567	2568	2569	ค่าเฉลี่ย
1.	Pump Cylinder	35	53	56	5	37.25
2.	Bellows	10	4	13	3	7.50
3.	Valves Building-in	17	29	24	3	18.25
4.	Homogenizer Device	12	15	20	4	12.75
5.	Oil Sealing Piston	2	2	1	0	1.25
6.	Shock Absorber	12	17	20	2	12.75
7.	Frame	0	0	1	0	0.25
8.	Motor Homogenizer	0	0	1	0	0.25
9.	Oil Pump	1	3	2	0	1.50

จากตารางที่ 4 พบว่าความเสียหายของอุปกรณ์ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ได้แก่ Pump Cylinder, Valves,

Homogenizer Device โดยจากข้อมูลเดือนมกราคม ถึง เดือนมีนาคม 2569 ความเสียหายของทุกอุปกรณ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะ Pump Cylinder มีค่าความเสียหายจำนวน 5 ครั้ง และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลดลงจาก 200,000 บาทในปี 2568 เหลือ 30,000 บาท โดยมีผลมาจากการวิเคราะห์ปัญหาที่ถูกต้องและการบำรุงรักษาที่เป็นระบบ

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงก่อนและหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 5 รายละเอียดค่าใช้จ่ายก่อนและหลังการทดสอบ (บาท/ปี)

ข้อมูลค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)						
	Equipment name	2566	2567	2568	2569	ค่าเฉลี่ย
1.	Pump Cylinder	80,000	100,000	200,000	30,000	102,500
2.	Bellows	120,000	48,000	130,000	10,000	77,000
3.	Valves Building-in	17,000	40,000	30,000	5,000	23,000
4.	Homogenizer Device	40,000	80,000	70,000	20,000	52,500
5.	Oil Sealing Piston	4,000	4,000	9,000	0	4,250
6.	Shock Absorber	35,000	40,000	50,000	8,000	33,250
7.	Frame	0	0	200,000	0	50,000
8.	Motor Homogenizer	0	0	150,000	0	37,500
9.	Oil Pump	5,000	15,000	10,000	0	7,500

5. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ความสูญเสียเวลาการทำงานของเครื่อง Homogenizer UHT STORK 3 ในกระบวนการผลิตนม UHT พบว่าการนำแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) มาประยุกต์ใช้กับเครื่อง Homogenizer STORK 3 ส่งผลลดความเสียหายของเครื่องจักรอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และการลด Downtime ของกระบวนการผลิต โดยใช้แนวทางการกำหนดรอบการทำ PM ให้เหมาะสม การจัดทำ Visual Control และการจัดทำมาตรฐานการตรวจสอบ ทุกๆ 2 สัปดาห์ ส่งผลให้จำนวนครั้งของการรั่วลดลง และมีการเพิ่มทักษะให้กับพนักงานซ่อมบำรุงให้แต่ละคนมีทักษะที่เหมาะสมและใกล้เคียงกัน จากผลการวิเคราะห์และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ลดความสูญเสียทั้งในด้านเวลาการผลิต ค่าใช้จ่าย และยังเป็นแนวทางที่สามารถขยายผลไปยังเครื่อง Homogenizer เครื่องอื่นๆ ในสายการผลิตได้ต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้ควรนำแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่พัฒนาขึ้นขยายผลไปยังเครื่อง Homogenizer STORK 1, 2 และ 4 ด้วย รวมถึงควรจัดทำตารางตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งจัดเตรียมอะไหล่สำรองของชิ้นส่วนที่เสียหายบ่อยของ Pump Cylinder และ Packing Seal เพื่อลด Downtime ที่ไม่ได้เกิดจากแผนการผลิต นอกจากนี้ควรส่งเสริมการฝึกอบรมพนักงานซ่อมบำรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถตรวจสอบและแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและทันท่วงที ทั้งนี้ควรมีการบันทึกประวัติการซ่อมบำรุงและผลการตรวจสอบอย่างเป็นระบบเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาการนำระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพเครื่องจักรแบบ Real-time รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่อง Homogenizer และคุณภาพของผลิตภัณฑ์นม UHT และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนในระบบบำรุงรักษาเชิงป้องกันในระยะยาวต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Serra, D. S., et al. (2023). Implementation of preventive maintenance routines and the "zero breakdowns by base condition" methodology in an organization. *MOJ Applied Bionics and Biomechanics, 7*(1), 1–6.

[2] Ben, E. O., et al. (2022). Implementation of autonomous maintenance and its effect on MTBF, MTTR, and reliability of a critical machine in a beer processing plant. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies, 31*(2), 45–53.

[3] Nwajana, A. O., et al. (2024). Maintenance resources optimization using Pareto Analysis. *ScienceDirect Journal of Manufacturing Systems.*

[4] Oke, S. A., et al. (2023). Repair and maintenance management system of food processing equipment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 29*(2), 310–330.

[5] Kumah, A., & Forkuo-Minka, A. O. (2024). Cause-and-effect (Fishbone) diagram: A tool for generating and organizing quality improvement ideas. *Global Journal of Quality and Safety in Healthcare, 7*(2), 50–55.

[6] Tetra Pak. (2024). *Homogenizers: Dairy processing handbook*. Tetra Pak International. สืบค้นจาก https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/homogenizers

[7] FAO. (2023). *Maintenance systems for the dairy plant*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. สืบค้นจาก https://www.fao.org/3/x6548e/X6548E04.htm

[8] ภุมรินทร์ ทวิชศรี, “การหาอัตราการล้มเหลวและพยากรณ์เวลาความเสียหายอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 22 kV” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EENET39), 2559

Multi-Criteria ABC-Based Storage Layout Improvement for Outdoor Precast Concrete Yard

Manop Donmuen [1], Parinyawatr Dhinnabutra[2], Boonkit Unpikul[3] and Prasart Phuperm[4,*]

[1,2] Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000, Thailand
[3,4] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000, Thailand
*Corresponding author: prasart.ph@rmuti.ac.th, 0813804067

Abstract

The precast concrete industry relies heavily on outdoor storage yards, where efficient space allocation is essential for reducing material-handling distances and improving operational performance. This study develops a multi-criteria ABC (MC-ABC) storage-allocation method for an outdoor precast concrete yard in Khon Kaen Province, Thailand. Annual movement data for eight stock-keeping units (SKUs) were used to compare three storage layouts 1) the current layout (CL), 2) the traditional value-based ABC layout (VO-ABC), and 3) the proposed MC-ABC layout, which considers both annual usage value and movement frequency. The results show that the VO-ABC layout increased unit-distance work (UDW) from 15,014.35 to 15,360.27 km per year. In contrast, the MC-ABC layout reduced UDW to 14,522.77 km per year, representing a 3.27% improvement over the current layout. Under the stated assumptions, this reduction corresponds to an estimated annual fuel-cost saving of THB 7,046. Descriptive Spearman and Kendall rank correlations also indicated stronger alignment between storage distance, SKU value, and movement frequency under the proposed layout. The MC-ABC method combines value-based ABC classification with within-class frequency ranking and a round-based allocation rule. It requires neither optimization software nor additional capital investment, making it a practical decision-support tool for industrial storage yards in which product values and movement frequencies vary substantially.

Keywords: Multi-criteria slotting, unit-distance work, precast concrete yard, storage layout

1. INTRODUCTION

The precast concrete business, which involves manufacturing structural components such as columns, beams, walls, and floors in factories, remains a high-demand market. Quality control, compressive strength, and delivery time are crucial for business survival. Outdoor storage of precast concrete plays a significant role in linking production, temporary storage, and delivery, but the

handling conditions differ significantly from traditional indoor warehousing. Precast concrete components are large, heavy, and commonly stored outdoors between production and dispatch. The storage and retrieval of precast products rely heavily on mobile cranes, forklifts, and trucks, while fluctuations in inventory levels continually change the amount of usable yard space. Previous studies on precast stockyards have addressed several related issues, including product-location assignment, yard simulation, transportation and storage scheduling, stacking strategies, avoidable relocations, and environmental performance [1–5]. Improving storage assignment therefore offers a relatively low-cost way to increase productivity, particularly when a plant cannot expand its yard or invest in new handling equipment.

Two concepts that are often conflated should be clearly distinguished. Warehouse slotting typically positions high-demand items, or items with a low cube-per-order index, near input and output points to minimize picker or vehicle travel [6–8]. In contrast, traditional ABC inventory analysis classifies stock-keeping units according to annual usage value so that different levels of inventory control can be applied. Subsequent multi-criteria extensions have incorporated additional cost and non-cost factors into the classification process [9–12].

Existing studies of precast stockyards generally rely on simulation, dynamic scheduling, or metaheuristic optimization [1–5]. Although these approaches can be highly effective, they may be difficult for smaller plants to implement because of limited data, software resources, and analytical expertise. This study therefore seeks to develop a practical storage-assignment method that retains the value-based hierarchy of ABC classification while also accounting for the frequency of product movements. It therefore develops a multi-criteria ABC zone-assignment procedure for an outdoor precast concrete yard and evaluates its ability to reduce unit-distance work without optimization software, layout reconstruction or capital expenditure.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Slotting Research in Heavy-Goods and Outdoor Environments

Research specific to outdoor precast storage already demonstrates that stockyard layout is a distinct operational problem. Marasini et al. [1] used historical-order analysis and simulation to support storage and dispatch decisions, while Dawood and Marasini [2] integrated product-location allocation, routing policies, and visualization

in the SimStock system. Liu et al. [3] addressed real-time transportation and storage scheduling to reduce unnecessary relocations, Zou et al. [4] optimized precast-slab stacking locations, and Lim and Kim [5] examined environmental impacts in an in-situ precast storage yard. In contrast, de Koster et al. [13] reviewed indoor order-picking systems, Kapou et al. [14] examined ergonomics-based layout and storage assignment for manual picking, Duque-Jaramillo et al. [15] developed a sorting-based slotting approach, and Prunet et al. [16] jointly addressed storage-location assignment and picker routing. The remaining practical gap is therefore not the absence of outdoor-yard research, but the limited availability of simple, auditable, solver-free allocation rules for small industrial precast yards.

2.2 Multi-Criteria Extensions of ABC Classification

Flores and Whybark [9] demonstrated that ABC classification can incorporate both cost and non-cost criteria rather than relying solely on monetary value. Building on this foundation, Ramanathan [10] formulated multi-criteria ABC classification as a weighted linear optimization model. Ng [11] subsequently introduced a simpler classification method, while Zhou and Fan [12] extended the weighted-optimization framework to account for both favorable and unfavorable criterion weights. Although these approaches improve the classification of inventory items, they do not directly address how the resulting classes should be translated into physical storage-zone assignments. The present study fills this gap by converting the multi-criteria classification principle into a transparent spatial-priority rule that considers both annual usage value and movement frequency.

3. METHODOLOGY

3.1 Case Study Facility and Data

The data for this study were obtained from XYZ Concrete Co., Ltd., a precast concrete manufacturer operating an outdoor storage yard in Khon Kaen Province, Thailand. The study focused on eight product types. Annual movement frequencies were calculated from the company's production and delivery records for the 2025 fiscal year, while unit values were drawn from its inventory valuation records. These data formed the basis for evaluating and comparing the proposed storage-allocation strategies.

3.2 ABC Value Classification

The monetary value of each SKU was calculated as $V_i = q_i \times p_i$, where q_i represents the annual movement quantity and p_i denotes the unit price in Thai Baht

(THB). The SKUs were ranked in descending order of annual usage value and classified using cumulative-value cut-offs of 80% for Class A and 95% for Classes A and B combined. These cut-offs were adopted as operational classification rules for the present case study.

3.3 Performance Metric

Aggregate unit-distance work (UDW) was calculated as $D = \Sigma(f_i \times d_i) / 1000\ km$, where f_i denotes the annual movement frequency of SKU i and d_i represents the one-way travel distance (m) from the assigned storage zone to the dispatch loading area under the layout being evaluated. The measure is a frequency-distance or load-distance proxy commonly used in facilities planning [17]. It is not a direct measure of energy, time, or physical work because movements were treated equally irrespective of product mass, handling cycle, congestion, and return travel. UDW was expressed in km/year and applied consistently to all layouts. The corresponding fuel cost savings relative to the existing storage layout were estimated as $\Delta Cost = (\Delta D/3) \times 43$ THB where ΔD is the reduction in annual travel distance (km), 3 km/L is the average recorded fuel consumption rate of the plant's material handling trucks, and 43 THB/L is the reference diesel price used in the analysis.

3.4 Rank-Based Alignment Diagnostics

Two rank-order correlation measures were used to examine the structural alignment of each storage layout independently of the aggregate UDW. Spearman's ρ [18] measured the relationship between SKU value and storage distance, while Kendall's τ [19] was used to confirm the consistency of the ordinal rankings. Both measures were applied descriptively rather than for hypothesis testing or population-level inference. Given the small sample size, the estimates should be interpreted with caution, as Bonett and Wright [20] noted that sample size directly affects the precision and confidence intervals of correlation coefficients.

3.5 Zone-Assignment Procedures

This study evaluated three inventory allocation methods using the current layout (CL) as a baseline. The Value-Based ABC (VO-ABC) method uses the general ABC inventory placement principle, ranking SKUs by their annual financial value (V_i) from highest to lowest and then allocating storage space according to this value sequence from highest to lowest. The proposed Multi-criteria ABC (MC-ABC) method incorporates both annual usage value and movement frequency through a two-stage, round-based allocation procedure. First, the SKUs are classified into

Classes A, B, and C according to their annual usage values. The SKUs within each class are then ranked in descending order of annual movement frequency. Storage locations for Classes A and B are assigned in successive rounds. In each round, the highest-frequency unassigned SKU in Class A is allocated to the nearest available zone, followed by the highest-frequency unassigned SKU in Class B. This process is repeated until all Class A and Class B SKUs have been assigned. The Class C SKUs are subsequently allocated to the remaining zones in descending order of movement frequency. This procedure allows movement frequency to influence storage proximity while retaining the ABC value classification as an explicit component of the allocation rule.

4. RESULTS

4.1 ABC Value Classification

Table 1 presents an annual inventory value, movement frequency, and ABC classification for eight SKU types. Class A (SK and PG) accounts for 80.14% of total annual usage value (THB 150.58 millions of THB 187.88 million) and 45.61% of annual movements. Class B (SKK and PP) accounts for 14.30% of value and 50.31% of movements. Class C (SKO, RN, B, and I) accounts for the remaining 5.56% of value and 4.08% of movements. The SKU PP product code is practically significant, even though it has the highest number of movements at 45,755 times per year, representing 44.33%, but its unit price is relatively low (268.38 baht), placing it in Class B instead of Class A. This approach highlights the limitations of allocating storage space based on value and the inefficiency of inventory placement using a single criterion.

The 80% and 95% values were treated as target cumulative-value cut-offs. Because individual SKUs could not be divided between classes, each class boundary was placed after the SKU that produced a cumulative value share closest to the corresponding target. This procedure resulted in a cumulative value share of 80.14% for Class A and 94.44% for Classes A and B combined.

Table 1 The annual-usage-value classification

SKU	Qty (units)	Qty %	Unit Value (THB/unit)	Total Value (M THB)	Value Share (%)	Cum. Value (%)	Class
SK	44,714	43.32%	2,361.07	105.57	56.19%	56.19%	A
PG	2,366	2.29%	19,020.63	45.00	23.95%	80.14%	A
SKK	6,178	5.99%	2,361.07	14.59	7.76%	87.91%	B
PP	45,755	44.33%	268.38	12.28	6.54%	94.44%	B
SKO	2,050	1.99%	2,361.07	4.84	2.58%	97.02%	C
RN	2,055	1.99%	1,751.82	3.60	1.92%	98.94%	C
B	100	0.10%	19,020.63	1.90	1.01%	99.95%	C
I	5	0.00%	19,020.63	0.10	0.05%	100.00%	C
Total	**103,223**	**100%**	-	**187.88**	**100%**	-	-

4.2 Zone Assignments and Layout Maps

Figure 1 shows the storage layout for three layout configurations, where the height

of each bar varies according to the annual movement frequency of each SKU. The CL, as shown in Figure 1a, the SKU PP is located in Zone 1, closest to the shipping area, while the SKU SK, the highest-value item in the warehouse, is placed in Zone 3, 172 meters away. This arrangement does not reflect a systematic value-based storage policy or optimal frequency allocation. As shown in Figure 1b, the VO-ABC configuration addresses the limitations of purely value-based prioritization by assigning SKU SK to Zone 1, the storage area closest to the shipping area. However, this reassignment forces SKU PP into Zone 4, located 180 m from the shipping area and 73 m farther from the dispatch point than in the current layout. The resulting increase in travel distance substantially raises the overall throughput-weighted transport requirement.

In contrast, the proposed MC-ABC layout, shown in Figure 1c, applies the two-stage, round-based allocation procedure described in Section 3.5. First, the SKUs are classified into Classes A, B, and C according to their annual usage values and ranked within each class by annual movement frequency. In the first allocation round, SK, the highest-frequency SKU in Class A, is assigned to Zone 1, followed by PP, the highest-frequency SKU in Class B, in Zone 2. In the second round, the remaining Class A SKU, PG, is assigned to Zone 3, followed by the remaining Class B SKU, SKK, in Zone 4. After completing the Class A–B allocation rounds, the Class C SKUs are assigned to the remaining zones in descending order of movement frequency RN, SKO, B, and I in Zones 5–8, respectively.



Figure 1 Storage zone layout maps for (a) current layout, (b) VO-ABC layout, and (c) MC-ABC layout

4.3 Unit-Distance Work

Table 2 summarizes the UDW for the three evaluated storage models. The CL results in a total unit transport distance of 15,014.35 km/year. SKU SK contributes the most to the unit transport distance (7,690.81 km). In addition, the VO-ABC method increases

the total unit transport distance to 15,360.27 km, which is a 2.30% increase compared to the current model. Although moving SKU SK to Zone 1 reduces its UDW by 2,906.41 km, this benefit is offset by moving SKU PP from Zone 1 to Zone 4, which increases the unit transport distance by 3,340.12 km. While the proposed MC-ABC method helps reduce the total UDW to 14,522.77 km, an improvement of 3.27%, resulting in the lowest total UDW of the three models.

Table 2 Unit-distance work (UDW)

SKU	Freq. (units)	CL Dist.(m)	CL UDW(km)	VO-ABC Dist.(m)	VO-ABC UDW(km)	MC-ABC Dist.(m)	MC-ABC UDW(km)	UDW Change Relative to CL (km)
PP	45,755	107	4,895.78	180	8,235.90	160	7,320.80	2,425.02
RN	2,055	160	328.80	235	482.93	190	390.45	61.65
SK	44,714	172	7,690.81	107	4,784.40	107	4,784.40	(2,906.41)
SKK	6,178	180	1,112.04	172	1,062.62	180	1,112.04	-
SKO	2,050	250	512.50	190	389.50	235	481.75	(30.75)
PG	2,366	190	449.54	160	378.56	172	406.95	(42.59)
B	100	235	23.50	250	25.00	250	25.00	1.50
I	5	275	1.38	275	1.38	275	1.38	(0.00)
Total	**103,223**	-	**15,014.35**	-	**15,360.27**	-	14,522.77	(491.58)

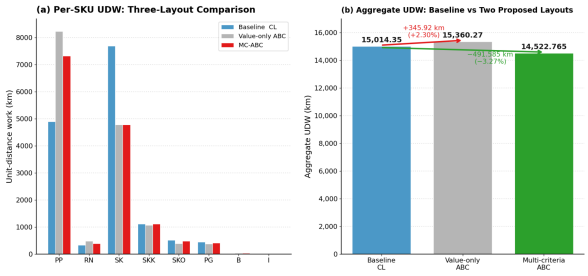


Figure 2 (a) Per-SKU unit-distance work for all three layouts, (b) aggregate UDW comparison

Table 3 summarizes the Rank-based alignment diagnostics and fuel-cost summary for three layouts, the MC-ABC layout yielded Spearman's ρ = −0.905 for annual usage value versus storage distance and ρ = −0.952 for movement frequency versus storage distance. Compared with the CL, these stronger negative correlations indicate that higher-value and more frequently moved SKUs were more closely aligned with the nearer storage zones.

Figure 2a decomposes UDW by SKU, highlighting the dominant effect of PP, while Figure 2b compares aggregate UDW across the three layouts.

Table 3 Rank-based alignment diagnostics and fuel-cost summary for three layouts

Metric	Current Layout	VO-ABC Layout	MC-ABC Layout	Interpretation
Spearman's ρ (value vs distance)	−0.476	−1.000	**−0.905**	VO-ABC achieves perfect value ordering; MC-ABC retains very strong value alignment after the SKK–PG swap.
Kendall's τ (value vs distance)	−0.357	−1.000	**−0.786**	MC-ABC maintains strong pairwise monotonic ordering between value and distance.
Spearman's ρ (frequency vs distance)	−0.833	−0.810	**−0.952**	MC-ABC provides the strongest overall frequency–distance alignment.
Kendall's τ (frequency vs distance)	−0.714	−0.643	**−0.857**	MC-ABC also provides the strongest pairwise frequency ordering.
Aggregate UDW (km)	15,014.35	15,360.27	**14,522.77**	MC-ABC remains the only proposed layout with UDW below the current baseline.
UDW change vs CL (km / %)	-	+345.93 / +2.30%	**−491.58 / −3.27%**	VO-ABC increases UDW, whereas MC-ABC reduces it by 3.27%.
Estimated fuel-cost change vs CL at THB 43/L and 3 km/L	-	**+THB 4,958/yr**	**−THB 7,046/yr**	Positive denotes additional cost; negative denotes a saving. MC-ABC saves approximately THB 7,046 annually.

Using the assumed diesel price of THB 43/L and the facility's recorded average fuel economy of 3 km/L, the 491.58 km annual reduction in aggregate UDW achieved by the

MC-ABC layout translates into an estimated annual fuel cost saving of THB 7,046. In contrast, the VO-ABC layout increases annual travel distance, resulting in an additional fuel cost of approximately THB 4,958 relative to the current layout. This implies that the proposed storage assignment is still economically beneficial under different operating conditions.

5. DISCUSSION

This research found that ideal value-based distance alignment does not always translate into reduced travel on outdoor precast concrete yards. VO-ABC increased UDW by 2.30% because PP was moved 73 m farther from the dispatch point than in the current layout. Although the annual usage value and movement frequency showed an overall negative correlation (ρ=-0.810), this single large-volume sequence changes significantly outweighed the overall result. This is consistent with multi-criteria ABC research, which cautions against considering only monetary value as a factor [9-12], and with warehouse studies showing that storage allocation significantly impacts travel efficiency [7,8]. It is also consistent with studies on precast concrete yards showing that product location, routes, stacking sequence, and relocation influence loading and handling efficiency [1-5]. The MC-ABC rule reduced the annual UDW by 491.58 km (3.27%) while maintaining strong descriptive consistency in both value and frequency. A practical advantage is transparency. The proposed approach can be re-ranked without the need for optimization software. Furthermore, the study included only eight SKUs as key products and used only one year's data from a single factory. The analysis also excludes seasonal demand shifts, storage-capacity limits, product dimensions and weights, stacking compatibility, crane cycle time, congestion, return travel, safety constraints, and implementation costs. Future work should test alternative weights, seasonal scenarios, additional facilities, and mathematical optimization benchmarks.

6. CONCLUSION

The results show that applying the VO-ABC increased UDW by 2.30%. In contrast, the proposed MC-ABC method reduced UDW by 491.58 km/year (3.27%) and yielded an estimated fuel saving of THB 7,046/year under the stated assumptions. Considering Spearman's correlation coefficient between SKU value and movement frequency as a practical preliminary screening indicator, the MC-ABC method appears to be a more suitable storage strategy than other methods.

The proposed allocation rules can be easily applied to large outdoor storage yards with clearly defined storage zones.

7. Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge XYZ Company for providing unrestricted access to its manufacturing plant, equipment, and operational data. The company name is presented as an alias in accordance with a confidentiality agreement established to protect the identity of the participating organization. The authors also thank Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, for providing laboratory facilities and analytical support. This research was not funded externally.

8. References

[1] Marasini R, Dawood N, Hobbs B. Stockyard layout planning in precast concrete products industry: a case study and proposed framework. Construction Management and Economics. 2001;19(4):365-77.

[2] Dawood N, Marasini R. Visualisation of a stockyard layout simulator 'SimStock': a case study in precast concrete products industry. Automation in Construction. 2003;12(2):113-22.

[3] Liu D, Li X, Chen J, Jin R. Real-time optimization of precast concrete component transportation and storage. Advances in Civil Engineering. 2020;2020:5714910.

[4] Zou Y, Gao Q, Wang S. Optimization of the stacking plans for precast concrete slab based on assembly sequence. Buildings. 2022;12(10):1538.

[5] Lim J, Kim S. Environmental impact minimization model for storage yard of in-situ produced PC components: comparison of dung beetle algorithm and improved dung beetle algorithm. Buildings. 2024;14(12):3753.

[6] Heskett JL. Cube-per-order index-a key to warehouse stock location. Transportation and Distribution Management. 1963;3(1):27-31.

[7] Petersen CG, Aase G. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. International Journal of Production Economics. 2004 Nov 8;92(1):11-9.

[8] Silva A, Roodbergen KJ, Coelho LC, Darvish M. Estimating optimal ABC zone sizes in manual warehouses. International Journal of Production Economics. 2022 Oct;252:108579.

[9] Flores BE, Whybark DC. Implementing multiple criteria ABC analysis. Journal of

Operations Management. 1987 Oct;7(1-2):79-85.

[10] Ramanathan R. ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. Computers & Operations Research. 2006 Mar;33(3):695-700.

[11] Ng WL. A simple classifier for multiple criteria ABC analysis. European Journal of Operational Research. 2007 Feb 16;177(1):344-53.

[12] Zhou P, Fan L. A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization. European Journal of Operational Research. 2007 Nov 1;182(3):1488-91.

[13] De Koster R, Le-Duc T, Roodbergen KJ. Design and control of warehouse order picking: a literature review. European Journal of Operational Research. 2007 Oct 16;182(2):481-501.

[14] Kapou V, Ponis ST, Plakas G, Aretoulaki E. An innovative layout design and storage assignment method for manual order picking with respect to ergonomic criteria. Logistics. 2022;6(4):83.

[15] Duque-Jaramillo JC, Cogollo-Florez JM, Gomez-Marin CG, Correa-Espinal AA. Warehouse management optimization using a sorting-based slotting approach. Journal of Industrial Engineering and Management. 2024 Feb 19;17(1):133-50.

[16] Prunet T, Absi N, Cattaruzza D. The storage location assignment and picker routing problem: a generic branch-cut-and-price algorithm. European Journal of Operational Research. 2025;327(3):857-74.

[17] Tompkins JA, White JA, Bozer YA, Tanchoco JMA. Facilities planning. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2010.

[18] Spearman C. The proof and measurement of association between two things. American Journal of Psychology. 1904 Jan;15(1):72-101.

[19] Kendall MG. A new measure of rank correlation. Biometrika. 1938 Jun;30(1-2):81-93.

[20] Bonett DG, Wright TA. Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations. Psychometrika. 2000 Mar;65(1):23-8.

การพัฒนาแอปพลิเคชันบนมือถือเพื่อการจำแนกประเภทขยะอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีรหัสแท่งและปัญญาประดิษฐ์

Development of a Smart Waste Classification Mobile Application Using Barcode Technology and Artificial Intelligence

พีรวิชญ์ เอี่ยมอักษร[1], สุชานันท์ ขันพระแสง[1] และ ณสิทธิ์ เหล่าเส็น[1]*

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 21 ม.6 ถ.เทพกระษัตรี ต.รัษฎา อ.เมือง ภูเก็ต 83000
*ผู้ติดต่อ: nasith.l@pkru.ac.th, 0897273823

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชัน "WasteVision" บนมือถือเพื่อส่งเสริมการคัดแยกขยะ ระบบใช้กลไกการระบุวัสดุ 3 ชั้น ได้แก่ 1) การสแกนบาร์โค้ดผ่าน Open Food Facts API 2) การจำแนกประเภทภาพด้วย Google Cloud Vision API เป็นระบบสำรอง และ 3) การจัดการข้อมูลท้องถิ่นผ่าน Google Sheets พัฒนาด้วย Flutter Framework และภาษา Dart โดยมีระบบหน่วยความจำสำรอง (Local caching) และอัลกอริธึมคัดกรองข้อมูลภาพที่ไม่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ได้ทำการทดสอบระบบวิเคราะห์ภาพกับชุดข้อมูลภาพถ่ายบรรจุภัณฑ์จำนวน 237 ภาพ ผลการทดสอบพบว่าระบบมีความแม่นยำในการจำแนกประเภท (Accuracy) สูงถึงร้อยละ 92.41 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบและตรรกะที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงในการช่วยให้ผู้ใช้งานคัดแยกขยะได้ถูกต้องตามหลักสากลอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การคัดแยกขยะ, ปัญญาประดิษฐ์, การจดจำรหัสแท่ง, ฟลัตเตอร์, คลาวด์วิชันเอพีไอ

Abstract

This study introduces "WasteVision," a Flutter-based mobile application designed to enhance sustainable waste sorting. The system addresses incorrect classification by implementing a multi-layered identification approach: 1) real-time barcode recognition via Open Food Facts API, 2) AI-powered image classification through Google Cloud Vision API as a fallback, and 3) a cloud-based proxy database using Google Sheets for local product data. The application features a bilingual interface, local caching, and specialized noise-filtering algorithms to improve recognition accuracy. Technical performance evaluations were conducted on a dataset of 237 packaging images, yielding an overall classification accuracy of 92.41%. These results confirm the application's potential and robustness in promoting proper environmental waste disposal practices.

Keywords: Waste classification, Artificial Intelligence, Barcode recognition, Flutter, Cloud Vision API

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยเป็นวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญระดับโลก การคัดแยกขยะที่ต้นทางอย่างถูกต้องถือเป็นหัวใจสำคัญของการจัดการอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ประชาชนมักประสบปัญหาความสับสนในการจำแนกประเภทวัสดุบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้กระบวนการจัดการขยะขาดประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแอปพลิเคชัน 'WasteVision'

บน Flutter Framework โดยบูรณาการเทคโนโลยีบาร์โค้ดร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ Google Cloud Vision API เพื่อสร้างกลไกการระบุประเภทขยะที่แม่นยำและมีระบบสำรองข้อมูลผ่าน Google Sheets ที่ยืดหยุ่น

อย่างไรก็ตาม ระบบคัดแยกขยะที่มีอยู่ในปัจจุบันมักอาศัยตู้ทิ้งขยะอัจฉริยะที่มีต้นทุนฮาร์ดแวร์สูง หรือใช้เพียงเทคโนโลยีเดียวในการระบุประเภทซึ่งมักเกิดข้อผิดพลาดเมื่อบรรจุภัณฑ์ชำรุด งานวิจัยนี้จึงได้ปิดช่องว่างดังกล่าว (Research Gap) โดยการผสานเทคโนโลยีบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่เข้าถึงง่าย เข้ากับระบบระบุตัวตนแบบหลายชั้น และฐานข้อมูลแบบมีส่วนร่วม (Crowdsourcing)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน WasteVision บนระบบปฏิบัติการเคลื่อนที่สำหรับการจำแนกประเภทขยะอัจฉริยะ
2. เพื่อศึกษาและประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำของการบูรณาการเทคโนโลยีรหัสแท่งร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ในการคัดแยกขยะ

โดยเนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีวิจัย ผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อสรุปผลการวิจัยในลำดับสุดท้าย

2. ทบทวนวรรณกรรม

ปัจจุบันการพัฒนาแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่นิยมใช้สถาปัตยกรรมบริการขนาดเล็ก (Microservices) ที่แลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (API) โดยเฟรมเวิร์ก Flutter และภาษา Dart ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการทำงานข้ามแพลตฟอร์ม จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบงานวิจัยที่สอดคล้องกันดังนี้

ชนินทร์ เซ็นนันท์ และคณะ [4] ได้พัฒนาแอปพลิเคชันแจ้งเตือนกิจกรรมสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารแทนระบบเว็บไซต์เดิม โดยออกแบบเอพีไอเชื่อมโยงฐานข้อมูลกับส่วนติดต่อผู้ใช้ที่พัฒนาด้วย Flutter ขณะที่ ภัทรพล คิ้วอำไพ และคณะ [5] นำเสนอแอปพลิเคชัน "ณ สยาม" เพื่อสนับสนุนข้อมูลสำหรับนักศึกษาใหม่ โดยประยุกต์ใช้ระบบฐานข้อมูลแบบ NoSQL ผ่าน Firebase และใช้ Flutter สำหรับพัฒนาส่วนควบคุมฝั่งผู้ใช้และผู้ดูแลระบบ ด้าน เวหา เกาะประเสริฐ และ สุวรรณี อัศวกุลชัย ได้สร้างแอปพลิเคชันแนะนำมัคคุเทศก์ตามวงจรชีวิตการพัฒนาซอฟต์แวร์ 6 ขั้นตอน โดยใช้อัลกอริทึมการกรองข้อมูลแบบมีส่วนร่วม (Collaborative Filtering) บนภาษา Dart เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการแนะนำข้อมูล

ในด้านการวิเคราะห์ภาพถ่ายและการจัดหมวดหมู่ขยะ (Waste Classification) เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามาเป็นเทคโนโลยีพลิกโฉมในการจัดการขยะยุคใหม่ งานวิจัยล่าสุดชี้ให้เห็นถึงความพยายามในการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานบนแอปพลิเคชันมือถืออย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Suwarno และคณะ [7] ที่ได้ประยุกต์ใช้ AI บนอุปกรณ์เคลื่อนที่เพื่อจำแนกประเภทและสภาพของขยะในครัวเรือน สอดคล้องกับการศึกษาของ Nasien และคณะ [8] ที่นำเสนอการจัดหมวดหมู่ขยะอัตโนมัติด้วยแอปพลิเคชันผ่านโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกเพื่อการรีไซเคิลอย่างยั่งยืนได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การฝึกสอนโมเดลปัญญาประดิษฐ์ด้วยตนเองมักเผชิญข้อจำกัดด้านปริมาณชุดข้อมูล (Dataset) และทรัพยากรการประมวลผลบนสมาร์ทโฟน ดังนั้น การประยุกต์ใช้บริการบนคลาวด์ เช่น Google Cloud Vision API จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากเป็นการเรียกใช้โมเดลที่ผ่านการฝึกฝนด้วยชุดข้อมูลขนาดมหาศาล (Pre-trained Models) การเลือกใช้สถาปัตยกรรมคลาวด์จึงช่วยลดภาระการประมวลผล

บนฮาร์ดแวร์ของผู้ใช้งานปลายทาง ทำให้แอปพลิเคชันทำงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

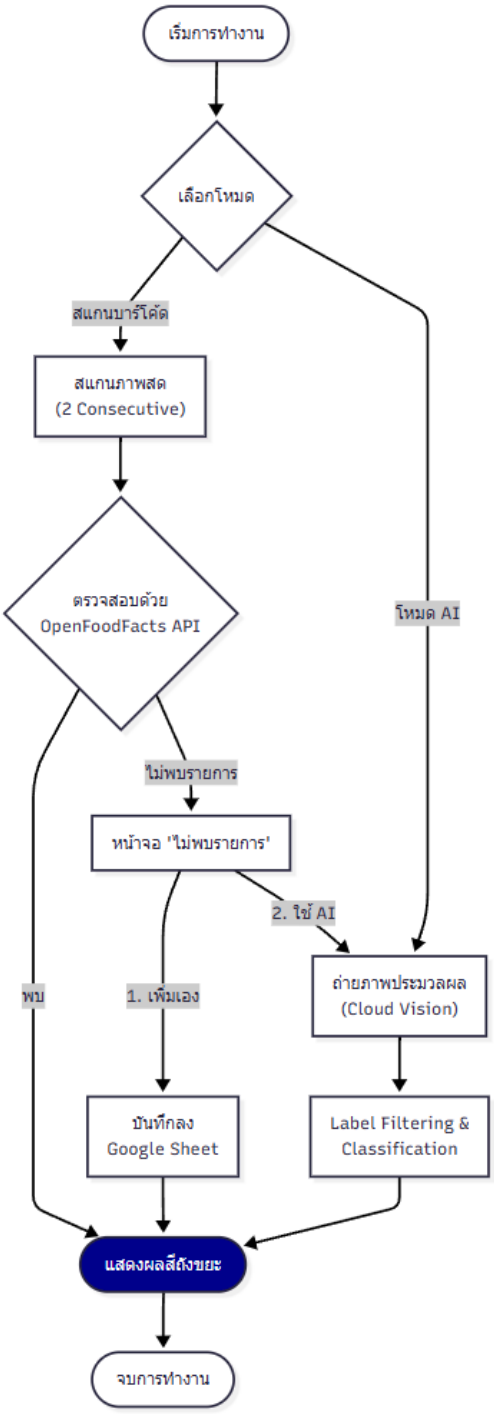
ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยตามหลักวิศวกรรมซอฟต์แวร์ 4 ขั้นตอน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความต้องการ

ผู้วิจัยกำหนดความต้องการเชิงระบบ (System Requirements) โดยมุ่งเน้น 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ 1) ความเชื่อมั่นและกลไกสำรอง (Reliability and Fallback) ที่สามารถระบุประเภทขยะผ่านบาร์โค้ดและมีระบบสำรองด้วยปัญญาประดิษฐ์กรณีไม่พบข้อมูล 2) ความยืดหยุ่นของข้อมูล (Data Flexibility) โดยดึงข้อมูลจาก Open Food Facts API ร่วมกับฐานข้อมูลท้องถิ่นบน Google Sheets และ 3) สมรรถนะและการรองรับผู้ใช้สากล (Performance and Globalization) ด้วยระบบหน่วยความจำสำรอง (Caching) และส่วนติดต่อผู้ใช้สองภาษา

3.2 การออกแบบระบบ

ผู้วิจัยออกแบบสถาปัตยกรรมแอปพลิเคชันประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ หน้าจอโหมดการสแกน (Barcode/AI Mode) ส่วนแสดงผลลัพธ์ผ่านการ์ดข้อมูล (Result Card) และระบบจัดการข้อมูลจากมวลชน (Contribution) โดยใช้เทคนิคการดึงข้อมูลแบบขนาน (Parallel Fetching) จากแหล่งข้อมูลหลายแหล่งพร้อมกัน และนำข้อมูล JSON มาประมวลผลผ่านตรรกะการจำแนกขยะ (Classification Logic) เพื่อระบุสีถังขยะที่ถูกต้อง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานและตรรกะการจำแนกขยะผ่านระบบบาร์โค้ดและระบบสำรองด้วยปัญญาประดิษฐ์

3.3 การพัฒนาระบบ

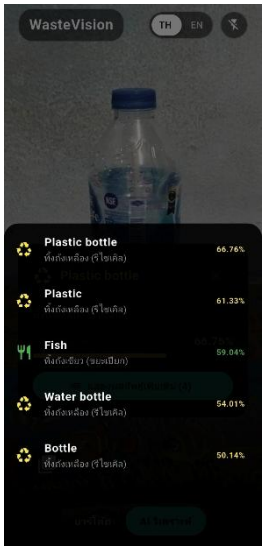
ระบบพัฒนาด้วย Flutter Framework และภาษา Dart บนซอฟต์แวร์ Visual Studio Code โดยเน้นตรรกะการทำงานหลัก 3 ส่วน ได้แก่ 1) การตรวจจับรหัสแท่งแม่นยำสูงด้วยเทคนิค Consecutive Reads 3 เฟรมร่วมกับ Checksum 2) การวิเคราะห์วัสดุด้วย Cloud Vision API พร้อมระบบกรองป้ายกำกับที่ไม่เกี่ยวข้อง (Label Filtering) และ 3) ระบบ Local Caching ที่จัดเก็บข้อมูลล่าสุด 100 รายการเพื่อลดภาระการทำงานของเครือข่าย



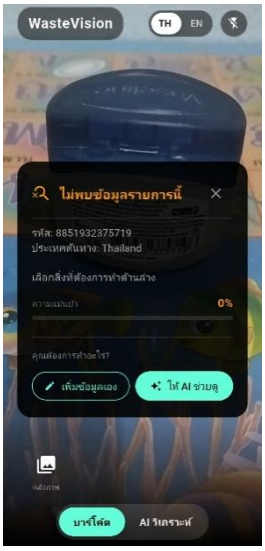
รูปที่ 2 หน้าจอโหมดสแกนบาร์โค้ด และปุ่มสลับโหมด



รูปที่ 3 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยปัญญาประดิษฐ์



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงรายการผลลัพธ์การวิเคราะห์เพิ่มเติม



รูปที่ 5 หน้าจอแจ้งเตือนกรณีไม่พบข้อมูลบาร์โค้ด



รูปที่ 6 หน้าจอสำหรับการบันทึกข้อมูลรายการใหม่โดยผู้ใช้งาน

3.4 การรวบรวมข้อมูลและขั้นตอนการทดสอบระบบ

ในการประเมินความแม่นยำของระบบ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ประเภท เพื่อให้ครอบคลุมการประเมินผลทั้งระบบ ดังนี้

1. **การทดสอบระบบบาร์โค้ด**

ได้ทดสอบกับผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคจริง จำนวน 30 รายการ ซึ่งประกอบด้วยสินค้าหลากหลายประเภท อาทิ เครื่องดื่ม อาหารกึ่งสำเร็จรูป และของใช้ส่วนตัว เพื่อประเมินประสิทธิภาพการถอดรหัส (Decoding) และความครอบคลุมของฐานข้อมูล โดยใช้กลยุทธ์การบริหารจัดการข้อมูลแบบ **Hybrid Data Sourcing** ซึ่งผสานการดึงข้อมูลอัตโนมัติจาก API ร่วมกับการตรวจสอบและปรับปรุงข้อมูลโดยมนุษย์ (Human-in-the-Loop Validation) เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่แม่นยำ (Verified Dataset)

2. **การทดสอบระบบปัญญาประดิษฐ์**

ผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ระยะ คือ

- **ระยะที่ 1 (Automated API Testing)** ประเมินความแม่นยำของตรรกะ AI โดยใช้ชุดภาพถ่ายทดสอบ (Test Set) จำนวน 237 ภาพ นำมาประมวลผลอัตโนมัติผ่านชุดคำสั่ง (Script) เพื่อจำลองการทำงานของ Cloud Vision API
- **ระยะที่ 2 (Live Application Testing)** ประเมินในสภาพแวดล้อมจริง โดยทดสอบถ่ายภาพกลุ่มขยะอันตรายผ่านกล้องของอุปกรณ์เคลื่อนที่บนแอปพลิเคชันโดยตรง

3.5 เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ

ประเมินความแม่นยำในระยะที่ 1 ด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของตรรกะแอปพลิเคชันกับความถูกต้องตามจริง นำเสนอในรูปแบบเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) และคำนวณค่าความแม่นยำ (Accuracy) ตามสมการดังนี้

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ *Accuracy* คือ ค่าความแม่นยำของระบบ
TP จำนวนที่ทำนายว่าเป็นขยะและเป็นจริง
TN จำนวนที่ทำนายว่าไม่ใช่และเป็นจริง
FP จำนวนที่ทำนายว่าเป็นขยะแต่ไม่จริง
FN จำนวนที่ทำนายว่าไม่ใช่แต่เป็นขยะจริง

4. ผลการวิจัย

4.1 ประสิทธิภาพการทำงานเชิงเทคนิคของระบบ

จากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของแอปพลิเคชัน WasteVision ในด้านระบบสแกนบาร์โค้ด การจัดการหน่วยความจำสำรอง (Local Caching) และความเสถียรของแอปพลิเคชันเมื่อมีการสลับโหมดการทำงาน พบว่าระบบสามารถดำเนินงานได้ตามเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์ที่กำหนดไว้ โดยเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการประเมินผลจากการสังเกต (Pass/Fail) เป็นหลักฐานเชิงปริมาณ (Quantitative metrics) พบว่าระบบมีอัตราความสำเร็จและความเร็วในการตอบสนองอยู่ในระดับดีเยี่ยม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบสมรรถนะเชิงเทคนิคของแอปพลิเคชัน WasteVision

รายการ	เกณฑ์	ผลลัพธ์
ถอดรหัสแท่ง EAN-13	อ่านรหัส 13 หลักถูกต้อง	100%
วิเคราะห์วัสดุด้วย AI	จำแนกประเภทตรงตามตรรกะ	92.41%
ระบุประเทศ	ตรวจสอบรหัสประเทศถูกต้อง	100%
การจัดการหน่วยความจำ	ดึงข้อมูลแคชโดยไม่ผ่านเครือข่าย	<0.5 วิ
บันทึกข้อมูล	เรียลไทม์	สำเร็จ (100%)

4.2 ประสิทธิภาพการจำแนกวัสดุด้วยปัญญาประดิษฐ์

จากการประเมินความแม่นยำของตรรกะ AI ในระยะที่ 1 ด้วยชุดภาพถ่ายขยะ 237 ภาพ พบว่าระบบจำแนกประเภทขยะรีไซเคิลและขยะทั่วไปได้ถูกต้อง 219 ภาพ และผิดพลาด 18 ภาพ คิดเป็นค่าความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 92.41 เพื่อความเป็นวิทยาศาสตร์จึงจำแนกผลด้วยเมทริกซ์ความสับสนในตารางที่ 2 ส่วนการทดสอบระยะที่ 2 กับขยะอันตราย ระบบสามารถคัดกรองสัญญาณรบกวน (เช่น มือ หรือฉากหลัง) ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับการทดสอบในระยะที่ 2 ซึ่งเป็นการใช้งานจริงผ่านแอปพลิเคชัน โดยมุ่งเน้นกลุ่มขยะอันตราย ผลการทดสอบเชิงประจักษ์พบว่าแบบจำลองสามารถระบุอัตลักษณ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างเด่นชัด เมื่อผสานเข้ากับตรรกะของแอปพลิเคชัน จึงสามารถจัดหมวดหมู่ขยะอันตรายลงสู่ถังสีแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 Confusion Matrix ของการทดสอบระบบจำแนกประเภทขยะ

ผลจำแนก	ทายถูก	ทายผิด	รวม
คาดหวังว่าถูกต้อง	219	18	237
คาดหวังว่าผิดพลาด	0	0	0

5. อภิปรายผล

จากการทดสอบแอปพลิเคชัน WasteVision พบว่าระบบดำเนินงานได้ถูกต้องตามฟังก์ชันที่กำหนด การสแกนรหัสแท่งสากล (EAN-13) ร่วมกับรหัส Prefix สามารถสืบค้นและระบุผลิตภัณฑ์ได้ทันที แม้สินค้าท้องถิ่นที่ไม่มีในฐานข้อมูลสากลก็สามารถจัดการได้ด้วยระบบฐานข้อมูลตัวแทน (Proxy database) ซึ่งการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบมีส่วนร่วม (Crowdsourcing) เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาข้อจำกัดของฐานข้อมูลในระยะเริ่มต้น

ในด้านการประมวลผลภาพ AI สามารถจำแนกวัสดุบรรจุภัณฑ์ได้แม่นยำร้อยละ 92.41 และมีความทนทาน (Robustness) ต่อสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมจริง โดยอัลกอริธึมการคัดกรองป้ายกำกับ (Label Filtering) สามารถแยกแยะและละเว้นวัตถุที่ไม่ใช่ขยะ เช่น อวัยวะของผู้ใช้งาน (มือ, แขน) ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยลดอัตราการเกิดผลบวกลวง (False-Positive) ได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Suwarno และคณะ [7] ที่ยืนยันว่าการประยุกต์ใช้ AI บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกประเภทและสภาพขยะในครัวเรือนได้อย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแอปพลิเคชัน WasteVision สำหรับการคัดแยกขยะมูลฝอย ฟังก์ชันหลักประกอบด้วยการสแกนรหัสแท่ง การวิเคราะห์วัสดุด้วยปัญญาประดิษฐ์ และระบบจัดการข้อมูลจากมวลชน จากผลการทดสอบเชิงเทคนิคพบว่าระบบมีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 92.41 ถือเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อร่วมขับเคลื่อนการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นรูปธรรม

6.2 ข้อจำกัดและงานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากแอปพลิเคชันพัฒนาขึ้นเป็นต้นแบบ (Proof of Concept) การทดสอบในระยะนี้จึงรองรับเฉพาะระบบปฏิบัติการ Android และมุ่งเน้นประสิทธิภาพเชิงเทคนิคแทนการวัดความพึงพอใจ นอกจากนี้ ฐานข้อมูลสินค้าท้องถิ่นยังมีข้อจำกัดด้านปริมาณ และการประเมินประสิทธิภาพในกลุ่มขยะเปียกยังเป็นความท้าทายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้น งานวิจัยในอนาคตควรพัฒนาโหมดการทำงานออฟไลน์ (Offline Mode) เพิ่มฟังก์ชันวิเคราะห์เครื่องหมายรีไซเคิล และขยายผลสู่ระบบปฏิบัติการ iOS เพื่อครอบคลุมกลุ่มผู้ใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Google Cloud. (2026). Cloud Vision API: Derive insights from images with pre-trained ML models. Accessed March 27. Available from https://cloud.google.com/vision.

[2] Open Food Facts. (2026). Open Food Facts API Documentation and Server Reference. Accessed March 27. Available from https://openfoodfacts.github.io/openfoodfacts-server/api/

[3] Google Developers. (2026). Google Sheets API: Read and write spreadsheet data. Accessed July 1, 2026. Available from https://developers.google.com/sheets/api/reference/rest

[4] ชนินทร์ เซ็นนันท์, ธนพัฒน์ จิตต์ชะนะ และ ณสิทธิ์ เหล่าเส็น, “การพัฒนาแอปพลิเคชันแจ้งเตือนกิจกรรมและจัดการข้อมูลขยะแบบเรียลไทม์สำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต,” ใน การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2567, หน้า 206-214.

[5] เมธา สิทธิชัย และ ศิริพงษ์ วงศ์วัฒนา, “การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อการคัดแยกวัสดุบรรจุภัณฑ์ในระบบโมบายแอปพลิเคชัน,” วารสารวิศวกรรมซอฟต์แวร์และการจัดการ, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 45-60, มกราคม 2568.

[6] I. Sommerville, Engineering Software Products: An Introduction to Modern Software Engineering. Hoboken, NJ, USA: Pearson Education, 2021.

[7] Suwarno, S., Lie, J., & Siahaan, M. (2026). Implementing Mobile-based AI in Household Waste Type and Condition Classification. Bulletin of Information Technology (BIT), 7(1), 1-12.

[8] Nasien, D., Adita, M. H., Farkhan, M., Rahmadhani, U. S., & Samah, A. A. (2025). Automated Waste Classification Using YOLOv11 : A Deep Learning Approach for Sustainable Recycling. Journal of Applied Business and Technology, 6(1), 68–74.

DearFile: ระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลอัจฉริยะบนแอปพลิเคชัน LINE ด้วยปัญญาประดิษฐ์

DearFile: An Intelligent Personal Knowledge Management System on LINE Application Using Artificial Intelligence

กฤษณพงศ์ ยาเสร็จ[1] *

[1] สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

ผู้ติดต่อ: kritsanaphong.ya@rmuti.ac.th, 085-8489791

บทคัดย่อ

DearFile เป็นระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลที่ผสานการจัดเก็บไฟล์บนคลาวด์เข้ากับแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ (LLM) บนแพลตฟอร์ม LINE เพื่อลดอุปสรรคในการบันทึกและสืบค้นความรู้ โดยผู้ใช้ส่งไฟล์ ข้อความ และลิงก์ผ่าน LINE OA ได้โดยไม่ต้องติดตั้งแอปพลิเคชันเพิ่ม ระบบใช้สถาปัตยกรรม Agentic RAG ร่วมกับกลไก Forced First-Step Search ที่บังคับให้ทุกคำตอบสืบค้นจากคลังความรู้ของผู้ใช้ก่อนเสมอ และใช้การค้นหาแบบผสมระหว่างคำสำคัญภาษาไทยกับการค้นหาเชิงความหมายผ่าน Reciprocal Rank Fusion ร่วมกับการจัดอันดับใหม่

การประเมินบนชุดทดสอบสองภาษาที่ควบคุมตัวแปร (คลังข้อมูล 31 รายการ, กรณีทดสอบที่มีเฉลย 116 กรณี) พบว่าการเพิ่มการค้นหาเชิงความหมายยกค่า Recall@8 จาก 0.868 เป็น 1.000 และ nDCG@8 จาก 0.903 เป็น 0.991 อย่างไรก็ตาม บนคลังข้อมูลขนาดเล็กและสะอาดเช่นนี้ การค้นหาด้วยเวกเตอร์เพียงอย่างเดียวเข้าใกล้เพดานประสิทธิภาพแล้ว การรวมผลและจัดอันดับใหม่จึงให้ผลชัดเจนเฉพาะบนคำค้นข้ามภาษา (nDCG@8 = 1.000 เทียบกับ 0.935) ในด้านเอเจนต์ ระบบเลือกใช้เครื่องมือถูกต้องร้อยละ 89.5 (macro-F1 = 0.909) กลไกยืนยันก่อนเขียนข้อมูลทำงานถูกต้องครบทุกกรณี และวงรอบเชิงเอเจนต์ปฏิเสธการตอบเมื่อไม่พบข้อมูลได้ดีกว่าการตอบแบบครั้งเดียว ซึ่งสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของระบบ ระบบตอบสนองด้วยเวลามัธยฐาน 5.2 วินาที ต้นทุนประมาณ 0.01 ดอลลาร์สหรัฐต่อครั้ง

ผลการวิจัยแสดงว่าสถาปัตยกรรม Agentic RAG ที่บังคับการอ้างอิงจากคลังความรู้ผู้ใช้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสืบค้นข้ามภาษาและความน่าเชื่อถือของคำตอบ และประยุกต์ใช้ได้บนแพลตฟอร์มการสื่อสารที่ผู้ใช้ใช้งานเป็นประจำ ทั้งนี้ผลอยู่บนคลังข้อมูลสังเคราะห์ขนาดเล็กแบบผู้ใช้รายเดียว การยืนยันบนผู้ใช้จริงยังเป็นงานในอนาคต

Abstract

DearFile is a personal knowledge management system that integrates cloud file storage with a Large Language Model (LLM) on LINE, Thailand's most widely used messaging platform. Users capture files, text, and links through a LINE Official Account without installing additional applications. The system employs an Agentic RAG architecture with a Forced First-Step Search mechanism that grounds every response in the user's knowledge base before invoking the LLM, combining Thai keyword search and semantic search via Reciprocal Rank Fusion with reranking.

Evaluation on a controlled bilingual benchmark (31-item corpus, 116 labeled test cases) shows that adding semantic retrieval raises Recall@8 from 0.868 to 1.000 and nDCG@8 from 0.903 to 0.991. However, vector-only retrieval already approaches the ceiling on a corpus of this size, so fusion and reranking prove decisive only on cross-lingual queries (nDCG@8 = 1.000 vs. 0.935 for keyword-only). The agent achieved 89.5% tool routing accuracy (macro-F1 = 0.909), confirm-before-write was correct in all tested cases, and the agentic loop abstained more reliably than a single-shot baseline when answers were absent — a property central to trustworthiness. Median end-to-end latency was 5.2 seconds at approximately USD 0.01 per request.

The results show that an Agentic RAG architecture enforcing knowledge-base grounding improves cross-lingual retrieval and response reliability, and can be delivered through an everyday communication platform. Findings are based on a small synthetic single-user corpus; validation with real users remains future work.

Keywords : Personal Knowledge Management, Retrieval-Augmented Generation (RAG), Large Language Model (LLM), Semantic Search, AI Agent

1. บทนำ

ในยุคที่ข้อมูลข่าวสารหลั่งไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่อง ผู้ใช้งานทั่วไปต้องเผชิญกับข้อมูลที่กระจัดกระจายอยู่ตามแอปพลิเคชันและอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ทั้งไฟล์เอกสาร รูปภาพ ลิงก์เว็บไซต์ และบันทึกข้อความ ส่งผลให้การสืบค้นและนำความรู้กลับมาใช้ในภายหลังเป็นเรื่องยุ่งยากและใช้เวลา ปัญหาดังกล่าวทวีความรุนแรงขึ้นตามปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้น จนผู้ใช้จำนวนมากบันทึกข้อมูลไว้แต่ไม่สามารถเรียกกลับมาใช้ได้จริงเมื่อต้องการ

เครื่องมือจัดการความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดในแง่มุมที่ต่างกัน เครื่องมือจัดเก็บไฟล์และโน้ตอย่าง Notion, Google Drive และ Evernote แม้จะจัดระเบียบข้อมูลได้ดี แต่กำหนดให้ผู้ใช้เปิดแอปพลิเคชันแยกต่างหากและจัดโครงสร้างข้อมูลด้วยตนเอง จึงเกิดภาระในการบันทึก (capture friction) ขณะที่ผู้ช่วยสนทนาซึ่งขับเคลื่อนด้วยแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ตอบคำถามได้อย่างเป็นธรรมชาติ แต่อาศัยความรู้ภายในแบบจำลอง (parametric memory) เป็นหลัก จึงเสี่ยงต่อการสร้างข้อมูลที่คลาดเคลื่อน (hallucination) และไม่ยึดโยงกับคลังความรู้ส่วนตัวของผู้ใช้ ส่วนระบบ Retrieval-Augmented Generation (RAG) แม้จะยึดโยงคำตอบกับแหล่งข้อมูลภายนอกได้ แต่ส่วนใหญ่ถูกพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันเฉพาะทางที่ผู้ใช้ต้องเรียนรู้และปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้งาน

จากการทบทวนเครื่องมือข้างต้นพบว่า แต่ละกลุ่มตอบโจทย์ได้เพียงบางด้าน และยังไม่มีระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลใดที่ผสานคุณสมบัติสามด้านเข้าไว้ด้วยกัน ได้แก่ การบันทึกข้อมูลแบบไร้อุปสรรค (zero-friction capture) บนแพลตฟอร์มที่ผู้ใช้ใช้งานเป็นประจำอยู่แล้วโดยไม่ต้องติดตั้งหรือเรียนรู้เครื่องมือใหม่ การตอบคำถามที่ยึดโยงและตรวจสอบได้จากคลังความรู้ของผู้ใช้เองแทนการตอบจากความรู้ภายในแบบจำลอง และการรองรับการใช้งานทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษอย่างเต็มรูปแบบ ช่องว่างดังกล่าวคือประเด็นที่งานวิจัยนี้มุ่งแก้ไข

DearFile ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยใช้ LINE ซึ่งมีผู้ใช้ในประเทศไทยกว่า 54 ล้านคนในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว [14] เป็นช่องทางหลักในการบันทึกความรู้ ผู้ใช้เพียงส่งไฟล์ ข้อความ หรือลิงก์ผ่าน LINE Official Account โดยไม่ต้องติดตั้งแอปพลิเคชันเพิ่มเติม การทำงานภายในแพลตฟอร์มการสื่อสารที่ผู้ใช้คุ้นเคยเช่นนี้ช่วยลดอุปสรรคในการบันทึกลงอย่างมาก ในด้านการสืบค้น DearFile ใช้สถาปัตยกรรม Agentic RAG ร่วมกับกลไก Forced First-Step Search ที่บังคับให้ทุกคำตอบต้องสืบค้นจากคลังความรู้ของผู้ใช้ก่อนเสมอ ทำให้คำตอบอ้างอิงกลับไปยังข้อมูลต้นทางที่ผู้ใช้บันทึกไว้ได้ และใช้การค้นหาแบบผสมที่รวมการค้นหาด้วยคำสำคัญภาษาไทยเข้ากับการค้นหาเชิงความหมาย เพื่อรองรับการใช้งานสองภาษา แนวทางนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี AI Agent ซึ่งเดิมจำกัดอยู่ในเครื่องมือเฉพาะทาง สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้บนแพลตฟอร์มการสื่อสารทั่วไป เพื่อให้ผู้ใช้ทั่วไปเข้าถึงการจัดการความรู้ส่วนบุคคลได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้งานเดิม

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลบนแพลตฟอร์ม LINE LIFF ที่รองรับการบันทึกไฟล์ รูปภาพ ข้อความ และลิงก์แบบไร้อุปสรรค เพื่อพัฒนาสถาปัตยกรรม Agentic RAG ร่วมกับกลไก Forced First-Step Search และการค้นหาแบบผสมสองภาษา ให้ระบบตอบคำถามที่ยึดโยงกับคลังความรู้ของผู้ใช้ได้อย่างแม่นยำและตรวจสอบได้ และเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเชิงปริมาณในด้านความแม่นยำของการสืบค้น การเลือกใช้เครื่องมือ วงจรชีวิตของระบบความจำ ตลอดจนเวลาและต้นทุนในการตอบสนองของ AI Agent

1.2 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาระบบที่รองรับการจัดเก็บไฟล์รูปภาพ ข้อความ และลิงก์ผ่าน LINE OA ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยจำกัดเฉพาะการใช้งานแบบผู้ใช้รายเดียว และประเมินผลด้วยชุดทดสอบที่ควบคุมตัวแปร ทั้งนี้ไม่ครอบคลุมการใช้งานหลายผู้ใช้และการปรับแต่งแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ (fine-tuning)

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจัดการความรู้ส่วนบุคคล

การจัดการความรู้ส่วนบุคคล (Personal Knowledge Management:PKM)มุ่งเน้นการรวบรวมจัดระเบียบและเรียกใช้ข้อมูลส่วนบุคคลอย่างมีประสิทธิภาพแนวคิด Building a Second Brain[1]เสนอการจัดเก็บความรู้ในระบบภายนอกผ่านโครงสร้าง PARA เพื่อสนับสนุนการนำข้อมูลกลับมาใช้ซ้ำแนวคิดดังกล่าวยังชี้ให้เห็นว่าการลดอุปสรรคในการบันทึกข้อมูล (Zero-FrictionCapture) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้งานระบบอย่างต่อเนื่อง

2.2 Retrieval-Augmented Generation

Retrieval-Augmented Generation (RAG) [2] ผสานการค้นคืนข้อมูลจากคลังความรู้ภายนอกเข้ากับการสร้างคำตอบของแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ ช่วยลดปัญหา hallucination โดยยึดคำตอบกับข้อมูลที่ค้นคืนได้และสามารถอ้างอิงแหล่งที่มา นอกจากนี้ยังรองรับการปรับปรุงฐานความรู้โดยไม่ต้องฝึกแบบจำลองใหม่ จึงเหมาะกับระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคล

2.3 Semantic Search

การค้นหาเชิงความหมายแปลงข้อความเป็นเวกเตอร์เพื่อค้นหาข้อมูลที่มีความหมายใกล้เคียง แม้ใช้ถ้อยคำแตกต่างกัน Sentence-BERT [3] ทำให้การค้นคืนด้วยเวกเตอร์สามารถใช้งานได้จริง ขณะที่แบบจำลองรุ่นใหม่ เช่น E5 [4] และ BGE [5] รองรับหลายภาษา จึงเหมาะกับระบบที่รองรับทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

2.4 Hybrid Retrieval and Reranker

การค้นคืนข้อมูลด้วยคำสำคัญและการค้นหาเชิงความหมายมีจุดเด่นแตกต่างกัน โดยการค้นหาด้วยคำสำคัญเหมาะกับคำเฉพาะหรือศัพท์เทคนิค ขณะที่การค้นหาเชิงความหมายสามารถค้นคืนข้อมูลที่มีความหมายใกล้เคียงแม้ใช้ถ้อยคำแตกต่างกัน [6] การค้นคืนแบบผสม (Hybrid Retrieval) จึงรวมผลจากทั้งสองวิธีด้วย Reciprocal Rank Fusion (RRF) [7] ซึ่งใช้ลำดับอันดับแทนคะแนนดิบ ทำให้สามารถผสานผลการค้นหาได้โดยไม่ต้องปรับเทียบคะแนนของแต่ละระบบ ภายหลังจึงจัดอันดับใหม่ด้วย Cross Encoder [8] เพื่อประเมินความเกี่ยวข้องระหว่างคำถามและเอกสารร่วมกัน ส่งผลให้คุณภาพของผลลัพธ์สูงขึ้นโดยยังคงประสิทธิภาพในการค้นคืน

2.5 Agentic Conversational AI

Agentic AI มองแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่เป็นตัวแทนที่สามารถวางแผน ให้เหตุผล และเลือกใช้เครื่องมือเพื่อดำเนินงานหลายขั้นตอนได้ โดย ReAct [9] ผสานการให้เหตุผลเข้ากับการเรียกใช้เครื่องมือ ขณะที่ Toolformer [10] แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถเรียนรู้การใช้เครื่องมือได้ด้วยตนเอง ระบบสนทนาสมัยใหม่ยังอาศัยแบบจำลองที่ผ่านการปรับให้ทำตามคำสั่งเพื่อรองรับการสนทนาแบบปลายเปิดและรักษาบริบทของผู้ใช้ [11] แนวคิดดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนา Agent Runtime ซึ่งทำหน้าที่ประสานการวางแผน การเรียกใช้เครื่องมือ การจัดการบริบท และหน่วยความจำของเอเจนต์ อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจของเอเจนต์ยังคงขึ้นอยู่กับแบบจำลองภาษา ทำให้บางกรณีอาจตอบจากความรู้ภายในโดยไม่สืบค้นข้อมูลจากคลังความรู้ของผู้ใช้ งานวิจัยนี้จึงเสนอ Forced First-Step Search เพื่อกำหนดให้การค้นคืนข้อมูลเป็นขั้นตอนแรกของทุกคำถาม ช่วยให้ทุกคำตอบอ้างอิงจากคลังความรู้ของผู้ใช้และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

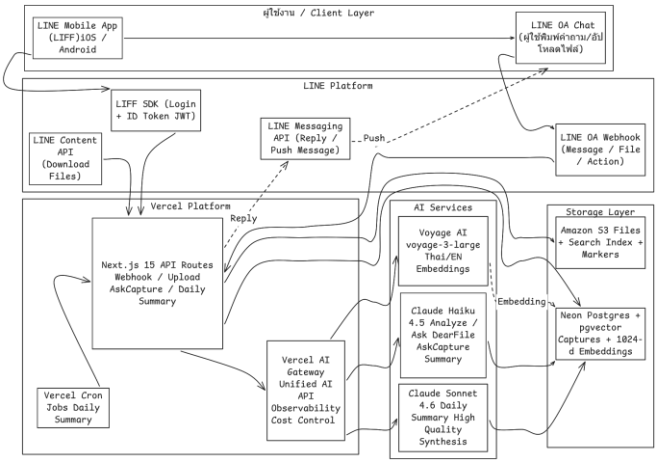
2.6 แพลตฟอร์ม LINE ในประเทศไทย

LINE มีผู้ใช้งานในประเทศไทยมากกว่า 54 ล้านคน [14] และรองรับการพัฒนาบริการผ่าน LINE Messaging API และ LINE Front-end Framework (LIFF) ทำให้สามารถพัฒนาระบบที่ผู้ใช้เข้าถึงได้โดยไม่ต้องติดตั้งแอปพลิเคชันเพิ่มเติม

3. การออกแบบและพัฒนาระบบ

3.1 สถาปัตยกรรมโดยรวม

DearFile ออกแบบสถาปัตยกรรม Serverless โดยใช้ Next.js 15 (App Router) เป็น Backend หลัก, Neon PostgreSQL ร่วมกับ pgvector สำหรับจัดเก็บข้อมูลและ Vector Embeddings, AWS S3 สำหรับจัดเก็บไฟล์ และ Claude AI จาก Anthropic สำหรับการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ระบบทั้งหมดถูก Deploy บน Vercel เพื่อรองรับการ Scale แบบอัตโนมัติ โดยใช้การรับข้อมูลจากผู้ใช้ทำผ่าน LINE Messaging API Webhook ซึ่งรับ Event ต่างๆแล้วส่งต่อไปยัง Async Processing Pipeline โดยใช้ Next.js after() API ควบคู่กันเพื่อให้ผู้ใช้ได้รับ Acknowledgment ทันทีโดยไม่ต้องรอประมวลผล AI ที่ใช้เวลานาน ภาพรวมของสถาปัตยกรรมและลำดับการทำงานแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมโดยรวมของระบบ DearFile

3.2 Hybrid Intent Routing

ระบบจำแนกความตั้งใจของผู้ใช้ด้วยกลไก 2 ชั้น ได้แก่ (1) Regex Classifier สำหรับรูปแบบที่ชัดเจนและตายตัว เช่น คำสั่งค้นหา การอัปโหลดไฟล์ หรือการถามข้อมูล และ (2) LLM Classifier โดยใช้ Claude Haiku 4.5 [12] สำหรับข้อความที่คลุมเครือ

หรือซับซ้อน กลไกนี้ช่วยลดการเรียกใช้ LLM ที่ไม่จำเป็น ลดต้นทุนและเพิ่มความเร็วในการตอบสนอง

3.3 Agentic RAG ด้วย Forced First-Step Search

หัวใจของระบบ Ask DearFile คือ Agentic RAG Pipeline ที่มีการใช้กลไก Forced First-Step Search บังคับให้ระบบค้นหาข้อมูลจากคลังความรู้ของผู้ใช้ก่อนตอบคำถามเสมอ โดยไม่อนุญาตให้ตอบจากความรู้ของโมเดลภาษาเพียงอย่างเดียว

การค้นหาดำเนินการแบบ Parallel ผ่าน 3 ช่องทาง ได้แก่

(1) Keyword Search รองรับภาษาไทยพร้อม Fuzzy Matching,

(2) Semantic Search บนไฟล์ด้วย Vector Embeddings จาก voyage-3-large [13], และ

(3) Semantic Search บนโน้ตและลิงก์ ผลลัพธ์จากทั้ง 3 ช่องทางถูกรวมและเรียงลำดับตาม Relevance Score โดยระบบสามารถทำซ้ำกระบวนการนี้ได้สูงสุด 4 รอบเมื่อต้องการข้อมูลเพิ่มเติม

3.4 การวิเคราะห์ไฟล์แบบ Hybrid

เมื่อผู้ใช้ส่งไฟล์ ระบบจะวิเคราะห์ด้วยกลไก 2 ขั้นตอน

(1) Metadata Extraction สำหรับไฟล์ที่มีโครงสร้างชัดเจน เช่น PDF, DOCX หรือไฟล์ข้อความ

(2) AI Vision Fallback โดยใช้ Claude Sonnet 4.6 สำหรับไฟล์ประเภทรูปภาพหรือไฟล์ที่ไม่สามารถดึงข้อความได้โดยตรง จากนั้นระบบจะสร้าง Vector Embeddings ขนาด 1,024 มิติ และจัดเก็บลงใน pgvector สำหรับการค้นหาเชิงความหมายในอนาคต

3.5 Virtual AI Folder System

ระบบจัดโฟลเดอร์อัจฉริยะใช้ AWS S3 Object Tags ผสานกับ JSON Search Index เพื่อใช้จำลองโครงสร้างโฟลเดอร์โดยไม่ต้องย้ายไฟล์จริง ซึ่งทำให้ไฟล์เดียวกันสามารถปรากฏในหลายหมวดหมู่ได้ตามบริบท และการจัดหมวดหมู่สามารถอัปเดตได้โดยไม่กระทบ URL ของไฟล์

3.6 วิธีการประเมินประสิทธิภาพระบบ

การประเมินนั้นถูกออกแบบให้ครอบคลุมทุกองค์ประกอบของระบบโดยยึดหลักการทำซ้ำได้ (reproducibility) ใช้ชุดข้อมูลที่กำหนดตายตัวและมีเฉลยที่ทราบล่วงหน้า โดยตัวชี้วัดเชิงปริมาณและโปรโตคอลการทดลองที่ระบุขั้นตอนชัดเจน

3.6.1 ชุดข้อมูลทดสอบ

ใช้ชุดข้อมูลสังเคราะห์ที่ควบคุมตัวแปรได้เป็นสองภาษา ประกอบด้วย คลังข้อมูล 31 รายการ (ไฟล์ 19 + โน้ต/ลิงก์ 12), คำค้นการสืบค้น 37 คำค้น (ตอบได้ 34,ข้ามภาษา6,ตัวลวง3)พร้อมความเกี่ยวข้องไล่ระดับ 0/1/2, ชุด QA 20 คำถาม (ตอบได้ 15, ไม่พบ 5), ชุดความตั้งใจ/เครื่องมือ19ประโยคและสถานการณ์ระบบความจำ23รายการ รวมกรณีทดสอบเฉลย 99 กรณี

3.6.2 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

การสืบค้นใช้ Precision@k, Recall@k, Hit@k, MRR, MAP และ nDCG@k (k = 1, 3, 5, 8); การเลือกใช้เครื่องมือใช้ accuracy, macro-F1 และ confusion matrix พร้อมอัตราการยืนยันก่อนเขียน; คุณภาพคำตอบใช้ผู้ตัดสินที่เป็นแบบจำลองภาษา

(LLM-as-judge, claude-sonnet-4-6) ประเมิน correctness (0/0.5/1) และ faithfulness; ประสิทธิภาพวัดเวลา p50/p95/p99 จำนวนโทเคน ระบบความจำวัดprecision/recallของการเลื่อนขั้นและการลืม

3.6.3 กลุ่มเปรียบเทียบและ Ablation

การสืบค้นเปรียบเทียบ 4 รูปแบบ (R1 คำสำคัญ, R2 เวกเตอร์, R3 ผสม RRF, R4 ผสม+จัดอันดับใหม่ ซึ่งเป็นระบบที่นำเสนอ);การทำงานเชิงเอเจนต์เปรียบเทียบ A0 (single-shot RAG) กับ A1 (agentic loop); และระดับแบบจำลองเปรียบเทียบ Haiku กับ Sonnet

3.6.4 โปรโตคอลการทดลอง

ตัวชี้วัดการสืบค้นที่เป็นค่าตายตัววัดครั้งเดียว ส่วนตัวชี้วัดเชิงเอเจนต์รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำN=3ครั้งแต่ละกรณีทำงานในเธรดอิสระใช้บัญชีผู้ใช้ใหม่พร้อมคลังข้อมูลที่ป้อนไว้และลบทิ้งหลังเสร็จต้นทุนคำนวณจากจำนวนโทเคนจริงคูณตารางราคา และวัดประสิทธิภาพขณะเซิร์ฟเวอร์ว่าง

3.6.5 สภาพแวดล้อมและการตั้งค่า

แบบจำลอง claude-haiku-4-5 / claude-sonnet-4-6; Embeddings/Reranker คือ Voyage voyage-3 large rerank-2.5-lite; การรวมผลด้วย Reciprocal Rank Fusion (k = 60) ตามด้วย top-25 จัดอันดับใหม่เหลือ top-8; การเรียกคืนความจำแบบมีขอบเขตสูงสุด 15 รายการ; ฐานข้อมูล Neon PostgreSQL (pg_trgm + pgvector HNSW cosine); รันไทม์ Node v22.19.0, Next.js App Router

4. ผลการดำเนินงาน

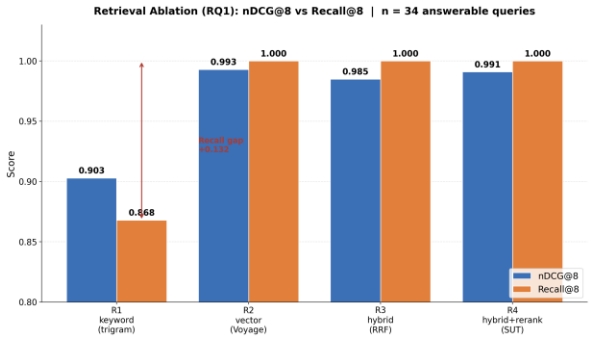
ระบบ DearFile ได้รับการพัฒนาจนครบฟังก์ชันหลัก ประกอบด้วย การบันทึกไฟล์ ข้อความ และลิงก์ผ่าน LINE พร้อมการวิเคราะห์และจัดหมวดหมู่อัตโนมัติ, ระบบค้นหาผสมระหว่าง Keyword Search และ Semantic Search สองภาษา, ฟังก์ชัน Ask DearFile สำหรับตอบคำถาม, Daily Summary และหน้าจัดการไฟล์ผ่าน LIFF Application หัวข้อนี้รายงานผลการประเมินเชิงปริมาณตามวิธีในหัวข้อ 3.6

4.1 ผลการสืบค้น (Retrieval)

จากคำค้นที่ตอบได้ 34 คำค้นการค้นหาแบบผสมร่วมกับการจัดอันดับใหม่ (R4) ให้ค่า nDCG@8 เท่ากับ 0.991สูงกว่าการใช้คำสำคัญเพียงอย่างเดียว (R1) ที่ได้ 0.903 อย่างชัดเจน โดยการเพิ่มการค้นหาเชิงความหมายช่วยยกค่า Recall@8 ขึ้นจาก 0.868 เป็น 1.000 (เพิ่มขึ้น 13.2 จุด) รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบการสืบค้น (n = 34)

รูปแบบ	nDCG@8	MRR	MAP	Recall@8
R1 คำสำคัญ	0.903	0.956	0.853	0.868
R2 เวกเตอร์	0.993	1.000	0.996	1.000
R3 ผสม (RRF)	0.985	1.000	0.996	1.000
R4 ผสม+rerank	0.991	1.000	0.990	1.000



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสืบค้นแต่ละรูปแบบ

4.2 การสืบค้นข้ามภาษา (Cross-lingual)

สำหรับคำค้น6คำค้นที่ภาษาของคำค้นต่างจากภาษาของป้ายกำกับ การค้นหาแบบผสม + จัดอันดับใหม่ (R4) ให้ค่า nDCG@8 สมบูรณ์เท่ากับ 1.000 ขณะที่การใช้คำสำคัญอย่างเดียวได้เพียง 0.935แสดงว่าการค้นหาเชิงความหมายและการจัดอันดับใหม่มีบทบาทสำคัญเมื่อการสืบค้นมีความยากขึ้น ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสืบค้นข้ามภาษา (n = 6)

รูปแบบ	nDCG@8	Recall@8	MAP
R1 คำสำคัญ	0.935	0.806	0.806
R2 เวกเตอร์	0.997	1.000	0.978
R3 ผสม (RRF)	0.997	1.000	0.978
R4 ผสม+rerank	1.000	1.000	1.000

4.3 การทำงานเชิงเอเจนต์และคุณภาพคำตอบ

จากคำถามตอบได้ 15 ข้อและตอบไม่ได้ 5 ข้อ (ทดลองซ้ำ N = 3) การตอบแบบครั้งเดียว (A0) ให้ความถูกต้อง (correctness) ร้อยละ 97.5 ขณะที่วงรอบเชิงเอเจนต์ (A1) ได้ร้อยละ 88.3 อย่างไรก็ตามความเชื่อมั่นของทั้งสองซ้อนทับกัน (A0 97.5% ± 2.8%, A1 88.3% ± 7.1%) ความแตกต่างจึงยังไม่มีนัยสำคัญที่ขนาดตัวอย่างนี้ทั้งนี้จุดเด่นของเอเจนต์อยู่ที่การเลือกใช้เครื่องมืออย่างปลอดภัยมากกว่าการตอบคำถามข้อเท็จจริงอย่างเดียว ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณภาพคำตอบ A0 เทียบกับ A1

ระบบ	Correct	Faithful	Not-found
A0 single-shot	97.5%	95.0%	80.0%
A1 agentic (SUT)	88.3%	80.0%	86.7%

4.4 การเลือกใช้เครื่องมือและกลไกยืนยัน

ระบบเลือกใช้เครื่องมือได้ถูกต้องร้อยละ 89.5 (macro-F1 = 0.909) จากชุดความตั้งใจ 19 ประโยคด้านกลไกความปลอดภัยของการเขียนข้อมูล พบว่าการยืนยันก่อนเขียน (confirm-first สำหรับ reminders/calendar) ทำงานถูกต้องร้อยละ 100 และการไม่เขียนเมื่อเป็นคำสั่งอ่าน ถูกต้องร้อยละ 100แสดงถึงพฤติกรรมการดำเนินการที่ปลอดภัยของเอเจนต์

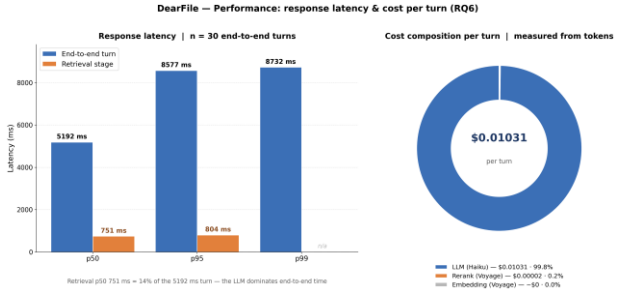
4.5 ประสิทธิภาพและระดับแบบจำลอง

จากการวัดการทำงานจริง 30 ครั้ง เวลาตอบสนองแบบครบวงจรมีค่ามัธยฐาน (p50) 5,192 มิลลิวินาที, p95 8,577 มิลลิวินาที และ p99 8,732 มิลลิวินาที โดยขั้นการสืบค้นใช้เวลา p50 เพียง 751 มิลลิวินาที ต้นทุนเฉลี่ยประมาณ 0.01031 ดอลลาร์สหรัฐต่อครั้ง (โทเคนเฉลี่ย 9,402) เมื่อเปรียบเทียบระดับแบบจำลอง Sonnet สามารถให้ความถูกต้องสูงกว่า Haiku 3.3 จุด แต่ใช้เวลาและต้นทุนมากกว่าจึงสนับสนุนนโยบาย

ใช้Haikuเป็นค่าเริ่มต้นและยกระดับเป็น Sonnet เมื่อจำเป็น ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 3

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบระดับแบบจำลอง

แบบจำลอง	Accuracy	p50 (ms)	$/ครั้ง
Haiku 4.5	96.7%	1,485	0.00111
Sonnet 4.6	100.0%	2,415	0.00306



รูปที่ 3 การกระจายของเวลาตอบสนองและต้นทุนต่อครั้ง

4.6 ระบบความจำ

การทดสอบวงจรชีวิตของระบบความจำผ่านทุกกรณีได้แก่การเลื่อนขั้นจากความจำระยะสั้นสู่ระยะยาว 2/2,การลืมข้อมูลที่ไม่ได้ใช้1/1,การคงข้อมูลใหม่ไว้ระยะสั้น19/19และการปักหมุดระยะยาว1/1โดยการรวมความจำซ้ำ (reflection merge) ลดจาก 3 เหลือ1รายการค่าความแม่นยำและความครบถ้วนของการเลื่อนขั้นและการลืมเท่ากับ 1.000

4.7 การนำเข้าและวิเคราะห์ไฟล์

การวิเคราะห์ไฟล์ที่มีป้ายกำกับ 3 รายการให้ความถูกต้องของประเภทเอกสาร (doc_type) ร้อยละ 100 อัตราการจับป้ายกำกับ (tag hit) ร้อยละ 100 และความครบถ้วน (tag recall) ร้อยละ 83.3พร้อมความสอดคล้องของแบบแผนสรุปภาษาไทยและป้ายกำกับภาษาอังกฤษร้อยละ 100 นอกจากนี้ตัวจัดการคำสั่งเช่นการสร้างโฟลเดอร์และการเปลี่ยนชื่อภาษาไทยทำงานถูกต้องและคงอักขระไทยไว้ครบถ้วน

5. อภิปรายผล

ด้านการสืบค้นการใช้คำสำคัญเพียงอย่างเดียวสูญเสียค่า Recall@8 ไปประมาณร้อยละ 13.2 เมื่อเทียบกับกระบวนการเต็มรูปแบบซึ่งการค้นหาเชิงความหมายร่วมกับการรวมผลและการจัดอันดับใหม่ช่วยกู้คืนส่วนที่ขาดหายนี้ได้อนึ่งบนคลังข้อมูลขนาดเล็กและสะอาดการค้นหาด้วยเวกเตอร์เพียงอย่างเดียวก็เข้าใกล้เพดานประสิทธิภาพแล้วการรวมผลและการจัดอันดับใหม่จึงเพิ่มค่าได้เพียงเล็กน้อยในกรณีทั่วไปแต่กลับให้ผลชัดเจนบนคำค้นข้ามภาษาซึ่งการสืบค้นมีความยากจริงโดยการจัดอันดับใหม่ทำให้ได้ค่า nDCG@8 สมบูรณ์ที่ 1.000

ด้านการทำงานเชิงเอเจนต์สำหรับคำถามข้อเท็จจริงอย่างง่าย การตอบแบบครั้งเดียว (single-shot) ที่รวมบริบทที่สืบค้นได้ทั้งหมดในการเรียกครั้งเดียวถือเป็นฐานเปรียบเทียบที่แข็งแรงและให้ผลดีกว่าเล็กน้อย (ร้อยละ 97.5 เทียบกับ 88.3) อย่างไรก็ตามคุณค่าของสถาปัตยกรรมเชิงเอเจนต์อยู่ที่การเลือกใช้เครื่องมืออย่างถูกต้อง(ร้อยละ89.5)และการดำเนินการอย่างปลอดภัยผ่านกลไกยืนยันก่อนเขียน(ร้อยละ100) มากกว่าการค้นหาคำตอบเพียงอย่างเดียว ส่วนการเลือกระดับแบบจำลองSonnetให้ความถูกต้องเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 3.3 แต่ใช้เวลาประมาณ 1.6 เท่าและต้นทุนประมาณ2.8เท่าจึงสนับสนุนนโยบายใช้Haikuเป็นค่าเริ่มต้นและยกระดับเมื่อจำเป็น

5.1 ข้อจำกัดของการศึกษา

ผลการประเมินอยู่บนคลังข้อมูลสังเคราะห์ที่ควบคุมตัวแปรได้มีเฉลยที่ชัดเจนแต่ไม่ใช่ปริมาณการใช้งานจริงค่าความแม่นยำที่สูงส่วนหนึ่งเป็นผลจากคลังข้อมูลขนาดเล็กและสะอาด (ceiling effect) คลังข้อมูลที่ใหญ่และมีสัญญาณรบกวนมากขึ้นจะช่วยแยกความแตกต่างระหว่างรูปแบบได้ชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ผู้ตัดสินที่เป็นแบบจำลองภาษาแม้ใช้เกณฑ์ตายตัวร่วมกับการตรวจข้อเท็จจริงหลักแต่การตรวจสอบซ้ำโดยมนุษย์บางส่วนจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและการเชื่อมต่อบริการภายนอกทดสอบบนบัญชีเดียวจึงยังไม่ครอบคลุมการเปรียบเทียบเชิงแข่งขันกับระบบอื่น

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนา DearFile ระบบจัดการความรู้ส่วนบุคคลที่ขับเคลื่อนด้วย AI บน LINE แอปพลิเคชันผลการประเมินเชิงปริมาณแสดงให้เห็นว่าการนำสถาปัตยกรรม Agentic RAG มาใช้ร่วมกับกลไก Forced First-Step Search การค้นหาแบบผสมและการจัดอันดับใหม่ ช่วยให้ระบบสืบค้นความรู้ได้อย่างแม่นยำ (nDCG@8 0.991 และ 1.000 บนคำค้นข้ามภาษา) ตอบสนองเร็ว (มัธยฐาน 5.2 วินาที) ด้วยต้นทุนต่ำ (ประมาณ0.01ดอลลาร์สหรัฐต่อครั้ง)และมีพฤติกรรมการเขียนข้อมูลที่ปลอดภัยโดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนพฤติกรรมการสื่อสารหรือเรียนรู้เครื่องมือใหม่

สำหรับการพัฒนาในอนาคตผู้วิจัยวางแผนเพิ่มฟังก์ชันAudioTranscriptionสำหรับไฟล์เสียง ,ClientSideEncryptionเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและการรองรับOfflineModeรวมถึงการขยายการประเมินไปยังคลังข้อมูลขนาดใหญ่และผู้ใช้จริงเพื่อยืนยันผลในสภาพการใช้งานจริง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานและคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ โดยเฉพาะอาจารย์ ดร. เอกชัย แซ่จึง อาจารย์ที่ปรึกษาของ DearFile ที่ให้การสนับสนุน และคำแนะนำในการพัฒนาโครงการนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] T. Forte, *Building a Second Brain: A Proven Method to Organize Your Digital Life and Unlock Your Creative Potential*. New York, NY, USA: Atria Books, 2022.

[2] P. Lewis, E. Perez, A. Piktus, F. Petroni, V. Karpukhin, N. Goyal, H. Küttler, M. Lewis, W. Yih, T. Rocktäschel, S. Riedel, and D. Kiela, "Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, 2020, pp. 9459–9474.

[3] N. Reimers and I. Gurevych, "Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks," in *Proc. 2019 Conf. Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*, Hong Kong, China, 2019, pp. 3982–3992.

[4] L. Wang, N. Yang, X. Huang, B. Jiao, L. Yang, D. Jiang, R. Majumder, and F. Wei, "Text embeddings by weakly-supervised contrastive pre-training," 2022, *arXiv:2212.03533*.

[5] S. Xiao, Z. Liu, P. Zhang, N. Muennighoff, D. Lian, and J.-Y. Nie, "C-Pack: Packed resources for general Chinese embeddings," in *Proc. 47th Int. ACM SIGIR Conf. Research and Development in Information Retrieval*, 2024, pp. 641–649.

[6] S. Robertson and H. Zaragoza, "The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond," *Foundations and Trends in Information Retrieval*, vol. 3, no. 4, pp. 333–389, 2009.

[7] G. V. Cormack, C. L. A. Clarke, and S. Buettcher, "Reciprocal rank fusion outperforms Condorcet and individual rank learning methods," in *Proc. 32nd Int. ACM SIGIR Conf. Research and Development in Information Retrieval*, Boston, MA, USA, 2009, pp. 758–759.

[8] R. Nogueira and K. Cho, "Passage re-ranking with BERT," 2019, *arXiv:1901.04085*.

[9] S. Yao, J. Zhao, D. Yu, N. Du, I. Shafran, K. Narasimhan, and Y. Cao, "ReAct: Synergizing reasoning and acting in language models," in *Proc. 11th Int. Conf. Learning Representations (ICLR)*, Kigali, Rwanda, 2023.

[10] T. Schick, J. Dwivedi-Yu, R. Dessì, R. Raileanu, M. Lomeli, E. Hambro, L. Zettlemoyer, N. Cancedda, and T. Scialom, "Toolformer: Language models can teach themselves to use tools," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 36, 2023.

[11] L. Ouyang et al., "Training language models to follow instructions with human feedback," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 35, 2022, pp. 27730–27744.

[12] Anthropic, "Claude Models," Anthropic Documentation, 2025. [Online]. Available: https://docs.claude.com/en/docs/about-claude/models. [Accessed: Jul. 16, 2026].

[13] Voyage AI, "Embeddings," Voyage AI Documentation, 2025. [Online]. Available: https://docs.voyageai.com/docs/embeddings. [Accessed: Jul. 16, 2026].

[14] DataReportal, "Digital 2025: Thailand," 2025. [Online]. Available: https://datareportal.com/reports/digital-2025-thailand. [Accessed: Jul. 16, 2026].

การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง
Study and Development of Ginger-Based Meat Tenderizing Powder

ธนากร พนพพิรัตน์[1], ศักดิ์ชัย คำมูล[1], อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล[2], ภูชิสส์ ตันวาณิชกุล[2], เดชาวัต มั่นกลาง[2], ประยูร จอมหล้าพีรติกุล[2*]

[1] นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
[2] อาจารย์สาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
*ผู้ติดต่อ: E-mail prayoon.jo@rmuti.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0895547049

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง โดยใช้ประโยชน์จากเอนไซม์ซิงจิเบน (Zingibain) รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับผงหมักเนื้อนุ่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยนำไปใช้ในการหมักเนื้อหมูสันนอก โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มไม่หมักผงเนื้อนุ่ม(ควบคุม), กลุ่มใช้ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงในปริมาณ 2, 3 และ 4 กรัม ตามลำดับ และกลุ่มใช้ผงหมักเนื้อนุ่มจากท้องตลาดปริมาณ 2 กรัม โดยการวิเคราะห์ ค่าสีของผงขิง ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก, ความนุ่มของเนื้อด้วยการทดสอบแรงตัดเฉือนตามลายเนื้อ และขวางลายเนื้อ และการประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale จากผลการทดสอบ พบว่า ค่าสีของผงขิงที่ได้มีค่า L* เท่ากับ 69.13 ±0.91 ค่า a* เท่ากับ 10.13 ±1.59 ค่า b* เท่ากับ 20.23 ±0.32 และมีความชื้น 12.16%db การสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุกมากที่สุด คือกลุ่มควบคุม 14.81% น้อยที่สุดพบที่ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง 3 กรัม 9.38% ผลแรงตัดเฉือนกลุ่มควบคุมมากสุดตามลายเนื้อ 18.79 N และขวางลายเนื้อ 16.77 N กลุ่มใช้ผงหมักขิง 4 กรัม สามารถลดแรงตัดเฉือนลงได้มากที่สุด ตามลายเนื้อ 9.2 N และขวางลายเนื้อ 8.33 N การใช้ผงหมักจากขิง โดยให้คะแนนทางประสาทสัมผัสของเนื้อเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม การใช้ผงหมักจากขิงช่วยเพิ่มความนุ่มของเนื้อ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยผงขิงปริมาณ 4 กรัม ให้ค่าความนุ่มสูงที่สุด 6.62 คะแนน ซึ่งให้ความนุ่มเหนือกว่าผงหมักในท้องตลาด 6.38 คะแนน

คำสำคัญ: ผงหมักเนื้อนุ่ม, เอนไซม์ซิงจิเบน, ความนุ่ม, ขิง

Abstract

This study aimed to investigate and develop a ginger-based meat tenderizer powder utilizing the enzyme Zingibain, and to compare its efficiency with commercial tenderizers. Pork loin was used and divided into five experimental groups: a control group (no tenderizer), three groups treated with the ginger-based tenderizer at dosages of 2, 3, and 4 g, and one group treated with a commercial tenderizer at a dosage of 2 g. The analysis evaluated the color profile of the ginger powder, cooking loss, meat tenderness (measured by Warner-Bratzler shear force both parallel and perpendicular to the muscle fiber), and sensory attributes using a 9-point hedonic scale.

The results indicated that the ginger powder exhibited color values of L* = 69.13 ± 0.91,

a* = 10.13 ± 1.59, and b* = 20.23 ± 0.32, with a moisture content of 12.16% (dry basis). The highest cooking loss was observed in the control group (14.81%), whereas the lowest was found in the 3 g ginger powder group (9.38%). Regarding tenderness, the control group exhibited the highest shear force at 18.79 N (parallel) and 16.77 N (perpendicular). The 4 g ginger powder group achieved the most significant reduction in shear force, decreasing to 9.20 N (parallel) and 8.33 N (perpendicular). Furthermore, the sensory evaluation demonstrated that the ginger powder significantly enhanced meat tenderness compared to the control group. Specifically, the 4 g ginger powder group received the highest tenderness score of 6.62, outperforming the commercial tenderizer which scored 6.38.

Keywords: Meat tenderizer powder, Zingibain, Tenderness, Ginger

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารให้ความสำคัญกับคุณภาพ ความปลอดภัย และการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติมากขึ้น ส่งผลให้แนวคิดอาหารแบบ Clean Label ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นการลดการใช้สารปรุงแต่งและสารสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหาร [1,2] แต่ในความเป็นจริง ผลิตภัณฑ์หมักเนื้อในท้องตลาดส่วนใหญ่ยังคงใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate) ซึ่งแม้จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความนุ่ม แต่การใช้สารดังกล่าวอาจส่งผลเสียต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส โดยเฉพาะการเกิดรสเฝื่อนหรือรสคล้ายสบู่ (Off-flavor) และลักษณะสัมผัสที่ลื่นผิดปกติ [3] นอกจากนี้ยังเพิ่มปริมาณโซเดียมในผลิตภัณฑ์ซึ่งก่อให้เกิดความกังวลด้านสุขภาพ เช่น โรคความดันโลหิตสูง และอาจทำลายคุณค่าทางโภชนาการของวิตามินบางชนิดในเนื้อสัตว์ [4]

ในขณะเดียวกันปัญหาความเหนียวของเนื้อสัตว์เป็นข้อจำกัดสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะเนื้อสัตว์ที่มีโครงสร้างกล้ามเนื้อหนาแน่น ส่งผลให้เนื้อสัมผัสแข็งและเคี้ยวยาก [5,6] เอนไซม์โปรติเอสจากพืชจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถย่อยสลายโปรตีนและคอลลาเจน ทำให้เนื้อสัตว์มีความนุ่มขึ้นตามธรรมชาติ อีกทั้งยังปลอดภัยและไม่ทิ้งสารตกค้าง [7,8]

ขิง (Ginger) เป็นพืชสมุนไพรที่มีเอนไซม์โปรติเอสสำคัญ คือ “ซิงจิเบน” (Zingibain) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความนุ่มของเนื้อสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเอนไซม์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส และมีสมบัติคล้ายกับเอนไซม์ปาเปน (Papain) จากมะละกอและเอนไซม์โบรมีเลน (Bromelain) สับปะรด [9] นอกจากนี้ขิงยังเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงในรูปแบบผงแห้ง เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและยืดอายุการเก็บรักษา โดยศึกษากระบวนการผลิตคุณภาพทางกล และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด ผลการศึกษาคาดว่าจะช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์หมักเนื้อจากธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคยุคใหม่ได้อย่างเหมาะสม

2.วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษากรรมวิธีในการการผลิตผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง
2. เพื่อศึกษาผลของผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงทางกลและทางประสาทสัมผัส
3. การเปรียบเทียบคุณภาพของเนื้อที่หมักโดยผงหมักนุ่มจากขิงกับผงหมักนุ่มตามท้องตลาด

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.1 การเตรียมผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง

นำขิงแก่(8-12 เดือน จากตลาดโบ้เบ้ ขอนแก่น) สดมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และหั่นเป็นเส้นขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 3-4 เซนติเมตร ตู้อบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ขิงความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่เหมาะสมตามแนวทางของ ศรายุทธ เมามี (2564). [10] และสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) [11] แล้วนำมาบดในเครื่องปั่นให้เป็นผงละเอียด จากนั้นไปใส่ตะแกรงไฟฟ้าด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร แล้วบรรจุผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงลงในภาชนะที่สะอาดและปิดสนิท พร้อมนำไปใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 1 ขิงอบแห้ง

3.2 การพัฒนาสูตรผงหมักเนื้อ

นำเนื้อหมูสันนอกมาล้างทำความสะอาดแล้วหั่นตัดแต่งส่วนที่เป็นพังผืดและไขมันออก จากนั้นหั่นเนื้อหมูสันนอกให้หนา 1 เซนติเมตร ปริมาณ 100 กรัม สูตรผงหมักซึ่งมีส่วนผสมต่อ 100 กรัม ประกอบไปด้วยน้ำตาล 2 กรัม เกลือ 1 กรัม พริกไทย 0.5 กรัม และ ทำการทดลองทั้งหมด 5 กลุ่มทดลองดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไม่หมักผงเนื้อนุ่ม(ควบคุม) กลุ่มที่ 2 ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง 2 กรัม กลุ่มที่ 3 ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง 3 กรัม กลุ่มที่ 4 ผงหมักเนื้อนุ่มจากขิง 4 กรัม กลุ่มที่ 5 ผงหมักเนื้อนุ่มจากท้องตลาด 2 กรัม ตัวอย่างละ 3 ชิ้น แล้วนำมานวดผสม ส่วนผสมให้เข้ากันกับเนื้อหมูสันนอกจนทั่ว ดังรูปที่ 2 หมักไว้ในอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำเนื้อหมูสันนอกมาอบด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ตามระเบียบวิธีของ Gibis, M. (2016) [12] หลังจากนั้นนำเนื้อหมูสันนอกที่ทำสุกแล้ว หั่นให้ได้ขนาด กว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์แรงตัดเฉือนและประสาทสัมผัส



รูปที่ 2 เนื้อหมูสันนอกที่หมักตามกลุ่มทดลองต่างๆ

3.3 การวิเคราะห์ค่าสีขิงผง

นำขิงผงมาวัดค่าสีด้วยใช้เครื่องวัดค่าสี (Colorimeter PONPE 241CR / PONPE) ดังรูปที่ 3 รายงานผลในระบบ CIE ได้แก่ +L* แสดงถึงค่าความสว่าง จนไปถึง -L* แสดงถึงค่าความมืด แกน a* จะบรรยายถึง (-a*) แสดงความเป็นสีเขียว (+a*) แสดงความเป็นสีแดง ส่วนแกน b* จะบรรยายถึง (-b*) แสดงความเป็นน้ำเงิน ไป เหลือง (+b*) แสดงความเป็นเหลือง ทำการวิเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 3 วัดค่าสีของขิง

3.4 การสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก (Cooking loss)

คำนวณการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุกเนื้อหมูสันนอก โดยชั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างก่อนการทำสุก (W_1) และชั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างหลังการทำให้สุก (W_2) เพื่อใช้คำนวณค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการทำสุก ดังสมการที่ 1 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก} = [(W_1 - W_2) / W_1] * 100 \quad (1)$$

เมื่อ

W1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการทำให้สุก (กรัม)

W2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการทำให้สุก (กรัม)

3.5 การทดสอบและวิเคราะห์ความนุ่มของเนื้อหมูสันนอก

ที่หั่นจาก 3.2 โดยการทดสอบแรงตัดเฉือน ด้วยเครื่อง ทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ยี่ห้อ Lloyd Instruments รุ่น LRX-Plus ประเทศอังกฤษ โดยใช้หัวใบมีดแบบWarner-Bratzler Blade โดยใช้โหมดแรงกดด้วยการตัดบริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 แบบขวางลายเนื้อ และตามลายเนื้อ แล้วตั้งค่าพารามิเตอร์ Test speed 2.0 mm/s และทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ



รูปที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ความนุ่มของเนื้อหมูสันนอก

3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเนื้อหมูสันนอก เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยหั่นเนื้อหมูสันนอกหลังทำให้สุกเป็นชิ้น ชิ้นละ 20 กรัม ลงในถ้วยพลาสติกที่มีรหัสกำกับตัวอย่าง จากนั้นนำไปให้ผู้ทดสอบ ทำการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเนื้อหมูสันนอกทุกชุดทดลองที่ศึกษาโดยใช้แบบทดสอบความชอบ ดังรูปที่ 5 ด้วยวิธี 9-point hedonic scale คะแนนตั้งแต่ 1-9 คะแนน (1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด) [13] ในคุณลักษณะต่าง ๆ คือ กลิ่นรส รสชาติ ความชุ่มฉ่ำ ความนุ่มเนื้อและความชอบโดยรวม จำนวน 30 คน



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสของเนื้อหมูสันนอก

4. ผลการทดลอง

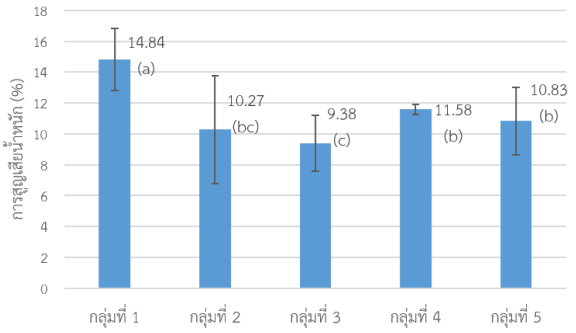
4.1 จากการวิเคราะห์ค่าสี (L*, a*, b*)

ผลการทดลองพบว่าผงขิงมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 69.13 ± 0.91 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เท่ากับ 10.13 ± 1.59 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 20.23 ± 0.32 จากค่าสีดังกล่าวพบว่าผงขิงมีความสว่างค่อนข้างสูง ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการแปรรูปที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช้เอนไซม์ (Non-enzymatic browning) หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] นอกจากนี้ค่า a* และ b* ที่มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นถึงโทนสีส้มอมเหลืองที่เด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่ดีของผงขิงและสัมพันธ์กับสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ [15]

4.2 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณความชื้นของผงขิงที่วัดได้คือร้อยละ 12.16 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับขิงผง (มผช. 248/2559) [11] ที่กำหนดให้ความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 13 โดยมวล พบว่าผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นที่ระดับร้อยละ 12.16 นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาอายุการเก็บรักษา (Shelf-life) เนื่องจากเป็นระดับที่ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ [16] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขิงมีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย (Hygroscopic nature) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Caking) และรักษาคุณภาพของสารสำคัญให้คงอยู่ได้นานที่สุด

4.3 การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังปรุงสุก จากรูปที่ 6 พบว่าเนื้อสัตว์ที่ไม่ผ่านการหมักมีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดคือ 14.84% ในขณะที่เนื้อสัตว์ที่ผ่านการหมักด้วยผงหมักจากขิงมีค่าต่ำที่สุดเพียง 9.384% ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Naveena & Mendiratta (2001). [17] ที่ระบุว่าสารสกัดจากขิงมีเอนไซม์โปรติเอสในกลุ่มซิงจิเบน (Zingibain) ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะในการย่อยสลายโปรตีนโครงสร้างกล้ามเนื้อ (Myofibrillar proteins) โดยเฉพาะการทำลายพันธะของแอคตินและไมโอซิน ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายโปรตีนเกิดการคลายตัวและ

ช่วยลดแรงบีบอัดภายในเซลล์กล้ามเนื้อที่มักจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อน สภาวะดังกล่าวนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water Holding Capacity) ตามกลไกที่ Huff-Lonergan & Lonergan (2005). [18] ได้อธิบายไว้ว่าการลดลงของแรงตึงเครียดภายในโครงสร้างจะช่วยขยายช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อ ทำให้สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำและความชุ่มชื้นไว้ภายในโครงสร้างได้ดีขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักหลังปรุงสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม และช่วยรักษาความฉ่ำวาวของเนื้อสัตว์ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

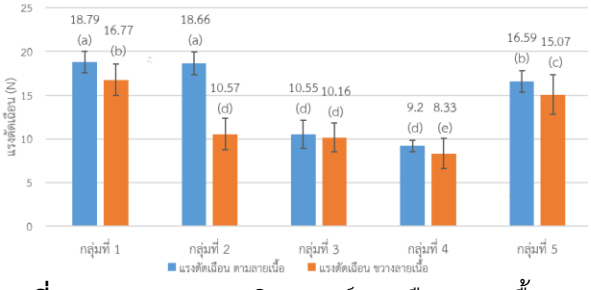


รูปที่ 6 แสดงการสูญเสียน้ำหนักหลังสุก

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ c หลังตัวเลขที่แสดงถึงความแตกต่าง ทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ความนุ่มของเนื้อหมูสันนอก จากรูปที่ 7 พบว่าการตัดขวางลายเนื้อให้ค่าแรงตัดเฉือนต่ำกว่าการตัดตามลายเนื้อในทุกชุดการทดลองอย่างเห็นได้ชัด โดยชุดควบคุมที่ไม่ใส่ผงหมักมีค่าแรงตัดเฉือนสูงสุด (ตามลายเนื้อ 18.79 N และขวางลายเนื้อ 16.77 N) เนื่องจากเนื้อสัตว์ประกอบด้วยเส้นใยกล้ามเนื้อ เรียงตัวกันตามแนวยาว การตัดตามลายเนื้อจึงเป็นการตัดขนานไปกับแนวเส้นใย ทำให้โครงสร้างทางกายภาพทนทานต่อแรงกดค่อนข้างสูง ในทางตรงกันข้าม การตัดขวางลายเนื้อเป็นการตัดทำลายโครงสร้างความยาวของเส้นใยและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันให้ขาดออกจากกันเป็นชิ้นสั้น ๆ ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อลดลง เครื่องมือวัดจึงใช้แรงตัดเฉือน (Shear force) น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Thompson et al. (2018) [19] ที่ระบุว่าทิศทางการวางตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อ (Muscle fiber orientation) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงตัดเฉือน โดยการตัดตามลายเนื้อจะทำให้เครื่องมือต้องออกแรงเอาชนะแรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวตามธรรมชาติของมัดกล้ามเนื้อที่ยังสมบูรณ์อยู่ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของผงหมักจากขิง พบว่าการเพิ่มปริมาณผงหมักส่งผลให้ค่าแรงตัดเฉือนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยชุดทดลองที่ใช้ผงหมักขิงปริมาณ 4 กรัม สามารถลดแรงตัดเฉือนลงได้มากที่สุด เหลือเพียง 9.2 N ตามลายเนื้อและ 8.33 N ขวางลายเนื้อ

นอกจากนี้ การใช้ผงหมักขิงในปริมาณ 3 และ 4 กรัม ยังมีประสิทธิภาพในการช่วยให้เนื้อนุ่มลงได้ดีกว่าผงหมักสำเร็จรูปตามท้องตลาดทั่วไป 16.59 N และ 15.07 N ความนุ่มของเนื้อที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงหมักขิง เป็นผลมาจากกิจกรรมของเอนไซม์โปรตีเอสตามธรรมชาติในขิงที่ชื่อว่า "Zingibain" ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาย่อยสลายพันธะโปรตีนในโครงสร้างกล้ามเนื้อ (Myofibrillar proteins) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพันประเภท คอลลาเจน (Collagen) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลที่เคยเกาะกันแน่นเกิดการสลายตัวและหลวมขึ้น [20] การเพิ่มปริมาณผงหมักขิงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ตื่นตัว (Active enzyme) ในระบบ ทำให้เกิดการย่อยสลายโปรตีนได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [21] และการที่ผงหมักขิงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าผงหมักในท้องตลาด



รูปที่ 7 กราฟแสดงการวิเคราะห์แรงเฉือนของเนื้อหมูสันนอก

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c, d และ e หลังตัวเลขที่แสดงถึงความแตกต่าง ทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางประสาทของเนื้อหมูสันนอก จากการทดสอบผลดังตารางที่ 1 พบว่าผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงในปริมาณ 3 กรัม ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด (7.00 ± 1.78) ซึ่งสูงกว่าทั้งกลุ่มที่ไม่หมักและกลุ่มที่ใช้ผงหมักจากท้องตลาด โดยรายละเอียดการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเนื้อหมูสันนอก มีดังนี้

1. ด้านความนุ่มและความชุ่มฉ่ำ (Tenderness and Juiciness) เนื้อหมูที่หมักด้วยขิงปริมาณ 3 และ 4 กรัม มีคะแนนความนุ่ม (6.54 และ 6.62 ตามลำดับ) สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ผลนี้เป็นไปตามสมมติฐานเนื่องจากในขิงมีเอนไซม์ซิงจิเบน (Zingibain) ซึ่งเป็นเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเส้นใยกล้ามเนื้อ (Myofibrillar proteins) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissue) ในเนื้อสัตว์ ช่วยปรับปรุงโครงสร้างของเนื้อสัมผัสให้มีความอ่อนนุ่มและคลายตัวลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บความชุ่มชื้นเพิ่มสูงขึ้น และช่วยรักษาความฉ่ำของเนื้อสัมผัสในระหว่างการบริโภค [22]

2. ด้านกลิ่นรสและรสชาติ (Flavor and Taste) เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงขิงเป็น 4 กรัม คะแนนความชอบด้านรสชาติกลับลดลงเหลือ 5.92 เมื่อเทียบกับปริมาณ 3 กรัม (6.31 คะแนน) เนื่องจากขิงมีสารให้ความเผ็ดร้อนและกลิ่นฉุนที่เฉพาะตัว (Pungent compounds) เช่น Gingerols และ Shogaols ซึ่งหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปอาจกลบกลิ่นรสตามธรรมชาติของเนื้อหมู หรือสร้างความไม่พึงประสงค์ให้กับผู้บริโภคบางกลุ่ม [23] ดังนั้นปริมาณ 3 กรัมจึงเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum level) ที่ช่วยส่งเสริมกลิ่นรสของเนื้อหมูให้เด่นชัดขึ้นโดยไม่รบกวนรสชาติหลัก

3. การยอมรับโดยรวม (Overall Acceptance) คะแนนความชอบโดยรวมของผงหมักขิง 3 กรัม อยู่ที่ 7.00 คะแนน ซึ่งสูงกว่ากลุ่มของผงหมักจากท้องตลาด ซึ่งมีคะแนนอยู่ที่ 6.92 คะแนน สะท้อนให้เห็นว่าผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่มีสมบัติเป็นสารเพิ่มความนุ่ม (Natural tenderizer) ซึ่งนอกจากจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสแล้ว ยังเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการจากสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในขิงอีกด้วย [24]

ตารางที่ 1 คะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเนื้อหมูสันนอก

ตัวอย่าง	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส				
	ความนุ่มเนื้อ	รสชาติ	ความชุ่มฉ่ำ	กลิ่นรส	ความชอบโดยรวม
กลุ่มที่ 1	5.00±1.41^{d}	5.62±1.04^{d}	5.62±1.04^{d}	4.77±1.41^{d}	5.77±1.48^{cd}
กลุ่มที่ 2	6.00±1.85^{bc}	6.00±1.78^{cd}	5.62±1.71^{d}	5.85±1.63^{c}	6.38±1.61^{bc}
กลุ่มที่3	6.54±1.71^{ab}	6.31±1.84^{bc}	6.62±2.06^{a}	6.46±1.94^{ab}	7.00±1.78^{a}
กลุ่มที่ 4	6.62±1.76^{a}	5.92±1.85^{cd}	6.31±2.25^{ab}	6.54±1.45^{a}	6.31±1.93^{bc}
กลุ่มที่ 5	6.38±1.85^{ab}	6.77±1.64^{a}	6.15±1.57^{bc}	6.15±2.03^{bc}	6.92±1.75^{a}

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c และ d หลังตัวเลขที่แตกต่างกันในแต่ละสดมภ์แสดงถึงความแตกต่าง ทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการพัฒนาผงหมักเนื้อนุ่มจากขิงแก่เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร พบว่า

1.ด้านคุณภาพของวัตถุดิบ กระบวนการแปรรูปขิงผงด้วยอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นร้อยละ 12.16 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (ไม่เกินร้อยละ 13) และมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 69.13 สะท้อนถึงการคงตัวของสารสำคัญและไม่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมากเกินไป

2.ประสิทธิภาพทางกล การใช้ผงหมักขิงมีผลต่อคุณภาพของเนื้อหมูสันนอกอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่มที่ใช้ผงขิง 4 กรัมในการหมัก ทดสอบแรงตัดเฉือน (Shear force) ต่ำที่สุดที่ 8.33 N และพบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังปรุงสุก (Cooking loss) ต่ำที่สุดที่ร้อยละ 9.38 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่ากลุ่มควบคุมและผงหมักสำเร็จรูปในท้องตลาด

3.การยอมรับทางประสาทสัมผัส จากการทดสอบความชอบ (9-point Hedonic Scale) พบว่า

กลุ่มที่ใช้ผงขิง 3 กรัมในการหมัก ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด 7.00 คะแนน โดยพบว่าเนื้อหมูสันนอกที่ใช้ผงขิง 3 กรัมหมักให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและชุ่มฉ่ำในระดับที่เหมาะสม โดยไม่มีกลิ่นฉุนหรือรสเผ็ดร้อนของขิงมารบกวนรสชาติหลักของเนื้อสัตว์มากเกินไป

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้เน้นศึกษาประสิทธิภาพของผงหมักขิงแก่เฉพาะกับเนื้อหมูสันนอกเพียงชนิดเดียว ซึ่งยังไม่ครอบคลุมถึงพฤติกรรมการบริโภคที่มีความหลากหลายของมนุษย์ ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้การศึกษาในอนาคตทดสอบประสิทธิภาพของผงหมักขิงแก่นี้เพิ่มเติมกับเนื้อสัตว์ที่มีโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อแตกต่างออกไป เช่น เนื้อโค หรือเนื้อสัตว์ปีก เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารให้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ผงหมักขิงในบรรจุภัณฑ์รูปแบบต่างๆ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และความเห็นในรายงานผลโครงการเป็นของผู้รับการสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป ขอขอบพระคุณ ดร.ประยูร จอมหล้าพีรติกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] Somsri, S. (2021). “Clean Label: A New Trend in the Food Industry for Health-Conscious Consumers.” Journal of Food Science and Innovation 1, 1: 12-25.

[2] Martin, J., and S. Lee. (2019). “Consumer perception toward clean label meat products.” Journal of Food Quality and Safety 14, 2: 55-63.

[3] Sheard, P. R., and A. Tali. (2004). “Injection of salt, tripolyphosphate and bicarbonate marinades into beef joints to improve juiciness and tenderness.” Meat Science 68, 1: 39-46.

[4] Desmond, E. (2006). “Reducing salt: A challenge for the meat industry.” Meat Science 74, 1: 188-196.

[5] Wattanakul, R. (2022). “Heat treatment and muscle fiber in aged meat.” Thai Journal of Meat Science 7, 1: 34-47.

[6] Chanan, K. (2020). Meat science and culinary applications. Bangkok: Academic Press.

[7] Park, D., and Y. Kim. (2018). “Protease activity and its role in meat tenderness.” Asian Food Science Journal 9, 3: 120-130.

[8] Rodriguez, M. (2020). Plant-based protease for food processing. แปลโดย สุรีย์พร แสงทอง. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัย.

[9] กฤษฎาพร สีหะวงษ์. (2558). “การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการลอกกาวไหมแบบ 2 ขั้นตอน (เอนไซม์ซิงกิเบนตามด้วยสารละลายโซดาแอชเจือจาง) กับกระบวนการลอกกาวไหมด้วยสารละลายโซดาแอชปกติ.” ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[10] ศรายุทธ เมามี. (2564). “ตู้อบแห้งพริกขี้ฟ้าแบบอัตโนมัติด้วยรังสีอินฟราเรด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2559). “มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ขิงผง (มผช. 248/2559).” กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

[12] Gibis, M. (2016). “Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: A review.” Food and Chemical Toxicology 92: 213-224.

[13] สวรักษ์ จันทเทพธิมากุล และนฤมล จอมมาก. (2564). “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อทางธรรมชาติจากสับปะรด.” รายงานผลการวิจัย โครงการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเพื่อส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชนบ้านดอนขุนห้วย อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี, ทุนอุดหนุนโดยกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.).

[14] An, K., D. Zhao, Z. Wang, J. Wu, Y. Xu, and G. Xiao. (2016). “Comparison of different drying methods on Chinese ginger (Zingiber officinale Roscoe): Changes in volatiles, chemical components and antioxidant activities.” LWT - Food Science and Technology 65: 334-341.

[15] Pathare, P. B., U. L. Opara, and F. A. J. Al-Said. (2013). “Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review.” Food and Bioprocess Technology 6, 1: 36-60.

[16] Ganjloo, A., R. A. Rahman, J. Bakar, A. Osman, and M. Bimakr. (2009). “Kinetics of color change and moisture sorption isotherm of coriander (Coriandrum sativum) and ginger (Zingiber officinale).” Journal of Food Engineering 94, 3-4: 388-394.

[17] Naveena, B. M., and S. K. Mendiratta. (2001). “Tenderization of spent hen meat with ginger extract.” Meat Science 61, 3: 233-237.

[18] Huff-Lonergan, E., and S. M. Lonergan. (2005). “Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes.” Meat Science 71, 1: 194-204.

[19] Thompson, J. M., R. Polkinghorne, and A. Gee. (2018). “The effect of cutting direction and sarcomere length on the shear force of beef muscles.” Meat Science 143: 45-52.

[20] Naveena, B. M., and S. K. Mendiratta. (2011). “Tenderization of spent hen meat using ginger extract.” British Poultry Science 45, 1: 78-84.

[21] Bhat, Z. F., J. D. Morton, S. L. Mason, and A. E. D. Bekhit. (2018). “Applied microbial proteases for meat tenderization.” Food Chemistry 245: 123-129.

[22] Naveena, B. M., S. K. Mendiratta, and A. S. R. Anjaneyulu. (2004). “Tenderization of spent hen meat using ginger extract.” Journal of Food Chemistry 84, 2: 231-236.

[23] Thompson, A. K., et al. (2018). “Sensory characteristics and consumer preference of ginger-marinated pork loin.” Meat Science 145: 312-319.

[24] He, X., et al. (2015). “Antioxidant and antimicrobial potential of ginger extract in meat products.” Journal of Food Processing and Preservation 39, 6: 1604-1612.

การวิเคราะห์ความจำเพาะในการจับของโปรตีน Outer Membrane Protein N ต่อน้ำตาลกลูโคส มอลโทส และซูโครสด้วยเทคนิค Molecular Docking

Analysis of the Binding Specificity of Outer Membrane Protein N toward Glucose, Maltose, and Sucrose Using Molecular Docking

Siwat Phunimit[1], Pitipat Sopa[2], Wichayaphorn Sonphakdee[3], Anupong Tankrathok[4], and Watcharin Chumjan[5*]

[1]Saraburiwitthayakhom School, 532 Phahonyothin Road, Pakphriao Sub-district, Mueang Saraburi District, Saraburi 18000, Thailand

[2]Banphai School, 851 Moo 1, Chenchob Thit Road, Nai Mueang Subdistrict, Ban Phai District, Khon Kaen 40110, Thailand

[3]Khonkeanwittayayon School, 58 Na Mueang Rd, Nai Mueang, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen 40000, Thailand

[4]Department of Biotechnology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand

[5]Department of Chemistry, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding author: chumjanw@gmail.com or watcharin.cu@rmuti.ac.th, 061-601-6335

บทคัดย่อ

โปรตีน Outer membrane protein N (OmpN) เป็นพอรินชนิดหนึ่งที่อยู่บริเวณเยื่อหุ้มชั้นนอกของแบคทีเรียแกรมลบ มีโครงสร้างแบบ β-barrel และรวมตัวอยู่ในรูปสามหน่วยย่อย ทำหน้าที่ลำเลียงสารโมเลกุลขนาดต่ำกว่า 600 Da ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและหน้าที่จึงมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจกลไกการนำส่งสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และการประยุกต์ใช้งานด้านชีวภาพในอนาคต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายตำแหน่งกรดอะมิโนบริเวณ constriction site ของโปรตีน OmpN ที่เกี่ยวข้องกับการนำส่งน้ำตาลกลูโคส มอลโทส และซูโครส ด้วยเทคนิค Molecular Docking ผลการศึกษา พบว่าน้ำตาลซูโครส (-8.3 kcal/mol) แสดงค่าความจำเพาะในการจับสูงกว่ามอลโทส (-6.1 kcal/mol) และกลูโคส (-5.7 kcal/mol) ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายตำแหน่งการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดอะมิโนกับโมเลกุลน้ำตาล โดยซูโครสมีปฏิสัมพันธ์กับกรดอะมิโน ASP127, TYR120, LEU129, GLU131, PRO130, ARG58 และ LYS37 ขณะที่มอลโทสมีปฏิสัมพันธ์กับ GLU131, LEU129, ASP127, ASP135, TYR56 และ ARG58 และกลูโคสมีปฏิสัมพันธ์กับ GLY133 และ ARG147 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโปรตีน OmpN มีความจำเพาะต่อการจับกับน้ำตาลโมเลกุลคู่สูงกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว แสดงให้เห็นว่ากรดอะมิโนตรงบริเวณ constriction site ส่งผลต่อการคัดเลือกและการลำเลียงสารสำคัญผ่านช่องโปรตีน OmpN และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษากลไกการนำส่งสารสำคัญ รวมถึงการออกแบบโครงสร้างสารสำคัญเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านเทคโนโลยีชีวภาพในอนาคตอันใกล้

คำสำคัญ: โปรตีน OmpN; การจำลองการจับระดับโมเลกุล; บริเวณ Constriction Site; การลำเลียงน้ำตาล; ค่าความจำเพาะในการจับ

Abstract

Outer membrane protein N (OmpN) is a porin located in the outer membrane of Gram-negative bacteria. It possesses a trimeric β-barrel structure and functions as a channel for the transport of hydrophilic molecules smaller than 600 Da across the bacterial outer membrane, playing an essential role in bacterial survival. Therefore, understanding its structural and functional properties is important for elucidating the mechanisms of molecular transport and for future biotechnological applications. This study aimed to predict the amino acid residues located at the constriction site of OmpN involved in the transport of glucose, maltose, and sucrose using molecular docking analysis. The results revealed that sucrose exhibited the highest binding affinity (-8.3 kcal/mol), followed by maltose (-6.1 kcal/mol) and glucose (-5.7 kcal/mol). These findings were consistent with the predicted hydrogen-bond interactions between amino acid residues and sugar molecules. Sucrose interacted with ASP127, TYR120, LEU129, GLU131, PRO130, ARG58, and LYS37, whereas maltose interacted with GLU131, LEU129, ASP127, ASP135, TYR56, and ARG58. In contrast, glucose interacted only with GLY133 and ARG147. The results indicate that OmpN exhibits greater binding specificity toward disaccharides than monosaccharides. Furthermore, the amino acid residues located at the constriction site appear to play a crucial role in substrate selectivity and molecular transport through the OmpN channel. These findings provide fundamental insights into the transport mechanism of OmpN and may contribute to the rational design of biomolecules and biotechnological applications in the future.

Keywords: Outer membrane protein N (OmpN); Molecular Docking; Constriction Site; Sugar Transport; Binding Affinity

1. Introduction

Outer membrane protein N (OmpN) is a porin located in the outer membrane of Gram-negative bacteria, particularly in *Escherichia coli* (*E. coli*). Similar to other classical porins, OmpN adopts a trimeric β-barrel structure that forms water-filled channels facilitating the passive diffusion of small hydrophilic molecules across the bacterial outer membrane [1]. Porins play a crucial role in nutrient uptake, osmotic regulation, and bacterial adaptation to environmental changes by controlling membrane permeability [2]. Structural studies have demonstrated that OmpN shares significant similarities with the major porins OmpF and OmpC, including the presence of a constriction site that governs substrate selectivity and transport efficiency [3-4]. Furthermore, the amino acid residues lining the pore lumen contribute to substrate recognition and molecular translocation through electrostatic and hydrogen-bonding interactions [5]. Therefore, understanding the structural and functional properties of OmpN is essential for elucidating the molecular mechanisms of substrate transport across the bacterial outer membrane. OmpN from a non-pathogenic Gram-negative bacterium serves as an excellent model for characterizing porin-mediated molecular transport and provides fundamental knowledge that can be translated to homologous porins in clinically important Gram-negative pathogens. Such insights may support the development of antimicrobial agents and nanoparticle- or peptide-based delivery systems that exploit porin channels to enhance the intracellular delivery of therapeutic molecules. Ultimately, OmpN offers a promising platform for advancing antimicrobial research, protein engineering, and biotechnological applications aimed at overcoming the permeability barrier of Gram-negative pathogens.

Previous studies have demonstrated that sugar-specific porins play a crucial role in the uptake of carbohydrates across the outer membrane of Gram-negative bacteria. Among these proteins, maltoporin (LamB) from *E. coli* has been extensively investigated as a model system for understanding sugar transport mechanisms. Structural and mutagenesis analyses revealed that the constriction region of LamB contains specific amino acid residues involved in substrate recognition and maltodextrin translocation, indicating that sugar transport is governed by both steric and electrostatic interactions [6-7]. Crystallographic studies further showed that different sugars exhibit distinct binding orientations and permeation efficiencies within the LamB channel, highlighting the importance of pore architecture in substrate selectivity [8]. More recently, computational approaches such as molecular docking and molecular dynamics (MD) simulations have been widely employed to investigate transport pathways and ligand–protein interactions in sugar-specific porins. For example, Coines et al. (2019) used multiscale molecular simulations to characterize glucose transport through the OprB porin of

Pseudomonas species and identified key residues within the constriction region that contribute to substrate binding and translocation [9]. Similarly, MD simulations of the sucrose-specific porin ScrY revealed that hydrogen-bond networks and pore-lining residues strongly influence sucrose diffusion through the channel [10]. Collectively, these studies demonstrate that combining structural biology, mutagenesis, electrophysiological measurements, molecular docking, and molecular dynamics simulations provides valuable insights into the molecular determinants governing sugar recognition, selectivity, and transport through bacterial porins. Therefore, this study aimed to evaluate and compare the binding affinity and interaction sites of glucose, maltose, and sucrose with OmpN using molecular docking analysis. Unlike previous studies, which have primarily focused on the structural characterization, expression, permeability, and transport properties of OmpN, this work specifically investigates the molecular basis of substrate recognition and sugar selectivity. By predicting the binding energies, interaction patterns, and amino acid residues involved in ligand recognition, this study provides mechanistic insights into how OmpN discriminates among structurally related carbohydrates before their translocation through the porin channel. These computational findings establish a theoretical framework for understanding the substrate specificity of OmpN and provide valuable guidance for subsequent experimental validation. Furthermore, the knowledge gained from this study may contribute to the rational engineering of porins with tailored transport properties and support the development of porin-mediated delivery systems for antimicrobial agents and other bioactive molecules.

2. Method

The tertiary structure of OmpN was predicted using I-TASSER [11]. Molecular docking simulations between OmpN and the sugar molecules glucose, maltose, and sucrose were performed using HDOCK. Docking complexes were visualized in PyMOL, where ligands were displayed in ball-and-stick mode and interacting amino acid residues were identified and highlighted. Protein structures were represented in cartoon mode, and representative images were generated from optimized viewing angles. The interaction profiles of the three sugars were compared based on their docking poses and interacting residues. Docking images were organized in Microsoft PowerPoint, and the amino acid residues involved in ligand binding were recorded in Microsoft Word for subsequent comparative analysis.

3. Results and Discussion

The molecular docking analysis was performed to investigate the interactions between OmpN and three sugar molecules, namely glucose, maltose, and sucrose. The binding affinities and interacting amino acid residues are summarized in Table 1, while the

docking conformations are shown in Figure 1. The results revealed that sucrose exhibited the highest binding affinity toward OmpN (−8.3 kcal/mol), followed by maltose (−6 . 1 kcal/mol) and glucose (−5.7 kcal/mol). The more negative binding energy of sucrose indicates a more stable and favorable interaction with OmpN compared with the other tested sugars.

Table 1 Predicted interacting amino acid residues and binding affinities of OmpN and ScrY with sugar substrates based on molecular docking analysis

Protein	substates	Amino acid residue (Affinity)
OmpN (This study)	Glucose	ARG58, ARG96, GLU131, GLY133, ASP135, ARG147 (-5.7 kcal/mol)
	Maltose	GLU131, LEU129, ASP127, ASP135, TYR56, ARG58 (-6.1 kcal/mol)
	Sucrose	ASP127, TYR120, LEU129, GLU131, PRO130, ARG58, LYS37 (-8.3 kcal/mol)
ScrY (Steinkamp et a., 2016)	Sucrose	ARG161, ASP201, ASP199, GLU120, ARG80, ARG110

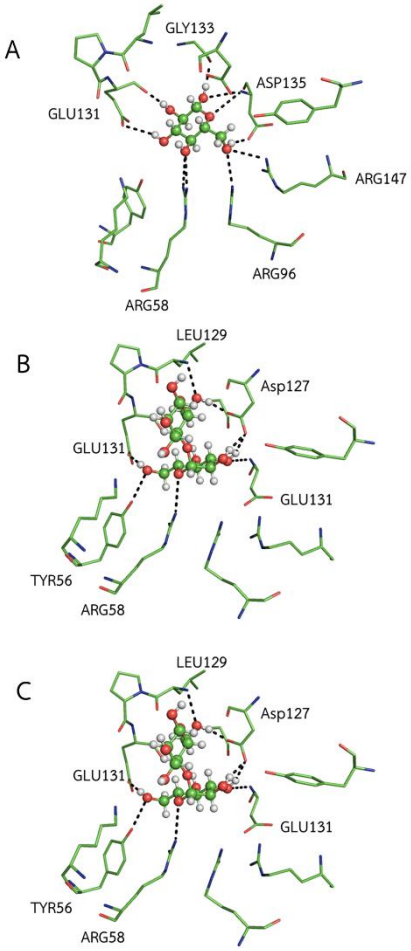


Figure 1 Predicted binding interactions between OmpN and sugar substrates obtained from molecular docking analysis. The docked complexes illustrate the interacting amino acid residues involved in substrate recognition and binding. (A) OmpN–glucose complex showing interactions with ARG58, ARG96, GLU131, GLY133, ASP135, and ARG147. (B) OmpN–maltose complex showing interactions with GLU131, LEU129, ASP127, ASP135, TYR56, and ARG58. (C) OmpN–sucrose complex showing interactions with ASP127, TYR120, LEU129, GLU131, PRO130, ARG58, and LYS37.

As shown in Table 1 and Figure 1, glucose interacted with six amino acid residues within the OmpN binding pocket, namely ARG58, ARG96, GLU131, GLY133, ASP135, and ARG147. The relatively small number of interacting residues indicates a limited binding interface between glucose and OmpN, which may contribute to its comparatively weak binding affinity. Among these residues, ARG147, a positively charged amino acid, is likely involved in stabilizing the glucose molecule through hydrogen bonding and electrostatic interactions, whereas GLY133, owing to its small side chain, may provide structural flexibility that facilitates ligand accommodation within the pore. These molecular interactions are consistent with the relatively weak docking affinity of glucose (−5.7 kcal/mol), suggesting that glucose is unlikely to be a preferred substrate for OmpN.

In contrast, maltose exhibited a higher binding affinity (−6.1 kcal/mol) and interacted with six amino acid residues, including TYR56, ARG58, ASP127, LEU129, GLU131, and ASP135. The increased number of interactions compared with glucose suggests that maltose forms a more extensive binding network within the OmpN pore. Charged residues such as ASP127, GLU131, and ASP135 may contribute to the formation of hydrogen bonds with the hydroxyl groups of maltose, while ARG58 may provide additional electrostatic stabilization. The presence of multiple interactions likely enhances the stability of the OmpN–maltose complex and contributes to the stronger binding affinity observed. Similar findings have been reported in carbohydrate-binding proteins, where an increased number of protein–ligand contacts generally correlates with enhanced binding stability [10].

Among the three tested sugars, sucrose showed the strongest interaction with OmpN, exhibiting a binding affinity of −8.3 kcal/mol. The sucrose molecule interacted with seven amino acid residues, namely LYS37, ARG58, ASP127, TYR120, LEU129, PRO130, and GLU131. The larger number of interacting residues suggests the formation of a broader interaction interface, which may increase the stability of the protein–ligand complex. Notably, several residues involved in sucrose binding, including ARG58, ASP127, LEU129, and GLU131, were also identified in the maltose-binding complex. This finding suggests that these residues may form a common substrate recognition region within OmpN. The involvement of charged amino acids such as ARG58, ASP127, and GLU131 further indicates that hydrogen bonding and electrostatic interactions play important roles in sugar recognition and binding.

Comparison of the docking complexes revealed that the number of interacting amino acid residues increased in the order glucose < maltose < sucrose, which corresponded closely with the observed binding affinities. This relationship suggests that the extent of protein–ligand interactions contributes significantly to the stability of the complexes. Similar observations have been reported for bacterial porins, where substrate selectivity is

influenced by the size, shape, and chemical properties of the channel-lining residues [2, 5]. The stronger interactions observed for maltose and sucrose may indicate that OmpN preferentially accommodates larger sugar molecules compared with the monosaccharide glucose.

The repeated involvement of ASP1 2 7 , LEU129, GLU131, and ARG58 in both maltose and sucrose binding suggests that these residues may play critical roles in substrate recognition and transport. Previous studies have demonstrated that charged residues located within porin channels contribute significantly to substrate selectivity by mediating hydrogen-bonding and electrostatic interactions with transported molecules [5, 12]. Therefore, these residues may represent key determinants of OmpN substrate specificity.

Although molecular docking provides valuable insights into potential protein–ligand interactions, the results remain computational predictions and require experimental validation. Further studies employing liposome swelling assays, sugar uptake assays, or site-directed mutagenesis of key residues such as ARG58, ASP127, LEU129, and GLU131 would be useful for confirming their roles in sugar transport. Nevertheless, the present findings provide preliminary evidence that OmpN may preferentially interact with disaccharides, particularly sucrose, and that specific amino acid residues within the pore region contribute to substrate recognition and binding specificity.

4. Conclusion

Molecular docking analysis revealed that OmpN interacts with glucose, maltose, and sucrose through distinct binding modes, demonstrating substrate-dependent recognition at the molecular level. Among the tested sugars, sucrose exhibited the strongest binding affinity (−8.3 kcal/mol) and formed the largest interaction network with residues lining the pore, whereas maltose (−6.1 kcal/mol) and glucose (−5.7 kcal/mol) showed progressively weaker interactions. Notably, ARG58, ASP127, LEU129, and GLU131 were consistently involved in the recognition of both maltose and sucrose, suggesting that these conserved residues constitute a key substrate-binding region responsible for carbohydrate selectivity. The stronger interaction observed with sucrose indicates that OmpN may preferentially recognize larger carbohydrates through cooperative hydrogen-bonding and electrostatic interactions rather than molecular size alone. These findings provide new mechanistic insights into the substrate recognition process of OmpN, extending beyond previous studies that primarily focused on porin expression, structural characterization, or transport activity. By identifying the amino acid residues governing ligand specificity, this study establishes a molecular framework for predicting substrate preference and offers a rational basis for engineering OmpN with

tailored transport properties. Such knowledge may facilitate the development of porin-based biosensors, selective membrane transport systems, and porin-mediated delivery platforms capable of improving the uptake of carbohydrates, antimicrobial agents, or other bioactive compounds into Gram-negative bacteria. Collectively, this work advances our understanding of OmpN-mediated molecular recognition and provides an important foundation for future experimental validation and biotechnological applications.

5. Acknowledgments

This work was supported by Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under contract no. FF69/KKC/065 and the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Khon Kaen campus.

6. References

[1] Prilipov, A., Phale, P. S., Van Gelder, P., Rosenbusch, J. P., & Koebnik, R. (1998). Identification and characterization of two quiescent porin genes, *nmpC* and *ompN*, in *Escherichia coli* BE. Journal of Bacteriology, 180(13), 3388–3392.

[2] Delcour, A. H. (2009). Outer membrane permeability and antibiotic resistance. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics, 1794(5), 808–816.

[3] Baslé, A., Rummel, G., Storici, P., Rosenbusch, J. P., & Schirmer, T. (2006). Crystal structure of osmoporin OmpC from *Escherichia coli* at 2.0 Å resolution. Journal of Molecular Biology, 362(5), 933–942.

[4] Subbarao, G. V., & van den Berg, B. (2006). Crystal structure of the monomeric porin OmpG. Journal of Molecular Biology, 360(4), 750–759.

[5] Nikaido, H. (2003). Molecular basis of bacterial outer membrane permeability revisited. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 67(4), 593–656.

[6] Klebba, P. E., Hofnung, M., & Charbit, A. (1994). A model of maltodextrin transport through the sugar-specific porin, LamB, based on deletion analysis. The EMBO Journal, 13(19), 4670–4675.

[7] Charbit, A. (2003). Maltodextrin transport through LamB. Frontiers in Bioscience, 8, s265–s274.

[8] Meyer, J. E. W., Hofnung, M., & Schulz, G. E. (1997). Channel specificity: Structural basis for sugar discrimination and differential flux rates in maltoporin. Journal of Molecular Biology, 272(1), 56–63.

[9] Coines, J., Acosta-Gutierrez, S., Bodrenko, I., Rovira, C., & Ceccarelli, M. (2019). Glucose transport via the pseudomonad porin OprB: Implications for the design of Trojan Horse anti-infectives. Physical Chemistry Chemical Physics, 21(16), 8457–8463.

[10] Steinkamp, W., Schulten, K., & Bond, P. J. (2016). Characteristics of sucrose transport through the sucrose-specific porin ScrY studied by molecular dynamics simulations. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 4, 9.

[11] Yang J, Yan R, Roy A, Xu D, Poisson J, Zhang Y. The I-TASSER Suite: protein structure and function prediction. Nat Methods. 2015 Jan;12(1):7-8.

[12] Schulz, G. E. (2002). The structure of bacterial outer membrane proteins. Biochimica et Biophysica Acta, 1565(2), 308–317.

การวิเคราะห์โปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายภายใต้สภาวะการตกตะกอนในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันด้วยเทคนิค SDS-PAGE

Analysis of Target Soy Protein Precipitation at Different Buffer pH Conditions Using SDS-PAGE

Khrit Thongwon[1], and Watcharin Chumjan[2*]

[1]Lincoln High School, 25 Boundary Road, Lincoln 7608, Canterbury, New Zealand

[2]Department of Chemistry, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen campus, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding author: chumjanw@gmail.com or watcharin.cu@rmuti.ac.th, 061-601-6335

บทคัดย่อ

โปรตีนถั่วเหลืองเป็นโปรตีนจากพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญ การตกตะกอนของโปรตีนถั่วเหลืองทำได้โดยการปรับค่าพีเอชให้ใกล้กับจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนถั่วเหลือง (ประมาณ pH 4.5) ส่งผลให้โปรตีนเกิดการรวมตัวและตกตะกอน จากนั้นสามารถแยกโปรตีนที่ตกตะกอนได้ด้วยการปั่นเหวี่ยง และนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) เพื่อศึกษารูปแบบโปรตีนภายใต้สภาวะค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตกตะกอนโปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน และวิเคราะห์โครงสร้างโปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE โดยนำโปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายมาบ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชต่างกัน พร้อมเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อแยกโปรตีนที่ตกตะกอนออกจากสารละลายส่วนใส และนำทั้งส่วนตะกอนและสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE ผลการทดลองพบว่าโปรตีนถั่วเหลืองเป้าหมายสามารถตกตะกอนได้ดีในช่วง pH 4–6 เนื่องจากช่วง pH ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีน ส่งผลให้แรงผลักทางไฟฟ้าสถิตลดลงและเกิดการรวมตัวของโปรตีนได้ดี ในขณะที่พบการตกตะกอนเพียงเล็กน้อยหรือไม่พบเลยที่ pH สูงกว่า 6 เนื่องจากโปรตีนมีประจุสุทธิมากขึ้น จึงละลายได้ดีในสารละลายบัฟเฟอร์มากขึ้น

คำสำคัญ: โปรตีนถั่วเหลือง; การตกตะกอนโปรตีน; ค่าพีเอช; จุดไอโซอิเล็กทริก; Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis

Abstract

Soybean protein is a valuable plant-based protein with high nutritional value and important functional properties. Soybean protein can be precipitated by adjusting the solution pH to the protein's isoelectric point (approximately pH 4.5), where the net surface charge is minimized, promoting protein aggregation and precipitation. The precipitated protein can then be separated by centrifugation and analyzed using Sodium Dodecyl Sulfate–Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) to examine protein profiles under different pH conditions. Therefore, this study aimed to precipitate the target soybean protein in buffer solutions with different pH values and to characterize the protein profiles by SDS-PAGE. The target soybean protein was incubated in buffer solutions at various pH values with continuous shaking at room temperature for 1 hour. The samples were subsequently centrifuged at 12,000 rpm for 2 hours to separate the protein precipitate from the supernatant. Both the pellet and supernatant fractions were then analyzed by SDS-PAGE. The results demonstrated that the target soybean protein precipitated most efficiently at pH 4–6, which is close to its isoelectric point. Under these conditions, electrostatic repulsion between protein molecules was reduced, facilitating protein aggregation and precipitation. In contrast, little or no precipitation was observed at pH values above 6, where the proteins carried a greater net charge, resulting in increased solubility in the buffer solution.

Keywords: Soy protein; Protein precipitation; Buffer pH; Isoelectric point; Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis

1. Introduction

Soybean proteins are valuable plant-derived proteins with high nutritional quality and diverse functional properties, making them important ingredients in the food, pharmaceutical, and biotechnology industries. Conventional soy protein purification primarily relies on isoelectric precipitation at approximately pH 4.5, where the majority of soybean proteins exhibit minimal net charge and precipitate simultaneously, enabling the production of soy protein isolates. Although this approach is simple and cost-effective, it provides limited selectivity for isolating individual protein fractions with distinct structural and functional characteristics. Among soybean storage proteins, β-conglycinin (7S globulin) has attracted considerable attention because of its excellent emulsifying, foaming, water-holding, and gel-forming properties, as well as its reported antioxidant, hypocholesterolemic, and bioactive effects. Importantly, β-conglycinin possesses an isoelectric point (pI) of approximately 4.9–6.0, which differs from the overall pI of soybean protein isolates. Therefore, selective precipitation near its pI offers a promising strategy for enriching β-conglycinin while minimizing contamination from other soybean proteins, thereby providing a higher-purity protein fraction suitable for structural characterization, functional property evaluation, bioactive peptide production, and the development of high-value functional foods and nutraceutical ingredients [1-3].

Protein precipitation based on pH adjustment is one of the most practical and scalable purification techniques because protein solubility is governed by its net surface charge. As the solution pH approaches the isoelectric point (pI) of a target protein, electrostatic repulsion decreases, promoting protein aggregation and precipitation, whereas proteins with different pI values remain relatively soluble [1, 4-5]. Despite the widespread application of isoelectric precipitation for producing soy protein isolates, relatively few studies have systematically investigated selective pH precipitation for enriching β-conglycinin according to its specific isoelectric point [2, 3]. Therefore, this study investigated the precipitation behavior of soybean proteins over a pH range of 4–10 to determine the optimal condition for selectively enriching β-conglycinin. The resulting protein fractions were subsequently characterized by Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) to evaluate protein composition and purification efficiency. This study provides a simple, economical, and scalable approach for the selective purification of β-conglycinin and establishes a foundation for its future applications in protein chemistry, food processing, functional ingredient development, and bioactive peptide production.

2. Method

Target soy protein (β-conglycinin, 52.5 kDa) was incubated in buffer solutions at various pH values (pH 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) with shaking at 25 ±3 °C for 1 h. The mixtures were then centrifuged at 12,000 rpm for 2 h to separate the precipitated proteins from the supernatant fractions. Both pellet and supernatant fractions were subsequently analyzed by 12% SDS-PAGE. Prior to analysis, all pellet fractions were resuspended in 100 µL of H_2O and vortexed until completely dissolved. Subsequently, 10 µL of each sample was transferred into a microcentrifuge tube and mixed with 4× SDS-PAGE loading buffer to obtain a final concentration of 1×. All samples were centrifuged before being loaded onto 12% SDS-PAGE gels. Electrophoresis was performed at 120 Volts for 100 min.

3. Results and Discussion

The effect of pH on the precipitation of target soy proteins was investigated by dissolving the proteins in buffer solutions at pH 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, and 10.0. After high-speed centrifugation, the protein fractions were analyzed using SDS-PAGE, as shown in Figure 1. The results demonstrated that protein precipitation occurred effectively at pH values ranging from 4.0 to 6.0, whereas lower levels of precipitation were observed at pH 7.0 and 8.0. In contrast, very faint or no protein bands were detected at pH 9.0 and 10.0, indicating that these alkaline conditions were not suitable for the precipitation of the target soy proteins.

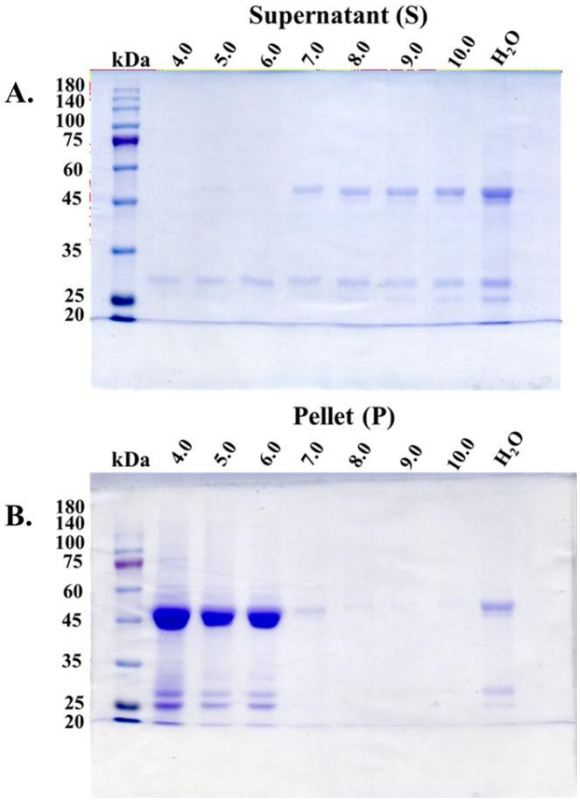


Figure 1 12% SDS-PAGE analysis of target soy protein precipitation at different pH values. Target soy proteins were dissolved in buffer solutions at pH 4.0–10.0 and subjected to high-speed centrifugation before SDS-PAGE analysis. (A) Supernatant fractions and (B) pellet fractions obtained after centrifugation.

The results demonstrated that pH had a significant effect on the precipitation behavior of the target soy proteins. Efficient precipitation was observed at pH 4.0–6.0, which may be associated with the isoelectric point (pI) of major soy proteins, particularly glycinin (pI 6.4) [6] and β-conglycinin (pI 4.9-6.0) [7]. At the isoelectric point, the net charge on the protein surface is minimized, resulting in reduced electrostatic repulsion between protein molecules and promoting aggregation

and precipitation [8]. Therefore, the stronger protein bands detected in the pellet fractions at acidic pH values suggest that the target proteins exhibited lower solubility under these conditions.

In contrast, lower precipitation was observed at pH 7.0 and 8.0, while very faint or no protein bands were detected at pH 9.0 and 10.0. These findings indicate that alkaline conditions increased protein solubility, likely due to enhanced negative charges on the protein surface that increased electrostatic repulsion and prevented protein aggregation [9]. Similar observations have been reported in previous studies showing that soy proteins are highly soluble under alkaline conditions but exhibit minimum solubility near their isoelectric point [10].

In addition, extreme alkaline pH conditions may induce conformational changes or partial denaturation of soy proteins, leading to alterations in intermolecular interactions and affecting precipitation efficiency [11]. The SDS-PAGE results therefore confirmed that pH values between 4.0 and 6.0 were the most suitable conditions for precipitating the target soy proteins and may be useful for improving the purification process of soy protein fractions.

4. Conclusion

In conclusion, pH significantly affected the precipitation efficiency of the target soy proteins. The SDS-PAGE analysis demonstrated that protein precipitation occurred most effectively at pH 4.0–6.0, while lower precipitation was observed at neutral and alkaline pH conditions. Very faint or no protein bands were detected at pH 9.0 and 10.0, indicating that highly alkaline conditions were unsuitable for precipitating the target soy proteins. These findings suggest that acidic pH conditions near the isoelectric point of soy proteins are favorable for protein aggregation and precipitation. Therefore, pH 4.0–6.0 may be considered the optimal range for the purification and recovery of target soy proteins for further biochemical and functional analyses.

5. Acknowledgments

This work was supported by Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under contract no. FF69/KKC/065 and the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Khon Kaen campus.

6. References

[1] Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (2017). Fennema's Food Chemistry (5th ed.). CRC Press.

[2] Maruyama, N., Adachi, M., Takahashi, K., Yagasaki, K., Kohno, M., Takenaka, Y., Okuda, E., Nakagawa, S., Mikami, B., & Utsumi, S. (2001). Crystal structures of recombinant and native β-conglycinin β homotrimers. European Journal of Biochemistry, 268(13), 3595–3604.

[3] Nishinari, K., Fang, Y., Guo, S., & Phillips, G. O. (2014). Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification. Food Hydrocolloids, 39, 301–318.

[4] Scopes, R. K. (1994). Protein Purification: Principles and Practice (3rd ed.). Springer.

[5] Hofland, G. W., van Es, M., van de Velde, F., & Witkamp, G. J. (2000). Isoelectric precipitation of soybean protein using carbon dioxide as a volatile acid. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications, 743(1–2), 357–368.

[6] Mo, X., Zhong, Z., Wang, D., & Sun, X. (2006). Soybean glycinin subunits: characterization of physicochemical and adhesion properties. Journal of agricultural and food chemistry, 54(20), 7589-7593.

[7] Mulalapele, L. T., & Xi, J. (2021). Detection and inactivation of allergens in soybeans: A brief review of recent research advances. Grain & Oil Science and Technology, 4(4), 191-200.

[8] Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (2008). Fennema's food chemistry (4th ed.). CRC Press.

[9] Kinsella, J. E. (1979). Functional properties of soy proteins. Journal of the American Oil Chemists' Society, 56(3), 242–258.

[10] Tang, C. H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57(12), 2636–2679.

[11] Lakemond, C. M. M., de Jongh, H. H. J., Hessing, M., Gruppen, H., & Voragen, A. G. J. (2000). Soy glycinin: Influence of pH and ionic strength on solubility and molecular structure at ambient temperatures. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48(5), 1985–1990.

การศึกษานำร่องการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM เพื่อจำแนกกลุ่มพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ของผู้บริโภค: กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา

A Pilot Study on Applying the RFM Model to Segment Consumers' Online Purchasing Behavior: A Case Study of Nakhon Ratchasima Province

รัศมี ธูปน้ำคำ[1], เอกชัย แซ่จึง[2]

[1] นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: rassamee.th@rmuti.ac.th, 0651914479

บทคัดย่อ

การศึกษานำร่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM กับข้อมูลพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ที่ได้จากแบบสอบถาม และเพื่อจำแนกกลุ่มผู้บริโภคออนไลน์ในจังหวัดนครราชสีมา เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามออนไลน์ที่ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน (IOC = 0.66–1.00) ได้รับแบบสอบถามกลับจำนวน 245 ชุด และคงเหลือข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ 229 ชุด หลังคัดกรองผู้ที่อาศัยในจังหวัดและเคยซื้อออนไลน์ ผู้วิจัยแปลงคำตอบเป็นคะแนน R, F และ M ในช่วง 1–5 คะแนน และจำแนกกลุ่มด้วยเกณฑ์ระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (Recency) ร่วมกับค่าความถี่–มูลค่ารวม ผลการศึกษาพบผู้บริโภค 4 กลุ่ม ได้แก่ ลูกค้าชั้นดี (ร้อยละ 41.0) ลูกค้ามีศักยภาพ (ร้อยละ 23.1) กลุ่มเสี่ยงหลุด (ร้อยละ 12.7) และกลุ่มห่างหาย (ร้อยละ 23.1) โดยคะแนนระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (Recency) มีค่าเฉลี่ยสูง (4.50) และพบว่าสัดส่วนเพศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่ม ($p < 0.05$) ผลชี้ว่าแนวทาง Questionnaire-based RFM ซึ่งต่างจากงานเดิมที่อาศัยข้อมูลธุรกรรมจริง มีความเป็นไปได้ในการจำแนกกลุ่มเชิงพฤติกรรมเบื้องต้น และเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาในวงกว้างต่อไป

คำสำคัญ: แบบจำลอง RFM, การแบ่งกลุ่มลูกค้า, พฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์, การศึกษานำร่อง

Abstract

This pilot study aims to test the appropriateness of applying the RFM model to online purchasing behavior data collected through a questionnaire and to segment online consumers in Nakhon Ratchasima. Based on Cochran's formula, the recommended sample size for the full-scale study was 385 respondents. Data were collected via an online questionnaire validated by three experts (IOC 0.66–1.00). Of 245 responses, 229 valid responses from provincial residents who had purchased online were analyzed. Responses were converted into R, F, and M scores (1–5) and segmented using recency together

with combined frequency-monetary value. The analysis identified four segments: Champions (41.0%), Promising customers (23.1%), At-Risk (12.7%), and Hibernating (23.1%). The recency score was highly skewed (mean 4.50), so frequency and monetary value were the principal segmenting dimensions, and gender differed significantly across segments ($p < 0.05$). The findings highlight the value of a questionnaire-based RFM approach, which differs from prior transaction-based studies, as a feasible method for preliminary behavioral segmentation and a basis for a larger-scale study.

Keywords: RFM model, Customer Segmentation, Online Purchasing Behavior, Pilot Study.

1. บทนำ

ปัจจุบันสังคมไทยกำลังเปลี่ยนผ่านสู่สังคมดิจิทัลอย่างรวดเร็ว จากผลสำรวจการใช้เทคโนโลยีดิจิทัล ปี 2567 พบว่าประชากรอายุ 16–74 ปี มีอัตราการใช้อินเทอร์เน็ตสูงถึงร้อยละ 90.7 โดยใช้อินเทอร์เน็ตเฉลี่ยวันละ 9 ชั่วโมง 20 นาที [1] ทั้งนี้พฤติกรรมการใช้อินเทอร์เน็ตแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเป็นที่ตั้งของจังหวัดนครราชสีมา มีระยะเวลาการใช้อินเทอร์เน็ตเฉลี่ยวันละ 6 ชั่วโมง 59 นาที [2] สอดคล้องกับมูลค่าพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของไทยที่เติบโตต่อเนื่องจากประมาณ 3.78 ล้านล้านบาทในปี 2563 เป็นประมาณ 6.13 ล้านล้านบาทในปี 2567 (ประมาณการ) [3]

การเติบโตดังกล่าวทำให้การแข่งขันในตลาดออนไลน์ทวีความรุนแรงขึ้น การจำแนกกลุ่มผู้บริโภค (Customer Segmentation) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้ผู้ประกอบการออกแบบกลยุทธ์ทางการตลาดได้ตรงกับกลุ่มเป้าหมาย [4] แบบจำลอง RFM เป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคตามพฤติกรรมการซื้อ เพื่อสนับสนุนการวางกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละกลุ่ม ในงานที่ใช้ข้อมูลธุรกรรมขนาดใหญ่ บางงานวิจัย มักประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการจัดกลุ่มข้อมูล เช่น K-Means เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกกลุ่มลูกค้าที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน [5], [6] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้ RFM กับข้อมูลธุรกรรมจริง ขณะที่การประยุกต์ใช้ RFM กับข้อมูลจากแบบสอบถาม โดยเฉพาะในบริบทของผู้บริโภคระดับจังหวัด ยังมีงานศึกษาไม่มากนัก จึงเป็นช่องว่างที่การศึกษานี้มุ่งเติมเต็ม โดยประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้ Questionnaire-based RFM เพื่อจำแนกกลุ่มผู้บริโภคออนไลน์ในจังหวัดนครราชสีมา

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM กับข้อมูลพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ที่ได้จากแบบสอบถาม

2.2 เพื่อจำแนกกลุ่มผู้บริโภคออนไลน์ในจังหวัดนครราชสีมาตามมิติระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (Recency) ความถี่ในการซื้อ (Frequency) และมูลค่าการซื้อ (Monetary)

2.3 เพื่อศึกษาลักษณะทางประชากรศาสตร์และปัจจัยในการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคในแต่ละกลุ่มพฤติกรรม (RFM Segments)

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การแบ่งกลุ่มลูกค้าและแบบจำลอง RFM

การแบ่งกลุ่มลูกค้าคือการจำแนกลูกค้าออกเป็นกลุ่มย่อยที่มีคุณลักษณะคล้ายกัน เพื่อให้ผู้ประกอบการเข้าใจความต้องการของแต่ละกลุ่มและออกแบบกลยุทธ์การตลาดได้ตรงเป้าหมาย [7] หนึ่งในเทคนิคที่ได้รับการยอมรับคือการวิเคราะห์แบบ RFM ซึ่งเสนอครั้งแรกโดย Hughes [8] โดยจำแนกลูกค้าจากระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด ความถี่ และมูลค่าการใช้จ่าย วิธีการให้คะแนนนิยมแบ่งแต่ละมิติเป็น 5 ระดับ โดยคะแนน 5 มีค่ามากที่สุด เช่น กลุ่ม 555 คือกลุ่มที่ซื้อล่าสุด ซื้อบ่อย และใช้จ่ายสูง [9] RFM เป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการแบ่งกลุ่มลูกค้าเพื่อการส่งเสริมการขายแบบเฉพาะเจาะจง [10] ในระดับสากลมีการนำ RFM ไปใช้ร่วมกับการจัดกลุ่มแบบ K-Means และประเมินจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วย Elbow method และ Silhouette score เช่นงานของ [5] และ [11] ซึ่งจำแนกลูกค้าอีคอมเมิร์ซได้ 4 กลุ่ม พร้อมข้อเสนอแนะเชิงการตลาดรายกลุ่ม

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้ RFM ในประเทศไทยส่วนใหญ่อาศัยข้อมูลธุรกรรมจริง เช่น [12] ใช้ RFM ร่วมกับ K-Means กับข้อมูลลูกค้า 12,641 ราย จำแนกได้ 7 กลุ่ม และ [13] ใช้ RFM ร่วมกับ K-Means และ DBSCAN ภายใต้กรอบ CRISP-DM จำแนกได้ 3 กลุ่ม ในทำนองเดียวกัน [14] ใช้ RFM ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อความกับชุดข้อมูลธุรกรรมขนาดใหญ่ ในทางกลับกัน งานที่ศึกษาผู้บริโภคออนไลน์ด้วยแบบสอบถามมักใช้วิธีการเชิงสถิติอื่น เช่น [4] ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบและการถดถอยพหุคูณ และ [15] ใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับงานก่อนหน้า จะเห็นว่างานที่ใช้ RFM ทั้งในและต่างประเทศล้วนอาศัยข้อมูลธุรกรรมจริง และมักใช้อัลกอริทึมการจัดกลุ่มร่วมกับดัชนีวัดคุณภาพ ซึ่งมีจุดเด่นด้านความแม่นยำแต่มีข้อจำกัดคือต้องเข้าถึงข้อมูลธุรกรรม ขณะที่งานสำรวจผู้บริโภคด้วยแบบสอบถามเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายกว่าแต่ยังไม่นิยมประยุกต์ RFM จุดต่างของการศึกษานี้จึงอยู่ที่การทดสอบการนำ RFM มาใช้กับข้อมูลแบบสอบถามด้วยการให้คะแนนตามช่วงคำตอบในบริบทท้องถิ่น ซึ่งเป็นช่องว่างที่ยังมีการศึกษาน้อย

4. ขอบเขตการวิจัย

4.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

มุ่งเน้นแปลงข้อมูลพฤติกรรมการซื้อที่ได้จากแบบสอบถามให้อยู่ในรูปคะแนน RFM การจัดกลุ่ม (Segmentation) และการอธิบายลักษณะของแต่ละกลุ่มด้วยข้อมูลประชากรศาสตร์และปัจจัยในการตัดสินใจซื้อ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ไม่ครอบคลุมการสร้างแบบจำลองเชิงทำนาย

4.2 ขอบเขตด้านประชากร

ผู้ที่เคยซื้อสินค้าออนไลน์และอาศัยอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา (กลุ่มตัวอย่างนำร่องที่ใช้วิเคราะห์ 229 ราย)

5. ระเบียบวิธีวิจัย

5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรคือผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าออนไลน์ในจังหวัดนครราชสีมาซึ่งมีจำนวนไม่ทราบแน่ชัด ผู้วิจัยกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างสำหรับการศึกษาฉบับสมบูรณ์ด้วยสูตรของ Cochran [4] ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ไม่เกิน 5% โดยกำหนดสัดส่วนประชากร p=0.5 ซึ่งให้ขนาดตัวอย่างสูงสุด จึงสามารถย่อรูปสมการได้ดังนี้

$$n = \frac{Z^2}{4e^2} \qquad (1)$$

เมื่อ n คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

Z คือ ค่ามาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 1.96

e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้นได้เท่ากับ 5% เท่ากับ 0.05

$$n = \frac{1.96^2}{4(0.05)^2} = 384.16$$

ดังนั้นกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างไม่น้อยกว่า 385 คน เนื่องจากบทความนี้เป็นการศึกษานำร่อง จึงนำเสนอผลเบื้องต้นจากข้อมูลที่เก็บได้ ณ ขณะนี้ โดยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบสะดวก (Convenience Sampling) เผยแพร่แบบสอบถามผ่านช่องทางออนไลน์ เช่น สื่อสังคมออนไลน์และกลุ่มผู้บริโภคในจังหวัด กลุ่มเป้าหมายคือผู้ที่อาศัยอยู่ในจังหวัดนครราชสีมาและเคยซื้อสินค้าออนไลน์ โดยใช้คำถามคัดกรองด้านถิ่นที่อยู่และประสบการณ์การซื้อออนไลน์ในตอนต้นของแบบสอบถาม เก็บข้อมูลในช่วงระหว่างเดือนเมษายน–พฤษภาคม พ.ศ. 2569 ได้รับการตอบกลับ 245 ชุด และเมื่อคัดกรองแล้วคงเหลือข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ 229 ชุด

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือคือแบบสอบถามที่เผยแพร่ผ่าน Google Form ประกอบด้วย (1) คำถามคัดกรอง (2) ข้อมูลประชากรศาสตร์ (3) พฤติกรรมการซื้อตามตัวแปร RFM และ (4) ปัจจัยและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจซื้อ แบบสอบถามผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) อยู่ระหว่าง 0.66–1.00 และปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญก่อนนำไปเก็บข้อมูลจริง

5.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แนวคิด RFM กับข้อมูลจากแบบสอบถาม (Questionnaire-based RFM) โดยใช้การให้คะแนนตามช่วงคำตอบแทนข้อมูลธุรกรรมจริง ผู้วิจัยแปลงคำตอบเป็นคะแนน 1–5 ต่อมิติ ดังตารางที่ 1 โดยระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (R) ให้คะแนนแบบผกผัน (ซื้อล่าสุด = คะแนนสูง) ส่วนความถี่ (F) และมูลค่า (M) ให้คะแนนตามลำดับตัวเลือก โดยมิติมูลค่า (M) พิจารณาจากยอดใช้จ่ายรวมในรอบ 6 เดือน จากนั้นคำนวณคะแนน มูลค่า-ความถี่รวม FM = (F + M) / 2 การรวมคะแนน F และ M มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนมิติให้สามารถจำแนกกลุ่มในลักษณะสองมิติ (R × FM) ได้ง่าย และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษานำร่อง และจำแนกผู้บริโภคโดยเทียบคะแนน R และ FM กับค่าเฉลี่ยของกลุ่ม ตัวอย่าง ตามเกณฑ์ดังนี้

กลุ่มลูกค้าชั้นดี (Champions): R ≥ ค่าเฉลี่ย และ FM ≥ ค่าเฉลี่ย

กลุ่มลูกค้ามีศักยภาพ (Promising): R ≥ ค่าเฉลี่ย และ FM < ค่าเฉลี่ย

กลุ่มเสี่ยงหลุด (At-Risk): R < ค่าเฉลี่ย และ FM ≥ ค่าเฉลี่ย

กลุ่มห่างหาย (Hibernating): R < ค่าเฉลี่ย และ FM < ค่าเฉลี่ย

จากนั้นใช้สถิติเชิงพรรณนา (ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และมัธยฐาน) และการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มผู้บริโภคกับข้อมูลประชากรศาสตร์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยภาษา Python (ไลบรารี pandas และ SciPy) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้เป็นการรายงานด้วยตนเองของผู้ตอบ ผู้วิจัยตรวจสอบความครบถ้วนของคำตอบและคัดกรองด้วยคำถามคุณสมบัติ แต่ไม่สามารถยืนยันความถูกต้องเทียบกับข้อมูลธุรกรรมจริงได้

ตารางที่ 1 เกณฑ์การให้คะแนน RFM จากคำตอบในแบบสอบถาม

มิติ	ตัวเลือกคำตอบ	ค่าคะแนน
Recency (R)	ภายใน 7 วัน	5 (ผกผัน)
	8–30 วัน	4
	31–90 วัน	3
	91–180 วัน	2
	>180 วัน	1
Frequency (F)	1–2 ครั้ง	1
	3–5 ครั้ง	2
	6–10 ครั้ง	3
	11–20 ครั้ง	4
	>20 ครั้ง	5
Monetary (M)	<1,000 บาท	1
	1,000–2,999	2
	3,000–5,999บาท	3
	6,000–9,999	4
	≥10,000 บาท	5

6. ผลการวิจัย

6.1 ลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง

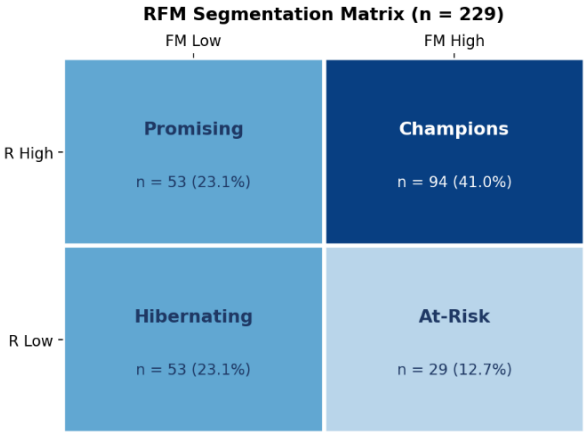
ผู้ตอบแบบสอบถามที่ใช้วิเคราะห์จำนวน 229 คน ส่วนใหญ่มีอายุ 25–44 ปี (ร้อยละ 65.9) เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 66.4) สถานภาพโสด (ร้อยละ 58.5) มีการศึกษาระดับปริญญาตรี (ร้อยละ 58.1) ประกอบอาชีพพนักงานบริษัทเอกชน (ร้อยละ 49.8) และมีรายได้ต่อเดือนอยู่ในช่วง 15,000–30,000 บาท (ร้อยละ 37.1)

6.2 คะแนน RFM และการจำแนกกลุ่ม

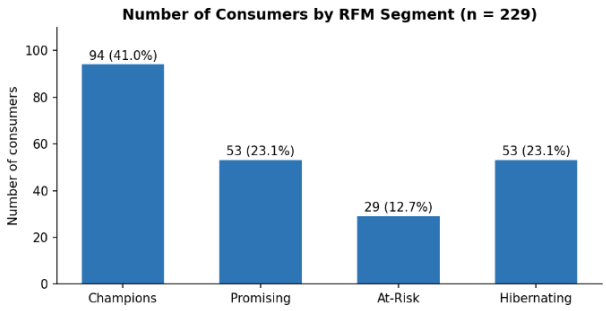
คะแนนเฉลี่ยของแต่ละมิติ ได้แก่ ระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (R) เท่ากับ 4.50 ความถี่ในการซื้อ (F) เท่ากับ 3.02 และมูลค่าการซื้อ (M) เท่ากับ 2.86 โดยมิติ R มีค่าเฉลี่ยสูง (มัธยฐาน = 5) คะแนนส่วนใหญ่กระจุกอยู่ในระดับสูง สะท้อนว่าผู้ตอบส่วนใหญ่มีการซื้อสินค้าออนไลน์ในช่วงที่ผ่านมา การจำแนกกลุ่มใช้ค่าเฉลี่ยของ R (4.50) และ FM (2.94) เป็นจุดตัด ส่งผลให้สามารถแบ่งผู้บริโภคออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2 รูปที่ 1 และรูปที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำแนกกลุ่มพฤติกรรมผู้บริโภคด้วยแบบจำลอง RFM (n = 229)

กลุ่มพฤติกรรม	จำนวน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย (R/F/M)	FM	ลักษณะเด่น
ลูกค้าชั้นดี (Champions)	94 (41.0%)	5.0/4.06/3.70	3.88	R สูง, FM สูง
ลูกค้ามีศักยภาพ (Promising)	53 (23.1%)	5.0/2.13/1.75	1.94	R สูง, FM ต่ำ
เสี่ยงหลุด (At-Risk)	29 (12.7%)	3.38/3.38/3.83	3.61	R ต่ำ, FM สูง
ห่างหาย (Hibernating)	53 (23.1%)	3.74/1.85/1.94	1.90	R ต่ำ, FM ต่ำ



รูปที่ 1 การจำแนกกลุ่ม RFM ตามระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (R) และมูลค่า-ความถี่รวม (FM)



รูปที่ 2 สัดส่วนของกลุ่มพฤติกรรมผู้บริโภคที่จำแนกด้วยแบบจำลอง RFM

6.3 ลักษณะของแต่ละกลุ่มและการทดสอบความแตกต่าง

ทุกกลุ่มมีเหตุผลหลักในการตัดสินใจ คือราคา/โปรโมชัน ตัดสินใจด้วยตนเองเป็นส่วนใหญ่ และนิยมซื้อผ่าน Shopee และ TikTok เป็นหลัก เมื่อพิจารณารายกลุ่มพบว่า กลุ่มลูกค้าชั้นดีส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 79) และนิยมสินค้ากลุ่มสุขภาพและความงามและแฟชั่น กลุ่มลูกค้ามีศักยภาพ มีสัดส่วนเพศชายมากขึ้นและมีรายได้ค่อนข้างต่ำ (ต่ำกว่า 15,000 บาท ร้อยละ 38) กลุ่มเสี่ยงหลุดมีสัดส่วนเพศชายสูงกว่ากลุ่มอื่น (ร้อยละ 55) มีผู้มีรายได้สูง (60,000 บาทขึ้นไป ร้อยละ 24) และนิยมชำระเงินผ่านบัตรเครดิต/เดบิตมากกว่ากลุ่มอื่น ส่วนกลุ่มห่างหายส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 66)

ผลการทดสอบไคสแควร์พบว่าสัดส่วนเพศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่ม (χ^2 (3, N = 229) = 14.73, p = 0.002) โดยกลุ่มลูกค้าชั้นดีมีสัดส่วนเพศหญิงสูงสุด และระดับรายได้ก็แตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญ เช่นกัน (χ^2 (12) = 29.32, p = 0.004) อย่างไรก็ตาม บางเซลล์มีความถี่คาดหวังต่ำ จึงควรตีความผลด้วยความระมัดระวัง ส่วนระดับการศึกษาไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่ม (p > 0.05) สำหรับตัวแปรอายุและอาชีพพบว่ามีหลายเซลล์ที่มีความถี่คาดหวังต่ำกว่าเกณฑ์ ผลการทดสอบจึงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสถิติไคสแควร์และไม่นำมาตีความในการศึกษานำร่องนี้

ตารางที่ 3 ตารางไขว้ระหว่างกลุ่มพฤติกรรม RFM กับเพศ (n = 229)

กลุ่มพฤติกรรม	ชาย (ร้อยละ)	หญิง (ร้อยละ)	รวม
ลูกค้าชั้นดี (Champions)	20 (21.3%)	74 (78.7%)	94
ลูกค้ามีศักยภาพ (Promising)	23 (43.4%)	30 (56.6%)	53
เสี่ยงหลุด (At-Risk)	16 (55.2%)	13 (44.8%)	29
ห่างหาย (Hibernating)	18 (34.0%)	35 (66.0%)	53
รวม	**77 (33.6%)**	**152 (66.4%)**	**229**

7. อภิปรายและสรุปผล

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM กับข้อมูลจากแบบสอบถามมีความเป็นไปได้ในการจำแนกกลุ่มพฤติกรรมผู้บริโภคในระดับเบื้องต้น โดยสามารถจำแนกผู้บริโภคออกเป็น 4 กลุ่มที่มีความหมายเชิงการตลาดและมีจำนวนสมาชิกเพียงพอสำหรับการตีความผล ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 และ 2

ข้อค้นพบสำคัญคือ มิติด้านระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุด (Recency) มีค่าเฉลี่ยสูง สะท้อนว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ยังมีพฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ในช่วงที่ผ่านมา ขณะที่ความถี่ในการซื้อและมูลค่าการซื้อมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มมากกว่า จึงช่วยสะท้อนความหลากหลายของพฤติกรรมผู้บริโภคได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ข้อค้นพบดังกล่าวเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการศึกษาในวงกว้างในอนาคต ในเชิงการนำไปใช้ ผลการแบ่งกลุ่มช่วยให้ออกแบบกลยุทธ์การตลาดแบบเฉพาะกลุ่มได้ เช่น รักษากลุ่มลูกค้าชั้นดีด้วยสิทธิพิเศษหรือโปรแกรมสมาชิก กระตุ้นกลุ่มลูกค้ามีศักยภาพให้ซื้อบ่อยและมีมูลค่าสูงขึ้น และดึงกลุ่มเสี่ยงหลุดและกลุ่มห่างหายกลับมาด้วยโปรโมชั่นหรือการสื่อสารซ้ำ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 3

การศึกษาครั้งต่อไปควรเก็บรวบรวมข้อมูลให้ครบตามขนาดกลุ่มตัวอย่างที่คำนวณได้ และเปรียบเทียบผลการจำแนกกลุ่มกับข้อมูลธุรกรรมการซื้อจริงหรือวิธีการจำแนกกลุ่มอื่น เพื่อประเมินความเหมาะสมและความน่าเชื่อถือของการประยุกต์ใช้ Questionnaire-based RFM

8. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นการศึกษานำร่องที่ใช้ข้อมูลจำนวน 229 ชุด จากขนาดกลุ่มตัวอย่างที่คำนวณได้ 385 คน และใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบสะดวก (Convenience Sampling) ซึ่งไม่ใช่การสุ่มตัวอย่างแบบอาศัยความน่าจะเป็น ข้อมูล RFM ได้จากการรายงานด้วยตนเองผ่านแบบสอบถาม มิใช่ข้อมูลธุรกรรมจริง ดังนั้นผลที่ได้จึงเป็นผลเบื้องต้น มีข้อจำกัดในการสรุปอ้างอิง และควรตีความผลด้วยความระมัดระวัง

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป คือ ควรเก็บข้อมูลให้ครบตามขนาดกลุ่มตัวอย่างที่คำนวณได้ ปรับช่วงคำถามด้านระยะเวลาการซื้อครั้งล่าสุดให้มีความละเอียดมากขึ้น และเปรียบเทียบผลกับข้อมูลธุรกรรมจริง เพื่อยืนยันความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้แบบจำลอง RFM กับข้อมูลจากแบบสอบถาม

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่านที่กรุณาตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย และขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูล

10. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานคณะกรรมการดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2567). “การพัฒนาด้านดิจิทัลของประเทศไทย ประจำปี พ.ศ. 2567 (Thailand Digital Outlook 2024).” ตุลาคม 2567.

[2] สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์. (2565). “การสำรวจพฤติกรรมผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย Thailand Internet User Behavior.” 2565.

[3] สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์. (2567). “การสำรวจมูลค่าพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ในประเทศไทย (Value of e-Commerce Survey in Thailand).” 2567.

[4] ธมลวรรณ สมพงศ์ (2564). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าทางออนไลน์ของผู้บริโภคในจังหวัดนครปฐม (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม). สืบค้นจาก: http://ithesis- ir.su.ac.th/dspace/bitstream /123456789/3609/1/620920042. pdf

[5] Khanfar, I., Khanfar, I., and Odeh, M. (2024). “Customer Segmentation Based on RFM Attributes Using Machine Learning.” In Intelligent Systems, Business, and Innovation Research (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 489, pp. 369–386). Cham: Springer.

[6] Christy, A. J., Umamakeswari, A., Priyatharsini, L., and Neyaa, A. (2021). “RFM ranking – An effective approach to customer segmentation.”Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences 33,10 (December): 1251–1257.

[7] ธมลวรรณ ธีระอัมพรกุล (2565). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบธุรกิจอัจฉริยะ เพื่อวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลเชิงลึกของธุรกิจค้าปลีก (สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ).

[8] Hughes, A. M. (1994). Strategic Database Marketing. Chicago: Probus Publishing.

[9] เอกสิทธิ์ พัชรวงศ์ศักดา. (2557). การวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยเทคนิคดาต้าไมน์นิ่งเบื้องต้น: RFM Segmentation. กรุงเทพฯ: เอเชีย ดิจิตอลการพิมพ์ จำกัด.

[10] Birant, D. (2011). Knowledge-Oriented Applications in Data Mining. Rijeka: IN-TECH.

[11] Dogan, O., Aycin, E., and Bulut, Z. A. (2018). “Customer Segmentation by Using RFM Model and Clustering Methods: A Case Study in Retail Industry.” International Journal of Contemporary Economicsand Administrative Sciences 8,1 (June): 1–19.

[12] สิทธิพันธ์ สำเร็จประสงค์ (2566). วิเคราะห์การแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยตัวแปรอาร์เอฟเอ็มและอัลกอริทึมเคมีนส์: กรณีศึกษาในธุรกิจค้าปลีกอิเล็กทรอนิกส์สินค้าสำหรับสตรีมีครรภ์. (สารนิพนธ์ปริญญา

มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ). สืบค้นจาก: https://digital.library.tu. ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:309397.

[13] ชาญชวัตม์ ภักดีศรี (2566). การพัฒนากลยุทธ์ทางการตลาดโดยใช้วิทยาศาสตร์ข้อมูลในการจัดกลุ่มลูกค้าตามพฤติกรรมการซื้อสินค้า. (สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ). สืบค้นจาก: https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:313603.

[14] เอกปรียา ใบสนิ (2563). การศึกษาวิธีการแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยเทคนิคอาร์เอฟเอ็มร่วมกับการวิเคราะห์ข้อความ. (สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ). สืบค้นจาก: http://ir- ithesis.swu.ac.th/dspace/handle/123456789/1083

[15] ถิรดา ไชยเผือก (2565). ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการซื้อสินค้า ผ่านช่องทางการถ่ายทอดสดช้อปปี้ไลฟ์ (SHOPEE LIVE)ของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร. (สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ). สืบค้นจาก: http://ir- ithesis.swu.ac.th / dspace /bitstream/123456789/2072/1/gs621130083.pdf

การสร้างเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน

The Construction of an LPG Gas Detector with Smartphone Notification

เกียรติภูมิมินทร์ ชาวสวน[1], จิรนุช ศรีหมอก[1], ชัยชิต ศรีพลกรัง[1] และ ทศพร จันทร์เผือก[1*]

[1] สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ผู้ติดต่อ: E-mail : thossaporn.c@nrru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 044-009-009 ต่อ 2913

บทคัดย่อ

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นพลังงานที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม แต่หากเกิดการรั่วไหลจะมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอัคคีภัยและการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้เซนเซอร์เอ็มคิวสอง (MQ-2) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต (IoT) โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ 1) ระยะทางในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ต (แบบไม่มีสิ่งกีดขวางและแบบมีสิ่งกีดขวาง) 2) ความแม่นยำในการวัดค่าของเซนเซอร์เปรียบเทียบกับค่าวิกฤตที่ตั้งไว้ในโปรแกรม (ค่าเท่ากับ 300) และ 3) ความเชื่อมั่นในการแจ้งเตือนผ่านระบบจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (E-mail) และสัญญาณเสียง (Buzzer) ผลการวิจัยพบว่า ในสภาวะไม่มีสิ่งกีดขวาง อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและส่งสัญญาณแจ้งเตือนได้ดีที่สุดในระยะทางไม่เกิน 50 เมตร โดยมีระยะเวลาในการแจ้งเตือนเฉลี่ย 4 วินาที และเมื่อมีสิ่งกีดขวางระยะทางสูงสุดลดลงเหลือ 30 เมตร ระยะเวลาแจ้งเตือนเฉลี่ย 3.82 วินาที ส่วนการทดสอบความไวของเซนเซอร์เมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซสูงเกิน 300 ซึ่งเป็นค่าสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ ระบบสามารถประมวลผลและส่งสัญญาณแจ้งเตือนผ่านอีเมลและบัซเซอร์ได้ถูกต้องแม่นยำครบถ้วน 100% (10 จาก 10 ครั้ง) นอกจากนี้การคำนวณด้านพลังงานพบว่าเครื่องตรวจจับก๊าซนี้กินไฟต่ำมาก เพียง 1.2 วัตต์ ซึ่งหากเปิดใช้งานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงในระยะเวลา 30 วัน จะเสียค่าไฟฟ้าเพียง 3.46 บาทต่อเดือน สรุปได้ว่าเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีที่พัฒนาขึ้นมีความเสถียร ประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงาน เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อยกระดับความปลอดภัยในที่พักอาศัย

คำสำคัญ: เครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจี, เซนเซอร์ MQ-2, ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), การแจ้งเตือนผ่านอีเมล

Abstract

Liquefied Petroleum Gas (LPG) is widely used in households and industrial sectors. However, gas leakage poses a catastrophic risk of fire and explosions. This research aims to construct and evaluate the efficiency of an LPG gas detector utilizing an MQ-2 sensor integrated with an ESP8266 microcontroller node to provide real-time smartphone notifications via Internet of Things (IoT) technology. The

performance was comprehensively evaluated based on three parameters: 1) the effective communication distance between the device and the Wi-Fi router under line-of-sight and obstructed conditions, 2) sensor threshold accuracy compared to the programmed critical value of 300, and 3) notification reliability through electronic mail (E-mail) and a buzzer alarm. The experimental results demonstrated that under line-of-sight conditions, the device reliably connected and transmitted notifications within a maximum distance of 50 meters, with an average response time of 4 seconds. Under obstructed conditions, the maximum effective distance was reduced to 30 meters, with an average response time of 3.82 seconds. For threshold verification, the sensor accurately triggered alarms in 100% of trials (10 out of 10) whenever gas levels exceeded 300, while remaining silent below the threshold. Energy consumption analysis revealed a very low power requirement of 1.2 Watts. Continuous 24-hour operation over 30 days consumed only 0.864 kWh, translating to an estimated electricity cost of 3.46 Baht per month. In conclusion, the developed LPG detector exhibits high reliability, responsiveness, and cost-effectiveness, making it highly suitable for practical domestic applications to enhance residential safety.

Keywords: LPG Gas Detector, MQ-2 Sensor, ESP8266 Microcontroller, Internet of Things (IoT), E-mail Notification.

1. บทนำ

ปัจจุบันก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG) เป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคครัวเรือน ธุรกิจร้านอาหาร และภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนสูงและมีต้นทุนราคาประหยัด อย่างไรก็ดี ก๊าซแอลพีจีจัดเป็นก๊าซไวไฟที่มีความอันตรายสูง หากเกิดการรั่วไหลจากสาเหตุต่างๆ เช่น การเสื่อมสภาพของท่อนำก๊าซ วาล์วควบคุม หรือพฤติกรรมการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง ย่อมนำไปสู่การสะสมของก๊าซในอากาศจนถึงจุดสันดาป ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดอัคคีภัยและการระเบิดที่รุนแรง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้บริโภค ที่ผ่านมา ระบบตรวจจับก๊าซแอลพีจีในท้องตลาดส่วนใหญ่เป็นระบบแบบดั้งเดิม (Standalone) ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือนภัยเป็นเสียงไซเรนหรือบัซเซอร์เฉพาะในบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์เท่านั้น ข้อจำกัดทางเทคโนโลยีดังกล่าวทำให้เกิดช่องว่างด้านความปลอดภัยในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ได้พำนักอยู่ในสถานที่เกิดเหตุ หรืออยู่ในจุดที่ไม่ได้ยินเสียงเตือนภัย ทำให้ไม่สามารถระงับเหตุการณ์รั่วไหลได้อย่างทันท่วงที [1], [3] จากข้อจำกัดข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) มาร่วมประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีที่ใช้เซนเซอร์ MQ-2 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ซึ่งมีชิปสื่อสารไร้สายในตัว เพื่อประมวลผล

และส่งสัญญาณแจ้งเตือนไปยังสมาร์ทโฟนของผู้ใช้ในรูปแบบจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (E-mail) แบบเรียลไทม์ [2] ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มในปัจจุบันที่มีการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มและแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารและส่งผ่านข้อมูลไปยังผู้ใช้งานโดยตรง [5] งานวิจัยนี้นอกจากจะช่วยลดความสูญเสียจากอุบัติภัยแล้ว ยังเป็นการยกระดับระบบความปลอดภัยภายในบ้านให้ก้าวสู่อัจฉริยะภาพตามแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน

2. เครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอหลักการทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และเครือข่ายไร้สายที่คณะผู้วิจัยนำมาบูรณาการร่วมกันเพื่อสร้างระบบตรวจจับภัยอัจฉริยะ โดยมีองค์ประกอบและทฤษฎีอ้างอิงที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) หมายถึงเครือข่ายของวัตถุ อุปกรณ์ หรือสิ่งของใด ๆ ที่มีการติดตั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซอฟต์แวร์ เซนเซอร์ และการเชื่อมต่อเครือข่าย เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถจัดเก็บ แลกเปลี่ยน และส่งผ่านข้อมูลระหว่างกันได้โดยตรงผ่านโครงสร้างพื้นฐานของอินเทอร์เน็ต ในงานวิจัยนี้ เทคโนโลยี IoT ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเปลี่ยนเครื่องตรวจจับก๊าซแบบเดิมที่ทำงานเฉพาะที่ให้สามารถส่งข้อมูลสถานะความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีข้ามระบบเครือข่าย ไปยังระบบคลาวด์และแจ้งเตือนเข้าสู่สมาร์ทโฟนของผู้ใช้งานได้แบบเวลาจริง (Real-time) เพื่อช่วยให้สามารถรับรู้เหตุการณ์และควบคุมระงับเหตุได้จากระยะไกล

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP8266

NodeMCU เป็นแพลตฟอร์มไมโครคอนโทรลเลอร์แบบโอเพนซอร์ส (Open Source) ที่ใช้ชิปประมวลผลหลักประเภทรวมสถาปัตยกรรม (SoC) เบอร์ ESP8266 ของบริษัท Espressif Systems สถาปัตยกรรมภายในประกอบด้วย CPU 32-bit Tensilica L106 ความถี่นาฬิกา 80 MHz มาพร้อมหน่วยความจำแฟลช (Flash Memory) ขนาด 4 MB และแรม (RAM) ขนาดรวม 160 KB จุดเด่นสำคัญคือมีโมดูลส่งสัญญาณ Wi-Fi ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n ย่านความถี่ 2.4 GHz ในตัว ทำให้บอร์ดดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งหน่วยควบคุม (MCU) และอุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้โดยไม่ต้องใช้ชิปสื่อสารภายนอกเพิ่ม นอกจากนี้ยังมีพอร์ต GPIO, PWM, I2C และ ADC (อนาล็อกเป็นดิจิทัล) ขนาด 10 บิต จำนวน 1 ช่อง (ขา A0) ทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำมาเป็นแกนหลักในระบบควบคุมตรวจจับความปลอดภัย [7]

2.3 โมดูลเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซไวไฟ (MQ-2 Sensor Module)

MQ-2 เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Gas Sensor) ที่มีความไวสูงในการตรวจจับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG), โพรเพน, มีเทน, บิวเทน รวมไปถึงควันไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยภายในเซนเซอร์มีสารไวพ่นจำพวกดีบุกไดออกไซด์ (SnO_2) ซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าสูงในสภาวะอากาศบริสุทธิ์ เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซแอลพีจีมาตกกระทบ

และเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวสารไวพ่น จะทำให้ค่าความต้านทานภายในลดลงในสัดส่วนที่เป็นปฏิภาคตรงกับความเข้มข้นของก๊าซ วงจรบนโมดูลจะแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปให้ออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก (0–5 V) ส่งเข้าสู่ขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจะถูกแปลงค่าความละเอียดเป็นสัญญาณดิจิทัลในช่วงค่า 0 ถึง 1,023 เพื่อนำไปประมวลผลเปรียบเทียบค่าวิกฤตต่อไป [7]

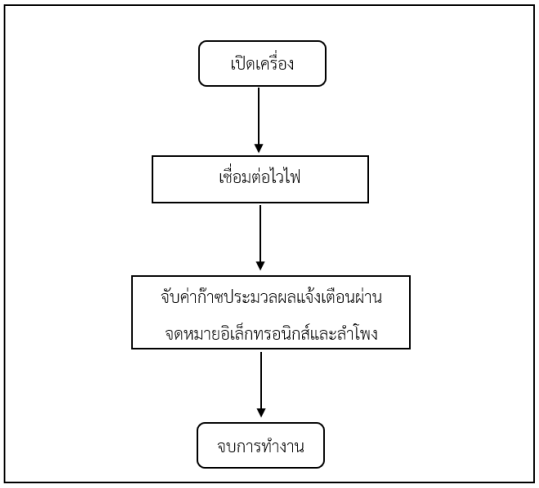
3. การทำงานและกระบวนการทำงาน

การทำงานของเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีอ้างอิงตามกรอบแนวคิดระบบปิดอัจฉริยะ (Smart System Framework) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [4], [6] คือ ขั้นรับข้อมูล (Input) ขั้นประมวลผล (Processing) และขั้นแสดงผล/เอาต์พุต (Output) ดังกระบวนการต่อไปนี้

1) ขั้นรับข้อมูล เซนเซอร์ MQ-2 ทำหน้าที่ตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซในอากาศอย่างต่อเนื่องและแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกส่งให้ NodeMCU ESP8266 ผ่านช่องอินพุต A0

2) ขั้นประมวลผล ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกแล้วแปลงเป็นค่าดิจิทัล (ADC Value) จากนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขในซอร์สโค้ด (Source Code) ที่กำหนดเกณฑ์ปลอดภัยแบบดิจิทัลวิกฤต (Threshold) ไว้ที่ค่าเท่ากับ 300

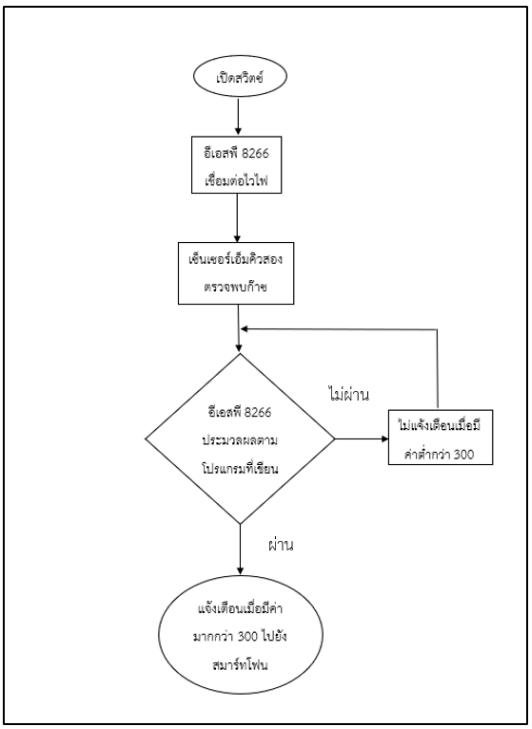
3) ขั้นเอาต์พุตและแสดงผล หากค่าที่อ่านได้ต่ำกว่า 300 ระบบจะถือว่าเป็นสภาวะปกติ ลูปการทำงานจะวนซ้ำเพื่อตรวจสอบต่อไป แต่หากเซนเซอร์สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซได้ตั้งแต่ 300 ขึ้นไป ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งการให้บัซเซอร์ (Buzzer) ส่งสัญญาณเสียงเตือนภัยความถี่สูง ณ บริเวณที่ติดตั้งทันที พร้อมกันนั้นจะเรียกใช้ฟังก์ชันการเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi และเปิดใช้งานคลาสไลบรารี เพื่อสร้างเซสชันการเชื่อมต่อที่ปลอดภัยแบบ SSL/TLS ไปยังโฮสต์เซิร์ฟเวอร์ส่งเมล (Gmail SMTP Server ด้วย Host: smtp.gmail.com, Port: 465) เพื่อทำหน้าที่ส่งข้อความแจ้งเตือนภัยระบุข้อความแจ้งเตือนการพบควัน โปรดไปตรวจสอบ ไปยังบัญชีจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ของผู้รับที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งจะปรากฏเป็นการแจ้งเตือนแบบพุช (Push Notification) บนสมาร์ทโฟนทันที แสดงดังภาพที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่อง

3.1 กระบวนการทำงานของเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน

กระบวนการทำงานของเครื่องตรวจจับก๊าซเป็นการทำงานโดยเปิดสวิตช์ แล้วอีเอสพีแปดสองหกหก เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซและเมื่อแจ้งเตือนเมื่อมีค่ามากกว่า 300 (ค่าที่ตั้งไว้ ได้จากการแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์เอ็มคิวสอง ไปยังสมาร์ทโฟนและลำโพงแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน การทำงานแสดงดังภาพที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของเครื่อง



รูปที่ 3 เครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน

3.2 การสร้างและต่อวงจรฮาร์ดแวร์เชิงกายภาพ

การประกอบเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจี คณะผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมต่อระบบไฟเลี้ยงและสัญญาณของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยมีบอร์ด NodeMCU ESP8266 เป็นศูนย์กลาง สัญญาณอนาล็อก (A0) จากเซนเซอร์ MQ-2 จะต่อเข้ากับพอร์ตอินพุตอนาล็อกของบอร์ด ในส่วนของระบบจ่ายไฟ ตัวเครื่องได้รับการติดตั้งโมดูลเรกูเลเตอร์ (Step-down Regulator) เพื่อทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ขนาด 7.4 โวลต์ ให้คงที่ที่ระดับ 5 โวลต์ สำหรับป้อนให้แก่บอร์ดควบคุมและเซนเซอร์อย่างปลอดภัย วงจรทั้งหมดจะถูกบรรจุลงในกล่องบล็อกใสกันน้ำขนาดกะทัดรัด กว้าง 12.7 ซม. ยาว 13.8 ซม. และสูง 6.3 ซม. พร้อมการเจาะช่องทางเดินอากาศเพื่อให้ก๊าซสามารถแพร่เข้าสู่หน้าสัมผัสของเซนเซอร์ได้สะดวก

4. การทดลองและผลการทดลอง

จากดำเนินการสร้างเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีเสร็จสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างเข้มงวด โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถของระบบในเชิงตัวเลขและการใช้งานจริง บันทึกผลลัพธ์จำนวน 10 ครั้งในแต่ละสถานการณ์การทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบระยะการสื่อสารไร้สาย (Wi-Fi Range) ทั้งแบบมีและไม่มีสิ่งกีดขวาง

การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาระยะทางที่เหมาะสมและขีดจำกัดในการรับส่งสัญญาณ Wi-Fi ระหว่างตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจจับก๊าซกับจุดกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ต (Router) โดยเริ่มทดสอบที่ระยะห่าง 5 เมตร และเพิ่มระยะทางขึ้นครั้งละ 5 เมตร บันทึกผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระยะทางในการติดตั้งและระยะเวลาเฉลี่ยในการส่งแจ้งเตือนเข้าสู่ระบบอีเมล

ระยะทาง (เมตร)	สภาพแวดล้อมเปิด (พื้นที่โล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง)	สภาพแวดล้อมปิด (มีสิ่งกีดขวาง/ผนังอาคาร)
5	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.8 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 3.5 วินาที)
10	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.5 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.1 วินาที)
15	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.2 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 3.6 วินาที)
20	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.4 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 3.4 วินาที)
25	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.6 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 3.6 วินาที)
30	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.1 วินาที)	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.5 วินาที)
35	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.3 วินาที)	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)
40	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.2 วินาที)	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)
45	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.1 วินาที)	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)
50	เชื่อมต่อได้สมบูรณ์ (เวลาเฉลี่ย 4.7 วินาที)	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)
55 ขึ้นไป	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ (ส่งล้มเหลว)

จากข้อมูลตารางที่ 1 พบว่า ในสภาวะพื้นที่โล่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง เครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตได้อย่างมีเสถียรภาพสูงในระยะทางสูงสุดที่ระยะ 50 เมตร โดยสามารถเชื่อมต่อและส่งอีเมลแจ้งเตือนเข้าสู่สมาร์ทโฟนสำเร็จครบถ้วนทุกครั้ง (100%) ระยะเวลาเฉลี่ยในการส่งข้อมูลนับตั้งแต่ตรวจพบก๊าซจนถึงการปรากฏของจดหมายอิเล็กทรอนิกส์อยู่ที่ประมาณ 4 วินาที อย่างไรก็ตาม เมื่อมีสิ่งกีดขวางภายในอาคาร ระยะทำงานสูงสุดจะลดลงเหลือเพียง 30 เมตร เนื่องจากคลื่นความถี่ 2.4 GHz เกิดการสะท้อนและลดทอนพลังงานเมื่อวิ่งผ่านสิ่งกีดขวางทึบแสง

4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องแม่นยำของเซนเซอร์ตามค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ (Threshold 300)

การทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ MQ-2 โดยป้อนค่าก๊าซแอลพีจีความเข้มข้นต่างกันเข้าสู่ตัวรับสัญญาณเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการสั่งงานตามเงื่อนไขเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ตั้งไว้ในโปรแกรมคือ 300

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัดค่าดิจิทัลจากเซนเซอร์เปรียบเทียบกับการตอบสนองของระบบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ (< 300)	ผลการแจ้งเตือนจากระบบ	ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ (>300)	ผลการแจ้งเตือนจากระบบ
1	125	ไม่แจ้งเตือน	345	แจ้งเตือนสำเร็จ
2	142	ไม่แจ้งเตือน	410	แจ้งเตือนสำเร็จ
3	180	ไม่แจ้งเตือน	385	แจ้งเตือนสำเร็จ
4	210	ไม่แจ้งเตือน	520	แจ้งเตือนสำเร็จ
5	95	ไม่แจ้งเตือน	315	แจ้งเตือนสำเร็จ
6	115	ไม่แจ้งเตือน	460	แจ้งเตือนสำเร็จ
7	240	ไม่แจ้งเตือน	390	แจ้งเตือนสำเร็จ
8	165	ไม่แจ้งเตือน	415	แจ้งเตือนสำเร็จ
9	130	ไม่แจ้งเตือน	370	แจ้งเตือนสำเร็จ
10	195	ไม่แจ้งเตือน	480	แจ้งเตือนสำเร็จ

ผลการทดลองในตารางที่ 2 ยืนยันความถูกต้องแม่นยำในการทำงานของระบบซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ โดยเมื่อสภาวะอากาศปกติหรือมีการปล่อยก๊าซปริมาณน้อยมากทำให้ค่าที่อ่านได้ต่ำกว่า 300 (อยู่ในช่วง 95 ถึง 240) เครื่องตรวจจับก๊าซจะไม่ส่งสัญญาณใด ๆ ซึ่งเป็นการป้องกันการตื่นตระหนกและ

ลดอัตราการเตือนลวง (False Alarm) และเมื่อปล่อยก๊าซจนค่าเซนเซอร์พุ่งสูงเกิน 300 (อยู่ในช่วง 315 ถึง 520) ระบบสามารถตรวจจับและส่งสัญญาณแจ้งเตือนได้ถูกต้องแม่นยำคิดเป็นร้อยละ 100

4.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์การบริโภคพลังงานสำหรับการเปิดใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง จากการวัดกระแสไฟฟ้าที่ระบบใช้ทั้งหมดในสภาวะการทำงานประกอบด้วย: NodeMCU ESP8266 ใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 90 mA, เซนเซอร์ MQ-2 ใช้กระแสไฟฟ้า 160 mA, และโมดูล Step-down/บัซเซอร์รวมสัญญาณไฟใช้กระแสไฟฟ้า 10 mA รวมกระแสไฟฟ้ารวมที่ระบบต้องการเท่ากับ 260 mA

กรณีใช้งานด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (แรงดัน 7.4 V ความจุ 5,200 mAh) ระยะเวลาใช้งานเท่ากับ 5,200 mAh/260 mA เท่ากับ 20 ชั่วโมง

กรณีติดตั้งถาวรภายในบ้าน (เชื่อมต่ออแดปเตอร์ 5 V จ่ายกระแสเฉลี่ย 240 mA หรือ 0.24 A) กำลังไฟฟ้าที่ตัวเครื่องใช้ (P) P = V x I = 5Vx0.24A เท่ากับ 1.2 วัตต์ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระยะเวลา 30 วัน (720 ชั่วโมง) Energy = 1.2วัตต์x720ชั่วโมง/1,000 เท่ากับ 0.864 หน่วย (kWh) อัตราค่าใช้จ่ายไฟฟ้าประจำเดือน (กำหนดให้ค่าไฟเฉลี่ยหน่วยละ 4 บาท) ค่าไฟฟ้าต่อเดือน = 0.864x4 = 3.46 บาท ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าบ่งชี้ว่า เครื่องตรวจจับก๊าซนี้ใช้กำลังงานต่ำมากเพียง 1.2 วัตต์ สร้างภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานให้แก่ผู้ใช้งานภายในบ้านไม่ถึง 3.5 บาทต่อเดือน ซึ่งให้ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์สูงมาก

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องตรวจจับก๊าซแอลพีจีแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟนที่ทำงานบนพื้นฐานเทคโนโลยี IoT ตัวอุปกรณ์มีขนาดกะทัดรัดพกพาง่ายและติดตั้งสะดวก จากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงลึกสามารถสรุปได้ว่า ระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทำงานสอดประสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายได้ไกลสุด 50 เมตรในที่โล่ง และ 30 เมตรในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีระยะเวลาตอบสนองในการส่งข้อมูลแจ้งเตือนถึงผู้ใช้งานเฉลี่ยไม่เกิน 4 วินาที ระบบตรวจจับค่าความเข้มข้นก๊าซผ่านเซนเซอร์ MQ-2 มีความแม่นยำสูง สามารถจำแนกและส่งสัญญาณแจ้งเตือนเมื่อค่าก๊าซสูงเกินกว่าขีดเปลี่ยน 300 ได้อย่างถูกต้องแม่นยำร้อยละ 100 พร้อมทั้งมีอัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำมาก คิดเป็นค่าใช้จ่ายเพียง 3.46 บาทต่อเดือน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัยที่ตั้งไว้ทุกประการ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธนดล มาลยเวช และคณะ. (2559). “ระบบแจ้งเตือนความปลอดภัยภายในบ้านผ่านแอปพลิเคชันบนแอนดรอยด์”. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาไทย ครั้งที่ 3, นครราชสีมา, 2559, หน้า 45–52.

[2] นารีรัตน์ แนบกลาง, และ อมิตา สังสี. (2567). “การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับความเคลื่อนไหวและถ่ายภาพแจ้งเตือนผ่านจดหมายอิเล็กทรอนิกส์”. (รายงานผลการวิจัย). นครราชสีมา, คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.

[3] พศวีร์ ศรีโหมด, เติมพงษ์ ศรีเทศ, เอกชัย ดีศิริ, และ ธนภัทร พรหมวัฒนภักดี. (2564). “ชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย”. (รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ/รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.

[4] พสชนัน ศรีโพธิ์ทอง, จงกล สังอ่วม, จรรยพร งามขา, และ กิตติญา บุญรัมย์. (2565). “วิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับควันและเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวเพื่อตรวจจับผู้ปฏิบัติงานภายใต้สถานการณ์ไฟไหม้”. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร, 13(2), 145-158.

[5] สุบัวแก้ว, และ ปณิธิ เนตินันทน์. (2563). “การพัฒนาระบบไลน์บอท สำหรับบัณฑิตวิทยาลัย” (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต.

[6] เสริมเกียรติ จอมจันทร์ยอง, เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, ฐิฏาพร สุภาษี, และ พานิช อินต๊ะ. (2560). “การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวล PM2.5 และ PM10 ในบรรยากาศด้วยเครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองไร้สายในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย” (รายงานผลการวิจัยทุนสนับสนุน). เชียงใหม่, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.).

[7] ICIT KMUTNB. (2017). "NodeMCU ESP8266 Specification and MQ Sensor Module Data” [Online]. Available: https://icit.kmutnb.ac.th/. [Accessed: Jun. 2, 2026].

การใช้งานระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ลิเธียม เพื่อประหยัดค่าไฟฟ้าในช่วง On-peak

Using a Lithium Battery Energy Storage System to Save Electricity Costs During On-Peak Periods

ธัชนันท์ คำมั่นคง[1], จักรี โนนซี[2], สุรพงษ์ แก่นมณี[3]* ปัญญา เข็มมุข[4],อภิชาติ สังข์ทอง[5]

1,2,3,4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

5 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

*ผู้ติดต่อ : surapong@techno.rru.ac.th,0909965992

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage System: ESS) สำหรับการประหยัดค่าไฟฟ้าในระบบ Time-of-Use (TOU) ของการไฟฟ้านครหลวง โดยใช้หลักการย้ายโหลด (Load Shifting) ชาร์จแบตเตอรี่ในช่วง Off-Peak (22.00–09.00 น.) และจ่ายไฟในช่วง On-peak (09.00–22.00 น.) ระบบ ESS ต้นแบบประกอบด้วยแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ขนาด 48V/100Ah (4.8 kWh) ร่วมกับระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) อินเวอร์เตอร์ แบบไฮบริด (Hybrid Inverter) ขนาด 3 kVA และระบบควบคุม การจัดการพลังงาน (EMS) บน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 สำหรับควบคุมการชาร์จ-คายประจุอัตโนมัติตามตาราง TOU การทดลองใช้รูปแบบ Pre-test / Post-test เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถลดพลังงาน On-peak จาก 3.82 kWh/วัน เหลือ 0.41 kWh/วัน (ลดลงร้อยละ 89.3) ทำให้ค่าไฟฟ้ารายเดือนลดลงจาก 488.4 บาท เหลือ 399.51 บาท ประหยัดได้ 88.89 บาท/เดือน (ร้อยละ 20.02) ระบบมีประสิทธิภาพ Load Shifting Efficiency ร้อยละ 91.4 และ Round-Trip Efficiency ร้อยละ 91.9 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On-peak ได้ร้อยละ 85.5 การทดสอบ Paired t-test พบความแตกต่าง ของการใช้พลังงานช่วง On-peak ก่อนและหลังติดตั้ง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 63.07$, $p < 0.0001$) ระบบมีต้นทุน การพัฒนา 44,000 บาท ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6–8 ปี สำหรับโหลดระดับบ้านพักอาศัย ซึ่งสั้นกว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ LiFePO4 (8–10 ปี)

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต, อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา, การบริหารจัดการโหลด, ระบบควบคุมพลังงาน

Abstract

This research project aims to study, design, develop, and evaluate the performance of an Energy Storage System (ESS) for electricity cost savings in the Time-of-Use (TOU) system of the Metropolitan Electricity Authority. It applies the principle of Load Shifting by charging the battery during Off-Peak hours (22:00–09:00) and supplying power during On-peak hours (09:00–22:00). The prototype ESS consists of a 48V/100Ah LiFePO4 battery (4.8 kWh), BMS, 3 kVA hybrid inverter, and an EMS control system implemented on an ESP32 microcontroller. The experiment used a Pre-test/Post-test design

over 8 weeks. Results showed the system reduced On-peak energy consumption from 3.82 kWh/day to 0.41 kWh/day (89.3% reduction), lowering the monthly electricity cost from 488.4 to 399.51 Baht, resulting in a saving of 88.89 Baht/month (20.02%). The system achieved a Load Shifting Efficiency of 91.4%, a Round-Trip Efficiency of 91.9%, and reduced peak power by 85.5%. The Paired t-test showed a statistically significant difference in On-peak energy consumption ($t = 63.07$, $p < 0.0001$). The system costs 44,000 Baht with a payback period of approximately 6–8 years for residential loads, which is shorter than the LiFePO4 battery lifespan of 8–10 years.

Keywords: Energy Storage System, Lithium Iron Phosphate Battery, Time-of-Use Tariff, Load Shifting, Energy Management System.

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) รายงานว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 2.1 ต่อปี ในประเทศไทย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รายงานว่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบในปี พ.ศ. 2566 อยู่ที่ประมาณ 35,053 เมกะวัตต์ [1]

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานไฟฟ้า คือ ความไม่สมดุลระหว่างปริมาณความต้องการพลังงาน (Demand) และกำลังการผลิต (Supply) โดยเฉพาะในช่วงเวลา Peak ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) จึงได้นำอัตราค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time-of-Use: TOU) มาใช้เป็นกลไกทางราคาเพื่อจูงใจให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงาน [2]

ระบบอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU มีการกำหนดราคาค่าพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา โดยแบ่งเป็นช่วง On-peak (09.00–22.00 น. วันจันทร์–ศุกร์) ที่อัตราค่าพลังงาน 4.2482 บาท/หน่วย และช่วง Off-Peak ที่อัตรา 2.6369 บาท/หน่วย ส่วนต่างของอัตราค่าไฟฟ้าสูงถึง 1.6113 บาท/หน่วย (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่มและค่า FT) เปิดโอกาสให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้อย่างมีนัยสำคัญหากสามารถจัดการการใช้พลังงานได้อย่างชาญฉลาด [2]

เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage System: ESS) โดยเฉพาะระบบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการชาร์จพลังงานในช่วง Off-Peak แล้วจ่ายพลังงานในช่วง On-peak หรือที่เรียกว่า Load Shifting ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบพัฒนา และทดสอบระบบ ESS ต้นแบบในบริบทของอัตรา TOU ของประเทศไทย

1. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบ ESS ต้นแบบที่สามารถชาร์จพลังงานในช่วง Off-Peak และจ่ายพลังงานให้โหลดในช่วง On-peak ได้โดยอัตโนมัติตามหลักการ Load Shifting

2.เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ESS โดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ

3.เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ESS รวมถึงการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU

อัตราค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time-of-Use: TOU) เป็นกลไกการกำหนดราคาพลังงานไฟฟ้าที่สะท้อนต้นทุนการผลิตที่แท้จริงในแต่ละช่วงเวลา การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) กำหนดอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดังตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU

ช่วงเวลา	ประเภทวัน/เวลา	อัตราค่าพลังงาน (บาท/หน่วย)
On-Peak	วันจันทร์–วันศุกร์ เวลา 09.00–22.00 น.	4.2482
Off-Peak	วันจันทร์–วันศุกร์ เวลา 22.00–09.00 น.	2.6369
Off-Peak	วันเสาร์–วันอาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์ (ตลอด 24 ชั่วโมง)	2.6369

2.2 เทคโนโลยีแบตเตอรี่ LiFePO4 สำหรับระบบ ESS

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate : LiFePO4) ถือเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบ ESS ในระดับอาคาร เนื่องจากมีความปลอดภัยสูง ไม่เกิดปรากฏการณ์หนีความร้อน (Thermal Runaway) อายุการใช้งานมากกว่า 3,000 – 6,000 รอบการชาร์จ (Cycles) และ มีประสิทธิภาพการประจุกลับ(Round -Trip Efficiency) อยู่ที่ร้อยละ 90–96 [5,6] โดยต้นทุนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนลดลงอย่างต่อเนื่องจากกว่า 1,000 ดอลลาร์สหรัฐต่อ kWh ในปี ค.ศ.2010 เหลือเพียงประมาณ 139 ดอลลาร์สหรัฐต่อ kWh ในปี ค.ศ. 2023 ทำให้ระบบ ESS มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [7]

2.3 หลักการ Load Shifting

Load Shifting หรือ Energy Arbitrage คือ กลยุทธ์การชาร์จพลังงานที่อาศัยระบบ ESS ในการชาร์จพลังงานในช่วงที่อัตราค่าไฟฟ้าต่ำ (Off - Peak) และจ่ายพลังงานให้กับโหลดในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้าสูง (On - peak) ผู้วิจัยต่างประเทศพบว่าสามารถทำการลดค่าไฟฟ้าในบ้านพักอาศัยได้ถึงร้อยละ 18.2 ด้วยขนาดของแบตเตอรี่ 5 – 10 kWh [3] ในขณะที่งานวิจัยในบริบทไทยพบว่า สามารถลดปริมาณค่าไฟได้ร้อยละ 22–28 [8]

2.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ระบบอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ของประเทศไทยมีส่วนต่างอัตราค่าพลังงานระหว่างช่วง On-peak และ Off-Peak ประมาณ 1.6113 บาทต่อหน่วย ซึ่งเป็นแรงจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ที่เพียงพอสำหรับการ

ลงทุน ระบบ ESS ระบบ ESS แบบแบตเตอรี่ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน คือ แบตเตอรี่ BMS อินเวอร์เตอร์ และ EMS โดยแบตเตอรี่ LiFePO4 เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน Load Shifting เนื่องจากมีอายุการใช้งานสูง ความปลอดภัยสูง และต้นทุนที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง หลักการ Load Shifting และ Peak Shaving เป็นกลยุทธ์หลักที่ระบบ ESS นำมาใช้เพื่อลดค่าไฟฟ้าในระบบ TOU โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสามารถลดค่าไฟฟ้าได้ร้อยละ 15–28 ขึ้นอยู่กับขนาดระบบและรูปแบบโหลด ระบบควบคุมพลังงาน (EMS) ที่มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดผลสัมฤทธิ์โดยรวมของระบบ ESS ข้อมูลและกรอบแนวคิดจากการทบทวนวรรณกรรมในบทนี้จะนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาระบบ ESS

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research Design) แบบ Pre-test – Post-test Design โดยเก็บข้อมูลก่อนการติดตั้งระบบ ESS เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ จากนั้นทำการติดตั้งและทดสอบระบบ แล้วจึงเก็บข้อมูลพลังงานหลังการติดตั้งระบบ 4 สัปดาห์เท่ากัน โดยระบบจะทำการบันทึกพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทุก ๆ 1 นาที ตลอดการทดลอง

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

ระบบ ESS ต้นแบบที่ออกแบบและพัฒนาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายการวัสดุและอุปกรณ์หลักของระบบ ESS

กลุ่มอุปกรณ์	รายการ	ข้อกำหนดทางเทคนิค
แบตเตอรี่	HAIDI POWERBOX LiFePO4 Battery Pack	48V/100Ah (4.8 kWh), BMS ในตัว
แปลงไฟ	Deye Hybrid Inverter/Charger (iPOWER)	3 kVA, 48V, RS485/CAN Bus
ควบคุม	ESP32 + RTC + SD Card (EMS)	32-bit, Wi-Fi, RS-485/CAN Bus
วัดพลังงาน	Energy Meter	Class 1, RS-485, 1-min interval
ป้องกัน DC/AC	CT Industrial CTM4-DC + Blaino C50 (Leetech IP54)	DC 63A/800V, AC 50A/250V

3.3 การออกแบบระบบ ESS

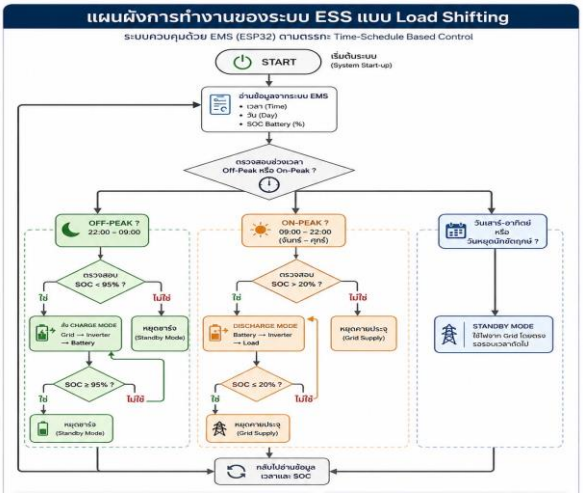
ระบบ ESS ถูกออกแบบขึ้นตามหลักการ Load Shifting โดยมีไดอะแกรมการต่อวงจรคือ: โครงข่ายไฟฟ้า AC ⟶ AC Breaker ⟶ อินเวอร์เตอร์ไฮบริด Deye ⟷ DC Breaker ⟷ แบตเตอรี่ HAIDI POWERBOX LiFePO4 ⟶ โหลด AC โดยมีระบบ EMS บนบอร์ด ESP32 ทำหน้าที่ควบคุมตามตรรกะเวลา (Time-Schedule Based Control) กำหนดให้ชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ในช่วง Off-Peak (22.00–09.00 น.) เมื่อระดับประจุ (State of Charge: SOC) ต่ำกว่า 95% และสั่งคายประจุเพื่อ

จ่ายไฟให้โหลดในช่วง On-peak (09.00–22.00 น. วันจันทร์–ศุกร์) เมื่อ SOC สูงกว่า 20%

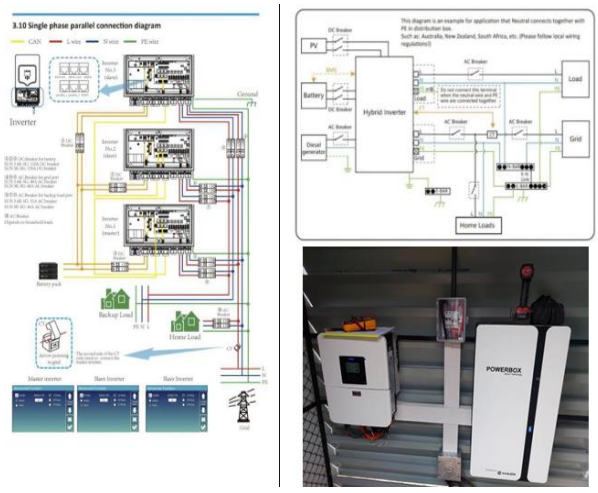
ขนาดความจุแบตเตอรี่คำนวณจากสูตร :

ความจุ (kWh) = พลังงานโหลด On-peak ÷ (ηinverter × ηbattery × DoD)

แทนค่า: ความจุ = 3.5 ÷ (0.95 × 0.92 × 0.80) ≈ 4.99 kWh จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 48V/100Ah (4.8 kWh)



รูปที่ 1 ระบบ ESS ออกแบบตามหลักการ Load Shifting



รูปที่ 2 การติดตั้งระบบ ESS (Block Diagram)

3.4 วิธีการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

บันทึกพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ พลังงานจากโครงข่าย (kWh) กำลังไฟฟ้า (W) สถานะประจุ (SOC, %) และอุณหภูมิ (°C) ทุกๆ 1 นาที

การวิเคราะห์ข้อมูลครอบคลุม:

(1) ประสิทธิภาพ Load Shifting: LSE (%) = (E_Shifted / E_OnPeak_Load) × 100

(2) ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วย Simple Payback Period (SPP) และ Net Present Value (NPV)

(3) การทดสอบสมมติฐานด้วย Paired t-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ α = 0.05 โดยประมวลผลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ผ่านชุดเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูล Data Analysis ToolPak คำสั่ง t-Test: Paired Two Sample for Means ซึ่งเป็น เครื่องมือพื้นฐานที่เหมาะสมกับลักษณะโครงงานต้นแบบระดับสหกิจศึกษา สำหรับคำนวณค่า t Stat, df, P-value และ t Critical

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ประสิทธิภาพของระบบ ESS ด้านเทคนิค

ระบบสามารถประจุแบตเตอรี่จากระดับ SOC ร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 95 ได้ภายในระยะเวลาประมาณ 4.5–5.0 ชั่วโมง โดยใช้กระแสไฟฟ้าประจุเฉลี่ย 18–20 แอมแปร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 53–54.6 โวลต์ และมีอุณหภูมิขณะประจุอยู่ในช่วง 29–38°C ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยตามข้อกำหนดของผู้ผลิต นอกจากนี้ ค่าประสิทธิภาพการประจุ-คายประจุ (Round-Trip Efficiency: RTE) เฉลี่ยตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์ของช่วง Post-test มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่า

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ ESS

รายการ	Pre-test	Post-test	ผลต่าง	% เปลี่ยนแปลง
พลังงาน On-peak (kWh/วัน)	3.82	0.41	-3.41	-89.3%
พลังงาน Off-Peak (kWh/วัน)	1.45	5.37	+3.92	+270.3%
ค่าไฟรวม (บาท/เดือน)	488.40	399.51	-88.89	-20.02%
กำลังสูงสุด On-peak (kW)	2.89	0.42	-2.47	-85.5%

แบตเตอรี่ประเภท LiFePO4 มีค่า RTE อยู่ในช่วงร้อยละ 90–96 [5] ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงยืนยันได้ว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพด้านเทคนิคที่สอดคล้องกับมาตรฐานทางวิชาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ LiFePO4 ระบบสามารถชาร์จแบตเตอรี่จาก SOC 20% ถึง 95% ได้ในระยะเวลาประมาณ 4.5–5.0 ชั่วโมง ด้วยกระแสชาร์จเฉลี่ย 18–20 แอมแปร์ ที่แรงดัน 53–54.6 โวลต์ อุณหภูมิขณะชาร์จอยู่ในช่วง 29–38°C ซึ่งอยู่ในพิสัยปลอดภัย ค่า Round-Trip Efficiency (RTE) เฉลี่ยตลอด 4 สัปดาห์ของช่วง Post-test เท่ากับ 91.9% ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลวิชาการที่ระบุว่าแบตเตอรี่ LiFePO4 มี RTE อยู่ในช่วงร้อยละ 90–96 [5]

4.2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานก่อนและหลังการติดตั้งระบบ ESS ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าก่อน (Pre-test) และหลัง (Post-test) การติดตั้งระบบ ESS โดยรวบรวมจากการบันทึกข้อมูลตลอด 8 สัปดาห์จากตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างช่วง Pre-test และ Post-test พบว่ามาตรการที่นำมาใช้ส่งผลให้รูปแบบการใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญใน 4 ด้าน ได้แก่ (1) การลดการใช้พลังงานช่วง On-peak พลังงานในช่วง On-peak ลดลงจาก 3.82 เป็น 0.41 kWh/วัน (ร้อยละ 89.3) สะท้อนให้เห็นว่ามาตรการสามารถลดการดึงพลังงานจากระบบในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (2) การเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานช่วง Off-peak พลังงานในช่วง Off-peak เพิ่มขึ้นจาก 1.45 เป็น 5.37 kWh/วัน (ร้อยละ 270.3) บ่งชี้ว่าเกิดการเลื่อนเวลาการใช้พลังงาน (Load Shifting) ได้สำเร็จ ซึ่งเป็นผลที่พึงประสงค์ในเชิงการบริหารระบบไฟฟ้าและช่วยกระจายโหลดให้สมดุลตลอดทั้งวัน(3) การลดค่าไฟฟ้ารวม ค่าไฟฟ้าลดลงจาก 488.40 เป็น 399.51 บาท/เดือน (ร้อยละ 20.02) แม้ปริมาณการใช้พลังงานโดยรวมไม่ได้ลดลง แต่การเปลี่ยนช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าไปยัง Off-peak ซึ่งมีอัตราค่าไฟต่ำกว่า ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้โดยตรง (4) การลดกำลังสูงสุดช่วง On-peak กำลังสูงสุดลดลงจาก 2.89 เป็น 0.42 kW (ร้อยละ 85.5) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของมาตรการในการตัดยอดโหลดสูงสุด (Peak Shaving) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดต้นทุนค่าความต้องการไฟฟ้า (Demand Charge) โดยรวมแล้ว มาตรการที่ดำเนินการบรรลุเป้าหมายทั้งด้านการประหยัดพลังงานช่วง On-peak การบริหารโหลด และการลด

ESTACON 2026 | 17th

ค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตาม ควรมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อยืนยันความยั่งยืนของผลลัพธ์ที่ได้

4.3 ประสิทธิภาพ Load Shifting

ระบบ ESS ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพ Load Shifting Efficiency (LSE) โดยเฉลี่ย 91.4% ซึ่งหมาย ความว่าจากพลังงานที่โหลดต้องการในช่วง On-peak ทั้งหมด โดยระบบสามารถย้ายมาจ่ายจากแบตเตอรี่ที่ชาร์จในช่วง Off-Peak ได้ถึงร้อยละ 91.4 ผลนี้สูงกว่าที่ทีมผู้วิจัยต่างประเทศรายงานไว้ที่ร้อยละ 18.2 ในระบบที่ไม่มีการควบคุมอัตโนมัติ [3] ยืนยันความสำคัญของระบบ EMS อัตโนมัติในการจัดการระบบ ESS ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยที่ พบว่า ระบบ Automated Response ตอบสนองต่อสัญญาณราคา TOU ได้ดีกว่าการตัดสินใจด้วยตนเองถึง 3–4 เท่า [9]

4.4 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การทดสอบ Paired t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพลังงาน On-peak ระหว่างช่วง Pre-test และ Post-test (28 วันต่อช่วง) พบว่าค่า t-statistic = 63.07 (df = 27) ค่า p-value < 0.0001 ซึ่งสูงกว่าค่า t-critical=1.703 ที่ระดับนัยสำคัญα=0.05 อย่างมาก จึงปฏิเสธสมมติฐาน และยืนยันว่าค่าเฉลี่ยพลังงาน On-peak หลังติดตั้งระบบ ESS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการคำนวณดังกล่าวได้จากคำสั่ง t-Test: Paired Two Sample for Means ในชุดเครื่องมือ Data Analysis ToolPak ของโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและเหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลของโครงงานต้นแบบนี้

4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนรวมในการลงทุนติดตั้งระบบ ESS ต้นแบบเท่ากับ 44,000 บาท ในสภาวะโหลดทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ (โหลดเฉลี่ย 290–340 วัตต์) ซึ่งประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 88.89 บาท/เดือน หรือ 1,066.68 บาท/ปี ได้ Simple Payback Period (SPP) ประมาณ 28 ปี อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ในบริบทการใช้งานจริงกับโหลดขนาดบ้านพักอาศัย (3–5 kW) พร้อมคำนึงถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าไฟฟ้าร้อยละ 5 ต่อปี พบว่า SPP ลดลงเหลือประมาณ 6–8 ปี ซึ่งสั้นกว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ LiFePO4 (8–10 ปี) และมีค่า NPV เป็นบวก (+18,540 บาท) สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงาน SPP ที่ 7–12 ปีสำหรับอาคารพาณิชย์ [4]

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามขนาดโหลด

กรณี	ขนาดโหลด	การประหยัด/ปี (บาท)	Payback Period
ทดลอง (ห้องปฏิบัติการ)	~0.3 kW	1,066	~28 ปี
บ้านพักอาศัย	3–5 kW	7,000–11,000	6–8 ปี
อาคารสำนักงาน	10–20 kW	50,000–80,000	3–5 ปี

4.6 ข้อจำกัดและขอบเขตการประยุกต์ใช้ระบบ

แม้ระบบ ESS ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะแสดงผลลัพธ์ด้านการประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ดี แต่ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4 ชี้ให้เห็นข้อจำกัดของระบบที่ผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้ควรพิจารณา ดังนี้

(1) ข้อจำกัดด้านขนาดโหลด ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแปรผันตามขนาดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างชัดเจน กรณีโหลดขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ (ประมาณ 0.3 kW) มีระยะเวลาคืนทุนยาวนานถึงประมาณ 28 ปี ซึ่งเกินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ LiFePO4 (8–10 ปี) จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ในขณะที่โหลดระดับบ้านพักอาศัย (3–5 kW) และอาคารสำนักงาน (10–20 kW) มีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่าและเหมาะสมกว่า ดังนั้นระบบนี้จึงเหมาะสมกับสถานที่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าช่วง On-peak ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอ มากกว่าการใช้งานกับโหลดขนาดเล็กมาก

(2) ข้อจำกัดด้านระยะเวลาการเก็บข้อมูล การทดลองดำเนินการเพียง 8 สัปดาห์ (Pre-test และ Post-test ช่วงละ 4 สัปดาห์) ซึ่งยังไม่ครอบคลุมความผันแปรของพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าตามฤดูกาล (ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว) และยังไม่มีข้อมูลการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาว จึงควรเก็บข้อมูลต่อเนื่องอย่างน้อย 1 ปีตามข้อเสนอแนะ เพื่อยืนยันความแม่นยำของผลการประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาว

(3) ข้อจำกัดด้านโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า ระบบถูกออกแบบให้สอดคล้องกับโครงสร้างอัตราTOU ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) โดยเฉพาะ ผลลัพธ์ที่**ได้**จึงอาจไม่สามารถนำไปใช้อ้างอิงโดยตรงกับผู้ใช้ไฟฟ้าในเขตพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) หรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่เลือกใช้อัตราปกติ (Normal Rate) ซึ่งมีโครงสร้างราคาต่างกัน

(4) ข้อจำกัดด้านความจุแบตเตอรี่แบบตายตัว ระบบต้นแบบใช้แบตเตอรี่ขนาดคงที่ 4.8 kWh ซึ่งคำนวณให้เหมาะสมกับโปรไฟล์โหลดที่ใช้ทดสอบเท่านั้น หากนำไปใช้กับสถานที่ที่มีโหลดช่วง On-peak สูงกว่าที่ออกแบบไว้ จำเป็นต้องคำนวณและปรับขนาดความจุแบตเตอรี่ใหม่ให้เหมาะสมกับโหลดจริง

(5) ข้อจำกัดด้านการบูรณาการกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทดสอบการทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Rooftop) จึงยังไม่สามารถยืนยันประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบเมื่อทำงานร่วมกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้

โดยสรุป ระบบ ESS ต้นแบบนี้เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในสถานที่ที่อยู่ในระบบอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ของ กฟน. มีโหลดการใช้ไฟฟ้าช่วง On-peak ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอ ตั้งแต่ระดับบ้านพักอาศัย (3 kW ขึ้นไป) จนถึงอาคารพาณิชย์ขนาดเล็ก-กลาง และมีความสามารถในการลงทุนเบื้องต้น ในขณะที่ยัง

ไม่เหมาะสมสำหรับโหลดขนาดเล็กมากหรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีรูปแบบการใช้พลังงานไม่สม่ำเสมอ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและทดสอบระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (ESS) ต้นแบบโดยใช้แบตเตอรี่ LiFePO4 ขนาด 4.8 kWh ร่วมกับระบบ EMS บนบอร์ด ESP32 เพื่อทำ Load Shifting ตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า TOU โดยสรุปผลการทดลองได้ดังนี้:

1. ระบบสามารถลดพลังงานช่วง On-peak ลงได้ร้อยละ 89.3 (จาก 3.82 เหลือ 0.41 kWh/วัน) และลดค่าไฟฟ้ารายเดือนลงได้ร้อยละ 20.02
2. ระบบมีประสิทธิภาพการย้ายโหลด (LSE) ร้อยละ 91.4 ประสิทธิภาพรวมระบบ (RTE) ร้อยละ 91.9 และลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดช่วง On-peak ได้ร้อยละ 85.5 โดยมีความแตกต่างก่อนและหลังติดตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$)
3. การใช้งานในระดับบ้านพักอาศัยจริงมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6–8 ปี ซึ่งสั้นกว่าอายุใช้งานของแบตเตอรี่

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ควรพิจารณาบูรณาการระบบ ESS ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Rooftop) เพื่อให้นำพลังงานสะอาดที่ผลิตได้เองมาชาร์จลงแบตเตอรี่โดยตรง พร้อมทั้งพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมด้วยปัญญาประดิษฐ์ (Machine Learning) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมโหลด และควรเก็บข้อมูลในระยะยาวอย่างน้อย 1 ปีเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยทางฤดูกาล

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจทานงานวิจัยอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด อีกทั้งขอขอบคุณ บริษัท พีจี อิเล็กทริค กรุ๊ป จำกัด ที่สนับสนุนทีมช่างเทคนิคและอุปกรณ์สำหรับการติดตั้ง และการแนะนำการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยซึ่งเป็นงานบูรณาการโครงงานในรายวิชาสหกิจศึกษาชิ้นนี้ที่ได้ให้ทีมนักศึกษาและคณาจารย์ได้ทำการวิจัยร่วมในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2566). รายงานประจำปี 2566: ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ. นนทบุรี: กฟผ.

[2] การไฟฟ้านครหลวง. (2566). โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ Time-of-Use. กรุงเทพฯ: กฟน.

[3] Castillo-Cagigal, M., Garrido-Zafra, J., Caamaño-Martín, E., and Moreno-Munoz, A. (2011). "PV self-consumption optimization with storage and active DSM for the residential sector." Solar Energy, 85(9), 2338–2348.

[4] Merei, G., Moshoevel, C., Magnor, D., and Sauer, D. U. (2016). "Optimization of self-consumption and techno-economic analysis of PV-battery systems in commercial applications." Applied Energy, 168, 171–178.

[5] Dunn, B., Kamath, H., and Tarascon, J. M. (2011). "Electrical energy storage for the grid: A battery of choices." Science, 334(6058), 928–935.

[6] Nykvist, B., and Nilsson, M. (2015). "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles." Nature Climate Change, 5(4), 329–332.

[7] BloombergNEF. (2023). *Electric Vehicle Outlook 2023 and Lithium-Ion Battery Price Survey*. New York: Bloomberg Finance L.P.

[8] กานต์ อินทะสอน,ปัญญา เข็มมุข, และ สุรกิจ ทองสุก.(2563).“การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพระบบ PV - BESS สำหรับอาคารที่ใช้ระบบอัตราค่าไฟฟ้า TOU ในประเทศไทย." วารสารวิศวกรรมศาสตร์ไทย,18(2), 45–58.

[9] Borenstein, S. O., Jaske, M., and Rosenfeld, A. (2002). Dynamic pricing, advanced metering and demand response in electricity markets. Berkeley: University of California Energy Institute, CSEM Working Paper 105.

การสร้างและประเมินการทำงานของชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติกรณีเปลี่ยนแม่พิมพ์:สหกิจศึกษา

Construction and Performance Evaluation of an Semi-automated Support Plate Set for Mold Change: Cooperative Education

ชยุตพงศ์ ขมเล็ก[1], เมฆา มะหะหมัดซอและ[1], นรินทร์ กุลนภาดล[2], กาหลง บัวนาค[2] และชัชวาล นิมโรธรรม[2]*

[1]นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลยานยนต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถ.มรุพงษ์ ต.หน้าเมือง อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์สมัยใหม่ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถ.มรุพงษ์ ต.หน้าเมือง อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

*ผู้ติดต่อ: Chatchawal.nim@rru.ac.th, 0816673782

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและสร้างชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติสำหรับอำนวยความสะดวกในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ในสายการผลิต และ 2) เพื่อประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและการใช้งานของชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติโดยผู้เชี่ยวชาญในสถานประกอบการ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ปัญหาความเสี่ยงด้านการยศาสตร์และลดระยะเวลาการสูญเปล่าในกระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้องค์ความรู้ทางวิศวกรรมเครื่องกลในการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสร้างกลไกการยกตัวแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ระบบนิวเมติกส์เข้ามาทดแทนการใช้แรงงานคนในการยกพาเลทไม้แบบเดิม โครงสร้างมีขนาดกว้าง 940 มิลลิเมตร ยาว 2950 มิลลิเมตร และสูง 57 มิลลิเมตร การประเมินคุณภาพอาศัยผู้เชี่ยวชาญจากสถานประกอบการจำนวน 5 คน ประเมินด้านโครงสร้าง ความปลอดภัย และการยศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า ค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ของแบบประเมินผ่านเกณฑ์ และผลการประเมินความพึงพอใจด้านคุณภาพการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก ค่าเฉลี่ย 4.50 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.55 โดยเฉพาะการลดภาระทางร่างกายที่มีคะแนนสูงสุด ค่าเฉลี่ย 4.75 สรุปได้ว่านวัตกรรมดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง ช่วยลดภาระทางร่างกายและมีแนวโน้มลดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์จากการยกและเคลื่อนย้ายพาเลทไม้ของพนักงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิตได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: การยศาสตร์, ระบบนิวเมติกส์, สหกิจศึกษา, เครื่องปั๊มโลหะ, ชุดพื้นรองปฏิบัติงาน

Abstract

The objectives of this research are 1) to design and construct a semi-automated support plate set to facilitate the mold changeover process in the production line, and 2) to evaluate the design and functional quality of the semi-automated support plate set by industrial experts. The primary goal is to address ergonomic risks and reduce wasted time during the mold changeover process. The researcher applied mechanical engineering principles to design the structure using CAD software and developed a semi-automated lifting mechanism utilizing a pneumatic system to replace the manual lifting of heavy wooden pallets. The dimensions of the structure are 940 mm in width, 2950 mm in length, and 57 mm in height. The quality evaluation was conducted by five industrial experts, focusing

on structural integrity, safety, and ergonomics. The results indicated that the Index of Item-Objective Congruence (IOC) passed. The overall satisfaction regarding functional quality was rated at an "Excellent" level (Mean = 4.50, SD = 0.55), with reduction of physical burden receiving the highest scores (Mean = 4.75). In conclusion, this innovation is highly practical, significantly reducing the physical burden and demonstrating a tendency to mitigate ergonomic risks related to manual pallet lifting among operators, while substantially enhancing production line efficiency.

Keywords: Ergonomics, Pneumatic system, Cooperative education, Press machine, Support plate

1. บทนำ

สหกิจศึกษาและการศึกษาเชิงบูรณาการกับการทำงาน หมายถึง การจัดการศึกษาเชิงประสบการณ์อิงฐานสมรรถนะ ซึ่งสถาบันอุดมศึกษาและสถานประกอบการร่วมกันออกแบบและร่วมพัฒนา โดยให้นักศึกษาได้เรียนในสถาบันอุดมศึกษาควบคู่กับการไปปฏิบัติงานจริงในสถานประกอบการ เพื่อให้นักศึกษามีสมรรถนะพร้อมสู่โลกแห่งการทำงานจริงได้ทันทีหลังสำเร็จการศึกษา [1] จากการเข้าปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ณ บริษัท ชิโรกิ คอร์ปอร์เรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด ผู้วิจัยได้พบปัญหาในกระบวนการทำงานบริเวณสายการผลิตปั๊มขึ้นรูปโลหะ สืบเนื่องจากความจำเป็นในการปรับผังโรงงาน ทำให้ต้องมีการจัดเก็บแม่พิมพ์ไว้บริเวณด้านล่างของโต๊ะวางแม่พิมพ์ ในกระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์แต่ละครั้ง จึงมีความจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการยกเคลื่อนย้ายพาเลทไม้แบบเดิมที่มีน้ำหนักมากออกจากพื้นที่ เพื่อให้สามารถนำเครื่องมือเข้าไปปฏิบัติงานได้ การกระทำดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่ออาชีวอนามัยของพนักงาน ก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) เช่น อาการปวดหลังสะสมจากการทำงานหนัก นอกจากนี้ กระบวนการดังกล่าวยังทำให้เกิดความสูญเปล่าด้านเวลาในการเตรียมการผลิต จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน โดยเปลี่ยนจากระบบที่ต้องใช้แรงงานคนมาเป็นการใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติด้วยกระบอกสูบนิวเมติกส์ เพื่ออำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน ลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ และเพิ่มประสิทธิผลของสายการผลิต โดยได้รับการสนับสนุนจากสถานประกอบการในการสร้างนวัตกรรมชิ้นนี้จนสำเร็จ

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ สำหรับอำนวยความสะดวกในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ในสายการผลิต

2.2 เพื่อประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและการใช้งานของชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติโดยผู้เชี่ยวชาญในสถานประกอบการ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

3.1 กลศาสตร์โครงสร้างและวัสดุศาสตร์

ชุดพื้นรองปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีความมั่นคงแข็งแรงเพื่อรองรับน้ำหนักสถิตจากตัวผู้ปฏิบัติงาน

และน้ำหนักพลวัตอันเกิดจากแรงสั่นสะเทือนของเครื่องปั๊มขึ้นรูปโลหะ โครงสร้างหลักจึงถูกออกแบบโดยอาศัยเหล็กรูปพรรณหน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวงหรือเหล็กกล่องซึ่งมีคุณสมบัติทางวัสดุศาสตร์ที่โดดเด่นในการต้านทานแรงดัดและแรงอัดได้ดี อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กหน้าตัดทึบ

นอกจากนี้ การออกแบบกลไกการยกตัวได้อาศัยหลักการของจลนศาสตร์และคาน โดยการกำหนดตำแหน่งจุดหมุน (Pivot point) และจุดยึดกระบอกสูบให้เกิดการได้เปรียบเชิงกล ทำให้กระบอกสูบสามารถออกแรงดันโครงสร้างให้ยกตัวขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้พลังงานน้อยที่สุด [2]

3.2 ระบบนิวเมติกส์

ระบบนิวเมติกส์เป็นระบบที่อาศัยการอัดตัวของอากาศเพื่อส่งถ่ายกำลังและเปลี่ยนพลังงานความดันให้เป็นพลังงานกลในรูปแบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ลมอัดจากโรงงานอุตสาหกรรมจ่ายเข้าสู่กระบอกสูบลม โดยแรงทางกลที่กระบอกสูบสามารถผลิตได้จะแปรผันตรงกับความดันของลมอัดและพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$F = PA \qquad (1)$$

เมื่อ F คือ แรงทางกลของกระบอกสูบ (N)

P คือ ความดันของลมอัดสูบ (Pa)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (m^2)

เพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการควบคุมระบบ ได้มีการติดตั้งวาล์วควบคุมทิศทางแบบมือโยก สำหรับสั่งการยืดและหดตัวของกระบอกสูบร่วมกับการใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหล เพื่อปรับหรี่อัตราการไหลของลม ส่งผลให้ความเร็วในการยกตัวและการลดระดับของชุดพื้นรองมีความนุ่มนวล ป้องกันการกระชากที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและลดความเสียหายของโครงสร้าง [3]

3.3 การยศาสตร์ (Ergonomics)

การยศาสตร์ คือ ศาสตร์แห่งการออกแบบ สร้างและปรับปรุงระบบงานมีความเหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานของมนุษย์มากที่สุด [4] ในกระบวนการทำงานแบบเดิม พนักงานมีความจำเป็นต้องออกแรงยกและเคลื่อนย้ายพาเลทไม้ที่มีน้ำหนักมาก การก้มตัวและยกสิ่งของหนักอย่างต่อเนื่องก่อให้เกิดความเค้นกดทับบริเวณหมอนรองกระดูกสันหลังส่วนล่าง เสี่ยงต่อการเกิดภาวะความผิดปกติทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ การพัฒนาชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติจึงเป็นการประยุกต์หลักการทางวิศวกรรมไปใช้ที่ต้นเหตุของปัญหาการยศาสตร์โดยตรง เป็นหลักการปรับปรุงกระบวนการทำงาน (ECRS) ในมิติของการกำจัดกิจกรรมที่ไม่จำเป็น (Eliminate) [5] โดยขจัดขั้นตอนการยกพาเลทไม้ออกไปโดยสิ้นเชิง เปลี่ยนเป็นการใช้กลไกผ่อนแรง ซึ่งช่วยลดภาระทางร่างกาย เพิ่มความปลอดภัยและส่งเสริมอาชีวอนามัยที่ดีแก่พนักงานในสายการผลิต

3.4 การประเมินทางสถิติ

การหาค่าความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม (Index of item objective congruence, IOC) ของผู้เชี่ยวชาญด้วยการให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบสอบถามการวิจัย คือ การหาค่าสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ ซึ่งปกติแล้วจะให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบตั้งแต่ 3 คนขึ้นไปในการตรวจสอบ โดยให้เกณฑ์ในการตรวจพิจารณาข้อคำถามดังนี้ คะแนน +1 แน่ใจว่าข้อคำถามวัดได้ตรงตามวัตถุประสงค์, 0 ไม่แน่ใจว่าข้อคำถามวัดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ และ -1 แน่ใจว่าข้อคำถามวัดได้ไม่

ตรงตามวัตถุประสงค์ แล้วนำผลคะแนนที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญมาคำนวณหาค่า IOC ตามสมการที่ (2) โดยข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50-1.00 ถือว่ามีค่าความเที่ยงตรงสามารถใช้ได้ ในทางตรงกันข้ามหากข้อคำถามมีค่า IOC ต่ำกว่า 0.50 ถือว่ายังใช้ไม่ได้ต้องมีการปรับปรุง [6]

$$IOC = \frac{\Sigma R}{N} \quad (2)$$

เมื่อ IOC คือ ค่าดัชนีความสอดคล้อง

ΣR คือ ผลรวมคะแนนของผู้เชี่ยวชาญ

N คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้นำเครื่องมือทางสถิติมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลการประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้แบบประเมินมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ ซึ่งอ้างอิงหลักการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) [7] ดังนี้

1. ค่าเฉลี่ย (Mean) เป็นค่ากลางของข้อมูลที่ใช้เพื่อสรุปภาพรวมของระดับความพึงพอใจหรือระดับคุณภาพในแต่ละหัวข้อการประเมิน โดยคำนวณได้จากการนำผลรวมของคะแนนประเมินทั้งหมดหารด้วยจำนวนผู้เชี่ยวชาญ [7] หาได้จากสมการที่ (3)

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{n} \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนนประเมินในข้อนั้น ๆ

x คือ คะแนนประเมินของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน

n คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด

Σ คือ ผลรวมทางคณิตศาสตร์

2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้เพื่อวัดการกระจายตัวของชุดข้อมูล [7] หากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องกันสูง แต่หากมีค่ามากแสดงว่ามีความคิดเห็นที่แตกต่างกัน โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หาได้จากสมการที่ (4)

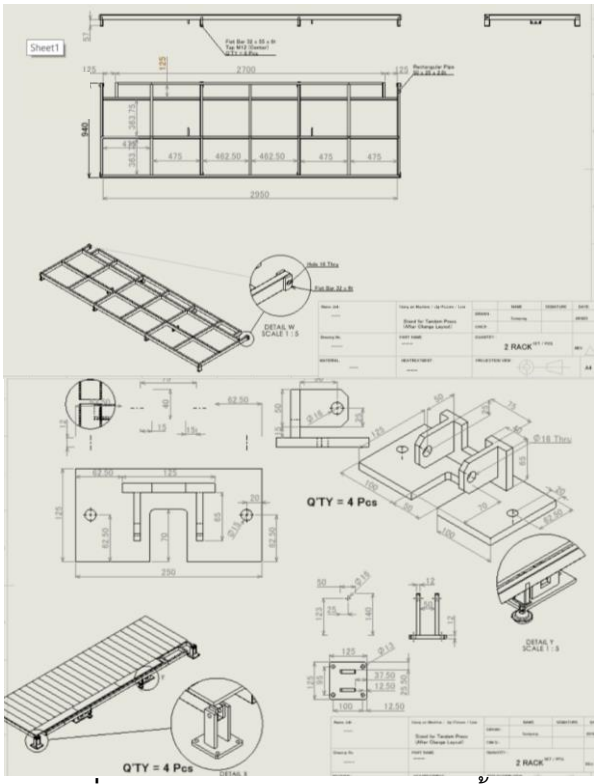
$$SD = \sqrt{\frac{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

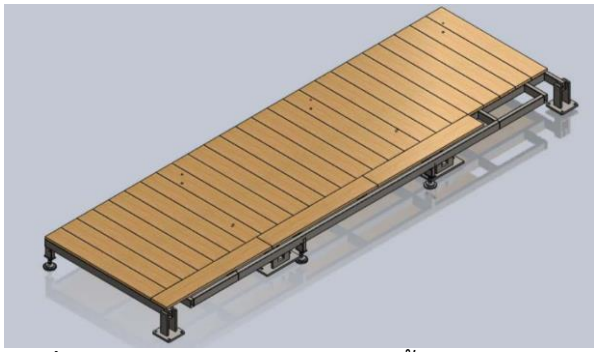
4.1 การออกแบบโครงสร้าง

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์พื้นที่หน้าเครื่องจักรและออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solid Works ดังแสดงในรูปที่ 1

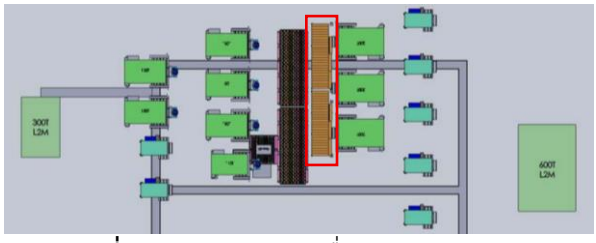


รูปที่ 1 แบบแสดงโครงสร้างและขนาดชิ้นงาน

โดยกำหนดขนาดโครงสร้างให้มีความกว้าง 940 มิลลิเมตร ความยาว 2950 มิลลิเมตร และความสูงจากพื้น 57 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวยึดจุดหมุนที่ความสูงจากพื้น 135 มิลลิเมตร และตัวยึดกระบอกสูบที่ความสูง 77 มิลลิเมตร เพื่อไม่ให้กีดขวางการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2 โครงสร้างหลักออกแบบโดยใช้เหล็กกล่อง ขนาด 25*25 มิลลิเมตร ทำโครงสร้างกรอบและเหล็กรองพาเลทใช้ขนาด 12*12 มาตรฐาน มอก. 1072566 หูจับด้านข้างใช้เหล็กแผ่นตัดขึ้นรูป หนา 5 มิลลิเมตร โดยออกแบบให้สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ที่ 80 กิโลกรัม ในขณะที่ตัวโครงสร้างมีน้ำหนักรวมประมาณ 38 กิโลกรัม รูปที่ 3 แสดงผังการจัดวางเครื่องจักร (Layout) ของสายการผลิตเครื่องปั๊มขึ้นรูปโลหะและตำแหน่งชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ (ภายในกรอบสีแดง)



รูปที่ 2 ภาพจำลองสามมิติแสดงชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

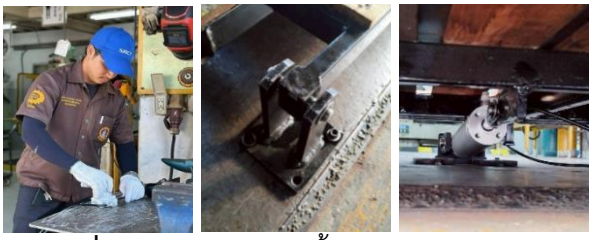


รูปที่ 3 ผังการจัดวางเครื่องจักร (Layout) ของสายการผลิตเครื่องปั๊มขึ้นรูปโลหะ

4.2 การสร้างและประกอบชิ้นงาน

การสร้างและประกอบชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีขั้นตอน ได้แก่ การตัด ดัด และเชื่อมประกอบโครงสร้างเหล็ก ทำการติดตั้งกระบอกสูบนิวเมติกส์ จำนวน 2 ตัว บริเวณด้านล่างของโครงสร้าง โดยระบบขับเคลื่อนใช้กระบอกสูบนิวเมติกส์ยี่ห้อ SMC รุ่น CG1TN63-175Z1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 63 มิลลิเมตร ระยะการชัก 175 มิลลิเมตร โดยทำงานที่ความดันลม 4 บาร์ ซึ่งสามารถสร้างแรงยกแนวตั้งได้ 950 นิวตัน

ติดตั้งวาล์วมือโยกและเดินสายลมโพลียูรีเทน (PU) จากนั้นทำการปูพื้นผิวด้านบนด้วยไม้กระดานจากไม้พาเลทเหลือทิ้งจากสถานประกอบการเพื่อลดต้นทุน และติดตั้งขาฉิ่งปรับระดับเพื่อความมั่นคงของฐาน



รูปที่ 4 การประกอบติดตั้งโครงสร้าง จุดหมุน และกระบอกสูบ



รูปที่ 5 ชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติที่เสร็จสมบูรณ์

4.3 การหาประสิทธิภาพและประเมินคุณภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพและประเมินคุณภาพของชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีดำเนินการออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การทดสอบในสภาวะการปฏิบัติงานจริง ผู้วิจัยได้นำชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ไปติดตั้งและทำการทดสอบการทำงานจริงหน้าสายการผลิตร่วมกับเครื่องปั๊มโลหะในสถานประกอบการ เพื่อทดสอบความเสถียรของระบบกลไกอัตราการตอบสนองของระบบควบคุมนิวเมติกส์ และความสอดคล้องกับจังหวะการทำงานจริงของพนักงานผู้ปฏิบัติงาน

2. การตรวจสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิจัยก่อนนำแบบประเมินไปจัดเก็บข้อมูลจริง ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบประเมินคุณภาพชิ้นงาน ซึ่งครอบคลุมเกณฑ์การวัดในด้านความปลอดภัย ความมั่นคงด้านการยศาสตร์ ด้านความทนทาน และด้านคู่มือการบำรุงรักษา โดยนำร่างแบบประเมินดังกล่าวให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเพื่อหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ตามสมการที่ (2) โดยคัดเลือกเฉพาะหัวข้อที่มีค่าดัชนี IOC ตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป ซึ่งท้ายที่สุดได้ข้อคำถามที่มีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหารวมทั้งสิ้น 10 รายการประเมิน

3. การประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยได้เชิญผู้เชี่ยวชาญจากสถานประกอบการ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มผู้จัดการฝ่ายผลิตและวิศวกรซ่อมบำรุงที่มีประสบการณ์ตรงจำนวน 5 คน ซึ่งมีประสบการณ์ในสายการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไม่ต่ำกว่า 5 ปีทำการสังเกตการณ์สภาวะการทำงานของชิ้นงานหน้าสายการผลิตและประเมินคุณภาพเชิงวิศวกรรมผ่านแบบประเมินมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (5 = ดีมาก, 4 = ดี, 3 = ปานกลาง, 2 = พอใช้, 1 = ปรับปรุง) ตามแนวคิดของลิเคิร์ท หลังจากการประเมินเสร็จสิ้น ผู้วิจัยจึงนำคะแนนทั้งหมดมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ เพื่อนำผลลัพธ์ทางสถิติไปอภิปรายผลในขั้นต่อไป

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการสร้างชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ

จากการดำเนินการสร้าง พบว่าชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ สามารถติดตั้งเข้ากับพื้นที่หน้าเครื่องจักรได้อย่างพอดี โครงสร้างมีความมั่นคงแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักพนักงานขณะปฏิบัติงานและทนทานต่อแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องปั๊มโลหะได้ กลไกกระบอกสูบสามารถยกชุดพื้นรองขึ้นและลงได้อย่างนุ่มนวลผ่านการควบคุมด้วยวาล์วมือโยก ช่วยลดขั้นตอนและเวลาในการย้ายพาเลทไม้แบบเดิมได้อย่างเป็นรูปธรรม

5.2 ผลการทดสอบสมรรถนะเชิงปฏิบัติการเบื้องต้น

จากการทดสอบใช้งานชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติหน้าสายการผลิตจริง พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์ได้อย่างเป็นรูปธรรม ดังนี้

1. การลดเวลาสูญเปล่า ลดขั้นตอนการจัดหาและซ้อนพาเลทไม้แบบเดิม ทำให้เวลาเตรียมการลดลงประมาณ 10 นาทีต่อรอบ โดยชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติทำงาน 40 วินาทีในการยกขึ้น ส่วนการใช้คนต้องยกจากจุดหนึ่งไปยังจุดเก็บฐานรอง ใช้เวลาเคลื่อนย้ายประมาณ 8-10 นาทีต่อครั้ง (มีการเปลี่ยนแม่พิมพ์ 3-4 ครั้งต่อวัน)

2. การลดภาระทางร่างกาย ก่อนการปรับปรุงพนักงานต้องออกแรงยกพาเลทไม้น้ำหนักประมาณ 25 กิโลกรัม จำนวน 4 ครั้งต่อวัน ภายใต้ท่าทางการก้มเงยที่ผิดหลักการยศาสตร์ หลังจากการติดตั้งนวัตกรรมนี้ พนักงานเพียงแค่กดปุ่มควบคุม ทำให้ลดแรงกระทำต่อกระดูกสันหลังลงได้อย่างชัดเจน แม้จะไม่ได้ประเมินด้วยเครื่องมือทางสรีรวิทยา แต่สามารถสังเกตได้จากความสะดวกในการปฏิบัติงานที่เพิ่มขึ้น

5.3 ผลการประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและการใช้งาน

ผลการประเมินดัชนีความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 คน พบว่าข้อคำถามที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 (อยู่ระหว่าง 0.66-1.00) แสดงว่าแบบประเมินมีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาและสามารถนำไปใช้ได้จำนวน 10 รายการ

สำหรับผลการประเมินความพึงพอใจด้านคุณภาพการออกแบบและการใช้งาน รายละเอียดคะแนนเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนในแต่ละด้านแสดงในตารางที่ 1 จากการประเมินคุณภาพด้านการออกแบบและการใช้งานโดยผู้เชี่ยวชาญในสถานประกอบการจำนวน 5 คน สามารถนำมาวิเคราะห์และอภิปรายผลได้ 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

1. ด้านความแข็งแรงของโครงสร้างและการยศาสตร์ ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่าชิ้นงานมีความโดดเด่นในด้านการออกแบบโครงสร้างและการลดภาระทางร่างกาย โดยหัวข้อความแข็งแรงทนทาน ความประณีต การเลือกใช้วัสดุ ความสมดุลของฐาน และการลดภาระทางร่างกายตามหลักการยศาสตร์ ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุดที่ 4.75 ระดับดีมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์โครงสร้างในการเลือกใช้วัสดุมาประกอบเป็นฐานนั้น มีความเหมาะสม สามารถทนทานต่อแรงกดทับและแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องปั๊มโลหะได้เป็นอย่างดี สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาคอขวดได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. กลุ่มของประสิทธิภาพกลไกการส่งกำลัง ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ได้รับคะแนนประเมินอยู่ในเกณฑ์เดียวกันที่ 4.25 ระดับดี แม้จะอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ แต่เป็นข้อสังเกตที่แสดงให้เห็นถึงช่องว่างในการพัฒนาต่อยอด เช่น ธรรมชาติของระบบนิวเมติกส์ที่ความเร็วและแรงดันลมแปรผันตามระบบของโรงงาน อาจทำให้เกิดความไม่ราบเรียบในบางจังหวะ การพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วลมเพิ่มเติม อาจช่วยเพิ่มความนุ่มนวลและยกระดับความปลอดภัยในการใช้งานระยะยาว รวมถึงสอดคล้องกับแผนการบำรุงรักษาที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วนด้านคู่มือปฏิบัติงาน ได้รับคะแนนประเมินที่ 4.25 ระดับดีเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม จุดนี้สามารถพัฒนาต่อยอด โดยการจัดทำเอกสารคู่มือ แผนผังจุดหล่อลื่นและรอบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้มีรูปแบบที่เข้าใจง่ายขึ้น เช่น การใช้ภาพประกอบหรือวิดีโอ จะช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของนวัตกรรมให้พร้อมสำหรับการขยายผลในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

3. ตัวชี้วัดที่ได้รับคะแนนประเมินต่ำที่สุดจากการวิเคราะห์ข้อมูลคือ การดูแลรักษาและการซ่อมบำรุง คะแนนเฉลี่ย 4.00 สิ่งที่น่าสนใจในทางสถิติคือ หัวข้อนี้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 0.82 ซึ่งสูงกว่าทุกหัวข้อประเมิน สะท้อนให้เห็นถึงความคิดเห็นที่ค่อนข้างกระจายตัวของผู้เชี่ยวชาญ

เมื่อพิจารณาในภาพรวม ชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติ ได้รับคะแนนประเมินเฉลี่ยสะสมที่ 4.50 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.55 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก นวัตกรรมนี้ได้รับการพิสูจน์ผ่านมุมมองของ

ESTACON 2026 | 17th

ผู้เชี่ยวชาญแล้วว่ามีคุณค่าทางวิศวกรรม สามารถแก้ปัญหาคอขวดในกระบวนการผลิต ลดความสูญเปล่าของเวลาและขจัดปัญหาด้านการยศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 สรุปผลการประเมินความพึงพอใจและคุณภาพของผลงานนวัตกรรม

รายการประเมิน	$\bar{x}$	SD
1. ความแข็งแรงทนทานในการรองรับแรงกดโดยไม่เสียรูป	4.75	0.50
2. ความประณีตของรอยเชื่อม จุดยึด และความปลอดภัยของผิวงาน	4.75	0.50
3. ความเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุ	4.75	0.50
4. ประสิทธิภาพและความลื่นไหลของกลไกการส่งกำลัง	4.25	0.50
5. ความมั่นคงและสมดุลของฐานขณะปฏิบัติงาน	4.75	0.50
6. ความมั่นคงของโครงสร้างหลัก	4.50	0.58
7. สามารถลดภาระทางร่างกายได้	4.75	0.50
8. มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.25	0.50
9. การดูแลรักษาและการซ่อมบำรุง	4.00	0.82
10. คู่มือการใช้งาน	4.25	0.58
ภาพรวม	4.50	0.55

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาชุดพื้นรองปฏิบัติงานกึ่งอัตโนมัติประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ นวัตกรรมนี้สามารถแก้ปัญหาการสูญเสียเวลาและขจัดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของพนักงานได้เป็นอย่างดี โครงสร้างที่ออกแบบมีความเหมาะสมทางวิศวกรรม ได้รับการยอมรับจากผู้เชี่ยวชาญในระดับดีมากและถูกนำไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิตของบริษัท ชิโรกิ คอร์ปอร์เรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสำเร็จของการบูรณาการความรู้ทางวิศวกรรมเพื่อพัฒนานวัตกรรมในรูปแบบสหกิจศึกษา

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดสอบการใช้งานจริงหน้าสายการผลิตอย่างน้อย 3-6 เดือน เพื่อศึกษาอัตราการสึกหรอของระบบนิวเมติกส์และการล้าตัวของจุดเชื่อม สำหรับนำไปวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้แม่นยำยิ่งขึ้น

2. ควรปรับปรุงจากเอกสารดั้งเดิมไปสู่มาตรฐานการทำงานด้วยภาพ (Visual SOP) คลิปวิดีโอสั้น หรือป้ายกำกับสัญลักษณ์บนเครื่องจักร เพื่อให้พนักงานใหม่เข้าใจง่ายและใช้งานได้อย่างปลอดภัย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นายสมปอง เกษทอง ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุง บริษัท ชิโรกิ คอร์ปอร์เรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด ที่กรุณาให้คำปรึกษาและสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์และงบประมาณในการจัดทำโครงงาน รวมถึงคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลยานยนต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนโครงงานสหกิจศึกษาชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] คณะกรรมการมาตรฐานการอุดมศึกษา. (2565). "ประกาศคณะกรรมการมาตรฐานการอุดมศึกษา เรื่อง หลักเกณฑ์และแนวปฏิบัติเพื่อส่งเสริมการจัดหลักสูตรสหกิจศึกษาและการศึกษาเชิงบูรณาการกับการทำงาน พ.ศ. 2565." กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, กรุงเทพฯ.

[2] วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. (2556). การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[3] บุญธรรม ภัทราจารุกุล. (2565). งานระบบนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[4] สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (องค์การมหาชน). (2562). คู่มือการปรับปรุงการปฏิบัติงานยกและเคลื่อนย้ายวัสดุด้วยแรงกายตามหลักการยศาสตร์. กรุงเทพฯ: สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (องค์การมหาชน).

[5] สุภาพร แสนกุล, ณัฏฐ์ดนัย สุพัฒน์ธนานนท์, เจษฎา แจ่มแสง, วัชรพล แสงดานุช, เตวิช รุ่งนภากานต์ และ นราธิป สุพัฒน์ธนานนท์. (2568). "การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยหลักการลดความสูญเปล่า ECRS: กรณีศึกษา กระบวนการผลิตขาธงญี่ปุ่นตั้งป้ายไวนิล." วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 3, ฉบับที่ 1.

[6] สุรพงษ์ คงสัตย์ และ ธีรชาติ ธรรมวงค์. (2551). “การหาค่าความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม (IOC),” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.mcu.ac.th/article/detail/14329. [เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2569].

[7] กัลยา วานิชย์บัญชา. (2561). สถิติสำหรับงานวิจัย (พิมพ์ครั้งที่ 12). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การคัดแยกกลุ่มแบคทีเรียเมทาโนโทรฟจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อศักยภาพในการลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกและพัฒนาต่อยอดสู่เซลล์โปรตีนสูง

Isolation of Methanotrophic Bacteria from a Biogas Production System for Greenhouse Gas Mitigation and Development of Single-Cell Protein

ปฐมพร พูลสวัสดิ์[1*], ปัญนกฤช ลาภบริสุทธิ์[1] และ สุคนธา ศิลาอาสน์[1]

[1] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 35 หมู่ 3 เทคโนธานี ถ.เลียบคลองห้า ต.คลองห้า จ.ปทุมธานี, 12120

*ปฐมพร พูลสวัสดิ์: E-mail patomporn@tistr.or.th, เบอร์โทรศัพท์ 02 5779000 ต่อ 9477

บทคัดย่อ

แบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟ (Methanotrophs) เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมแก๊สมีเทนผ่านกระบวนการออกซิเดชันโดยอาศัยแก๊สมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเซลล์ นอกจากนี้เมทาโนโทรฟยังได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้เพื่อผลิตโปรตีนเซลล์เดียว (Single Cell Protein; SCP) ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกคุณภาพสูงสำหรับอาหารสัตว์ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตสูง ใช้วัตถุดิบต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ศึกษาการคัดแยกและจำแนกลักษณะของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟจากตัวอย่างดินรอบๆ บริเวณบ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟาร์มปศุสัตว์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ประเทศไทย ทั้งหมด 14 แหล่ง ตัวอย่างดินถูกนำมาเพาะเลี้ยงแบบเสริมสมรรถนะ (Enrichment Culture) บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Nitrate Mineral Salt (NMS) ภายใต้สภาวะที่มีอากาศผสมแก๊สมีเทนในอัตราส่วน 4:1 ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์ลำดับเบส 16S rRNA ผลการคัดแยกได้เชื้อเมทาโนโทรฟ 2 สายพันธุ์ได้แก่ ปส 1.2 และ ปส 2.2

ผลการวิเคราะห์ลำดับยีน 16S rRNA พบว่าสายพันธุ์ ปส 1.2 มีความใกล้เคียงกับ *Methylomicrobium agile* 99.57% และสายพันธุ์ ปส 2.2 มีความใกล้เคียงกับ *Methylosarcina fibrata* 100.00% โดยทั้งสองสายพันธุ์จัดอยู่ในกลุ่มเมทาโนโทรฟชนิดที่ 1 (Type I methanotrophs) ผลจากการศึกษานี้ช่วยเพิ่มองค์ความรู้และฐานข้อมูลความหลากหลายของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟที่ยังมีการศึกษาน้อยในประเทศไทย รวมถึงเป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้เพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทน การผลิตโปรตีนเซลล์เดียว และพัฒนาผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อสนับสนุนเศรษฐกิจชีวภาพและเศรษฐกิจหมุนเวียนในอนาคต

คำสำคัญ: การคัดแยกเมทาโนโทรฟ, การเพาะเลี้ยงแบบเสริมสมรรถนะ, น้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ, *Methylomicrobium*, *Methylosarcina*

Abstract

Methanotrophic bacteria (methanotrophs) are microorganisms that play a vital role in regulating atmospheric methane through methane oxidation, utilizing methane as their sole carbon and energy source. In addition to their environmental significance, methanotrophs have attracted increasing interest in the production of single-cell protein (SCP), a high-quality alternative protein source for animal feed, due to their rapid growth rate, low-cost substrates, and efficient biomass production.

This study aimed to isolate and characterize methanotrophic bacteria from soil samples collected around wastewater treatment ponds associated with a biogas production system at a livestock farm in Thailand. The soil samples were enriched in Nitrate Mineral Salts (NMS) medium under an

atmosphere containing air and methane at a ratio of 4:1 to selectively promote the growth of methanotrophs. The isolated strains were subsequently characterized based on their morphological characteristics and 16S rRNA gene sequence analysis. Two methanotrophic bacterial strains, designated PS1.2 and PS2.2, were successfully isolated. Phylogenetic analysis based on the 16S rRNA gene sequence revealed that strain PS1.2 shared 99.57% sequence similarity with *Methylomicrobium agile*, whereas strain PS2.2 showed 100.00% sequence similarity with *Methylosarcina fibrata*. Both isolates were identified as Type I methanotrophs.

The findings of this study contribute to the current knowledge and database of methanotrophic bacterial diversity, which remains relatively underexplored in Thailand. Furthermore, these isolates represent valuable microbial resources for future applications in methane mitigation, single-cell protein production, and the development of biotechnological products supporting the bioeconomy and circular economy.

Keywords: Methanotrophs Isolation, Enrichment culture, Biogas wastewater, *Methylomicrobium*, *Methylosarcina*

1. บทนำ

สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นบนโลกเป็นผลกระทบมาจากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากสภาวะแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse effect) สะท้อนกลับมาในรูปของอุณหภูมิที่ผิวโลกที่สูงขึ้นทุกปี การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรทางธรรมชาติที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลโดยตรงต่อแหล่งโปรตีนของทั้งมนุษย์และสัตว์ ได้มีการประมาณการณ์ว่าความต้องการโปรตีนสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์นั้นจะมีปริมาณสูงถึง 1,250 ล้านตันในปี ค.ศ. 2050 [1] อย่างไรก็ดีความต้องการปริมาณโปรตีนยังมีความผันผวน เนื่องจากปริมาณการผลิตโปรตีนจากเนื้อสัตว์มีอัตราการแลกเนื้อค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้โปรตีนที่ได้จากพืชที่จะนำมาใช้ทดแทนโปรตีนจากเนื้อสัตว์ยังมีอัตราแลกเปลี่ยนที่ค่อนข้างสูง จากข้อมูลพบว่าโปรตีนจากพืช จำนวน 6 กิโลกรัม จึงจะสามารถเปลี่ยนเป็นโปรตีนเทียบเท่าเนื้อสัตว์เพียง 1 กิโลกรัม [2]

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว หนึ่งในทางออกของปัญหาคือการผลิตโปรตีนทางเลือกได้แก่ โปรตีนเชิงเดียว (Single cell protein; SCP) ที่ผลิตได้จากเชื้อจุลินทรีย์และสาหร่าย ทั้งอาศัยพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยเมื่อเทียบกับการผลิตโปรตีนรูปแบบอื่น สามารถให้ผลผลิตได้ในทุกฤดูกาล มีความยืดหนุ่นต่อสภาพอากาศที่เพาะเลี้ยง ให้ผลผลิตสูงในระยะเวลาสั้น รวมถึงสามารถใช้แหล่งอาหารได้หลากหลายเช่น วัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร [3]

การใช้ประโยชน์หลักของโปรตีนเซลล์เดียวคือการใช้เป็นโปรตีนทดแทนในอาหารสัตว์ ซึ่งเป็นการทดแทนการใช้วัตถุดิบที่มีโปรตีนสูง เช่น อาหารถั่วเหลือง หรืออาหารปลาป่น โปรตีนจากจุลินทรีย์นั้นสามารถผลิตขึ้นได้จากจุลินทรีย์หลากหลายชนิด เช่น เชื้อรา (Fungi), ยีสต์ (Yeats), สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ร่วมทั้งแบคทีเรีย (Bacteria) ดังแสดงแหล่งของโปรตีนทดแทนในตารางที่ 1 เนื่องด้วยตัวเซลล์ประกอบไปด้วยกรดแอมิโนที่จำเป็น (Essential amino acids) ซึ่งจากาการศึกษาพบว่าสามารถนำมาทดแทนแหล่งโปรตีนจากพืชและเนื้อสัตว์ได้ [4,5] ยิ่งไปกว่านั้นการประเมินผลกระทบทางด้านผลิตภัณฑ์พบว่าการผลิตโปรตีนจากจุลินทรีย์ส่งกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตโปรตีนจากพืช เช่น จากถั่วเหลือง [6] นอกเหนือจากการใช้โปรตีนเซลล์เดียวเป็นอาหารสัตว์แล้ว การใช้โปรตีนเซลล์เดียวเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์ก็มีแนวโน้มนำไปใช้มากขึ้น เช่น *Spirulina, Candida utilis, Kluyveromyces fragilis, Saccharomyces carisbergensis, Saccharomyces cerevisiae* และ *Fusarium graminearum* สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญในอนาคต [7,8]

ตารางที่ 1. การเปรียบเทียบการผลิตโปรตีนจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่นำมาสร้างเป็นโปรตีนทางเลือกจากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างจุลินทรีย์
เชื้อรา (Fungi)	เพาะเลี้ยงได้ง่าย ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว	อัตราการเจริญช้า องค์ประกอบโปรตีนต่ำ	*Aspergillus niger* *Chrysonilia sitophila*
สาหร่าย (Algae)	เพาะเลี้ยงได้ง่าย ได้ผลผลิตโปรตีนคุณภาพสูง	ผลิตองค์ประกอบผนังเซลล์เซลลูโลสที่ย่อยสลายได้ยาก มีธาตุโลหะหนักสะสม	*Chlorella* spp. *Caulerpa racemose* *Spirulina maxima*
ยีสต์ (Yeast)	ได้ผลผลิตเซลล์โปรตีนขนาดใหญ่ องค์ประกอบกรดนิวคลีอิกต่ำ	โปรตีนมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ อัตราการเจริญช้า องค์ประกอบโปรตีนต่ำ	*Candida tropicalis* *Saccharomyces cerevisiae* *Cryptococcus aureus*
แบคทีเรีย (Bacteria)	องค์ประกอบโปรตีนสูง องค์ประกอบผนังเซลล์สามารถย่อยสลายได้	องค์ประกอบกรดนิวคลีอิกสูง ผลผลิตเซลล์โปรตีนขนาดเล็ก ความหนาแน่นโปรตีนต่ำ	*Brevibacterium* spp. *Methanomonas methanica* *Methylococcus capsulatus* *Streptomyces* spp.

ที่มา: [7,8]

จากการศึกษาพบว่าโปรตีนเซลล์เดี่ยวที่ผลิตจากเมทาโนโทรฟิคแบคทีเรีย (Methanotrophic bacterium) โดยเฉพาะสายพันธุ์ *Methylococcus capsulatus* สามารถผลิตปริมาณโปรตีนได้สูงถึง 70% ทั้งยังได้รับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตอาหารเสริมให้กับปลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 [9] ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้จะใช้มีเทนเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอลเป็นสารผลิตภัณฑ์เบื้องต้นและนำไปสร้างมวลชีวภาพ (Biomass) ของเซลล์

แก๊สชีวภาพ (Biogas) มีองค์ประกอบหลักได้แก่ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียอินทรีย์จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ โรงงานผลไม้กระป๋อง ของเสียจากภาคปศุสัตว์ เช่น ฟาร์มหมู ฟาร์มไก่ ฟาร์มวัว ของเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือจากพืชพลังงาน เช่น หญ้าเนเปียร์ รวมทั้งเสียชุมชน โดยการเตรียมวัสดุอินทรีย์เหล่านี้เข้าสู่ระบบหมักไร้อากาศที่ประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศหรือไร้ออกซิเจน โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพที่ใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ ให้เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กซึ่งเป็นสารตั้งในขบวนการทางชีวภาพจนได้

ESTACON 2026 | 17th

ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สชีวภาพ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งมีวัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก จึงเป็นแหล่งที่มาของวัตถุดิบในการป้อนระบบการผลิตแก๊สชีวภาพได้เป็นอย่างดี จากความเหมาะสมทั้งปริมาณและความหาง่ายของวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพดังกล่าว จึงได้รับความสนใจและการสนับสนุนทั้งทางภาครัฐและเอกชนในการผลิตแก๊สชีวภาพ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้แก๊สชีวภาพที่มีคุณภาพเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสูง รวมทั้งการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาถึงประโยชน์ของแก๊สชีวภาพส่วนเกินด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สามารถใช้มีเทนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอนสำหรับเชื้อแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนโทรฟ [10,11] ที่สามารถนำมีเทนไปใช้ประโยชน์ได้เปรียบเสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ รวมถึงการพัฒนาเข้าสู่ระดับอุตสาหกรรม เช่น เมทานอล พอลิเมอร์, เอคโตอิน, โปรตีนเซลล์เดียว และน้ำมันไบโอดีเซล [12] ดังนั้นจึงเป็นโอกาสของผู้ประกอบการด้านแก๊สชีวภาพในการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพส่วนเกินเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มในแนวทางเลือกอื่นๆ เพื่อลดการสูญเสียจากการเผาทำลายแก๊สชีวภาพ (Biogas flare) และลดการปลดปล่อยแก๊สออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์แก๊สเรือนกระจกโดยผ่านกระบวนการและเทคโนโลยีทางชีวภาพ

แม้ว่าปัจจุบันจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีโปรตีนเซลล์เดี่ยวในหลายประเทศ โดยเฉพาะการใช้แบคทีเรียเมทาโนโทรฟ (methanotrophs) เปลี่ยนแก๊สมีเทนจากแก๊สธรรมชาติหรือแก๊สชีวภาพให้เป็นชีวมวลโปรตีนคุณภาพสูง แต่ในประเทศไทยงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการผลิตโปรตีนเซลล์เดี่ยว จากยีสต์ รา หรือสาหร่าย รวมถึงการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโปรตีนทางเลือกจากเส้นใยราสู่ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมทดแทนเนื้อสัตว์ [13] อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนโทรฟเพื่อใช้เป็นโปรตีนทดแทนในประเทศไทยยังอยู่ในระยะเริ่มต้น ทั้งยังไม่มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตในระดับกึ่งอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์อย่างเป็นรูปธรรม รวมถึงยังขาดฐานข้อมูลของสายพันธุ์เมทาโนโทรฟท้องถิ่นที่มีคุณภาพสูง รวมถึงข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนาการ ประสิทธิภาพการใช้มีเทน และความเหมาะสมสำหรับการผลิตโปรตีนเซลล์เดี่ยวในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบหมักแบบไร้อากาศ เป็นอาหารเลี้ยงเซลล์จุลินทรีย์ในกระบวนผลิตเซลล์โปรตีนสูง เป็นแนวทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพนอกเหนือจากการเป็นแก๊สเชื้อเพลิง และยังเป็นแนวทางการพัฒนาต่อยอดเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนที่ใช้ในปัจจุบันและส่งเสริมเป็นผลิตภัณฑ์ อาหารสัตว์หรือจนถึงการพัฒนาเป็นอาหารของมนุษย์ งานวิจัยนี้การศึกษารวบรวมจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟที่สามารถเจริญเติบโตได้ในแหล่งที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพและใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเซลล์เพื่อใช้สร้างเซลล์และส่งเสริมการเจริญเติบโต ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินมาเพาะเลี้ยงและคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟที่เจริญเติบโตได้ดีในอาหาเลี้ยงเชื้อสูตรเฉพาะในสภาวะที่บ่มด้วยแก๊สชีวภาพ เพื่อให้เซลล์สามารถนำมีเทนไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของเซลล์ ซึ่งเป็นกระบวนการคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะดังกล่าว นอกจากนี้การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์ของจุลินทรีย์ พร้อมทั้งตรวจวิเคราะห์คุณภาพของการเจริญเติบโตของเซลล์ ข้อมูลวิจัยที่ได้ถือเป็นแนวทางการประเมินความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์ของงานวิจัยและเสริมสร้างฐานข้อมูลของเชื้อในกลุ่มเมทาโนโทรฟในประเทศไทยต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1. การสำรวจและเก็บตัวอย่างในพื้นที่

การสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน ตะกอนและน้ำเสียในบริเวณบ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากฟาร์มในแหล่งต่างๆ ได้แก่ ฟาร์มหมู BMP ฟาร์ม ต.งิ้วงาม อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์, ฟาร์มหมูสมคิดเกษตรฟาร์ม ต.ป่าเซ่า อ.เมืองอุตรดิตถ์ จ.อุตรดิตถ์, ฟาร์มไก่ธนฟาร์ม ต.ท่าสัก อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์, ฟาร์มหมูประสิทธิ์ฟาร์ม ต.ผาจุก อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ ทั้งหมด 5 ฟาร์ม จำนวน 14 บ่อ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ตัวอย่างบ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

ชื่อฟาร์ม	บ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ
ฟาร์มหมู BMP ฟาร์ม	
ฟาร์มหมูขุนสมคิดเกษตรฟาร์ม	
ฟาร์มหมูพันธุ์สมคิดเกษตรฟาร์ม	
ฟาร์มไก่ธนฟาร์ม	
ฟาร์มหมูประสิทธิ์ฟาร์ม	

การสุ่มเก็บตัวอย่างดินรอบบริเวณบ่อ เก็บตัวอย่างดินบ่อละ 4 จุด บริเวณใกล้ผิวน้ำโดยขุดลึกลงไปประมาณ 10-20 เซนติเมตร [14-16] นำตัวอย่างดินมาผสมรวมกันในสัดส่วนที่เท่ากัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนตัวอย่างจากแต่ละบ่อ บรรจุตัวอย่างใส่ภาชนะสะอาดปิดสนิทเพื่อเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ถ้าไม่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันที) ก่อนนำมาทดสอบเพาะเลี้ยงหาสายพันธุ์จุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟ

2.2. การเตรียมอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนโทรฟ

สูตรอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้คัดแยกเชื้อกลุ่มเมทาโนโทรฟในครั้งนี้ คือ Nitrate mineral salt (NMS) [17] ซึ่งมีองค์ประกอบของสารอาหารและวิตามินที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ต่อหน่วยปริมาตร 1 ลิตร ประกอบด้วย $MgSO_4.7H_2O$ 1.0 กรัม, $CaCl_2.2H_2O$ 0.2 กรัม, 3.8% Fe-EDTA 0.1 มิลลิลิตร, KNO_3 1.0 กรัม, 0.1% $Na_2MoO_4.2H_2O$ 0.5 มิลลิลิตร, สารละลายธาตุรอง 1.0 มิลลิลิตร หากเตรียมเป็นอาหารแข็งเติมผงวุ้นสำหรับเลี้ยงเชื้อ 15 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันแล้วทำการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที ปล่อยให้สารอาหารเย็นตัว

สารละลายธาตุรองมีองค์ประกอบต่อปริมาตร 1 ลิตร ประกอบด้วย $FeSO_4.7H_2O$ 0.5 กรัม, $ZnSO_4.7H_2O$ 0.4 กรัม, H_3BO_3 0.015 กรัม, $CoCl_2.6H_2O$ 0.05 กรัม, EDTA 0.25 กรัม, $MnCl_2.4H_2O$ 0.02 กรัม, $NiCl_2.6H_2O$ 0.01 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

การเตรียมสารอาหารผสม เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.42 M ที่ pH 6.8 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร สารละลายวิตามิน 0.1 มิลลิลิตร และสารละลาย $CuCl_2.2H_2O$ 1 มิลลิลิตร ลงในสารอาหารที่เย็นตัวแล้วผสมให้เข้ากัน

การเตรียมสารละลายวิตามินเข้มข้น (Stock solution) ประกอบไปด้วย Biotin 0.002 กรัม, Folic acid 0.002 กรัม, Thiamine HCl 0.005 กรัม, Calcium pantothenate 0.005 กรัม, Vitamin B12 0.0001 กรัม, Riboflavin 0.005 กรัม, Nicotinamide 0.005 กรัม ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร ทำให้ปราศจากเชื้อด้วยการกรองผ่านแผ่นกรองไนลอนขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.42 M ที่ระดับ pH 6.8 มีองค์ประกอบต่อปริมาตร 1 ลิตร ประกอบด้วย KH_2PO_4 26 กรัม, Na_2HPO_4 32.83 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันปรับ pH ด้วยสารละลาย HCl หรือ NaOH ให้ได้ pH 6.8 ทำให้ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนด้วยหม้อนึ่งแรงดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที

การเตรียมสารละลาย $CuCl_2.2H_2O$ ความเข้มข้น 1,000 เท่า (Stock solution) มีองค์ประกอบต่อปริมาตร 100 มิลลิลิตร ประกอบด้วย $CuCl_2.2H_2O$ 0.17 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันฆ่าด้วยหม้อนึ่งแรงดัน

การใส่สารละลายวิตามินหลังอาหารเย็นตัวเพื่อลดการสลายตัวด้วยความร้อนของวิตามิน สำหรับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลาย $CuCl_2.2H_2O$ เพื่อลดการเกิดตะกอนของอาหาร

2.3. กระบวนการเพิ่มจำนวนกลุ่มจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟ ด้วยการเพาะเลี้ยงแบบเสริมสมรรถนะ (Enrichment culture)

เตรียมตัวอย่างดินหรือตะกอนประมาณ 10 กรัม หรือตัวอย่างน้ำเสียประมาณ 10 มิลลิลิตร บรรจุลงขวดซีรัมที่ปราศจากเชื้อขนาด 120 มิลลิลิตร เติมสารอาหารเหลว NMS 50 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดด้วยจุกยางซิลิโคนซีลฝาขวดด้วยฝาอลูมิเนียม เขย่าผสมตัวอย่างให้เข้ากัน ใช้เข็มฉีดยาดูดอากาศในขวดซีรัมออกปริมาตร 14 มิลลิลิตร แล้วฉีดแก๊สมีเทน 99.99% ผ่านตัวกรองไนลอนปราศจากเชื้อเส้นขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร ปริมาตร 14 มิลลิลิตร ลงในขวดซีรัมเพื่อให้ได้สัดส่วนอากาศต่อมีเทนที่ 4:1 (20% มีเทน) นำไปบ่มเพาะบนเครื่องเขย่า (Shaker) ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบในการเขย่า 120 รอบต่อนาที ในสภาวะทึบแสงเป็นเวลาประมาณ 5 วัน เมื่อครบเวลาบ่มเพาะ ดูดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดซีรัมที่เติมสารอาหาร NMS ใหม่ ผสมให้เข้ากับแล้วปิดฝาทำการปรับสัดส่วนแก๊สมีเทนและทำการบ่มเพาะเช่นเดิม ทำการเปลี่ยนถ่ายอาหารใหม่ซ้ำประมาณ 10 รอบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ขั้นตอนการเพาะเลี้ยง Enrichment culture

2.4. การศึกษาการเพิ่มจำนวนของกลุ่มจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีแก๊สมีเทน

แบ่งตัวอย่างเชื้อกลุ่มที่ผ่านการเพาะเลี้ยง Enrichment culture แล้ว ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดซีรัมที่เติมสารอาหาร NMS ผสมให้เข้ากัน ปิดฝาทำการปรับสัดส่วนแก๊สมีเทนโดยใช้เข็มฉีดยาปราศจากเชื้อดูดอากาศในขวดซีรัมออกปริมาตร 14 มิลลิลิตร แล้วฉีดแก๊สมีเทน 99.99% ผ่านตัวกรองไนลอนเส้นขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร ขนาด 25 มิลลิเมตร ปริมาตร 14 มิลลิลิตร ลงในขวดเพื่อให้ได้สัดส่วนอากาศต่อมีเทนที่ 4:1 (20% มีเทน) นำไปบ่มเพาะบนเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบในการเขย่า 120 รอบต่อนาที ในสภาวะทึบแสงเป็นเวลาประมาณ 5 วัน เช่นเดียวกันกับการเพาะเลี้ยง Enrichment culture ทำซ้ำ 3 รอบต่อแหล่งตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างของเหลวทุก 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างของเหลววิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร OD (Optical Density: OD_{600}) เพื่อสังเกตการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลินทรีย์

2.5. กระบวนคัดแยกจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟ

ตัวอย่างที่ผ่านการเพาะเลี้ยง Enrichment culture แล้วเตรียมทำการเจือจางแบบอนุกรม (Serial dilution) ให้ได้ความเข้มข้นตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับนำไปคัดแยกเชื้อบริสุทธิ์ ทำการดูดตัวอย่างปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายน้ำเกลือ 0.85% ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร ในหลอดไมโครเซนติฟิวก์ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสาร (Vortex mixer) ได้การเจือจาง 10 เท่า ดูดตัวอย่างที่เจือจางแล้วทำซ้ำแบบเดียวกันจนได้การเจือจางที่เหมาะสม (10^0 ถึง 10^{-5} เท่า) หยดตัวอย่างลงบนอาหารแข็ง NMS ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ทำการเกลี่ยตัวอย่างให้ทั่วผิวหน้านำไปบ่มเพาะในตู้บ่มปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง มีการให้อากาศผสมมีเทนในสัดส่วน 4:1 (20% มีเทน) เฝ้าสังเกตการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในตู้บ่มดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงในตู้บ่ม

เมื่อตรวจพบโคโลนีของเชื้อจุลินทรีย์อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า (ระยะเวลาประมาณ 7 วัน) นำไปคัดแยกเลือกโคโลนีที่มีลักษณะแตกต่างกันลงบนอาหารแข็ง NMS นำไปบ่มเพาะในตู้บ่มปิดสนิทที่สภาวะเดียวกันจนเชื้อเจริญพบโคโลนีที่ชัดเจน คัดแยกเชื้อซ้ำจนกว่าจะได้เชื้อบริสุทธิ์ (ลักษณะเป็นโคโลนีเดี่ยว) เชื้อบริสุทธิ์แต่ละชนิดที่คัดแยกได้ ถูกนำไปเพาะเลี้ยงเพื่อยืนยันการใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนเบื้องต้นด้วย 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะแรก เชื้อบริสุทธิ์ถูกบ่มเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง NMS ในสภาวะที่มีการให้อากาศผสมมีเทนในสัดส่วน 4:1 สภาวะที่สอง เพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีการให้อากาศเพียงอย่างเดียว และสภาวะที่สาม เพาะเลี้ยงดูการเจริญเติบโตของเชื้อบนอาหาร Nutrient agar (NA) ทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง

โดยสมมุติฐานที่ว่าเชื้อในกลุ่มเมทาโนโทรฟไม่สามารถใช้แหล่งคาร์บอนอื่นที่มีจำนวนคาร์บอนสูงได้ เช่นน้ำตาล [10,11] ดังนั้นเชื้อที่สามารถเจริญได้เฉพาะบนอาหาร NMS ที่มีการให้อากาศผสมมีเทนเท่านั้นคาดว่าจะเป็นเชื้อในกลุ่มเมทาโนโทรฟ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ลำดับ 16s rRNA เพื่อยืนยันสายพันธุ์ต่อไป

2.6. การศึกษาลักษณะโคโลนีและเซลล์ที่คัดแยกได้

เชื้อเมทาโนโทรฟที่คัดแยกได้ถูกนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของโคโลนีและเซลล์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ เซลล์แบคทีเรียที่ได้ถูกนำไปย้อมแกรมเพื่อระบุชนิดแกรมของแบคทีเรีย

2.7. การพิสูจน์เอกลักษณ์และการตรวจวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์

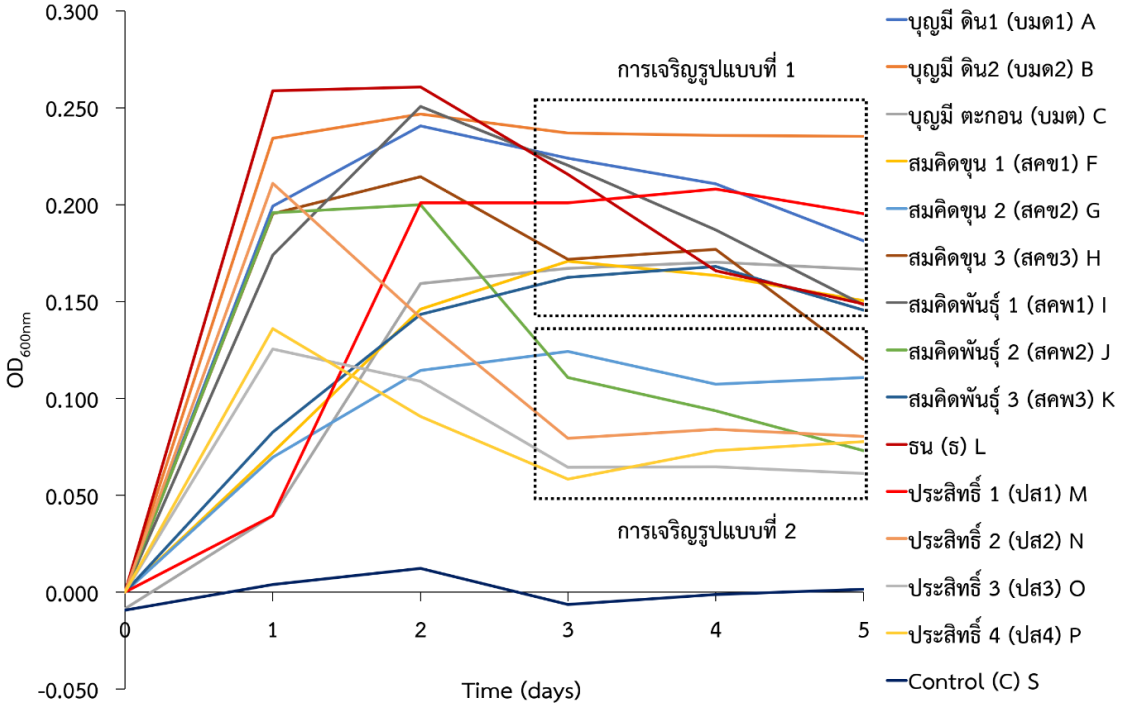
ตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกคัดแยกได้นำไปวิเคราะห์สายพันธุ์ผ่านการวิเคราะห์ลำดับ 16S rRNA โดยตัวอย่างจากแหล่งที่สามารถคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟได้หลังผ่าการเพาะเลี้ยง Enrichment culture ถูกนำไปวิเคราะห์ความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์ด้วย Oxford nanopore MinION Mk1C platform ผ่านฐานข้อมูล SILVA SSU 138.2 โดยศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

ESTACON 2026 | 17th

3. ผลการทดลอง

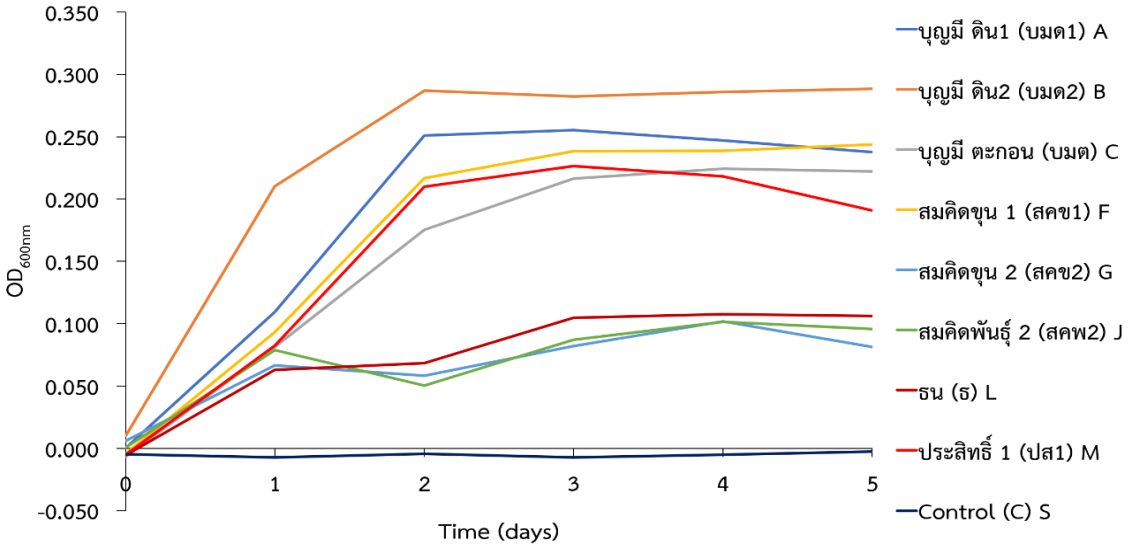
3.1. การทดสอบความสามารถในการเจริญของเชื้อกลุ่มภายใต้สภาวะที่มีแก๊สมีเทน

จากตัวอย่างดินรอบๆ บ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ 14 แหล่งที่ผ่านการเพาะเลี้ยง Enrichment culture ด้วยอาหารเหลว NMS ในสภาวะที่มีการให้อากาศต่อแก๊สมีเทนในสัดส่วน 4:1 เมื่อทดสอบการเจริญของกลุ่มจุลินทรีย์ในสภาวะเดียวกันเป็นเวลา 5 วัน สามารถสังเกตเห็นลักษณะการเจริญได้ 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 กลุ่มจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและได้ค่า OD_{600} ที่สูงในช่วง 0.15 ถึง 0.25 เมื่อเวลาผ่านไปการลักษณะการเจริญค่อนข้างคงที่หรือลดลงเล็กน้อย รูปแบบที่ 2 กลุ่มจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงแรกคล้ายรูปแบบที่ 1 แต่มีค่า OD_{600} ที่ต่ำกว่าอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.1 เมื่อเวลาผ่านไปมีการเจริญที่ลดลงชัดเจนกว่ารูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3. การเจริญของกลุ่มจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีแก๊สมีเทน (ทดสอบรอบ 1)

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการคัดแยกและการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟภายใต้สภาวะและระยะเวลาเพาะเลี้ยงที่ใกล้เคียงกัน [14,18-22] แสดงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟอยู่ในรูปแบบที่ 1 ดังนั้นเพื่อเป็นการคัดกรองปริมาณตัวอย่างและยืนยันลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แหล่งที่มีลักษณะการเจริญอยู่ในรูปแบบที่ 1 จะถูกนำไปทดสอบการเจริญเติบโตรูปแบบเดิมซ้ำอีกรอบ เพื่อยืนยันลักษณะการเจริญเติบโตของสายพันธุ์เมทาโนโทรฟ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่บ่มมีเทนชัดเจนขึ้น กลุ่มจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำมาศึกษาต่อในแนวทางการคัดแยกสายพันธุ์เมทาโนโทรฟเป็นหลัก เพื่อยืนยันลักษณะการเจริญเติบโตของสายพันธุ์เมทาโนโทรฟที่สามารถเจริญได้รวดเร็วและมีเพิ่มปริมาณเซลล์ที่สูง โดยวัดค่า OD_{600} และกลุ่มจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะถูกนำมาศึกษาต่อในแนวทางการคัดแยกสายพันธุ์เมทาโนโทรฟเป็นหลัก



รูปที่ 4. การเจริญของกลุ่มจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีแก๊สมีเทน (ทดสอบรอบ 2)

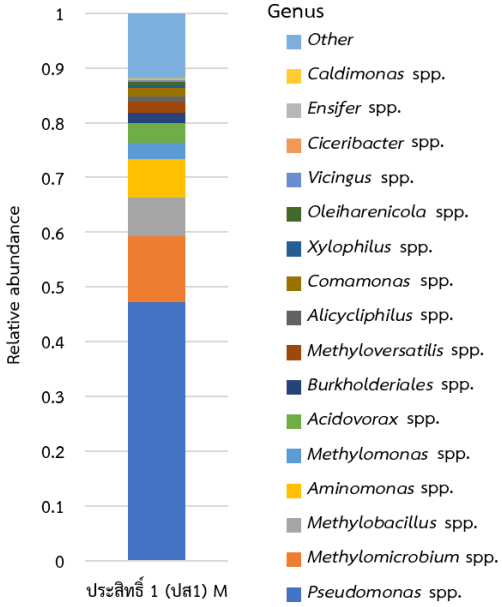
3.2 ความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์จากแหล่งที่สามารถคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟ

การคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟสามารถคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟได้เฉพาะตัวอย่างจากบ่อรับน้ำเสียประสิทธิ์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5. กลุ่มจุลินทรีย์จากตัวอย่างดินรอบๆ บ่อบำบัดน้ำเสียประสิทธิ์ 1 ที่เพาะเลี้ยงในอาหารเหลว NMS ที่มีการให้อากาศต่อมีเทนในสัดส่วน 4:1 เป็นเวลา 5 วัน (a) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (b)

เมื่อนำมาวิเคราะห์ดูความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์ก่อนทำการคัดแยกได้ผลโครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6. โครงสร้างกลุ่มจุลินทรีย์จากตัวอย่างดินรอบๆ บ่อบำบัดน้ำเสียประสิทธิ์ 1 หลังการเพาะเลี้ยง Enrichment culture

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าถึงมีการเพาะเลี้ยง Enrichment culture เพื่อเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟและลดจำนวนจุลินทรีย์อื่นที่ไม่เกี่ยวข้องซ้ำหลายครั้ง เพื่อให้กลุ่มจุลินทรีย์มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [14,15,20,22,23] จุลินทรีย์ใน

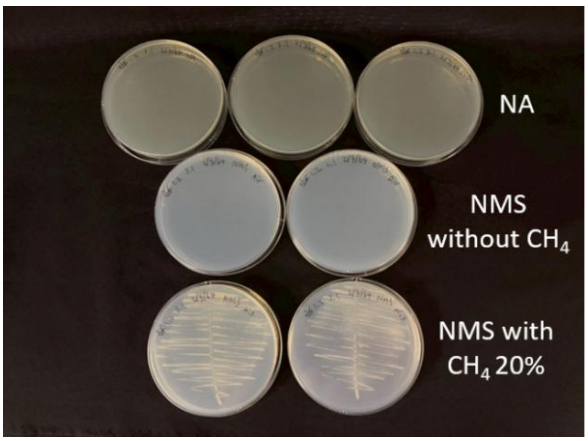
กลุ่มเมทาโนโทรฟ เช่น *Methylomicrobium* spp. และ *Methylomonas* spp. ก็ยังไม่ใช่กลุ่มประชากรหลักแต่กลับเป็นในกลุ่มของ *Pseudomonas* spp. ที่เป็นกลุ่มประชากรหลัก อาจเกิดจากความสามารถในการเจริญที่ช้ากว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์อื่น ซึ่งจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟอาศัยระยะเวลาในการเจริญประมาณ 7 วัน และสภาวะที่ทำการเพาะเลี้ยง Enrichment culture จุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟโดยใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนได้ทำหน้าที่เสมือนผู้ผลิตในระบบ สนับสนุนและสร้างสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ที่ไม่ได้มีความสามารถในการใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนได้โดยตรง ทำให้จุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้เร็วกว่าเจริญเติบโตเป็นกลุ่มประชากรหลัก

นอกจากนี้ผลการศึกษากลุ่มประชากรสังเกตได้ว่าสามารถตรวจพบกลุ่มเชื้อเมทาโนโทรฟอื่นๆ เช่น *Methylomonas* spp. แต่ไม่สามารถคัดแยกเป็นโคโลนีเดี่ยวได้ มีงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการคัดแยกจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟมักพบจุลินทรีย์ชนิดอื่นปะปนกับโคโลนีของเชื้อเมทาโนโทรฟ และเมื่อทำการคัดแยกจุลินทรีย์ออกจากกันพบว่าอัตราการเจริญของเชื้อเมทาโนโทรฟลดลง หรือบางครั้งไม่สามารถทำการคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟออกมาได้ [23-28] แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่อาศัยกันแบบเกื้อกูลระหว่างเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนโทรฟกับเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์อื่น ซึ่งเป็นความท้าทายของกระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อกลุ่มเมทาโนโทรฟ

นอกจากนี้สูตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงเชื้อเมทาโทรฟถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการคัดแยกเชื้อ เชื้อเมทาโนโทรฟบางชนิดมีความเฉพาะเจาะจงต่อสภาวะในการเจริญสูง ดังนั้นการพัฒนาสูตรอาหารและเลือกสูตรอาหารควรมีความเฉพาะเจาะจงและเหมาะสมแก่สภาวะการเจริญเติบโตของเชื้อเมทาโนโทรฟตามแหล่งที่อยู่ในธรรมชาติ [23,29] ด้วยเหตุผลดังกล่าวการศึกษาสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติและกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่เจริญอยู่ร่วมกันกับเชื้อเมทาโนโทรฟจึงเป็นปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญในกระบวนคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเชื้อในกลุ่มเมทาโนโทรฟเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มในอนาคต

3.3. กระบวนการคัดแยกจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟหลังการเพาะเลี้ยง Enrichment culture เพื่อให้ได้เชื้อบริสุทธิ์

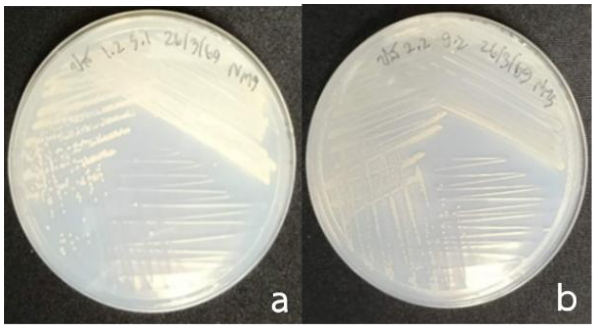
การคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟอาศัยหลักการของความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโต เชื้อเมทาโนโทรฟไม่สามารถใช้แหล่งคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนสูงได้ เช่น น้ำตาล มีเพียงบางสายพันธุ์ที่สามารถใช้แหล่งคาร์บอนอื่นนอกเหนือจากมีเทนได้ เช่น *Methylocella silvestris, Methylocapsa aurea*, *Methylocystis* spp. เป็นต้น [30-33] ดังนั้นผลการคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟใน 3 สภาวะพบการเจริญได้เฉพาะบนอาหาร NMS ที่มีการให้อากาศผสมแก๊สมีเทนเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 7



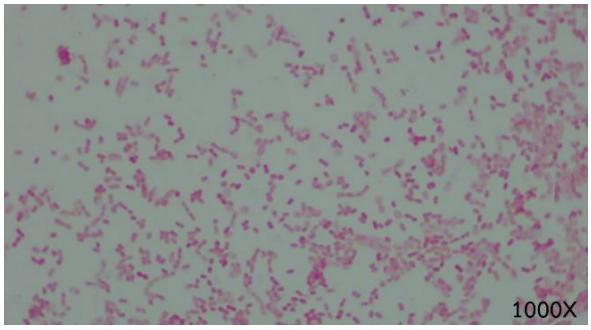
รูปที่ 7. การคัดเลือกจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟ

ผลการคัดแยกเชื้อพบเชื้อเมทาโนโทรฟ 2 สายพันธุ์ จากแหล่งตัวอย่างประสิทธิ์ 1 ประกอบด้วยสายพันธุ์ ปส 1.2 และ ปส 2.2 ทั้ง 2 สายพันธุ์ย้อมติดสีแกรมลบ ลักษณะโคโลนีมีสีขาวครีมด้าน กลม นูน ลักษณะเซลล์ของสายพันธุ์ 1.2 มีรูปทรงแท่งสั้นเล็กน้อย ขนาดประมาณ 0.8 ถึง 1.2 ไมโครเมตร

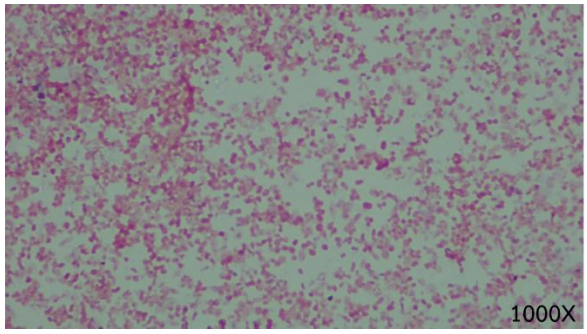
ลักษณะเซลล์ของสายพันธุ์ 2.2 มีลักษณะทรงแท่งสั้นเล็กน้อย ขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8. แสดงสายพันธุ์เมทาโนโทรฟที่คัดแยกได้ สายพันธุ์ ปส 1.2 (a), สายพันธุ์ ปส 2.2 (b)



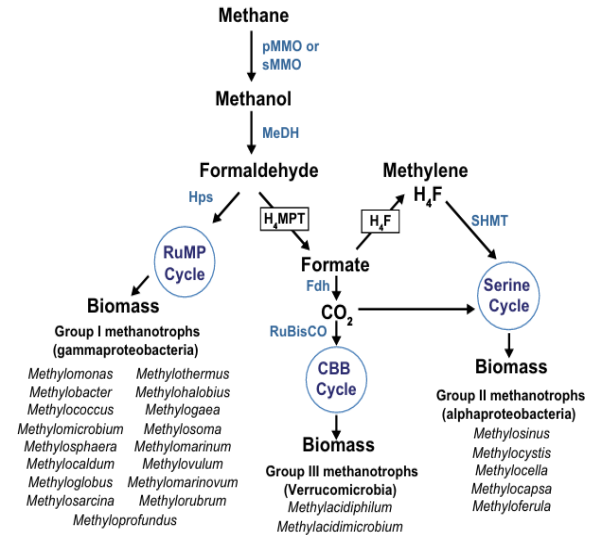
รูปที่ 9. แสดงลักษณะเซลล์สายพันธุ์ ปส 1.2



รูปที่ 10. แสดงลักษณะเซลล์สายพันธุ์ ปส 2.2

การวิเคราะห์ระบุสายพันธุ์ด้วยลำดับเบส 16S rRNA พบว่าสายพันธุ์ ปส 1.2 มีความใกล้เคียงกับสายพันธุ์ *Methylomicrobium agile* 99.57% และสายพันธุ์ ปส 2.2 มีความใกล้เคียงกับสายพันธุ์ *Methylosarcina fibrata* 100.00% โดยทั้งสองสายพันธุ์จัดอยู่ในกลุ่มเชื้อเมทาโนโทรฟชนิดที่ 1 (Type I methanotrophs)

เชื้อในกลุ่มเมทาโนโทรฟถูกจัดแบ่งประเภทตามวิถีการใช้มีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเซลล์ได้ 3 ประเภทได้แก่ Type I ประกอบด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Gammaproteobacteria สามารถออกซิไดซ์แก๊สมีเทนเข้าสู่วิถี RuMP cycle ในการสร้างชีวมวล ประเภท Type II ประกอบด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Alphaproteobacterial สามารถออกซิไดซ์มีเทนเข้าสู่วิถี Serine cycle และ Type X ประกอบด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Verrucomicrobia สามารถออกซิไดซ์มีเทนเข้าสู่วิถี CBB (Calvin–Benson–Bassham cycle) ดังแสดงในรูปที่ 11 [34]



ที่มา: [33]

รูปที่ 11. ภาพรวมวิถีการนำมีเทนมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟ

ผลการศึกษาการคัดแยกเชื้อเมทาโนโทรฟสามารถคัดแยกได้จากบ่อรับน้ำเสียประสิทธิ์ฟาร์มเพียงแหล่งเดียว สาเหตุที่นอกเหนือจากปัจจัยทางด้านกลุ่มประชากรและสภาวะที่ใช้ในการคัดเลือกแล้วอาจรวมถึงลักษณะพื้นที่ที่ทำการเก็บตัวอย่างด้วย การบำบัดน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพอาศัยการพักน้ำเป็นระยะๆ หลายบ่อเพื่อให้สารอินทรีย์เกิดการ

ย่อยสลายให้มีปริมาณไม่เกินมาตรฐานก่อนปล่อยคืนสู่ธรรมชาติ บ่อพักน้ำที่ผ่านการย่อยสลายสารอินทรีย์มาแล้วจะมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่ำและส่งผลให้มีการผลิตแก๊สมีเทนที่ต่ำลงด้วย รวมถึงขนาดของบ่อพักน้ำหากมีขนาดที่ใหญ่สามารถส่งผลให้เกิดการเจือจางของสารอินทรีย์ได้มาก เชื้อเมทาโนโทรฟสามารถเจริญได้เมื่อความเข้มข้นมีเทนที่เพียงพอ ทำให้มีโอกาสที่จะพบเมทาโนโทรฟปริมาณลดลงเมื่อน้ำเสียผ่านบ่อพักน้ำหลายบ่อ ตัวอย่างจากบ่อประสิทธิ์ 1 เป็นตัวอย่างที่เก็บจากบ่อพักน้ำแรกสุดที่มีการปล่อยออกมาจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพและเป็นบ่อขนาดเล็ก ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้มข้นและการผลิตแก๊สมีเทนสูงจึงเป็นแหล่งตัวอย่างที่มีโอกาสพบเชื้อเมทาโนโทรฟจากกระบวนการคัดแยกสูง

การทราบถึงประเภทวิถีการใช้มีเทนของเชื้อเมทาโนโทรฟสามารถช่วยในการปรับปรุงวิธีการคัดแยกให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่ม รวมถึงช่วยในการศึกษาผลผลิตที่เกิดขึ้นและเป็นข้อมูลสนับสนุนในการพัฒนาวิธีการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงและการผลิตเซลล์โปรตีนสูงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกและศึกษาคุณลักษณะของจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการใช้แก๊สมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอน จากบริเวณที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดสำหรับการผลิตเซลล์โปรตีนสูงเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนในอาหารสัตว์ โดยการเก็บตัวอย่างดินจากบริเวณรอบบ่อรับน้ำเสียจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพของฟาร์มปศุสัตว์ถูกนำมาเพาะเลี้ยง Enrichment culture ด้วยอาหาร NMS ที่ใช้แก๊สมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนหลัก เพื่อส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟ

ผลการศึกษาสามารถคัดแยกแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนโทรฟได้ทั้งหมด 2 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ ปส 1.2 และสายพันธุ์ ปส 2.2 ซึ่งทั้งสองสายพันธุ์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA สอดคล้องกับแบคทีเรียเมทาโนโทรฟประเภทที่ 1 โดยสายพันธุ์ ปส 1.2 มีความใกล้เคียงกับ *Methylomicrobium agile* และสายพันธุ์ ปส 2.2 มีความใกล้เคียงกับ *Methylosarcina fibrata* ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระบบหมักแบบไร้อากาศจากฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทยเป็นแหล่งที่มีศักยภาพสำหรับการค้นหาและคัดแยกแบคทีเรียเมทาโนโทรฟที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยีชีวภาพได้

ในปัจจุบันการศึกษาการพัฒนาโปรตีนเซลล์เดียวโดยใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนโทรฟเพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนในระดับสากลนั้นมีการศึกษาออกแบบดีไซน์ระบบการผลิตในระดับอุตสาหกรรมให้มีความคุ้มทุนและให้ผลผลิตในปริมาณมาก [35,36] ในขณะที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพทางด้านความหลากหลายทางชีวภาพและปริมาณวัตถุดิบชีวมวลในปริมาณมาก แต่ยังขาดข้อมูลงานวิจัยด้านนี้ที่จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการต่อยอดงานวิจัยสู่เชิงพาณิชย์

ด้วยเหตุข้างต้นองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาวิจัยในขั้นต่อไป โดยเฉพาะการประเมินประสิทธิภาพการเจริญเติบโต อัตราการใช้แก๊สมีเทน ปริมาณโปรตีนและองค์ประกอบกรดแอมิโนของชีวมวล ตลอดจนการพัฒนาสภาวะการเพาะเลี้ยงในระดับถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อรองรับการผลิตเซลล์โปรตีนสูงในระดับอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์อย่างยั่งยืนและก่อให้เกิดการผลิตเทคโนโลยีที่เป็นของประเทศเองพร้อมเข้าแข่งขันในตลาดโลกต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้อากาศเพื่อพัฒนาเป็นเซลล์โปรตีนสูงต่อยอดในรูปแบบอาหารสัตว์ สามารถดำเนินงานวิจัยจนบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ได้ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) นอกจากนี้ขอขอบพระคุณท่านผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและผู้บริหารทุกท่านที่ให้การสนับสนุนโครงการพร้อมทั้งข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ตลอดจนขอขอบคุณพนักงานและลูกจ้างของศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในด้านต่าง ๆ จนสำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Boland, Mike J., Rae, Allan N., Vereijken, Johan M., Meuwissen, Meuwissen P.M., Fischer, Arnout R.H., van Boekel, Martinus A.J.S., Rutherfurd, Shane M., Gruppen, Harry., Moughan, Paul J., and Hendriks, Wouter H. (2013). The future supply of animal-derived protein for human consumption. Trends in Food Science & Technology, 29(1), 62-73.

[2] Ritala, Anneli., Häkkinen, Suvi T., Toivari, Mervi., and Wiebe, Marily G. (2017). Single cell protein—State-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. Frontiers in Microbiology, 8, 2009.

[3] Sharif, Muhammad., Zafar, Muhammad Hammad., Aqib, Amjad Islam., Saeed, Muhammad., Farag, Mayada R., and Alagawany, Mahmoud. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. Aquaculture, 531, 735885.

[4] Kerckhof, Frederiek-Maarten., Sakarika, Myrsini., Van Giel, Marie., Muys, Maarten., Vermeir, Pieter., De Vrieze, Jo., Vlaeminck, Siegfried E., Rabaey, Korneel., and Boon, Nico. (2021). From biogas and hydrogen to microbial protein through co-cultivation of methane and hydrogen oxidizing bacteria. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9, 733753.

[5] Anupama., and P, Ravindra. (2000). Value-added food: Single cell protein. Biotechnology Advances, 18(6), 459–479.

[6] Spiller, Marc., Muys, Maarten., Papini, Gustavo., Sakarika, Myrsini., Buyle, Matthias., and Vlaeminck, Siegfried E. (2020). Environmental impact of microbial protein from potato wastewater as feed ingredient: Comparative consequential life cycle assessment of three production systems and soybean meal. Water Research, 171, 115406.

[7] Ayele, Gebeyehu., Admassu, Habtamu., Mosisa, Gadissa., Desalegn, Abebe., and Abeje, Molla. (2026). “Nutritional, Functional, and Safety Aspects of Single-Cell Protein Produced via Microbial Fermentation From Fruit-Processing Waste: A Comprehensive Review.” Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 25, no. 3: e70464.

[8] Deb, Kaustav., Bhunia, Sobhanjan., Begum, Jeenatara., and Chakraborty, Tamalika., (2025). Review on prospects of single cell proteins (SCPs) as a future of nutraceuticals. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, 85(4), 79–87.

[9] Ryther, John H., and Goldman, Joel C. (1975). Microbes as food in mariculture. Annual Review of Microbiology, 29, 429–443.

[10] Hanson, Richard S., and Hanson, Thomas E. (1996). Methanotrophic bacteria. Microbiological Reviews, 60(2), 439–471.

[11] Semrau, J. D. (2010). Methanotrophs and copper. FEMS Microbiology Reviews, 34(4), 496–531.

[12] Jawaharraj, Kalimuthu., Shrestha, Namita., Chilkoor, Govinda., Dhiman, Saurabh Ssudha., Islam, Jamil., and Gadhamshetty, Venkataramana. (2020). Valorization of methane from environmental engineering applications: A critical review. Water Research, 187, 116400.

[13] National Center for Genetic Engineering and Biotechnology. (2021). Thailand's first mycoprotein ready to hit the market. National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC). Available from https://www.biotec.or.th/home/en/mycoprotein/#

[14] Kim, Jisun., Kim, DaeHyun D., and Yoon, Sukhwan. (2018). Rapid isolation of fast-growing methanotrophs from environmental samples using continuous cultivation with gradually increased dilution rates. Applied microbiology and biotechnology, 102(13), 5707–5715.

[15] Svenning, Mette M., Wartiainen, Ingvild., Hestnes, Anne Grethe., and Binnerup, Svend J. (2003). Isolation of methane oxidising bacteria from soil by use of a soil substrate membrane system. FEMS Microbiology Ecology, 44(3), 347–354.

[16] Praeg, Nadine., Schachner, Iris., Schuster, Lisa., and Illmer, Paul. (2021). Carbon-dependent growth, community structure and methane oxidation performance of a soil-derived methanotrophic mixed culture. FEMS Microbiology Letters, 368(2), fnaa212.

[17] Whittenbury, R., Phillips, K.C., and Wilkinson, J.F. (1970). Enrichment, Isolation and Some Properties of Methane-Utilizing Bacteria. Journal of General Microbiology 61, 205-218.

[18] Panagiotis, Tsapekos., Benyamin, Khoshnevisan., Xinyu, Zhu., Xiao, Zha., and Irini, Angelidaki. (2019). Methane oxidising bacteria to upcycle effluent streams from anaerobic digestion of municipal biowaste. Journal of Environmental Management, 251, 109590

[19] Zhao, C.G., Zheng, J., Li, H.P., Wen, G.M., He, Y.Y., Yang, S.P., Dong, C., and Choi, M.M.F. (2009). Characterization of a methane-utilizing strain and its application for monitoring methane. Journal of applied microbiology, 106(6), 2024–2030.

[20] Sheets, Johnathon P., Ge, Xumeng., Li, Yueh-Fen., Yu, Zhongtang., and Li, Yebo. (2016). Biological conversion of biogas to methanol using methanotrophs isolated from solid-state anaerobic digestate. Bioresource technology, 201, 50–57.

[21] Kato, Souichiro., Takashino, Motoko., Igarashi, Kensuke., and Kitagawa, Wataru. (2020). Isolation and Genomic Characterization of a Proteobacterial Methanotroph Requiring Lanthanides. Microbes and environments, 35(1), ME19128.

[22] Dianou, Dayéri., and Adachi, Katsuki. (1999). Characterization of methanotrophic bacteria isolated from a subtropical paddy field. FEMS Microbiology Letters, 173(1), 163–173.

[23] Rhee, Sung-Keun., Awala, Samuel Imisi., and Nguyen, Ngoc-Loi. (2019). Enrichment and isolation of aerobic and anaerobic methanotrophs. In E. Y. Lee (Ed.), Methanotrophs: Microbiology fundamentals and biotechnological applications, 32, 39–69.

[24] Lidstrom, Mary E. (1988). Isolation and characterization of marine methanotrophs. Antonie van Leeuwenhoek, 54(3), 189–199.

[25] Ji, Wei., Ren, Likai., Zhou, Zhiyun., Yang, Jianpeng., Yang, Ziwei., Zhang, Ni., Sun, Jianqing., Chen, Kelong., and Chai, Wenbo. (2025). Characteristics of methanotrophic communities and their physicochemical driving mechanisms in estuarine and nearshore wetlands of Qinghai Lake. iScience, 28(8), 113040.

[26] Rahalkar, Monali C., Khatri, Kumal., Pandit, Pranitha., Bahulikar, Rahul A., and Mohite, Jyoti A. (2021). Cultivation of important methanotrophs from Indian rice fields. Frontiers in Microbiology, 12, 669244.

[27] Esembaeva, Maryam A., Melikhova, Ekaterina V., Kachnov, Vladislav A., and Kulyashov, Mikhail A. (2026). From Single Organisms to Communities: Modeling Methanotrophs and Their Satellites. Microorganisms, 14(1), 3.

[28] Thao, Huynh Van., Tarao, Mitsunori., Takada, Hideshige., Nishizawa, Tomoyasu., Nam, Tran Sy., Cong, Nguyen Van., and Xuan, Do Thi. (2024). Methanotrophic Communities and Cultivation of Methanotrophs from Rice Paddy Fields Fertilized with Pig-livestock Biogas Digestive Effluent and Synthetic Fertilizer in the Vietnamese Mekong Delta. Microbes and environments, 39(4), ME24021.

[29] Meruvu, Haritha., Wu, Hui., Jiao, Ziyue., Wang, Liyan., and Fei, Qiang. (2020). From nature to nurture: Essence and methods to isolate robust methanotrophic bacteria. Synthetic and Systems Biotechnology, 5(3), 173–178.

[30] Dedysh, Svetlana N., Knief, Claudia., and Dunfield, Peter F. (2005). Methylocella species are facultatively methanotrophic. Journal of Bacteriology, 187(13), 4665–4670.

[31] Chen, Yin., Crombie, Aadrew., Rahman, M. Tanvir., Dedysh, Svetlana N., Liesack, Werner., Stott, Matthew B., Alam, Maqsudul., Theisen, Andreas R., Murrell, J. Colin., and Dunfield, Peter F. (2010). Complete genome sequence of the aerobic facultative methanotroph Methylocella silvestris BL2. Journal of Bacteriology, 192(14), 3840–3841.

[32] Dunfield, Peter F., Belova, Svetlana E., Vorob'ev, Alexey V., Cornish, Sabrina L., and Dedysh, Svetlana N. (2010). Methylocapsa aurea sp. nov., a facultative methanotroph possessing a particulate methane monooxygenase, and emended description of the genus Methylocapsa. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 60(11), 2659–2664.

[33] Belova, Svetlana E., Baani, Mohamed., Suzina, Natalia E., Bodelier, Paul L. E., Liesack, Werner., and Dedysh, Svetlana N. (2011). Acetate utilization as a survival strategy of peat-inhabiting Methylocystis spp. Environmental Microbiology Reports, 3(1), 36–46.

[34] Kalyuzhnaya, Marina G., Puri, Avneesh W., and Lidstrom, Mary E. (2015). Metabolic engineering in methanotrophic bacteria. Metabolic Engineering, 29, 142–152.

[35] Olsen, Dres Foged., Jørgensen, John Bagterp., Villadsen, John., and Jørgensen, Sten Bay. (2010). Modeling and simulation of single cell protein production. IFAC Proceedings Volumes, 43(6), 502–507.

[36] Ma, Yicheng., Liu, Tao., Yuan, Zhiguo., and Guo, Jianhua. (2025). Microbial conversion of methane into single cell protein in a dual-membrane biofilm reactor. Water Research, 283, 123838.

แนวทางการจัดการโรงเรียนคาร์บอนต่ำ: กรณีศึกษาโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์)

Low-Carbon School Management Guidelines: A Case Study of Seekan (Wattananunupathum) School

อนันต์ชัย คติธรรม์กุล[1,*], ทัศนีย์ ศรีสุวัจรีย์[2], อัมรินทร์ วงศ์เศรษฐี[2],
รศ.ดร.สมเกียรติ บุญณสะ[3], รศ.กิตติ เกื้อสกุล[3] และ รศ.ดร. ปรีดา จันทวงษ์[3]

[1] โรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) 567 ถนนสรงประภา แขวงดอนเมือง เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210
[2] สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
[3] วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*ผู้ติดต่อ: advisor2600@gmail.com, 0909744114

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงปริมาณนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมด้านพลังงาน การแปรรูปขยะ และพื้นที่สีเขียว ของโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) ตามเกณฑ์โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (Low Emission Support Scheme: LESS) 2) วิเคราะห์แนวทางการจัดการสู่โมเดลโรงเรียนคาร์บอนต่ำ และ 3) ประเมินผลการลดการใช้ไฟฟ้าและผลประโยชน์เชิงสิ่งแวดล้อมภายในสถานศึกษา โดยใช้แนวคิดโรงเรียนคาร์บอนต่ำและหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนเป็นกรอบการวิจัย โดยมีบุคลากรผู้รับผิดชอบโครงการและคณะกรรมการพลังงานและสิ่งแวดล้อมเป็นผู้ให้ข้อมูลหลัก (Key Informants) เครื่องมือวิจัย ได้แก่ แบบบันทึกข้อมูลกิจกรรม โปรแกรมคำนวณมาตรฐานองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) (TGO Calculation Sheet) และเกณฑ์ประเมินโครงการ LESS วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ร้อยละ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$) ผลการวิจัยพบว่า 1) การดำเนินงานทั้ง 3 กิจกรรม สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รวม 110,022 $kgCO_2eq$ โดยโครงการ Solar Rooftop สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงสุด (53,515 $kgCO_2eq$) รองลงมาคือพื้นที่สีเขียว (44,815 $kgCO_2eq$) และขยะรีไซเคิล (11,692 $kgCO_2eq$) ตามลำดับ 2) แนวทางที่สำเร็จเกิดจากการผสมผสานมาตรการทางเทคโนโลยีร่วมกับการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและของเสียผ่านการมีส่วนร่วมของบุคลากร และ 3) การบูรณาการเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ร่วมกับแหล่งกักเก็บคาร์บอนตามธรรมชาติมีศักยภาพในการสนับสนุนการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคสถานศึกษา ผลการศึกษาครั้งนี้สามารถใช้เป็นกรณีศึกษาและแนวทางปฏิบัติทางเลือกให้แก่โรงเรียนอื่นที่มีบริบทใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และต้นทุนการลงทุนอย่างเต็มรูปแบบ ยังไม่มีหลักฐานและข้อมูลรองรับที่เพียงพอในการศึกษานี้ จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อยืนยันมิติความคุ้มค่าทางการเงิน

คำสำคัญ: โรงเรียนคาร์บอนต่ำ, การลดก๊าซเรือนกระจก, พลังงานทดแทน

Abstract

This quantitative research aimed to 1) evaluate greenhouse gas (GHG) emission reductions from energy, waste processing, and green space activities at Seekan (Wathananunthupathum) School based on the Low Emission Support Scheme (LESS) program criteria, 2) analyze management approaches toward a low-carbon school model, and 3) assess electricity usage reductions and environmental benefits within the institution. The low-carbon school concept and circular economy principles formed the research framework. The target group, selected through purposive sampling, consisted of project personnel and the energy and environmental committee. Research instruments included activity data logs, the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO) Calculation Sheet, and the LESS evaluation criteria. Data were analyzed using descriptive statistics, specifically percentages and cumulative GHG emissions measured in kilograms of carbon dioxide equivalent ($kgCO_2eq$). The findings revealed that: 1) the three cumulative activities successfully reduced GHG emissions by a total of 110,022 $kgCO_2eq$, with the Solar Rooftop project yielding the highest reduction (53,515 $kgCO_2eq$), followed by green spaces (44,815 $kgCO_2eq$) and recycled waste (11,692 $kgCO_2eq$), respectively; 2) the management approach integrated clean energy innovations with natural resource and waste management through active personnel participation; and 3) integrating solar energy technology with natural carbon sinks demonstrates viability in mitigating GHG emissions within educational institutions. This model can serve as a practical guidelines for other schools with similar contexts. However, full economic feasibility and investment cost-effectiveness analyses were not fully evaluated due to insufficient supporting data in this study; therefore, comprehensive financial evaluations should be further investigated in future research.

Keywords: Low-Carbon School, Greenhouse Gas Reduction, Renewable Energy

1. บทนำ

ในปัจจุบันวิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) เป็นประเด็นเร่งด่วนที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ โดยประเทศไทยได้ประกาศเจตนารมณ์ในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี ค.ศ. 2065 [1] สถานศึกษาในฐานะที่เป็นแหล่งบ่มเพาะเยาวชนและเป็นหน่วยงานที่มีการดำเนินกิจกรรมและการใช้ทรัพยากรในปริมาณสูง จึงมีบทบาทสำคัญในการเป็นโมเดลต้นแบบด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และการพัฒนาไปสู่ "โรงเรียนคาร์บอนต่ำ" (Low-Carbon School) เพื่อปลูกฝังพฤติกรรมรักษ์โลกให้แก่เยาวชนอย่างยั่งยืน [2]

โรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) เป็นสถานศึกษาระดับมัธยมศึกษาขนาดใหญ่พิเศษ ตั้งอยู่ในเขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร บนขนาดพื้นที่รวม

ประมาณ 9 ไร่ จากการสำรวจและทบทวนข้อมูลฐาน (Baseline Data) ก่อนเริ่มดำเนินโครงการ พบว่า โรงเรียนประสบปัญหาเชิงประจักษ์สำคัญ 2 ประการหลัก คือ ประการแรก โรงเรียนต้องแบกรับภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายตัวของการใช้ปรับเครื่องปรับอากาศในอาคารเรียนเพื่อรองรับประชากรในโรงเรียนที่หนาแน่น และประการที่สอง ระบบการจัดการของเสียภายในสถานศึกษายังขาดโครงสร้างการคัดแยกขยะที่ต้นทางที่มีประสิทธิภาพ ทำให้น้ำหนักขยะส่วนใหญ่ปะปนและถูกส่งไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ (Landfill) ภายใต้การจัดการของส่วนท้องถิ่น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกโดยไม่จำเป็น ปัญหาเหล่านี้นำมาสู่ความจำเป็นในการสร้างแนวทางแก้ไขปัญหาเชิงระบบที่วัดผลได้จริง

โรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) ได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจึงได้ดำเนินโครงการบูรณาการเพื่อมุ่งสู่การเป็นสถานศึกษาต้นแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผ่านมาตรการองค์รวม 3 มิติ ได้แก่ มิติด้านพลังงานหมุนเวียน ด้วยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ขนาดกำลังการผลิต 141.9 กิโลวัตต์ (kW) ซึ่งสอดรับกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP 2018 Revision 1) ที่สนับสนุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานสะอาดในระดับอาคาร [3] มิติด้านพื้นที่สีเขียว เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนตามธรรมชาติ (Carbon Sequestration) และมิติด้านการจัดการของเสียตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) เพื่อลดปริมาณขยะสู่การฝังกลบ การดำเนินงานทั้งหมดนี้ได้รับการตรวจประเมินและรับรองผลลัพธ์ผ่านเกณฑ์โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (Low Emission Support Scheme: LESS) โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [4] เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงปริมาณที่มีความน่าเชื่อถือทางวิทยาศาสตร์

แม้ว่าที่ผ่านมาจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับการลดก๊าซเรือนกระจกหรือการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในสถานศึกษาอยู่จำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่มักเป็นการศึกษาแบบแยกส่วนในมิติใดมิติหนึ่ง เช่น การประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ หรือการบริหารจัดการขยะรีไซเคิลอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงด้านเดียว อีกทั้งยังขาดการเชื่อมโยงข้อมูลกิจกรรมเข้ากับเกณฑ์มาตรฐานที่วัดผลได้จริงในระดับประเทศ ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap) ของการศึกษานี้คือถึงแม้จะมีงานวิจัยเกี่ยวกับโรงเรียนคาร์บอนต่ำจำนวนมาก แต่ยังมีงานที่ศึกษาการลดก๊าซเรือนกระจกทั้งระบบของโรงเรียนร่วมกับการกักเก็บคาร์บอนจากพื้นที่สีเขียวน้อย กรณีศึกษานี้จึงมีความแตกต่างจากงานเดิมและมีความจำเป็นในการสร้างแบบจำลองต้นแบบที่จับต้องได้ บทความวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาและวิเคราะห์ความสำเร็จของโมเดลการจัดการโรงเรียนคาร์บอนต่ำของโรงเรียนสีกันฯ ทั้งในมิติเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติที่ดี (Best Practice) ให้แก่สถานศึกษาอื่นที่มีบริบทใกล้เคียงกันในการขับเคลื่อนสู่สังคมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

2.วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกสะสม ($kgCO_2eq$) จากกิจกรรมมิติด้านพลังงานหมุนเวียน มิติด้านการจัดการของเสีย และมิติด้านพื้นที่สีเขียว ของโรงเรียนสีกัน (วัฒนา

นันท์อุปถัมภ์) ให้สอดคล้องตามเกณฑ์มาตรฐานของโครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (Low Emission Support Scheme: LESS)

2) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของแนวทางการบริหารจัดการสู่แบบจำลองโรงเรียนคาร์บอนต่ำ (Low-Carbon School Model) ที่บูรณาการระหว่างเทคโนโลยีและการมีส่วนร่วมของบุคลากรภายในสถานศึกษาอย่างเป็นระบบ

3) เพื่อประเมินผลการลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบสายส่งหลักและผลประโยชน์เชิงสิ่งแวดล้อมในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ภายในสถานศึกษา

3. การทบทวนวรรณกรรม

ในการดำเนินโครงการโรงเรียนคาร์บอนต่ำของโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมและจัดหมวดหมู่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นระบบเชิงโครงสร้าง เพื่อเป็นฐานในการวิเคราะห์และจำลองรูปแบบการลดก๊าซเรือนกระจก โดยจำแนกตามมิติการจัดการ 3 ด้านหลัก ดังนี้

3.1 แนวคิดคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการส่งเสริมพฤติกรรมในสถานศึกษา (Carbon Footprint)

การประเมินรอยเท้าคาร์บอนและการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของประชากรในสถานศึกษาเป็นรากฐานสำคัญของการพัฒนาองค์กรคาร์บอนต่ำ โดย กิตติคุณ เสียวสกุล และคณะ [5] ระบุว่าการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในโรงเรียนจะประสบความสำเร็จได้ต้องอาศัยกลไกการปรับปรุงเชิงกายภาพควบคู่ไปกับการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้เรียน สอดคล้องกับข้อค้นพบที่ชี้ว่ากิจกรรมการเรียนรู้เรื่องรอยเท้าคาร์บอนมีผลสะท้อนโดยตรงต่อทัศนคติและการลดใช้ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ อัญพัชร์ คงวัฒนานันทน์ และคณะ [6] เสนอว่าการพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าเป็นเครื่องมือขั้นพื้นฐานในการจำลองสถานการณ์ลดก๊าซให้สอดรับกับเป้าหมายของแผนอนุรักษ์พลังงานประเทศ

3.2 การจัดการเทคโนโลยีพลังงานสะอาดและโซลาร์รูฟท็อป (Solar Rooftop)

การเปลี่ยนผ่านระบบพลังงานดั้งเดิมสู่พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เป็นตัวขับเคลื่อนเชิงปริมาณที่มีนัยสำคัญที่สุด จากการศึกษาการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ภายในสถานศึกษาของการุณย์ ชัยวณิชย์ และคณะ [7] พบว่าการติดตั้งระบบขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาวและช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสนับสนุนการตัดสินใจติดตั้งระบบ Solar Rooftop ขนาด 141.9 kW ของกรณีศึกษานี้ ขณะเดียวกันมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานด้านอื่น เช่น การปรับเปลี่ยนหลอดไฟเป็นระบบ LED ภายในอาคารเรียนและสำนักงาน ตามแนวทางของการุณย์ ชัยวณิชย์ และพุทธดี อุบลศุข [8] ถือเป็นเครื่องมือร่วมที่เห็นผลลัพธ์เป็นรูปธรรมและรวดเร็วในการลดรอยเท้าคาร์บอนภาคพลังงาน

3.3 การบริหารจัดการของเสียและระบบนิเวศพื้นที่สีเขียวเมือง (Green Space)

การจัดการของเสียตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการเพิ่มพื้นที่สีเขียวทำ

หน้าที่ร่วมกันในการลดและกักเก็บก๊าซเรือนกระจก โดย สุระเชฐ แก้วมะโน และคณะ [9] ได้เสนอแนวทางการพัฒนาโครงการโรงเรียนปลอดขยะ (Zero-Waste School) เพื่อสร้างความยั่งยืน ซึ่งสอดรับกับ มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ และคณะ [10] ที่ระบุว่าการจัดการของเสียที่ต้นทางเป็นแกนหลักในการขับเคลื่อนนโยบายจังหวัดสะอาด นอกจากนี้ พัชญทัษห์ กิณเรศ [11] เน้นย้ำประโยชน์ของการรีไซเคิลและลดขยะอาหารเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกจากภาคขยะมูลฝอย ในมิติด้านนิเวศวิทยา วิวัฒน์ จำรัส [12] อธิบายว่าต้นไม้ในสถาบันการศึกษาทำหน้าที่เป็น "ป่าในเมือง" (Urban Forest) ที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่องและปรับสภาวะอากาศรอบอาคาร (Micro-climate) ซึ่งมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูงเกือบเทียบเท่ามาตรการทางเทคโนโลยี

เพื่อจัดหมวดหมู่เชิงระบบ ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ความเชื่อมโยงและความแตกต่างระหว่างงานวิจัยในอดีตกับงานวิจัยชิ้นนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์เปรียบเทียบขอบเขตและช่องว่างวรรณกรรม (Synthesis Matrix)

งานวิจัยและคณะผู้แต่ง	**มิติด้านพลังงานหมุนเวียน**	**มิติด้านการจัดการของเสีย**	**มิติด้านพื้นที่สีเขียว**
กิตติคุณ เสียวสกุล และคณะ (2025)	/	/	X
การุณย์ ชัยวณิชย์ และคณะ (2018)	/	X	X
สุระเชฐ แก้วมะโน และคณะ (2025)	X	/	X
วิวัฒน์ จำรัส (2020)	X	X	/
งานวิจัยนี้	/ (Solar 141.9 kW)	/ (ขยะแยกประเภท)	/ (ไม้ยืนต้นเด่น 50 ต้น)

จากการทบทวนวรรณกรรมในตารางที่ 1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่มักประสบข้อจำกัดในการศึกษาแบบแยกส่วน (Fragmented Approach) โดยมุ่งเน้นเฉพาะมาตรการทางเทคโนโลยีพลังงาน Solar Rooftop หรือการประเมิน Carbon Footprint ภาคของเสียด้านใดด้านหนึ่งเป็นเอกเทศ งานวิจัยชิ้นนี้จึงเข้ามาเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการ (Research Gap) โดยการบูรณาการระบบการประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกทั้งระบบของโรงเรียนร่วมกับการกักเก็บคาร์บอนจากพื้นที่สีเขียวอย่างเป็นระบบภายใต้มาตรฐานกลไกโครงการ LESS ซึ่งช่วยเชื่อมโยงมิติทางกายภาพและเทคโนโลยีเข้าด้วยกันเป็นแบบจำลององค์รวมระบบแรกในบริบทสถานศึกษาระดับมัธยมศึกษาขนาดใหญ่ในเขตเมือง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเรื่องแนวทางการจัดการโรงเรียนคาร์บอนต่ำ กรณีศึกษาโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีวิจัยเชิงประจักษ์ (Empirical Research) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขอบเขตการศึกษา (Scope of Study)

1) ขอบเขตด้านพื้นที่และข้อมูลกายภาพต้นไม้

โรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร มีขนาดพื้นที่ทางกายภาพรวมประมาณ 9 ไร่ โดยกำหนดพื้นที่สำรวจระบบนิเวศพื้นที่สีเขียวเมืองเฉพาะไม้ยืนต้นที่เข้าหลักเกณฑ์ขั้นต่ำของโครงการ LESS รวมทั้งสิ้นจำนวน 50 ต้น จำแนกเป็น ไม้ประดู่ 23 ต้น, อโศกอินเดีย 10 ต้น, ตะแบก 8 ต้น, ชมพูพันธุ์ทิพย์ 3 ต้น, นนทรี 2 ต้น, ราชพฤกษ์ 2 ต้น, สัตบรรณ 1 ต้น และสาละ 1 ต้น

2) ขอบเขตด้านเนื้อหา

ประเมินปริมาณการลดและการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกสะสมใน 3 มาตรการหลัก ได้แก่ (1) มิติด้านพลังงานหมุนเวียน (Solar Rooftop) (2) มิติด้านการจัดการของเสีย (ขยะรีไซเคิล) และ (3) มิติด้านพื้นที่สีเขียว (การกักเก็บคาร์บอนต้นไม้)

3) ขอบเขตด้านเวลา

ข้อมูลโครงการ Solar Rooftop และข้อมูลการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ จัดเก็บข้อมูลรายเดือนจริงตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2568 (รวมระยะเวลา 12 เดือน) และข้อมูลน้ำหนักของเสียแยกประเภท จัดเก็บสถิติสะสมตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 (รวมระยะเวลา 6 เดือน)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (Research Tools)

ผู้วิจัยใช้เครื่องมือในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล ดังนี้

1) เครื่องมือรวบรวมข้อมูลภาคสนาม: แบบฟอร์มใบสมัครและบันทึกข้อมูลโครงการ LESS ของ อบก. สายวัดสายรังวัดเส้นรอบวงต้นไม้ และเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลมาตรฐานความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

2) โปรแกรมคำนวณมาตรฐานโครงการ LESS (อบก.): ผู้วิจัยใช้เครื่องมือคำนวณสำเร็จรูปบนฐาน Microsoft Excel เวอร์ชันที่กำหนดโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. ผ่านระบบเครือข่ายสารสนเทศเว็บไซต์ อบก. (tgo.or.th) ได้แก่

2.1) ด้านพลังงานหมุนเวียน โปรแกรม LESS-AE-02-version 09_280568 (การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเพื่อใช้เอง)

2.2) ด้านพื้นที่สีเขียว โปรแกรม LESS-FOR-01-version 06_271166 (การกักเก็บคาร์บอนต้นไม้)

2.3) ด้านการจัดการของเสีย โปรแกรม LESS-WM-01-version 06_151264 (การคัดแยกขยะเพื่อรีไซเคิล)

4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วนตามประเภทกิจกรรม

1) ด้านการจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ สำรวจเชิงเทคนิคของระบบ Solar Rooftop ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 141.9 กิโลวัตต์ (kW) ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ URECO จำนวน 258 แผ่น และชุดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ Sungrow เก็บบันทึกตัวเลขหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงสะสมตลอด 1 ปี จากระบบ Cloud Monitoring ของอินเวอร์เตอร์ ร่วมกับการตรวจสอบบิลค่าไฟฟ้าจริง

รายเดือนจากการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) พบหน่วยผลิตสะสมเท่ากับ 114,300 กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

2) ด้านการจัดการขยะรีไซเคิล บูรณาการร่วมกับคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมและโครงการธนาคารขยะของสถานศึกษา ทำการคัดแยกขยะตั้งแต่ต้นทางที่โรงอาหารและอาคารเรียน รวบรวมน้ำหนักสะสมรอบ 6 เดือน โดยเปิดเผยข้อมูลกิจกรรมแยกประเภทอย่างชัดเจน ประกอบด้วย ขยะกระดาษ 1,756 กิโลกรัม, ขยะพลาสติก 657 กิโลกรัม, เหล็ก 493 กิโลกรัม และอลูมิเนียม 16.30 กิโลกรัม นำมาบันทึกสถิติเพื่อใช้คำนวณผลแยกตามรายวัสดุ

3) ด้านการเพิ่มพื้นที่สีเขียว ลงพื้นที่รังวัดและตรวจสอบไม้ยืนต้นหลักพรรณไม้ทั่วไปบนพื้นที่ 9 ไร่ ของโรงเรียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (Diameter at Breast Height: DBH วัดที่ความสูง 1.30 เมตรจากพื้นดิน) ตั้งแต่ 4.5 เซนติเมตรขึ้นไป และความสูงของต้นไม้ (Height: H) รวมทั้งสิ้น 50 ต้น เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลทางกายภาพสำหรับนำไปวิเคราะห์มวลชีวภาพ

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ข้อมูลที่รวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (Amount of GHG Reduction) โดยใช้สูตร

ER = (Activity Data x Emission Factor)

1) การคำนวณกิจกรรมด้านพลังงาน

1.1) ข้อมูลฐาน (Baseline) อ้างอิงอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ซื้อจากระบบสายส่งกระแสหลักเดิมของ กฟน. ก่อนเริ่มดำเนินโครงการ

1.2) ที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซ (Emission Factor) อ้างอิงค่าประกาศประจำปี พ.ศ. 2568 จาก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. โดยระบุค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบสายส่งไฟฟ้าของประเทศไทย (Grid Emission Factor) เท่ากับ 0.4682 $kgCO_2eq/kWh$ ตามข้อกำหนดในโปรแกรมสำเร็จรูป LESS-AE-02-version 09_280568

1.3) ขั้นตอนการคำนวณ นำหน่วยไฟฟ้าที่ Solar Rooftop ผลิตได้จริง 114,300 kWh คูณด้วยค่า Grid EF (114,300 x 0.4682) ได้ปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกภาคพลังงานเท่ากับ 53,515.26 $kgCO_2eq$

2) การคำนวณกิจกรรมด้านการจัดการของเสีย

2.1) ข้อมูลฐาน (Baseline) สมมติฐานกำหนดให้ปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมดถูกรวบรวมและนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ (Landfill Scenario) โดยไม่มีการคัดแยก

2.2) ที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซ (Emission Factor) อ้างอิงดัชนีค่าการปล่อยก๊าซสะสมจากการฝังกลบที่หลีกเลี่ยงได้ (Avoided Landfill Emissions) แยกรายประเภทวัสดุ (กระดาษ พลาสติก แก้ว โลหะ) จากหน่วยงาน อบก. ตามตารางเกณฑ์โปรแกรมสำเร็จรูป LESS-WM-01-version 06_151264 พ.ศ. 2568

2.3) ขั้นตอนการคำนวณ นำน้ำหนักขยะที่คัดแยกได้แต่ละวัสดุ คูณด้วยค่า EF เฉพาะของวัสดุนั้น ๆ แล้วนำผลลัพธ์มารวมกัน ได้ปริมาณผลรวมการลด

ก๊าซเรือนกระจกภาคของเสียรอบ 6 เดือน เท่ากับ 11,692.00 $kgCO_2eq$

3) การคำนวณกิจกรรมด้านพื้นที่สีเขียว

3.1) เลือกใช้สมการแอลโลเมตรีจำแนกตามกลุ่มชนิดพรรณไม้ (Allometric Equations) ในโปรแกรมสำเร็จรูป LESS-FOR-01-version 06_271166 ของ อบก. เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีวิจัยที่มีความแม่นยำทางวิชาการและมีความจำเพาะเจาะจงสูงที่สุดในการแปลงค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพ (DBH และ H) จากการสำรวจจริง ให้เป็นมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (Aboveground Biomass) และใต้พื้นดิน (Belowground Biomass)

3.2) ขั้นตอนการคำนวณ สมการ Allometric จะคำนวณมวลชีวภาพสะสมแห้ง (กิโลกรัม) จากนั้นคูณแปรสภาพเป็นปริมาณเนื้อธาตุคาร์บอน (ร้อยละ 47 ของมวลชีวภาพแห้ง) และแปรสภาพเป็นปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าสะสมต่อปีด้วยอัตราส่วนสัมพันธ์คงที่ (44/12) ตามมาตรฐานสากล ส่งผลให้ต้นไม้เด่นทั้ง 50 ต้นของโรงเรียนสีกันฯ ลดก๊าซเรือนกระจกได้ 44,815.00 $kgCO_2eq$

เมื่อรวมผลลัพธ์สะสมจากมาตรการทั้ง 3 ด้านโครงการของโรงเรียนสีกันฯ สามารถบรรลุผลรวมการลดก๊าซเรือนกระจกสะสมที่เกิดขึ้นจริงจากกิจกรรมโครงการหักล้างค่าฐาน ได้ผลลัพธ์รวมทั้งสิ้นเท่ากับ 110,022 $kgCO_2eq$

5. ผลการวิจัย

จากการดำเนินมาตรการทั้ง 3 ด้านเพื่อพัฒนาโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) สู่การเป็นสถานศึกษาคาร์บอนต่ำ ผู้วิจัยได้ประมวลผลข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) เชิงประจักษ์เข้าสู่โปรแกรมคำนวณมาตรฐานของ อบก. ทั้ง 3 ด้าน ผลการวิจัยเชิงปริมาณสรุปแยกตามรายกิจกรรมปรากฏดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปปริมาณการลดและการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกแยกตามประเภทกิจกรรม

กิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก	ข้อมูลกิจกรรมดิบ (Activity Data)	ปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ ($kgCO_2eq$)	คิดเป็นร้อยละ (%)
1. ด้านพลังงานหมุนเวียน (Solar 141.9 kW)	114,300 kWh/ปี	53,515	48.64
2. ด้านการจัดการของเสีย (ขยะรีไซเคิลสะสม 6 เดือน)	ของเสียรวม 2,922.30 กิโลกรัม	11,692	10.63
3. ด้านพื้นที่สีเขียว (การกักเก็บคาร์บอนต้นไม้)	ไม้ยืนต้นทั่วไป จำนวน 50 ต้น	44,815	40.73
รวมทั้งสิ้น		110,022	100.00

จากตารางที่ 2 มาตรการด้านพลังงานหมุนเวียน Solar Rooftop มีประสิทธิภาพเชิงปริมาณในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48.64 รองลงมาคือ การกักเก็บคาร์บอนต้นไม้ของพื้นที่สีเขียวเมืองร้อยละ 40.73 และการจัดการของเสียร้อยละ 10.63 ตามลำดับ

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากการดำเนินกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจกรวมทั้ง 3 ด้านของโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) สามารถอภิปรายผลเชิงเปรียบเทียบได้ดังนี้

1) ศักยภาพของเทคโนโลยีพลังงานสะอาดร่วมกับการประหยัดพลังงาน

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบ Solar Rooftop ขนาด 141.9 kW สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้สูงที่สุด (53,515 $kgCO_2eq$) ผลลัพธ์นี้มีความสอดคล้องอย่างยิ่งกับงานวิจัยของ การุณย์ ชัยวณิชย์ และคณะ [7] ที่ระบุว่าการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานศึกษามีศักยภาพสูงในการลดรอยเท้าคาร์บอนภาคพลังงานเนื่องจากเวลาในการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ตรงกับช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของอาคารเรียน (Peak Load) พอดี นอกจากนี้ ปริมาณการลดก๊าซที่เกิดขึ้นยังสอดรับไปในทิศทางเดียวกับมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของ การุณย์ ชัยวณิชย์ และพุทธดี อุบลศุข [8] ที่ระบุว่าการเปลี่ยนผ่านสู่เทคโนโลยีสีเขียวช่วยลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลจากสายส่งหลักได้อย่างเป็นรูปธรรม

2) บทบาทของพื้นที่สีเขียวในการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนเมือง

การกักเก็บก๊าซเรือนกระจกจำนวน 44,815 $kgCO_2eq$ จากไม้ยืนต้นทั่วไปจำนวน 50 ต้น มีความสอดคล้องกับแนวคิดของ วิวัฒน์ จำรัส [12] ที่อธิบายว่าต้นไม้ในสถานศึกษาทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนเมือง (Urban Carbon Sink) อย่างไรก็ตาม ข้อค้นพบเพิ่มเติมจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนต้นไม้เพียงอย่างเดียว แต่แปรผันตรงตามลักษณะทางกายภาพและความหนาแน่นของเนื้อไม้ด้วย โดยกลุ่มไม้ยืนต้นเนื้อแข็งที่โตช้า (เช่น ต้นประดู่ 23 ต้น และต้นนนทรี 2 ต้น) จะมีกลไกการสะสมมวลชีวภาพ (Biomass) ในเนื้อไม้ที่หนาแน่นและเสถียรกว่ากลุ่มพันธุ์ไม้โตเร็วที่มีเนื้อไม้โปร่ง ซึ่งข้อมูลนี้เป็นส่วนขยายที่ช่วยให้การจำลองโครงสร้างพื้นที่สีเขียวในโรงเรียนมีความแม่นยำยิ่งขึ้น [12]

3) การจัดการของเสีย

กิจกรรมการคัดแยกขยะรีไซเคิลสะสมน้ำหนักรวม 2,922.30 กิโลกรัม สามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ 11,692 $kgCO_2eq$ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองโรงเรียนปลอดขยะ (Zero-Waste School) ของ สุระเชฐ แก้วมะโน และคณะ [9] และนโยบายจังหวัดสะอาดของ มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ และคณะ [10] ที่ระบุว่าโรงเรียนคือจุดเริ่มต้นของการจัดการของเสียที่ต้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4) ศักยภาพและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

ในการประเมินผลตอบแทนทางการเงิน เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ยังไม่มีข้อมูลโครงสร้างต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ ตัวเลขกระแสเงินสดสุทธิ หรือการวิเคราะห์ทางการเงินขั้นสูง ผู้วิจัยจึงสรุปผลการวิจัยภายใต้หลักฐานเชิงประจักษ์ว่ามาตรการ Solar Rooftop ของโรงเรียนสีกันฯ "มีศักยภาพสูง" ในการสนับสนุนการลดค่าใช้จ่ายกระแสไฟฟ้ารายปีของส่วนราชการ แต่ยังไม่สามารถ

สรุปได้ว่าเป็นมาตรการที่คุ้มค่าที่สุดเชิงพาณิชย์ ซึ่งการประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) หรือต้นทุนต่อการลดคาร์บอนหนึ่งหน่วย (Cost per $kgCO_2eq$ reduced) ถือเป็นประเด็นสำคัญที่ท้าทายและควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อสร้างความแม่นยำเชิงลึก

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้บรรลุผลสัมฤทธิ์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ครบทั้ง 3 ข้อ ดังนี้

1) รูปแบบการจัดการองค์รวม 3 มิติ (พลังงาน-ของเสีย-พื้นที่สีเขียว) สามารถลดและกักเก็บก๊าซเรือนกระจกสะสมได้จริงรวมทั้งสิ้น 110,022.26 $kgCO_2eq$ โดยผ่านมาตรการตรวจวัดและได้รับการรับรองผลอย่างเป็นระบบภายใต้กลไกโครงการ LESS ของ อบก.

2) ผลการศึกษาพบว่า ความสำเร็จในการลดก๊าซเรือนกระจกเกิดจากการผสมผสานอย่างเป็นระบบระหว่างมาตรการทางเทคโนโลยี (การใช้โซลาร์เซลล์และการเพิ่มพื้นที่สีเขียว) ควบคู่กับพฤติกรรมการคัดแยกขยะของบุคลากรและนักเรียน โดยมีการเก็บบันทึกสถิติตัวเลขกิจกรรมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบจำลองโรงเรียนคาร์บอนต่ำแบบบูรณาการเพื่อเป็นแนวทางให้สถานศึกษาอื่นนำไปปฏิบัติจริงได้

3) มาตรการติดตั้งระบบ Solar Rooftop ขนาด 141.9 kW สามารถลดการพึ่งพากระแสไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้จริงเชิงประจักษ์โดยผลิตพลังงานสะอาดได้ 114,300 kWh/ปี ซึ่งแสดงให้เห็นถึง "ศักยภาพสูง" ในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคพลังงานและช่วยลดภาระรายจ่ายด้านพลังงานของสถานศึกษา โดยการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินเชิงลึกในมิติอื่น ๆ เป็นประเด็นสำคัญที่ถูกกำหนดขอบเขตให้ศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) มาตรการเชิงนโยบายโครงสร้าง หน่วยงานต้นสังกัดควรนำกรอบแนวทางการเก็บข้อมูลกิจกรรม (Activity Data Loop) ของโรงเรียนสีกันฯ ไปปรับใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการประเมินและขึ้นทะเบียนโครงการ LESS สำหรับสถานศึกษาอื่นในระดับนโยบายอย่างเป็นระบบ

2) มาตรการเชิงปฏิบัติการภายใน สถานศึกษาควรจัดตั้ง "ระบบการจัดซื้อจัดจ้างสีเขียว" (Green Procurement System) สำหรับพัสดุสำนักงานประเภทกระดาษเพื่อลดขยะที่ต้นทาง ควบคู่กับการพัฒนาระบบสารสนเทศรายงานผลรอยเท้าคาร์บอนรายเดือน (Digital Carbon Dashboard) เพื่อสร้างแรงจูงใจเชิงพฤติกรรมแก่ผู้เรียนในระยะยาว

8. ข้อจำกัดของงานวิจัยและการนำไปใช้ประโยชน์

8.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1) ข้อจำกัดด้านขนาดตัวอย่าง การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงกรณีศึกษาเดี่ยว ณ โรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) ซึ่งเป็นสถานศึกษาขนาดใหญ่พิเศษบริบทเขตเมือง ความสามารถในการนำผลลัพธ์ไปอ้างอิงทั่วไป (Generalizability) แก่สถานศึกษาขนาดเล็กหรือโรงเรียนในพื้นที่ชนบทห่างไกลจึงมีข้อจำกัดเนื่องจากพฤติกรรมการใช้ทรัพยากรและกายภาพพื้นที่สีเขียวมีความแตกต่างกัน

2) ข้อจำกัดด้านช่วงเวลา ข้อมูลสถิติกิจกรรมบางส่วน โดยเฉพาะภาคการจัดการของเสีย เป็นการ

เก็บข้อมูลจำกัดในช่วงเวลาเพียง 6 เดือน (กันยายน 2568 - กุมภาพันธ์ 2569) ทำให้อาจยังไม่สะท้อนความผันแปรตามฤดูกาลในรอบปีได้อย่างสมบูรณ์

3) ข้อจำกัดด้านการวิเคราะห์ทางการเงิน งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนการลงทุนและการบำรุงรักษาระบบ (O&M Cost) รวมถึงยังขาดการคำนวณตัวชี้วัดความคุ้มค่าทางการเงินขั้นสูง (Economic Viability) ในเชิงพาณิชย์

8.2 การนำไปใช้ประโยชน์

แม้จะมีข้อจำกัดข้างต้น แต่ผลการวิจัยเชิงปริมาณนี้สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในการถ่ายทอดองค์ความรู้ผ่านศูนย์เรียนรู้สิ่งแวดล้อมศึกษาภายในสถานศึกษา เพื่อปลูกฝังการลดรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) จากระดับบุคคลสู่อาคารเรียน และใช้เป็นแนวทางปฏิบัติปฏิบัติทางเลือก (Best Practice) ให้แก่โรงเรียนมัธยมศึกษาแห่งอื่นในการตั้งเป้าหมายลดก๊าซเรือนกระจก

9. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงเรียนสีกัน (วัฒนานันท์อุปถัมภ์) และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

10. เอกสารอ้างอิง

[1] Ministry of Natural Resources and Environment. (2022). Thailand's Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy (Revised Edition). Accessed February 1. Available from https://unfccc.int/documents/622276

[2] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2021). Action Plan for Community Solid Waste Management "Clean Province". Accessed February 1. Available from https://www.pcd.go.th/

[3] Ministry of Energy. (2020). Thailand Power Development Plan 2018-2080 (PDP2018 Revision 1). Accessed February 1. Available from https://www.eppo.go.th/images/allimage/PDP_image/PDP2018REv1.pdf

[4] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). (2023). Guidelines for Low Emission Support Scheme (LESS). Accessed February 1. Available from https://ghgreduction.tgo.or.th/th/about-less/about-less1/download/13955/175/17.html

[5] Seawsakul, K. et al. (2025). Promoting Electricity Usage Behaviors of Students to Reduce School Carbon Footprint. Journal of Science and Science Education, 8(2), 286-299. Accessed February 2. Available from https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JSSE/article/view/282067

[6] Kongwattananan, A. et al. (2022). Greenhouse Gas Emission Forecasting from Electricity Consumption: A Case Study of

Chulachomklao Royal Military Academy. Academic Journal of Science and Applied Science. Accessed February 2. Available from https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ajsas/article/view/3575

[7] Chaiyawanit, K. et al. (2018). Assessment of Greenhouse Gas Emissions and Economic Worthiness of Ground-Mounted Solar Cells in Chulachomklao Royal Military Academy. Journal of Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University, 10(12), 46-58. Accessed February 5. Available from https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nsrujst/article/view/118331

[8] Chaiyawanit, K., & Ubonsuk, P. (2018). Energy Efficiency Improvement by Replacing Lighting Equipment to Reduce Greenhouse Gas Emissions. Academic Journal of Science and Applied Science, 2018(2), 1-13. Accessed February 5. Available from https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ajsas/article/view/3553

[9] Kaewmano, S. et al. (2025). Development of Zero-Waste School Project Management in Educational Institutions in Songkhla Province. Journal of Institute of Trainer Monk Development, 8(2), 307-320. Accessed February 8. Available from https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JSSE/article/view/28206

[10] Assawaditlert, M. et al. (2024). Waste Management in Schools towards Clean Province. Thai Environment, 28(2), 9-12. Accessed February 8. Available from https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ej/article/view/3420

[11] Kinnares, P. (2024). Study and Development of a Food Waste Reduction Prototype under the Circular Economy Concept. Academic Research Journal, 7(6), 167-180. Accessed February 8. Available from https://so06.tci-thaijo.org/index.php/jra/article/view/270373

[12] Jamrad, W. (2020). Carbon Sequestration Potential of Green Spaces in Educational Institutions to Offset Greenhouse Gas Emissions. Journal of Science and Technology Research, 15(1), 12-25.

การสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องแบบเปิดออกสู่ผิวในแนวเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลองสำหรับการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม

Fabrication of Artificial Surface-Breaking Weld Discontinuities on Simulated Pressure Vessels for Liquid Penetrant Testing

อนุชาติ มากกลาง[1], กิตติศักดิ์ บัวศรี[2], นิมิตร มากกลาง[3], เจษฎา ภูคดหิน[4] ศรัณยู พรประสพ[5*], นายวิศรุต ตาคำ[6]

Anuchat Makklang[1], Kitttisak Buasri[2], Nimit Makklang[3], Jedtha Phukhodhin[4], Sarunyu Pornprasop[5*], Witsarut Takham[6]

[1]นักวิจัย วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5
Researcher. Nakhonratchasima Technical College Northeastern Vocational Education Institute 5
[2]อาจารย์ประจำ ภาควิชาเทคโนโลยีการเชื่อม วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา
Lecturer, Department of Welding Technology Nakhonratchasima Technical College Northeastern
[1]Corresponding Author: E-mail: Saksirahuntropap@gmail.com, เบอร์ 093-557-6161
[2]Author: E-mail: Saranyo7951@gmail.com, เบอร์ 061-267-5830

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดชิ้นงานภาชนะแรงดันจำลองที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องเทียม (Artificial surface-breaking weld discontinuities) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการฝึกปฏิบัติการตรวจสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT) ตามมาตรฐาน ASME โดยแก้ไขข้อจำกัดของชุดฝึกเดิมที่เป็นเพียงแผ่นโลหะเชื่อมต่อชน ซึ่งไม่สามารถจำลองสภาวะการตรวจสอบบนโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้ ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องเทียมจำนวน 15 จุด บนแนวเชื่อมของภาชนะแรงดันจำลองด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW) และสามารถสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องที่เทียบเคียงกับมาตรฐานสากลได้สำเร็จ

ผลการทดสอบด้วยสารแทรกซึมตามมาตรฐาน ASME Section VIII, Division 1, Appendix 8 พบว่าชิ้นงานจำลองสามารถแสดงผลการทดสอบด้วยการปรากฏของรอยความไม่ต่อเนื่องที่ชัดเจนจำนวน 7 จุด จากที่สร้างขึ้นทั้งหมด 15 จุด โดยในจุด C1 และ C4 (Circumferential Weld) พบเจอ รอยความไม่ต่อเนื่องลักษณะจุด (Rounded Indications) และแนวเส้น (Linear Indications) รวมทั้งในจุด N1 (Nozzle to Shell) และจุด N2 (Nozzle to Shell) ซึ่งพบเจอ รอยความไม่ต่อเนื่องในลักษณะแนวเส้น (Linear Indications) ทั้งนี้ รอยความไม่ต่อเนื่องที่ตรวจพบยังคงอยู่ในสถานะที่ยังไม่ผ่านการแปลผล (Uninterpreted indications) เพื่อใช้เป็นตัวแปรต้นในการทดสอบสมรรถนะการตีความของผู้ตรวจสอบ โดยอัตราส่วนร้อยละของความสำเร็จในการแสดงผล (Indication detection rate) จากจุดที่ตรวจพบทั้ง 7 จุด จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินความสามารถในการสังเกตการณ์ของผู้ตรวจสอบต่อไป

ผลงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลเชิงทดลองสำคัญในการพัฒนาชุดฝึก NDT ที่มีความสมจริง และเป็นแนวทางในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานสำหรับเครื่องมือทดสอบสมรรถนะผู้ตรวจสอบงานเชื่อมในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ: การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (PT), ข้อบ่งชี้ในรอยเชื่อม, ภาชนะแรงดันจำลอง, การฝึกปฏิบัติการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

Abstract

This research aims to develop a pressure vessel mock-up containing artificial surface-breaking weld discontinuities to serve as a standard tool for Liquid Penetrant Testing (PT) training, in accordance with ASME standards. This development addresses the limitations of conventional training kits, which are typically restricted to butt-joint metal plates and fail to simulate inspection conditions on complex structures. In this study, 15 artificial discontinuities were created on the weld seams of the pressure vessel mock-up using the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process, successfully producing discontinuities comparable to international standards.

Testing conducted according to ASME Section VIII, Division 1, Appendix 8, revealed that the mock-up successfully displayed clear indications of discontinuities in 7 out of the 15 created points. Specifically, rounded and linear indications were encountered at points C1 and C4 (Circumferential Weld), while linear indications were encountered at points N1 (Nozzle to Shell) and N2 (Nozzle to Shell). These detected discontinuities currently remain in an "uninterpreted" state, serving as the independent variables for testing the defect interpretation performance of inspectors. The indication detection rate from these 7 points will serve as baseline data for evaluating the observational capabilities of future inspectors.

This research provides essential experimental data for the development of realistic NDT training sets and establishes a framework for setting standard criteria for competency-based testing tools for welding inspectors in the petrochemical and related industries.

Keywords: Liquid Penetrant Testing (PT), Weld Defects, Simulated Pressure Vessel, Non-Destructive Testing Training

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง เช่น อุตสาหกรรมโครงสร้างขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพงานเชื่อมอย่างเคร่งครัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในด้านความปลอดภัยและการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive Testing: NDT) จึงถือเป็นกระบวนการสำคัญในการประเมินคุณลักษณะของวัสดุและค้นหารอยความไม่ต่อเนื่องที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงต่อโครงสร้างในอนาคต

หนึ่งในวิธีการตรวจสอบที่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายคือ การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจหาความไม่ต่อเนื่องที่เปิดออกสู่ผิวชิ้นงาน ไม่ว่าวัสดุนั้นจะเป็นโลหะหรืออโลหะ หลักการทดสอบอาศัยคุณสมบัติการแทรกซึมของสารเคมี (Wetting property) เข้าไปในรอยบกพร่องก่อนจะทำการขจัดสารส่วนเกินและใช้สารเร่งปฏิกิริยา (Developer) เพื่อดึงสารแทรกซึมที่ตกค้างในรอยตำหนิออกมาแสดงผลให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าความไว (Sensitivity) และความแม่นยำในการตรวจสอบด้วยวิธีนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ ชนิดของสารแทรกซึมและสารเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ ระยะเวลาในการแทรกซึม (Dwell Time) รวมถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Developing Time) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในปัจจุบันพบว่าอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการฝึกปฏิบัติงานตรวจสอบแบบไม่ทำลายส่วนใหญ่ยังคงจำกัดอยู่เพียงชิ้นงานทดสอบรูปแบบแผ่นโลหะเชื่อมต่อชน (Butt Joint) ซึ่งมีข้อจำกัดต่อการฝึกฝนทักษะใบสภางานจริง ที่มีการตรวจสอบบนชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เช่น ภาชนะแรงดัน (Pressure Vessel)

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการจัดสร้างข้อบกพร่องในรอยเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลองที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานสากล ASME Section VIII, Div 1 เพื่อมาใช้ฝึกปฏิบัติเพิ่มเทคนิคผู้ตรวจสอบไม่ทำลายสภาพหรือใช้ในการเรียนการสอนนักศึกษาให้ตรงตามความต้องการของตลาดแรงงาน ณ ปัจจุบัน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อสร้างชิ้นงานภาชนะแรงดันจำลอง ที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องของแนวเชื่อมที่ สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์และมีความชัดเจน คณะผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาไว้ดังนี้:

ศึกษาและสร้างภาชนะแรงดันจำลอง (Simulated Pressure Vessel) จากเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ตามมาตรฐาน ASME Section VIII, Div 1

การสร้างรอยความไม่ต่อเนื่อง (Artificial surface-breaking weld discontinuities) รวมจำนวนทั้งสิ้น 15 จุด บนแนวเชื่อมรอบวง (Circumferential weld) และแนวเชื่อมตามยาว (Longitudinal weld)

ใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) ในการสร้างรอยความไม่ต่อเนื่อง

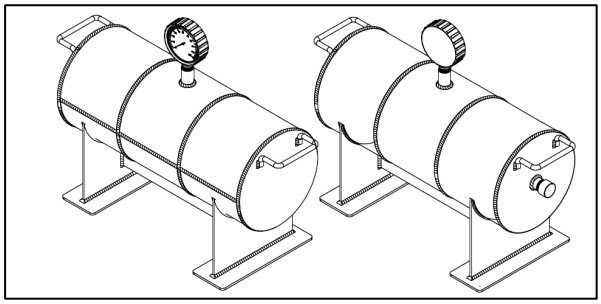
การสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องเทียมในแนวเชื่อมโดยมุ่งเน้นรอยที่เปิดออกสู่ผิว (Surface-breaking) เพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติการตรวจจับของวิธีสารแทรกซึม

ควบคุมตำแหน่งและลักษณะของรอยความไม่ต่อเนื่องให้อยู่ในสภาวะที่สามารถบ่งชี้ได้ (Indications) แต่ยังไม่ได้ผ่านการระบุประเภทหรือแปลผล (Uninterpreted) โดยผู้วิจัย

ESTACON 2026 | 17th

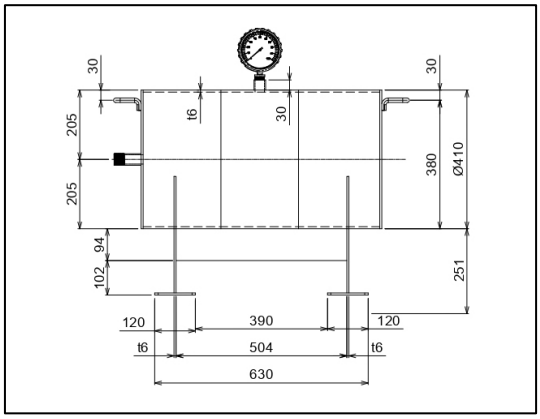
ใช้วิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT) ตามมาตรฐาน ASME Section VIII, Division 1, Appendix 8

3.2 การออกแบบภาชนะแรงดันจำลอง Ø410 มม. ยาว 710 มม.

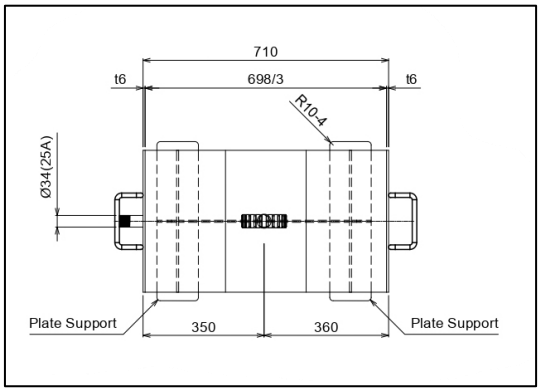


รูปที่ 1 การออกแบบภาชนะแรงดันจำลอง

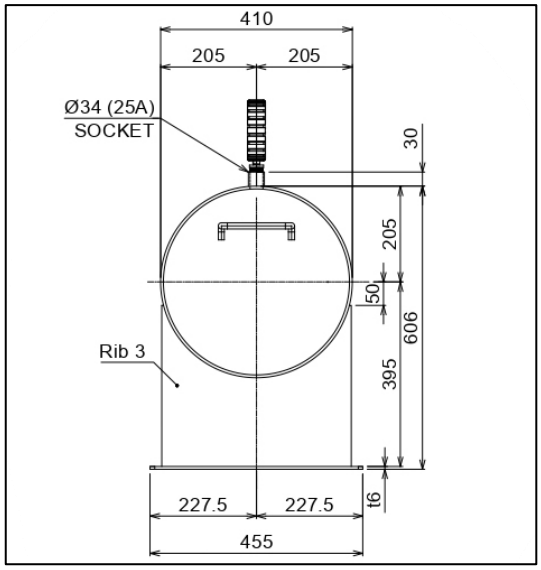
- ภาพฉาย 3 ด้าน และการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ



รูปที่ 2 ภาพฉายด้านหน้า

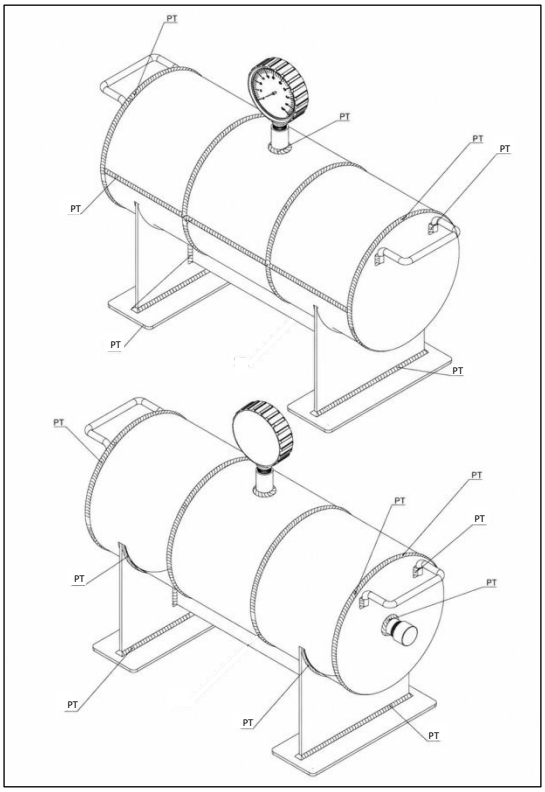


รูปที่ 3 ภาพฉายด้านบน



รูปที่ 4 ภาพฉายด้านข้าง

3.3 การกำหนดตำแหน่งที่จะสร้างรอยความไม่ต่อเนื่อง บนแนวเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลอง ทั้งหมด 15 จุด และกำหนดตำแหน่งการตรวจสอบ PT



รูปที่ 5 การกำหนดรอยความไม่ต่อเนื่อง

3.4 การสร้างชิ้นงาน ดำเนินการงานการสร้างชิ้นงาน ตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้

- การเตรียมวัสดุชิ้นงาน



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 6 การเตรียมวัสดุ

- การประกอบขึ้นรูป



(ก) (ข) (ค) (ง)

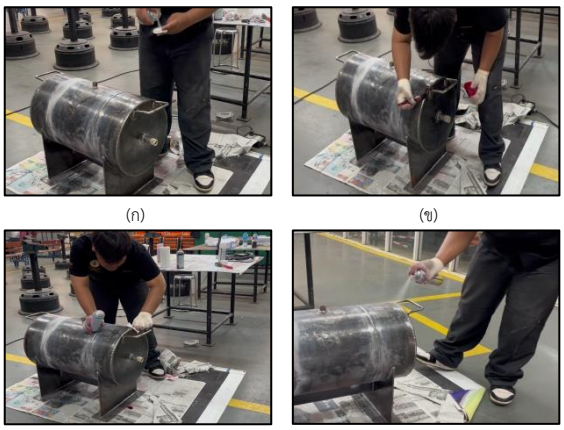
รูปที่ 7 การประกอบขึ้นรูป

- กำหนดตำแหน่งความไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 8 วางรอยความไม่ต่อเนื่อง

3.5 การบันทึกผล การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม PT (Liquid Penetrant Testing) การทดสอบความไม่ต่อเนื่องบนเนื้อวัสดุโดยการใช้สารแทรกซึม หรือในชื่อ Liquid Penetrant Testing (PT) อ้างอิงตาม ASME Section V Article 6 โดยขั้นตอน การเตรียมผิวงาน (Surface Preparation) การทาน้ำยาแทรกซึม (Penetrant Application) การทำความสะอาดน้ำยาส่วนเกิน (Excess Penetrant Removal) การใช้น้ำยาสร้างภาพ (Developer Application) การแปลผล (Interpretation& Evaluation) ดังรูปที่ 9 ก ทำน้ำยาแทรกซึม รูปที่ 9 ข เช็ดน้ำยาแทรกซึมบริเวณรอบรอยเชื่อมให้สะอาด รูปที่ 9 ค พ่นน้ำยาดึงสารแทรกซึม รูปที่ 9 ง



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 9 (ก) การทำความสะอาดรอยเชื่อมที่จะตรวจสอบ (ข) ทาน้ำยาแทรกซึม (ค) เช็ดน้ำยาแทรกซึมบริเวณรอบรอยเชื่อมให้สะอาด (ง) พ่นน้ำยาสร้างภาพดึงสารแทรกซึม

4. ผลการวิจัย

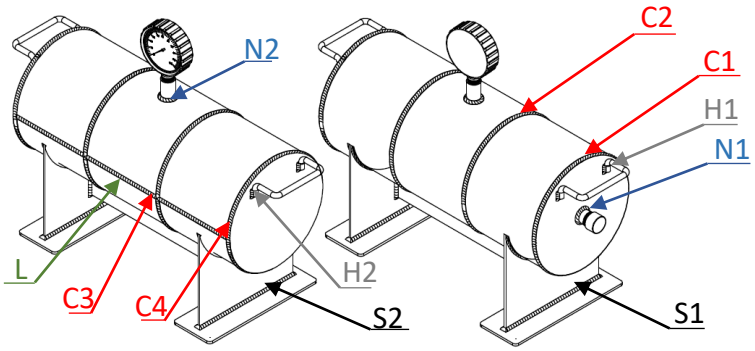
4.1 การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม PT (Liquid Penetrant Testing) จากการตรวจสอบ พบ รอยความไม่ต่อเนื่องตามยาว รอยความไม่ต่อเนื่องเป็นจุด อ้างอิง ASME Sec. VIII, Div. 1, App. 8 เป็นต้น

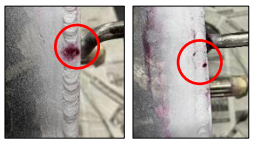
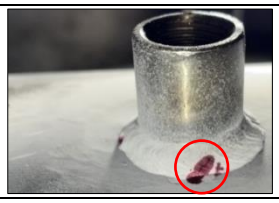
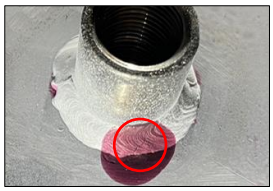
4.2 ผลการตรวจสอบจุดบ่งชี้ในงานเชื่อมโดยการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยสารแทรกซึม PT (Liquid Penetrant Testing) ผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บันทึกผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing) อ้างอิงตาม ASME Sec. VIII, Div. 1, App. 8

TYPES Pressure Vessel
Cylindrical Horizontal

Inspection Point	
	Circumferential Weld
	Longitudinal Weld
	Support Saddle Weld
	Nozzle to Shell Weld
	Handle Weld



ลำดับ	ตำแหน่ง	จุดที่ตรวจสอบ		ลักษณะรอยความไม่ต่อเนื่อง	
				Rounded Indications	Linear Indications
1	Pressure Vessel	Circumferential Weld	C1		
			C2	NONE	NONE
			C3	NONE	NONE
			C4	NONE	
		Longitudinal Weld	L	NONE	NONE
2	Support Saddle	Support Saddle Weld	S1	NONE	NONE
			S2	NONE	NONE
3	Nozzle to Shell	Nozzle to Shell Weld	N1	NONE	
			N2	NONE	
4	Handle	Handle Weld	H1	NONE	NONE
			H2	NONE	NONE

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 จากการดำเนินงานวิจัยการสร้างข้อบกพร่องในรอยเชื่อมบนภาชนะแรงดันจำลอง เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับฝึกปฏิบัติการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing: PT) พบว่าผู้วิจัยสามารถสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องจำลองที่เทียบเคียงกับมาตรฐานสากลได้สำเร็จ โดยการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Examination) ตามมาตรฐาน ASME Section V Article 6 ได้ดำเนินการครอบคลุมพื้นที่รอยเชื่อมตามแบบโครงสร้างถังแรงดัน จุด C1 (Circumferential Weld) ตรวจพบการสะสมของน้ำยาแทรกซึมทั้งในลักษณะที่เป็นจุด (Rounded Indications) และลักษณะที่เป็นแนวเส้น (Linear Indications) จุด C4 (Circumferential Weld): ตรวจพบข้อบ่งชี้ความไม่ต่อเนื่องในลักษณะที่เป็นแนวเส้น (Linear Indications) จุด N1 (Nozzle to Shell) ตรวจพบข้อบ่งชี้ความไม่ต่อเนื่องในลักษณะที่เป็นแนวเส้น (Linear Indications) จุด N2 (Nozzle to Shell): ตรวจพบข้อบ่งชี้ความไม่ต่อเนื่องในลักษณะที่เป็นแนวเส้น (Linear Indications) ซึ่งชิ้นงานจำลองดังกล่าวสามารถแสดงผลการทดสอบด้วยการปรากฏของรอยความไม่ต่อเนื่อง (Indication) อ้างอิง ASME Sec. VIII, Div. 1, App. 8 ที่ชัดเจนเมื่อผ่านกระบวนการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม ช่วยให้ผู้ฝึกปฏิบัติสามารถสังเกตเห็นและจำแนกประเภทของข้อบกพร่องได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การขยายผลไปสู่การทดสอบด้วยวิธีอื่น: ควรต่อยอดงานวิจัยโดยการสร้างข้อบกพร่องที่เหมาะสมกับการตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก (MT) หรือการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UT) บนชิ้นงานภาชนะแรงดันจำลองเดียวกัน เพื่อให้ชิ้นงานมีความเป็นอเนกประสงค์มากขึ้น
- การศึกษาสมบัติของวัสดุที่หลากหลาย: ควรมีการศึกษาการสร้างรอยบกพร่องบนวัสดุชนิดอื่นนอกเหนือจากเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) หรืออลูมิเนียม เพื่อให้ครอบคลุมความต้องการของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอากาศยานที่ใช้วัสดุต่างชนิดกัน
- การพัฒนาฐานข้อมูลเปรียบเทียบ (Defect Database): ควรพัฒนาคลังภาพหรือฐานข้อมูลดิจิทัลที่รวบรวมลักษณะรอยความไม่ต่อเนื่อง (Indication) ของข้อบกพร่องทั้ง 4 ประเภทในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงมาตรฐาน สำหรับเปรียบเทียบผลการทดสอบในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจาก คณะผู้ทำการวิจัย ได้รับความอนุเคราะห์จาก คณะภาควิชาเทคโนโลยีการเชื่อม วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 ที่ให้การสนับสนุน วัสดุอุปกรณ์ และ ข้อมูล ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ให้คำแนะนำในการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้เป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ชินภัทร แก้วโกมินทวงษ์ 2565 การสร้างและหาประสิทธิภาพเครื่องล้างหม้อน้ำรถยนต์ https://so06.tci-thaijo.org (ค้นคว้าเมื่อ วันที่ 5 กันยายน 2566)

[2] ชรัด (2528 : ค) ได้สร้างอุปกรณ์จำลองสถานการณ์ของการฝึกทักษะงานเชื่อมไฟฟ้าเบื้องต้น https://www.chanatc.ac.th.pdf (ค้นคว้าเมื่อ วันที่ 10 ตุลาคม 2566)

[3] จิราวัฒน์ (2539 : ค) ได้วิจัยการสร้างและทดลองหาประสิทธิภาพของชุดทดลองวงจรดิจิตอล https://dric.nrct.go.th (ค้นคว้าเมื่อ วันที่ 10 ตุลาคม 2566)

[4] ณรงค์(2534 : ค) ได้ทำการวิจัยการสร้างและหาประสิทธิภาพชุดฝึกปฏิบัติงานกลึง http://research.otepc.go.th.pdf (ค้นคว้าเมื่อ วันที่ 15 ตุลาคม 2566)

[5] สุพร ฤทธิภักดี 2555 ได้ทำวิจัยการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของชั้นผิวเชื่อมพอกแข็ง https://www.thaiscience.info.pdf (ค้นคว้าเมื่อ วันที่ 15 ตุลาคม 2566)

ระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการยอมรับเทคโนโลยี

Semi-Digital Material Requisition System with Low-Code Platform for Operational Efficiency and Technology Acceptance

ยอดรัก สายสิญจน์[1]

[1] คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ 167/2 หมู่ 8 ตำบลนาราชควาย อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48000

*ผู้ติดต่อ: yodruk_s@npu.ac.th, 089-7120291

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code และศึกษาประสิทธิภาพการดำเนินงานร่วมกับการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน ระบบพัฒนาโดยใช้ OutSystems ภายใต้แนวคิด Workflow แบบ 3-Lane Swimlane ประกอบด้วย ผู้ขอเบิก ผู้ดูแลระบบ และระบบสารสนเทศ โดยประยุกต์แนวคิดระบบกึ่งดิจิทัลที่ผสานการทำงานระหว่างระบบสารสนเทศและการควบคุมภายในผ่านการลงลายมือชื่อรับมอบวัสดุจริง ผู้ขอเบิกสามารถใช้งานแบบ Login-free ขณะที่ผู้ดูแลระบบต้องยืนยันตัวตนก่อนอนุมัติหรือยกเลิกคำขอ ระบบรองรับการยกเลิกอัตโนมัติ การบันทึก Audit Log การปรับปรุงข้อมูลคงคลังแบบเรียลไทม์ และการออกรายงาน

กลุ่มตัวอย่างจำนวน 74 คน ประกอบด้วยผู้ใช้งาน 72 คน และผู้ดูแลระบบ 2 คน ประเมินการยอมรับเทคโนโลยีตามแบบจำลอง TAM และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา

ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยในกระบวนการเบิกจ่ายจาก 35 นาที เหลือไม่เกิน 5 นาที คิดเป็นร้อยละ 85.71 ลดระยะเวลาในการตรวจสอบวัสดุคงเหลือร้อยละ 95 และลดระยะเวลาในการจัดทำใบเบิกร้อยละ 80 พร้อมเพิ่มความถูกต้องและความสามารถในการตรวจสอบข้อมูลคงคลัง ผู้ใช้งานมีระดับการยอมรับเทคโนโลยีโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$= 4.70, S.D. = 0.35) ผลการวิจัยชี้ว่าการประยุกต์ใช้ Low-Code ร่วมกับแนวคิดระบบกึ่งดิจิทัลสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน สนับสนุนการควบคุมภายใน และส่งเสริมการยอมรับเทคโนโลยีในองค์กรได้อย่างมีประสิทธิผล

คำสำคัญ: ระบบเบิกจ่ายวัสดุ, ระบบกึ่งดิจิทัล, แพลตฟอร์มโลว์โค้ด, การยอมรับเทคโนโลยี, การควบคุมภายใน

Abstract

This research aimed to develop a semi-digital material requisition system using a Low-Code platform and to investigate its operational efficiency as well as user technology acceptance. The system was developed using OutSystems under a three-lane swimlane workflow concept consisting of requisitioners, system administrators, and the information system. The semi-digital system concept was applied by integrating information systems with internal control processes through physical signatures for material receipt verification. Requisitioners are able to access the system via a login-free approach, while system administrators are required to authenticate before approving or canceling requests. The system supports automatic request cancellation, audit log recording, real-time inventory updates, and report generation.

The sample group consisted of 74 participants, including 72 system users and 2 system administrators. Technology acceptance was evaluated using the Technology Acceptance Model (TAM), and the data were analyzed using descriptive statistics.

The results revealed that the system reduced the average material requisition processing time from 35 minutes to no more than 5 minutes, representing an 85.71% reduction. The time required for inventory checking was reduced by 95%, while the time required for requisition form preparation was reduced by 80%. In addition, the system improved inventory data accuracy and traceability. Overall technology acceptance was rated at the highest level ($\bar{x}$= 4.70, S.D. = 0.35). The findings indicate that the application of a Low-Code platform combined with a semi-digital system approach can effectively enhance operational efficiency, support internal control processes, and promote technology acceptance within organizations.

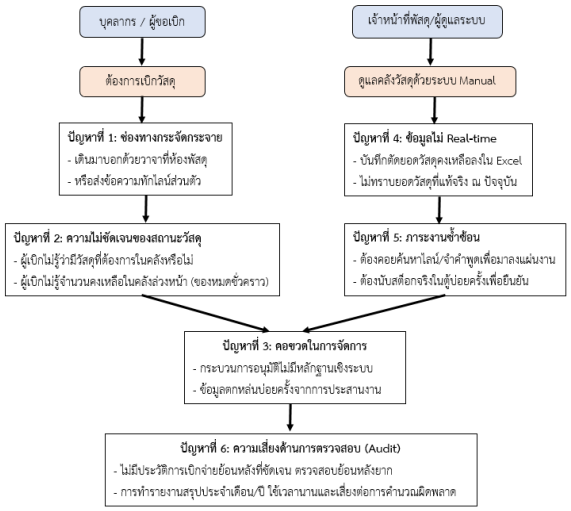
Keywords: Material Requisition System, Semi - Digital System, Low - Code Platform, Technology Acceptance, Internal Control

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม เป็นหน่วยงานที่มีภารกิจด้านการจัดการเรียนการสอน การวิจัย การบริการวิชาการ และการบริหารจัดการองค์กร โดยมีบุคลากรจำนวน 74 คน ซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุสำนักงานและวัสดุการศึกษาในการปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง การบริหารจัดการวัสดุจึงเป็นกระบวนการสนับสนุนที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดำเนินงาน ความพร้อมของทรัพยากร และความสามารถในการตรวจสอบการใช้วัสดุขององค์กร

จากการศึกษากระบวนการดำเนินงานเดิม พบว่ายังใช้รูปแบบกึ่งแมนนวล (Semi-Manual Process) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงบริบทและปัญหาหน้างานเดิม

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเบิกจ่ายวัสดุเดิม ดำเนินการโดยผู้ขอเบิกแจ้งความประสงค์ผ่านการสื่อสารด้วยวาจาหรือแอปพลิเคชัน Line และรับวัสดุจากเจ้าหน้าที่โดยตรง ขณะที่เจ้าหน้าที่จะทำการบันทึกข้อมูลการเบิกจ่ายและปรับปรุงบัญชีคุมวัสดุในภายหลังด้วยโปรแกรมตารางคำนวณ จากการศึกษาการปฏิบัติงานดังกล่าว พบปัญหาสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ 1) ข้อมูลวัสดุคงคลังไม่เป็นปัจจุบันและคลาดเคลื่อนจากสภาพจริง โดยพบกรณีที่ระบบบัญชีคุมวัสดุแสดงจำนวนวัสดุคงเหลือ แต่ไม่สามารถตรวจพบวัสดุจริงในคลัง ซึ่งอาจเกิดจากการบันทึกข้อมูลล่าช้าหรือการตัดยอดไม่ครบถ้วน 2) การติดตามและตรวจสอบประวัติการเบิกจ่ายทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีการจัดเก็บหลักฐานการเบิกจ่ายอย่างเป็นระบบ และ 3) การจัดทำรายงานเพื่อการบริหารและการตรวจสอบต้องอาศัยการตรวจนับวัสดุจริงและการรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง ส่งผลให้ใช้เวลานานและมีความเสี่ยงต่อข้อผิดพลาด งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลโดยใช้แพลตฟอร์ม OutSystems ร่วมกับการออกแบบ Workflow แบบ 3-Lane Swimlane เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ความถูกต้องของข้อมูล และการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานภายในองค์กร

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อพัฒนาระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลโดยใช้แพลตฟอร์ม Low-Code ให้เหมาะสมกับบริบทการดำเนินงานขององค์กร

2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการดำเนินงานก่อนและหลังการใช้งานระบบ

3) เพื่อศึกษาการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานระบบตามกรอบแนวคิดแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ระบบกึ่งดิจิทัล (Semi-Digital System)

ระบบกึ่งดิจิทัลเป็นแนวทางการออกแบบระบบสารสนเทศที่ผสมผสานการดำเนินงานผ่านระบบดิจิทัลร่วมกับกระบวนการควบคุมโดยมนุษย์ในบางขั้นตอน เพื่อสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศ ความสะดวกในการใช้งาน และการควบคุมภายในขององค์กร [1]

ในบริบทขององค์กร ผู้วิจัยพบว่าการพัฒนาระบบดิจิทัลเต็มรูปแบบ (Fully Digital System) อาจยังไม่สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานของหน่วยงาน เนื่องจากกระบวนการเบิกจ่ายวัสดุยังคงต้องอาศัยการส่งมอบวัสดุจริงและการลงลายมือชื่อรับมอบเพื่อเป็นหลักฐานประกอบการควบคุมภายใน อีกทั้งกลุ่มผู้ใช้งานมีความหลากหลายทั้งในด้านบทบาทหน้าที่และระดับความพร้อมด้านทักษะดิจิทัล เช่น อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรสนับสนุน ทำให้ต้องออกแบบระบบให้ใช้งานได้ง่ายและไม่เพิ่มภาระในการยืนยันตัวตนหรือการจัดการบัญชีผู้ใช้ นอกจากนี้ หน่วยงานยังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนผ่านจากกระบวนการแบบเอกสารไปสู่ระบบดิจิทัล จึงยังต้องอาศัยหลักฐานเชิงกายภาพร่วมกับระบบสารสนเทศ และยังไม่อยู่ในระยะของการปรับเปลี่ยนไปสู่ระบบไร้กระดาษอย่างสมบูรณ์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แนวทางระบบกึ่งดิจิทัล โดยดำเนินการสร้างคำขอเบิก การตัดสต็อก และการจัดทำรายงานผ่านระบบสารสนเทศ ขณะที่ยังคงกระบวนการรับมอบวัสดุและการลงลายมือชื่อจริงไว้เป็นหลักฐานเชิงกายภาพ เพื่อสนับสนุนการควบคุมภายในและการตรวจสอบย้อนหลัง ซึ่งช่วยลดอุปสรรคในการยอมรับเทคโนโลยี และเหมาะสมกับบริบทขององค์กร

2.1.2 การจัดการกระบวนการทำงาน (Workflow Management)

Workflow เป็นแนวคิดที่ใช้กำหนดลำดับขั้นตอนการดำเนินงานและผู้รับผิดชอบในแต่ละขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ช่วยให้สามารถติดตามสถานะงาน ลดความซ้ำซ้อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน [2] งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวในการออกแบบกระบวนการเบิกจ่ายวัสดุแบบ 3-Lane Swimlane เพื่อกำหนดบทบาทของผู้ขอเบิก ผู้ดูแลระบบ และระบบสารสนเทศให้มีความชัดเจน

2.1.3 แพลตฟอร์มการพัฒนาแบบ Low-Code

Low - Code Development Platform เป็นแนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้เครื่องมือแบบภาพและองค์ประกอบสำเร็จรูปเพื่อลดการเขียนโปรแกรม ส่งผลให้สามารถพัฒนาระบบได้รวดเร็วและลดความซับซ้อนของกระบวนการพัฒนา [3] งานวิจัยนี้เลือกใช้แพลตฟอร์ม OutSystems ในการพัฒนาระบบ เนื่องจากรองรับการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ การจัดการฐานข้อมูล และกระบวนการทำงานแบบ Workflow ได้อย่างครบวงจร

2.1.4 แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี

แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (TAM) พัฒนาโดย Davis (1989) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน โดยประกอบด้วยปัจจัยสำคัญ ได้แก่ การรับรู้ความง่ายในการใช้งาน การรับรู้ประโยชน์ในการใช้งาน และความตั้งใจในการใช้งาน [4] งานวิจัยนี้นำ TAM มาใช้เป็นกรอบในการประเมินการยอมรับระบบของผู้ใช้งานหลังการนำระบบไปใช้งาน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ มีการประยุกต์ใช้แนวคิดด้านการพัฒนาระบบสารสนเทศในบริบทที่หลากหลาย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

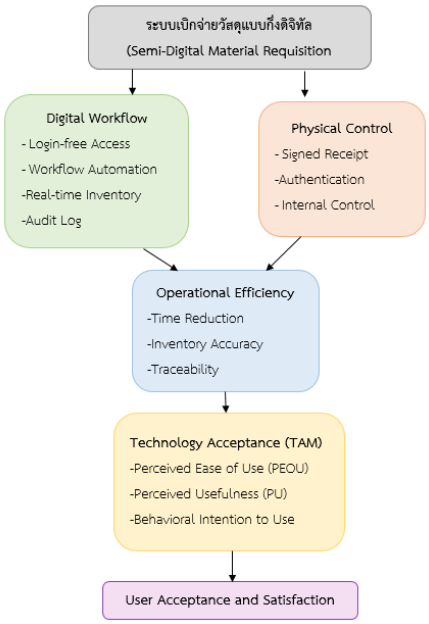
ตารางที่ 1 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย/ปี	ประเด็นสำคัญ	ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัย
Davis (1989) [4]	แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (TAM) โดยการรับรู้ประโยชน์และความง่ายในการใช้งานส่งผลต่อการยอมรับระบบ	ใช้เป็นกรอบประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน
Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). [5]	ความง่ายในการใช้งานและความเชื่อมั่นส่งผลต่อการใช้งานระบบออนไลน์	สนับสนุนแนวคิดการยื่นคำขอผ่านระบบออนไลน์
Recker, J., & La Rosa, M. (2012). [2]	ระบบ Workflow ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและการยอมรับของผู้ใช้งาน	ใช้ออกแบบ Workflow แบบ 3-Lane Swimlane
Cranshaw et al. (2017) [1]	Human-in-the-loop ช่วยเพิ่มความถูกต้องและความยืดหยุ่นของระบบ	สนับสนุนการทำงานร่วมกันระหว่างระบบและเจ้าหน้าที่
Oh et al. (2013) [6]	ความสะดวกในการใช้งานส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้	สนับสนุนการออกแบบระบบแบบ Login-free
Abdul Razak et al. (2024) [3]	Low-Code ช่วยลดเวลาในการพัฒนาและเพิ่มความคล่องตัวขององค์กร	สนับสนุนการเลือกใช้ Low-Code
W. Jia and W. Zhou. (2005). [7]	การใช้สถาปัตยกรรม "Timeout-based Locking Mechanisms" เพื่อตัดการทำงานและปล่อยล็อกโดยอัตโนมัติ	สนับสนุนกลไก Auto-cancel Timeout
Kent, K., & Souppaya, M. (2006). [8]	โครงสร้างการควบคุมภายในสำหรับความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ ออกแบบตามแนวทางปฏิบัติการจัดการ Log ของ NIST	สนับสนุนการออกแบบ Audit Log และการควบคุมภายใน

2.3 สรุปการทบทวนวรรณกรรมและช่องว่างงานวิจัย (Research Gap)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาแนวคิดด้านการยอมรับเทคโนโลยี การจัดการกระบวนการทำงาน การพัฒนาระบบด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code และการออกแบบระบบที่มีมนุษย์ร่วมในกระบวนการตัดสินใจ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นระบบบริการออนไลน์หรือระบบดิจิทัลเต็มรูปแบบ ขณะที่งานวิจัยที่บูรณาการแนวคิดดังกล่าวร่วมกันในบริบทของระบบเบิกจ่ายวัสดุภายในองค์กร ซึ่งต้องคำนึงถึงการควบคุมภายในการตรวจสอบย้อนหลัง และการดำเนินงานร่วมกันระหว่างกระบวนการดิจิทัลกับกระบวนการทางกายภาพยังมีจำนวนจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลโดยประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม Low-Code ร่วมกับ Workflow แบบ 3-Lane Swimlane และแนวคิด Human-in-the-loop เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน

2.4 กรอบแนวคิดการวิจัย



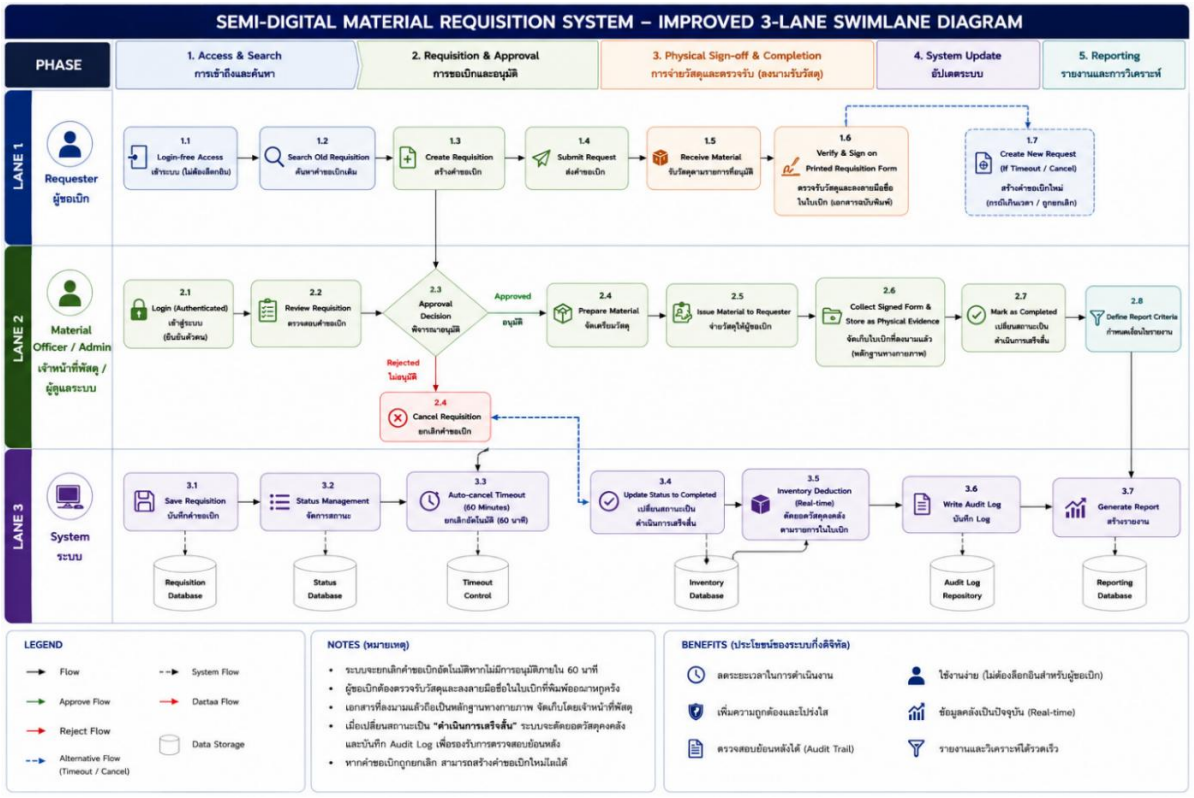
รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากรูปที่ 2 งานวิจัยนี้ ลดความซับซ้อนของการใช้งานผ่านแนวคิด Login-free Workflow และการติดตามสถานะแบบเรียลไทม์ ซึ่งส่งผลต่อการรับรู้ความง่ายในการใช้งาน (PEOU) และการรับรู้ประโยชน์ของระบบ (PU) ซึ่งนำไปสู่การยอมรับและการใช้งานระบบของผู้ใช้ พร้อมทั้งสนับสนุนความถูกต้องของข้อมูล การตรวจสอบย้อนหลัง และประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กร

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการทำงานของระบบใหม่

ในการปรับปรุงกระบวนการปฏิบัติงาน ผู้วิจัยได้ออกแบบตรรกะการดำเนินงานของระบบ โดยสรุปโครงสร้างการไหลของขั้นตอนการปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างผู้ใช้และส่วนต่อประสานระบบ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพกระบวนการทำงานของระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัล

จากรูปที่ 5 แสดงกระบวนการทำงานของระบบในรูปแบบ 3-Lane Swimlane Diagram ซึ่งแบ่งบทบาทการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผู้ขอเบิก เจ้าหน้าที่พัสดุ/ผู้ดูแลระบบ และระบบสารสนเทศ เริ่มจากผู้ขอเบิกสร้างใบเบิกผ่านระบบ โดยระบบบันทึกข้อมูล สถานะเริ่มต้นเป็น “รออนุมัติ”จากนั้นผู้ดูแลระบบเข้าสู่ระบบเพื่อตรวจสอบและ อนุมัติใบเบิก ซึ่งระบบจะดำเนินการปรับปรุงข้อมูลคงคลังแบบเรียลไทม์ พร้อมบันทึกประวัติการดำเนินงาน ในการรับมอบวัสดุ ผู้ขอเบิกต้องลงลายมือชื่อในเอกสารใบเบิก เพื่อเป็นหลักฐานทางกายภาพและรองรับการตรวจสอบย้อนหลัง ทั้งนี้ระบบรองรับการยกเลิกใบเบิกทั้งในรูปแบบ Manual Cancel และ Auto-Cancel Timeout รวมถึงสร้างรายงานตามเงื่อนไขการกรองข้อมูลเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการและการควบคุมภายในขององค์กร

3.2 ประชากร เครื่องมือ การเก็บรวบรวม และการวิเคราะห์ข้อมูล

ประชากรในการวิจัย ได้แก่ บุคลากรภายในคณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม จำนวน 74 คน ประกอบด้วยผู้ใช้งานทั่วไป 72 คน และผู้ดูแลระบบ 2 คน โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นผู้ใช้งานระบบจำนวน 72 คน ซึ่งคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive Sampling) จากผู้ที่มีการใช้งานระบบจริง

เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย 1) ระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลที่พัฒนาด้วยแพลตฟอร์ม OutSystems และ 2) แบบสอบถามการยอมรับเทคโนโลยีตามกรอบแนวคิด TAM โดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ครอบคลุม 3 ด้าน ได้แก่ การรับรู้ถึงประโยชน์ในการใช้งาน การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน และการยอมรับเชิงพฤติกรรม

ผู้วิจัยนำระบบไปทดลองใช้งานจริงภายในหน่วยงาน โดยให้ผู้ใช้งานทดลองดำเนินการในกระบวนการเบิกจ่ายวัสดุ จากนั้นจึงเก็บรวบรวมข้อมูลผ่านแบบสอบถามหลังการใช้งานระบบ และเก็บข้อมูลระยะเวลาในการดำเนินงานก่อนและหลังการใช้งานระบบ เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

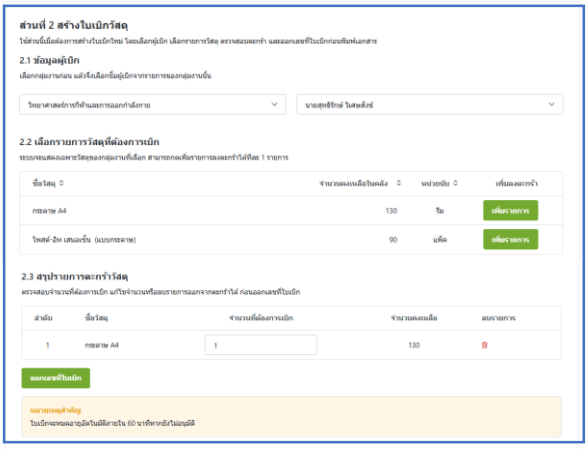
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการพัฒนาระบบ

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบ ให้ใช้วิธีการเลือกรายชื่อและรายการวัสดุตามสิทธิ์ของกลุ่มงาน เพื่อสร้างใบเบิก รวมถึงสืบค้นใบเบิกจบภายในหน้าจอเดียว (Single-Page Interface) โดยไม่ต้องล็อกอิน แสดงหน้าจอแสดงผลฝั่งผู้ใช้งานทั่วไป ดังรูปที่ 6



(ก) แสดงการค้นหาใบเบิก

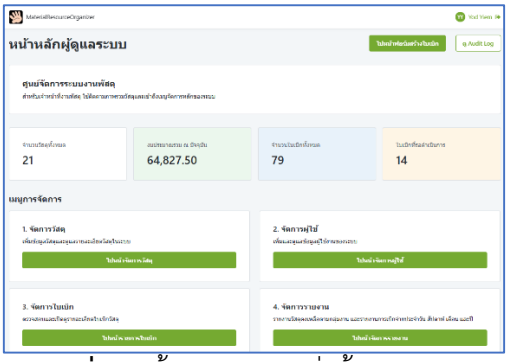


(ข) แสดงการสร้างใบเบิกในรูปแบบหน้าต่างเดียว

รูปที่ 6 หน้าจอแสดงผลฝั่งผู้ใช้งานทั่วไป

จากรูปที่ 6 (ก) เป็นส่วนของการค้นหาใบเบิกเดิม ขณะที่รูปที่ 6 (ข) เป็นสร้างคำขอเบิกวัสดุ ซึ่งออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกกลุ่มงาน ระบุชื่อผู้ขอเบิก เลือกรายการวัสดุ และจำนวนที่ต้องการเบิกได้ภายในหน้าจอเดียว ช่วยลดขั้นตอนการดำเนินงานและเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน

ในส่วนของผู้ดูแลระบบออกแบบมาให้ต้องเข้าสู่ระบบด้วยรหัสผ่านเพื่อความปลอดภัยของข้อมูล โดยหน้าจอหลักเป็นแผงควบคุม เพื่อให้สามารถบริหารจัดการวงจรคลังวัสดุได้จากส่วนกลาง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 หน้าจอแสดงผลฝั่งผู้ดูแลระบบ

จากรูปที่ 7 (ก) ส่วนการจัดการข้อมูล สำหรับการเพิ่ม ลบ แก้ไข รายชื่อบุคลากรและรายการวัสดุ ส่วนการจัดการใบเบิก จะใช้เพื่อตรวจสอบใบเบิก ค้นหาและกดยืนยันการจ่ายวัสดุเพื่อสั่งการให้ระบบตัดยอดคงคลังโดยอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ รูปที่ 7 (ข) ส่วนการออกรายงาน รองรับการกรองข้อมูลเพื่อเรียกดูและดาวน์โหลดรายงานสรุปยอดการเบิกจ่ายตามวัน สัปดาห์ เดือน หรือปี เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการตรวจสอบภายใน (Audit Compliance)

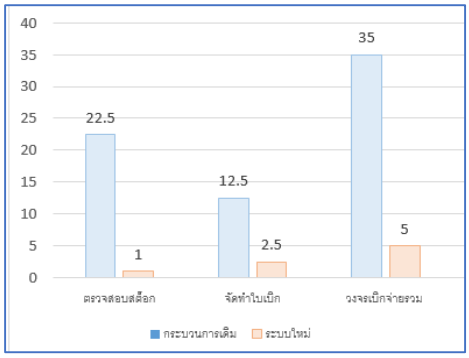
4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดำเนินงานโดยอ้างอิงจากระยะเวลาเฉลี่ยของกระบวนการเดิมซึ่ง

ได้จากการสังเกตการปฏิบัติงานจริงร่วมกับการสอบถามเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบ เปรียบเทียบกับระยะเวลาหลังการใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาระยะเวลาตลอดวงจรการเบิกจ่าย (Total Cycle Time) ทั้งนี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการสังเกตในช่วงการปฏิบัติงานจริงซ้ำจำนวน 5 ครั้ง โดยบันทึกระยะเวลาในแต่ละรอบของการดำเนินงานและนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย เพื่อสะท้อนระยะเวลาการปฏิบัติงานตามสภาพการใช้งานจริง แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 8

ตารางที่ 2 ตารางแสดงรายละเอียดเวลาแต่ละส่วนก่อนและหลังการนำระบบมาใช้งาน

มิติประสิทธิภาพ / ขั้นตอนปฏิบัติงาน	กระบวนการเดิม (Manual)	ระบบกึ่งดิจิทัล (OutSystems)	ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลง
1. การตรวจสอบยอดวัสดุคงเหลือ	การสอบถามเจ้าหน้าที่และการเดินตรวจนับจำนวนวัสดุในคลัง **(ใช้เวลาเฉลี่ย 15 - 30 นาที ขึ้นอยู่กับภาระงานของเจ้าหน้าที่)**	การสืบค้นยอดวัสดุคงเหลือแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน **(ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยกว่า 1 นาที)**	**ลดเวลาลงร้อยละ 95**
2. การจัดทำคำขอและออกเอกสารใบเบิก	การแจ้งความจำนงแบบปากเปล่าหรือส่งข้อความผ่านแอปพลิเคชัน Line ซึ่งไม่มีการบันทึกหลักฐานที่เป็นระบบ **(ใช้เวลาในการประสานงานและจดบันทึกตกแทนเฉลี่ย 10 - 15 นาที)**	การเลือกรายการวัสดุและระบุจำนวนจบภายในหน้าจอเดียว พร้อมสั่งพิมพ์ใบเบิกทันที **(ใช้เวลาเฉลี่ย 2 - 3 นาที)**	**ลดระยะเวลาลงร้อยละ 80 และเพิ่มความสมบูรณ์ของระบบฐานข้อมูล**
3. ความแม่นยำของข้อมูลวัสดุคงคลัง	มีความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนจากการบันทึกบัญชีคุมวัสดุด้วยมือ	มีความแม่นยำร้อยละ 100 ด้วยระบบหักลบยอดอัตโนมัติ	**เพิ่มความถูกต้องและความโปร่งใส**
ภาพรวมเวลาเฉลี่ยในวงจรการเบิกจ่าย	**25 - 45 นาที** (เฉลี่ย 35 นาที)	**ไม่เกิน 5 นาที** (เฉลี่ย 5 นาที)	**ลดเวลาปฏิบัติงานลงร้อยละ 85.71**



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยก่อนและหลังการนำระบบมาใช้งาน

จากรูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าระบบกึ่งดิจิทัลช่วยลดระยะเวลาเฉลี่ยตลอดวงจรการเบิกจ่ายจาก 35 นาที เหลือ 5 นาที คิดเป็นการลดระยะเวลาการปฏิบัติงานโดยรวมร้อยละ 85.71

4.3 ผลการยอมรับเทคโนโลยีและความพึงพอใจของผู้ใช้

ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 72 คน พบว่าผู้ใช้งานมีการยอมรับเทคโนโลยีโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้ ผลการประเมินสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบระบบที่ลดขั้นตอนการใช้งาน โดยไม่ต้องเข้าสู่ระบบ และรองรับการดำเนินงานผ่านหน้าจอเดียว ช่วยลดภาระในการใช้งาน ลดระยะเวลาในการรอคอย และลดขั้นตอนการกรอกข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิม นอกจากนี้ ผู้ใช้งานยังสามารถตรวจสอบสถานะคำขอเบิกและค้นหาข้อมูลย้อนหลังได้สะดวกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการยอมรับเทคโนโลยีในระดับสูง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการรับรู้ความง่ายในการใช้งานและการรับรู้ประโยชน์ของระบบตามแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์สถิติการยอมรับเทคโนโลยีและความพึงพอใจของผู้ใช้งานทั่วไป (N = 72)

มิติการประเมินตามทฤษฎี TAM	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ความพึงพอใจ
1. การรับรู้ความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU)	4.71	0.41	มากที่สุด
2. การรับรู้ประโยชน์ในการใช้งาน (Perceived Usefulness: PU)	4.69	0.38	มากที่สุด
3. การยอมรับเชิงพฤติกรรม (Behavioral Response)	4.71	0.40	มากที่สุด
ภาพรวมทั้งหมดของระบบ	4.70	0.35	มากที่สุด

ข้อมูลจากตารางที่ 3 นี้เป็นผลการวิเคราะห์เฉพาะกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 72 คน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างหลักที่ใช้ประเมินการยอมรับเทคโนโลยีตามกรอบแนวคิด TAM ส่วนผลการประเมินของผู้ดูแลระบบจำนวน 2 คน นำเสนอแยกในลักษณะข้อสังเกตเชิงพรรณนา เนื่องจากมีจำนวนผู้ให้ข้อมูลจำกัด โดย

พบว่าผู้ดูแลระบบทั้งสองรายมีความคิดเห็นในระดับเห็นด้วยอย่างยิ่งต่อการใช้งานระบบในทุกด้านที่ประเมิน โดยเฉพาะด้านความถูกต้องของการตัดสต็อกวัสดุ ระบบการออกรายงาน และการจัดการสิทธิ์การใช้งาน ซึ่งสะท้อนว่าระบบสามารถสนับสนุนการปฏิบัติงานและการควบคุมภายในของหน่วยงานได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินในส่วนนี้เป็นเพียงข้อสังเกตจากผู้ปฏิบัติงานจริงในหน่วยงาน และไม่สามารถอ้างอิงเพื่อสรุปเชิงสถิติทั่วไปได้

4.4 การอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน โดยลดระยะเวลาการทำงานลงร้อยละ 85.71 และเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลคงคลังผ่านการตัดสต็อกอัตโนมัติและการปรับปรุงข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Workflow Management System [2] และการประยุกต์ใช้ Low-Code Platform ในการพัฒนาระบบสารสนเทศ [3]

ในด้านการยอมรับเทคโนโลยี พบว่าผู้ใช้งานมีระดับการยอมรับอยู่ในระดับมากที่สุด ซึ่งสะท้อนจากการออกแบบระบบที่ลดความซับซ้อนของกระบวนการ ไม่ต้องลงทะเบียนเข้าใช้งาน และใช้รูปแบบหน้าจอแบบรวมขั้นตอนเดียว ส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถดำเนินงานได้สะดวกและลดภาระในการป้อนข้อมูล สอดคล้องกับแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยีของ Davis (1989)

ในด้านการควบคุมภายใน ระบบยังคงกลไกการตรวจสอบผ่านการลงลายมือชื่อรับมอบวัสดุจริงและการบันทึกข้อมูลเพื่อการตรวจสอบย้อนหลัง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Human-in-the-loop [1] และการกำกับดูแลข้อมูลอย่างโปร่งใส [8] โดยแม้ผู้ขอเบิกสามารถใช้งานแบบไม่ต้องเข้าสู่ระบบ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน แต่ระบบยังคงมีกลไกควบคุมผ่านการกำหนดสิทธิ์ตามกลุ่มงานร่วมกับการจัดเก็บข้อมูลบริบทของรายการคำขอ ได้แก่ รหัสอ้างอิงรายการ ผู้ขอเบิก กลุ่มงาน วันและเวลา และประวัติการดำเนินงาน เพื่อสนับสนุนการตรวจสอบย้อนกลับและความโปร่งใสของข้อมูล

ในเชิงความมั่นคงของระบบ งานวิจัยนี้ใช้แนวทางการควบคุมแบบหลายชั้น (Multi-layer Control) โดยไม่ได้อาศัยการยืนยันตัวตนแบบ Username/Password เป็นกลไกหลัก แต่ผสานการทำงานร่วมกันของ 1) การจำกัดสิทธิ์ตามบริบทของหน่วยงาน 2) การบันทึกข้อมูลเชิงระบบเพื่อการตรวจสอบย้อนหลัง และ 3) การยืนยันตัวตนผ่านกระบวนการรับมอบวัสดุและการลงลายมือชื่อจริงในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการ แนวทางดังกล่าวช่วยลดความเสี่ยงจากการระบุชื่อผู้ขอเบิกแทนบุคคลอื่นในขั้นตอนการสร้างรายการคำขอ และจำกัดผลกระทบให้อยู่เฉพาะในระดับการบันทึกรายการเท่านั้น โดยไม่สามารถนำไปสู่การเบิกวัสดุจริงได้โดยลำพัง เนื่องจากต้องผ่านทั้งการตรวจสอบสิทธิ์ตามบริบทของหน่วยงานและการยืนยันเชิงกายภาพในขั้นตอนการรับมอบวัสดุ อีกทั้งระบบยังมีกลไกการยกเลิกรายการคำขออัตโนมัติเมื่อไม่มีการดำเนินการภายในระยะเวลา 60 นาที เพื่อรักษาความสอดคล้องของสถานะข้อมูลและลดความคลาดเคลื่อนของรายการในระบบ โดยภาพรวม แนวทางการออกแบบดังกล่าวสะท้อนการผสานระหว่างความสะดวกในการใช้งานและกลไกการควบคุมภายใน ซึ่งช่วยให้ระบบ

สามารถลดความเสี่ยงด้านการระบุตัวตนและรักษาความถูกต้องของข้อมูลได้อย่างเหมาะสมตามบริบทขององค์กร

โดยสรุป การบูรณาการแนวคิดระบบกึ่งดิจิทัลร่วมกับ Workflow, Human-in-the-loop, Low-Code และ TAM สามารถเพิ่มทั้งประสิทธิภาพการดำเนินงาน ความถูกต้องของข้อมูล และการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบเบิกจ่ายวัสดุแบบกึ่งดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม Low-Code บน OutSystems ภายใต้แนวคิด Workflow แบบ 3-Lane Swimlane เพื่อสนับสนุนกระบวนการเบิกจ่ายวัสดุภายในองค์กร ผลการประเมินพบว่าสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการเบิกจ่ายลงร้อยละ 85.71 และผู้ใช้งานมีระดับการยอมรับเทคโนโลยีอยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.70, S.D. = 0.35)) แสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบที่ลดขั้นตอนการใช้งานและสนับสนุนการเข้าถึงแบบง่าย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและส่งเสริมการยอมรับเทคโนโลยีในองค์กรได้อย่างมีประสิทธิผล

ในกรณีที่มีการพัฒนาระบบไปสู่การใช้ลายมือชื่ออิเล็กทรอนิกส์แบบเต็มรูปแบบ ระบบยังคงสามารถรักษาจุดแข็งด้านการควบคุมภายในและการตรวจสอบย้อนหลังได้ เนื่องจากกระบวนการเบิกจ่ายยังคงมีขั้นตอนการส่งมอบและรับมอบวัสดุจริง ซึ่งทำหน้าที่เป็นการยืนยันตัวตนเชิงกายภาพควบคู่กับหลักฐานเชิงระบบ ดังนั้น แม้รูปแบบการลงนามจะเปลี่ยนเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ แต่การควบคุมที่อาศัยหลักฐานทางกายภาพยังคงมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนความน่าเชื่อถือของกระบวนการ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการพัฒนาระบบในอนาคต ได้แก่ การรองรับลายมือชื่ออิเล็กทรอนิกส์ การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ และการขยายการประยุกต์ใช้ไปยังหน่วยงานที่มีบริบทแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการนำระบบไปใช้ในวงกว้างและสนับสนุนการพัฒนาระบบสารสนเทศในองค์กรอย่างยั่งยืน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Cranshaw, J., Elwany, E., Newman, T., Kocielnik, R., Yu, B., Soni, S., Teevan, J., & Monroy-Hernández, A. (2017). Calendar.help: Designing a workflow-based scheduling agent with humans in the loop. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 2382–2393). https://doi.org/10.1145/3025453.3025780

[2] Recker, J., & La Rosa, M. (2012). Understanding user differences in open-source workflow management system usage intentions. Information Systems, 37(3), 200–212. https://doi.org/10.1016/j.is.2011.10.002

[3] Abdul Razak, S. F., Phey Ernn, Y., Yussoff, F. I., Ali Bukar, U., & Yogarayan, S. (2024). Enhancing Business Efficiency through Low-Code/No-Code Technology Adoption: Insights from an Extended UTAUT Model. Journal of

Human, Earth, and Future, 5(1), 85–99. https://doi.org/10.28991/HEF-2024-05-01-07

[4] Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13(3), 319–340. https://doi.org/10.2307/249008

[5] Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. Decision Sciences, 39(2), 273-315.

[6] Oh, H., Jeong, M., Lee, S., & Warnick, R. (2013). Attitudinal and behavioral outcomes of self-service technology in hospitality. International Journal of Hospitality Management, 35, 131–143. https://doi.org/10.1177/1096348013491598

[7] W. Jia and W. Zhou. (2005). Distributed Network Systems: From Concepts to Implementations. Boston, MA: Springer Science & Business Media, 2005.

[8] Kent, K., & Souppaya, M. (2006). Guide to computer security log management (NIST Special Publication 800-92). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-92

[9] กฤติเดช ฉายจรุง, และ ณัฐธิดา ภู่เจริญ. (2565). พัฒนาระบบบริหารจัดการคลังวัสดุกรณีศึกษาสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 นครราชสีมา. *วารสารวิจัยและพัฒนาด้านสุขภาพ สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดนครราชสีมา*, *8*(1), 68–81. เข้าถึงได้จาก https://he02.tci-thaijo.org/index.php/ODPC9

[10] กระทรวงการคลัง. (2560). ระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 134 ตอนพิเศษ 210 ง. หน้า 1-84.

[11] ปิยังกูร ออสุวรรณ, และ สุนันท์ ธาติ. (2023). การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการเบิกจ่ายวัสดุอุปกรณ์สำนักงานอย่างมีประสิทธิภาพและไร้กระดาษ กรณีศึกษา กองพันทหารม้าที่ 9 กองพลทหารราบที่ 4. *Journal of Logistics and Digital Supply Chain*, *1*(3), 52–67. เข้าถึงได้จาก https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JLDSC/article/view/1259

[12] สุพรรณิการ์ สิทธิสังข์. (2568). การพัฒนาระบบเอกสารการเบิกจ่ายในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. *วารสารแม่โจ้เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม*, *11*(1), 106–122. เข้าถึงได้จาก https://mitij.mju.ac.th/ARTICLE/R68007.pdf

[13] Nguyen, T. T. M., Nham, P. T., & Takahashi, Y. (2013). Technology acceptance model and the paths to online customer loyalty in an emerging market. *Tržište*, *25*(2), 231–248. https://www.researchgate.net/publication/281909060_Technology_acceptance_model_and_the_paths_to_online_customer_loyalty_in_an_emerging_market

รายงานผลการใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) ผ่านกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน เพื่อพัฒนาทักษะนวัตกรและสุขอนามัยชุมชน

Report on the Results of Using an Innovative Ventilation Screen Project Kit (Petty Patent) through a Blended Group Learning Process to Develop Innovator Skills and Community Hygiene

คำรณ พ่วงเจริญ[1]

[1]ตำแหน่ง ครู คศ.3 สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ สอก.5 Email : kum5711abc@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) สร้างและหาประสิทธิภาพชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) ด้วยการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน (Blended Learning) 2) เปรียบเทียบทักษะนวัตกรและผลสัมฤทธิ์ 3) ศึกษาความพึงพอใจ และ 4) ประเมินการยอมรับและการรับรู้ประโยชน์จากชุมชน กลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียน ปวช.3 สาขาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 11 คน และกลุ่มเป้าหมายชุมชน 20 คน ในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีลักษณะบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังอิฐบล็อกช่องลมสำหรับการระบายอากาศแบบธรรมชาติ เครื่องมือประกอบด้วยชุดโครงงาน 6 หน่วยการเรียนรู้ บูรณาการ MIAP Model ร่วมกับเทคนิค STAD สถิติที่ใช้ ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าที (t-test) ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของชุดโครงงานมีค่า 81.76/80.83 สูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะนวัตกรหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01ความพึงพอใจของนักเรียนอยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.59) การรับรู้ประโยชน์จากการใช้งานนวัตกรรมของประชาชนอยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.64) โดยนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตรเลขที่ 22029) สามารถลดเวลาติดตั้งจาก 960 วินาที เหลือเพียง 4 วินาที ด้วยระบบขายึดแรงเสียดทานโดยไม่ทำลายโครงสร้างอาคาร

คำสำคัญ: ชุดโครงงานนวัตกรรม, แผ่นมุ้งปิดช่องลม, การเรียนรู้แบบผสมผสาน, ทักษะนวัตกร, อนุสิทธิบัตร

Abstract

This research aimed to 1) develop and determine the efficiency of an innovative ventilation screen project kit (Petty Patent) through a Blended Learning approach based on the 80/80 criterion, 2) compare innovator skill components and learning achievement, 3) study satisfaction, and 4) assess community acceptance and perceived benefits. The sample consisted of 11 third-year Vocational Certificate students in Mechanical Technology at Prachuap Khiri Khan Technical College and a target group of 20 community members in Prachuap Khiri Khan Province, characterized by residential houses utilizing ventilation blocks for natural ventilation. The research instruments included a 6-unit project kit integrating the MIAP Model as a learning sequence and STAD as a collaborative mechanism. Statistical analysis involved percentages, mean ($\overline{X}$), standard deviation (S.D.), and t-test. Research findings revealed that the efficiency of the project kit was 81.76/80.83, exceeding the 80/80 standard. Post-learning achievement and innovator skill components were significantly higher than pre-learning levels at the .01 level. Student satisfaction was at the highest level ($\overline{X}$ =4.59), and community perception of benefits from utilizing the innovation was at the highest level ($\overline{X}$ =4.64). The ventilation screen innovation (Petty Patent No. 22029) reduced installation time from 960 seconds to only 4 seconds through a friction mounting system without damaging building structures

Keywords: Innovative Project Kit, Mosquito Screen, Blended Learning, Innovator Skills, Petty Patent

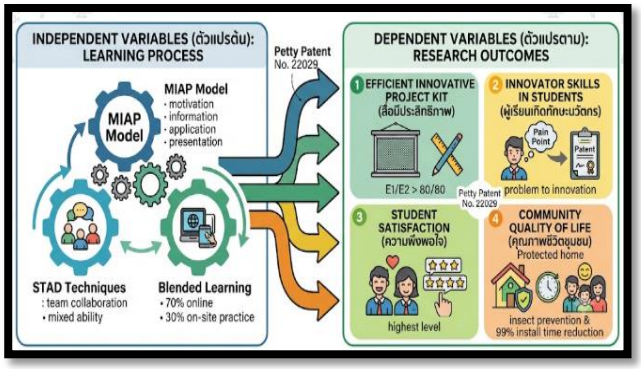
1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตกำลังคนสมรรถนะสูงเพื่อสร้างสรรค์นวัตกรรมตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 เป็นภารกิจสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การจัดการเรียนรู้อาชีวศึกษาแบบดั้งเดิมมักประสบภาวะของเสียทางการศึกษา (Educational Waste) ทำให้ผู้เรียนขาดทักษะนวัตกรและการคิดเชิงระบบเพื่อแก้ปัญหาจริง (Pain Point) โดยเฉพาะในมิติของสุขอนามัยชุมชน ซึ่งจากการสำรวจพบว่าอิฐบล็อกช่องลมเป็นจุดอ่อนสำคัญที่ทำให้แมลงพาหะนำโรคเข้าสู่ที่พักอาศัยได้โดยง่าย งานวิจัยในอดีตระบุว่าการติดตั้งมุ้งลวดแบบเดิมมีต้นทุนค่าแรงช่างสูงและต้องทำลายโครงสร้างอาคาร ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการเข้าถึงการป้องกันโรคของคนในชุมชน ข้อมูลสถานการณ์ทางระบาดวิทยาในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบว่าโรคไข้เลือดออกยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนอย่างต่อเนื่อง โดยกลุ่มอายุที่พบอัตราป่วยสูงสุดยังคงเป็นกลุ่มวัยเรียนและเยาวชน (ช่วงอายุ 10–14 ปี) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานสถานการณ์โรคติดต่อนำโดยแมลงในเขตสุขภาพที่ 5 ที่สะท้อนว่าพื้นที่ที่มีแหล่งเพาะพันธุ์ยุงลายในบ้านเรือนและสถานที่พักอาศัยเป็นปัจจัยเสี่ยงหลักที่สำคัญ ผู้วิจัยจึงเห็นช่องว่างในการพัฒนาวิธีการติดตั้งที่ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ผ่านนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตรเลขที่ 22029)

โดยประยุกต์ใช้หลักการแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) ผ่านระบบขายึดแรงเสียดทาน (Friction Mounting) ซึ่งติดตั้งง่ายแบบ D.I.Y. โดยไม่ทำลายโครงสร้างอาคารและลดเวลาติดตั้งได้ถึงร้อยละ 99 [13], [14]

การวิจัยนี้มุ่งแก้ปัญหาในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยบูรณาการการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน (Blended Group Learning) ออนไลน์ร้อยละ 70 และปฏิบัติจริงร้อยละ 30 ผสานโมเดล MIAP และเทคนิค STAD เพื่อสร้างสมรรถนะวิชาชีพ [17], [22] บทความนี้จึงมุ่งนำเสนอผลการใช้ชุดโครงงาน เพื่อประเมินเบื้องต้น ว่ากระบวนการเรียนรู้ที่เป็นระบบสามารถ ส่งเสริมองค์ประกอบของทักษะนวัตกร ของผู้เรียน และ สนับสนุนการรับรู้ประโยชน์ด้านสุขอนามัยและความสะดวกในชุมชน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3], [15], [20]



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการจัดการเรียนรู้

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม ผ่านกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน ให้มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80

2.2 เพื่อเปรียบเทียบทักษะนวัตกรและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของผู้เรียนระหว่างก่อนและหลังการใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมฯ

2.3 เพื่อศึกษาความพึงพอใจและ การรับรู้ประโยชน์ด้านสุขอนามัยและความสะดวกในชุมชน โดยประเมินความคิดเห็นของนักเรียนและประชาชนในพื้นที่จริงต่อการใช้งานนวัตกรรม

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม ที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าประสิทธิภาพกระบวนการและประสิทธิภาพผลลัพธ์ (E1/E2) เป็นไปตามเกณฑ์ 80/80

3.2 ทักษะนวัตกรและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของนักเรียนหลังเรียนด้วยชุดโครงงานนวัตกรรมฯ จะสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

3.3 ความพึงพอใจและคุณภาพชีวิตชุมชน นักเรียนและประชาชนจะมีความพึงพอใจต่อการใช้นวัตกรรมในระดับมากถึงมากที่สุด และระบบขายึดแรงเสียดทานจะเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลาในการติดตั้งได้มากกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างน้อยร้อยละ 80

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

เลือกนักเรียนที่เรียนใน ภาคเรียนสุดท้าย เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการประมวลทักษะงานช่างสู่การสร้างสรรค์นวัตกรรมมุ่งศึกษาในนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 11 คน ซึ่งเลือกแบบเจาะจง เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีสมรรถนะวิชาชีพพร้อมต่อการบูรณาการความรู้ ร่วมกับกลุ่มเป้าหมายในชุมชน คือ ประชาชนและเจ้าของบ้านพักอาศัยในเขตอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 20 คน เพื่อประเมินผลการใช้งานในสถานการณ์จริง

4.2 ขอบเขตด้านเนื้อหา

อ้างอิงตามหลักสูตรวิชาโครงงาน (Project) รหัสวิชา 20102-8501 โดยแบ่งออกเป็น 6 หน่วยการเรียนรู้ ครอบคลุมตั้งแต่การค้นหาปัญหา (Pain Point) การสร้างนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม ไปจนถึงกระบวนการขอรับความคุ้มครองอนุสิทธิบัตร

4.3 ขอบเขตด้านตัวแปร

1) ตัวแปรต้น คือ การจัดการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน (Blended Group Learning) ผ่าน MIAP Model และเทคนิค STAD

2) ตัวแปรตาม ได้แก่ ประสิทธิภาพของชุดโครงงานตามเกณฑ์ 80/80 ทักษะนวัตกร 6 ด้าน ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ความพึงพอใจของผู้เรียน และการยอมรับและการรับรู้ประโยชน์จากชุมชนด้านสุขอนามัย

4.4 ขอบเขตด้านระยะเวลาและสถานที่

ดำเนินการในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2568 รวม 18 สัปดาห์ (72 ชั่วโมง) โดยใช้พื้นที่แผนกวิชาช่างกลโรงงานในการสร้างสรรค์นวัตกรรม และพื้นที่ชุมชนนำร่องในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์สำหรับการทดสอบภาคสนาม

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1) กลุ่มประชากรและตัวอย่าง ประชากรคือนักเรียนระดับ ปวช. 3 สาขาวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 26 คน โดยผู้วิจัยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 11 คน ซึ่งอยู่ในภาคเรียนสุดท้ายที่มีสมรรถนะวิชาชีพพร้อมต่อการสร้างนวัตกรรม

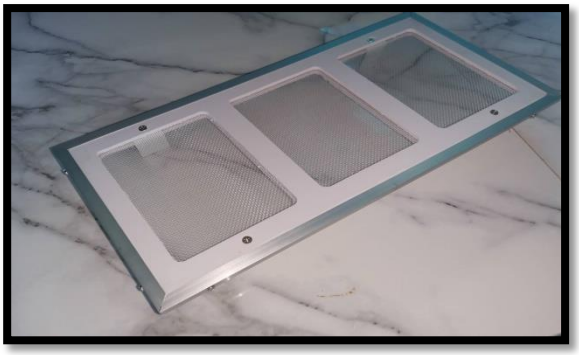
2) กลุ่มเป้าหมายชุมชน ประกอบด้วยประชาชนและเจ้าของบ้านพักอาศัยในเขตอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 20 คน ซึ่งเลือกแบบเจาะจงจากผู้ที่ได้รับการติดตั้งนวัตกรรมจริงเพื่อประเมินผลต่อคุณภาพชีวิต โดยลักษณะกายภาพของพื้นที่เป้าหมายส่วนใหญ่เป็นบ้านพักอาศัยชั้นเดียวและสองชั้นแบบก่ออิฐฉาบปูน ซึ่งมีการใช้ อิฐบล็อกช่องลม เป็นส่วนประกอบหลักเพื่อระบายอากาศในพื้นที่ห้องครัวและห้องน้ำ ช่องลมเหล่านี้มีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ซึ่งเป็นจุดอ่อนสำคัญที่ทำให้แมลงพาหะนำโรคเข้าสู่ตัวอาคารได้โดยง่าย การเลือกพื้นที่กลุ่มนี้จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของนวัตกรรมในสภาพแวดล้อมจริงที่มีความเสี่ยงด้านสุขอนามัย

5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

ผู้วิจัยดำเนินการศึกษาทดลองใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมฯ ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2568 โดยใช้เวลาเรียนปกติ 4 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ต่อเนื่องรวม 18 สัปดาห์ คิดเป็นเวลาเรียนรวมทั้งสิ้น 72 ชั่วโมง ตลอดภาคเรียน

5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1) ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) เป็นสื่อการเรียนรู้หลักที่แบ่งออกเป็น 6 หน่วยการเรียนรู้ พร้อมใบฝึกปฏิบัติงาน (Job Sheets) จำนวน 6 ใบ



ภาพที่ 2 แผ่นมุ้งปิดช่องลม

2) แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 60 ข้อ ซึ่งผ่านการวิเคราะห์คุณภาพมีค่าความยากง่าย (P) ระหว่าง 0.40–0.90 ค่าอำนาจจำแนก (D) ระหว่าง 0.20–0.80 และมีค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบทั้งฉบับโดยใช้สูตร KR-20 เท่ากับ 0.964 [8], [11]

3) แบบสอบถามประเมินผล ประกอบด้วย 1) แบบสอบถามความพึงพอใจของนักเรียน (10 ข้อ) มีค่าความเชื่อมั่น 0.91 และ 2) แบบสอบถามความคิดเห็นของกลุ่มเป้าหมายชุมชน (13 ข้อ) มีค่าความเชื่อมั่น 0.96 เพื่อประเมินผลต่อคุณภาพชีวิตและสุขอนามัย เครื่องมือทั้งหมดผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.80 – 1.00 ยืนยันถึงคุณภาพและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

5.4 ขั้นตอนการสร้างและหาคุณภาพเครื่องมือ

ผู้วิจัยพัฒนาเครื่องมือหลัก 3 ส่วน โดยผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน

1) ชุดโครงงานนวัตกรรม พัฒนาตามหลักสูตรรายวิชาโครงงาน แบ่งเป็น 6 หน่วยเรียนรู้ ผ่านการหาประสิทธิภาพ (Try-out) และปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

เกณฑ์การเปรียบเทียบระยะเวลาการติดตั้ง ผู้วิจัยกำหนดวิธีการวัดเวลาเชิงเปรียบเทียบระหว่างวิธีดั้งเดิม (การเจาะผนังและยึดสกรูจำนวน 16 จุดต่อช่องลม) กับระบบขายึดแรงเสียดทาน (Friction Mounting) โดยทำการทดลองจับเวลาจริง (Time Study) จำนวน 3 ครั้งต่อหนึ่งจุดการติดตั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

วิธีดั้งเดิม (960 วินาที) รวมเวลาตั้งแต่การวัดระยะ การเจาะนำด้วยสว่าน การฝังพุก และการขันสกรูยึดมุ้งลวดเข้ากับผนังปูน

ระบบขายึดแรงเสียดทาน (4 วินาที) วัดเวลาจากการวางแผ่นมุ้งให้ตรงตำแหน่งและการออกแรงกดเพื่อให้ระบบ Friction Lock ทำงานในขั้นตอนเดียว ผลลัพธ์จากการทดสอบซ้ำยืนยันว่า ระบบใหม่สามารถลดขั้นตอนที่ยุ่งยากและลดเวลาลงได้กว่าร้อยละ 99 โดยยังคงประสิทธิภาพการยึดเกาะที่มั่นคงภายใต้หลักการแรงเสียดทานสถิต

2) แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเป็นแบบเลือกตอบ 60 ข้อมีค่าความยากง่าย (P) 0.40–0.90 ค่าอำนาจจำแนก (D) 0.20–0.80 และมีค่าความเชื่อมั่นสูงถึง 0.85 [8], [11]

3) แบบสอบถามความพึงพอใจและคุณภาพชีวิต ใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ตรวจสอบจนได้ค่าความเชื่อมั่นของชุดนักเรียนเท่ากับ 0.91 และชุดชุมชนเท่ากับ 0.96 [7]

5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการตามแบบแผนการทดลองกลุ่มเดียวทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน (One Group Pre-test Post-test Design) ตามขั้นตอนดังนี้

1) ขั้นเตรียมการ ปฐมนิเทศชี้แจงวัตถุประสงค์และดำเนินการทดสอบก่อนเรียน (Pre-test)

2) ขั้นดำเนินการ จัดการเรียนรู้ด้วยชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลมทั้ง 6 หน่วย พร้อมเก็บคะแนนระหว่างเรียน (E1) และทดสอบหลังเรียนประจำหน่วย

3) ขั้นสรุปผล ดำเนินการทดสอบหลังเรียน (Post-test) ด้วยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ และให้นักเรียนตอบแบบสอบถามความพึงพอใจ

4) ขั้นประเมินชุมชน ลงพื้นที่เก็บข้อมูลความคิดเห็นจากประชาชนในชุมชน 20 แห่ง ที่ได้รับการติดตั้งนวัตกรรมเพื่อวัดผลการพัฒนาคุณภาพชีวิต

5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย

1)การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ผลการศึกษามีความเที่ยงตรงและสามารถตอบวัตถุประสงค์การวิจัยได้อย่างชัดเจน โดยแบ่งการดำเนินการออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย ผู้วิจัยใช้ค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน เพื่อยืนยันความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา พร้อมทั้ง วิเคราะห์หาค่าความยากง่าย (P) ค่าอำนาจจำแนก (D) และหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบด้วยสูตร KR-20 (Kuder-Richardson) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.964 ส่วนแบบสอบถามความพึงพอใจและการรับรู้ประโยชน์ วิเคราะห์ความเชื่อมั่นด้วยสัมประสิทธิ์แอลฟา (Cronbach's Alpha Coefficient) ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูง 0.91 – 0.96 [8], [11]

2. การหาประสิทธิภาพของนวัตกรรม ผู้วิจัยวิเคราะห์หาค่าดัชนีประสิทธิภาพของกระบวนการเรียนรู้และประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E1/E2) ตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 เพื่อประเมินคุณภาพของชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม

3. การทดสอบสมมติฐานและเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ ดำเนินการเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน เพื่อวัดพัฒนาการของทักษะนวัตกรและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน โดยใช้สถิติทดสอบค่าทีแบบกลุ่มสัมพันธ์ (t-test for Dependent Samples) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .01

4.การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา ใช้การหาค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อแปลผลระดับความพึงพอใจของผู้เรียน และระดับความคิดเห็นของกลุ่มเป้าหมายในชุมชนต่อ การรับรู้ประโยชน์ด้านสุขอนามัยและความสะดวก จากการใช้งานนวัตกรรมจริง

2)ผลการวิจัย

จากการศึกษาและทดลองใช้ชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) ผ่านกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสาน สามารถสรุปประเด็นสำคัญเชิงวิชาการได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพของชุดโครงงานนวัตกรรม ผลการหาประสิทธิภาพ (E1/E2) จากการทดลองภาคสนามมีค่าเท่ากับ 81.76 / 80.83 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ที่กำหนดไว้ ยืนยันว่านวัตกรรมชุดนี้มีคุณภาพเหมาะสมต่อการเป็นสื่อการเรียนการสอน

2. ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะนวัตกร: คะแนนทดสอบหลังเรียนของนักเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ในทุกหน่วยการเรียนรู้ สะท้อนให้เห็นถึงการพัฒนาทักษะนวัตกรที่ก้าวกระโดด โดยผู้เรียนสามารถเปลี่ยนปัญหา (Pain Point) ในชุมชนให้เป็นนวัตกรรมที่ได้รับการคุ้มครองตามกฎหมายได้จริง

ตารางที่ 1 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและดัชนีความก้าวหน้า

หน่วยการเรียนรู้	คะแนนก่อนเรียน ($\overline{X}$ 1)	คะแนนหลังเรียน ($\overline{X}$ 2)	คะแนนที่เพิ่มขึ้น (Diff)	ค่าสถิติทดสอบ (*t*)
หน่วยที่ 1 ความรู้เบื้องต้นการทำโครงงาน	8.45	17.18	**+8.73**	18.25**
หน่วยที่ 2 กระบวนการจาก Pain Point	9.10	17.45	**+8.35**	16.12**

หน่วยที่ 3 การเขียนข้อเสนอโครงงาน	8.82	17.00	**+8.18**	18.91**
หน่วยที่ 4 การสร้างนวัตกรรมแผ่นมุ้ง	9.36	17.82	**+8.46**	15.54**
หน่วยที่ 5 การนำเสนอผลงาน	8.55	17.27	**+8.72**	17.38**
หน่วยที่ 6 การคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญา	9.00	18.09	**+9.09**	19.86**

หมายเหตุ: ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (ค่าวิกฤต $t \geq 3.169$, $p<0.001$)

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปประเด็นความก้าวหน้าเพื่อนำไปเขียนในบทความวิชาการได้ คือ การพัฒนาแบบก้าวกระโดด นักเรียนมีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงขึ้นกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ในทุกหน่วยการเรียนรู้ ข้อมูลนี้ยืนยันว่ากระบวนการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) ร่วมกับ MIAP Model และเทคนิค STAD ช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ที่ยั่งยืน [23]หน่วยที่มีความก้าวหน้าสูงสุด หน่วยที่ 6 (การพัฒนาผลงานสู่การคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญา) มีค่าความแตกต่างของคะแนนสูงสุดถึง 9.09 คะแนน และมีค่า *t*-test สูงสุดที่ 19.86, สะท้อนให้เห็นว่าผู้เรียนสามารถบูรณาการความรู้ทั้งหมดไปสู่ทักษะนวัตกรรมขั้นสูง คือ การปกป้องสิทธิในผลงานที่สร้างขึ้นได้สำเร็จ การบรรลุเกณฑ์ประสิทธิภาพผลลัพธ์ (E2) คะแนนเฉลี่ยหลังเรียนในทุกหน่วยการเรียนรู้มีค่าสูงกว่า 16 คะแนน (หรือมากกว่าร้อยละ 80) ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพผลลัพธ์ในภาพรวมที่ระดับ 80.83 ยืนยันว่าชุดโครงงานนวัตกรรมมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้

ความคงทนในการเรียนรู้ ผลต่างคะแนนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกหน่วย แสดงถึงประสิทธิผลของสัดส่วนการเรียนแบบผสมผสาน (ออนไลน์ 70% และฝึกปฏิบัติจริง 30%) ที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ฝึกปฏิบัติในสภาพจริง (Doing the Real Thing) จนเกิดความชำนาญ

3. ความพึงพอใจของผู้เรียน นักเรียนมีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.59) โดยพึงพอใจสูงสุดในด้านความเหมาะสมของนวัตกรรมที่นำมาใช้เป็นสื่อการสอน

4. การพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชน ประชาชนในพื้นที่มีความคิดเห็นต่อการใช้งานนวัตกรรมในระดับ มากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.64) โดยผลการใช้งานเชิงประจักษ์พบว่าระบบขายึดแรงเสียดทาน (Friction Mounting) สามารถปฏิวัติกระบวนการติดตั้งให้ง่ายแบบ D.I.Y. และลดระยะเวลาการติดตั้งลงกว่าร้อยละ 99 (จาก 960 วินาที เหลือเพียง 4 วินาที) ช่วยยกระดับสุขอนามัยในการป้องกันแมลงพาหะนำโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทำลายโครงสร้างอาคาร



ภาพที่ 3 มีประสิทธิภาพไม่ทำลายโครงสร้างอาคาร

ผลการทดลองพบว่าชุดโครงงานนวัตกรรมมีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 81.76 / 80.83 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ดัชนีความก้าวหน้าทางการเรียนแสดงให้เห็นว่าผู้เรียนมีคะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ในทุกหน่วย โดยมีค่าสถิติทดสอบ t ระหว่าง 15.54 – 19.86 นอกจากนี้ นวัตกรรมยังช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตชุมชนในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.64) โดยระบบขายึดแรงเสียดทานสามารถปฏิวัติกระบวนการติดตั้งให้ง่ายแบบ D.I.Y. และลดระยะเวลาติดตั้งลงกว่าร้อยละ 99 (จาก 960 วินาที เหลือเพียง 4 วินาทีต่อจุด) โดยไม่ทำลายโครงสร้างอาคาร

นอกจากค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในระดับมากที่สุดแล้ว ผลการสัมภาษณ์เชิงลึกและการสังเกตการณ์เชิง

ประจักษ์หลังการติดตั้งพบข้อมูลสำคัญเชิงคุณภาพ โดยประชาชนส่วนใหญ่ให้ความเห็นตรงกันว่า 'สามารถรับรู้ถึงจำนวนยุงและแมลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดภายในบ้าน' อีกทั้งสภาพแวดล้อมภายในที่พักอาศัยดูสะอาดตาขึ้น และความสะดวกในการถอดล้างทำความสะอาดได้ด้วยตนเอง (D.I.Y.) ช่วยให้ลดความกังวลเรื่องการสะสมของฝุ่นละอองบริเวณช่องลม ข้อมูลเชิงคุณภาพเหล่านี้เป็นหลักฐานสำคัญที่ช่วยยืนยันประสิทธิภาพของนวัตกรรมในด้านสุขอนามัยชุมชนที่มากกว่าตัวเลขทางสถิติ

5.7 อภิปรายผล

ความสำเร็จของงานวิจัยครั้งนี้สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเรียนรู้แบบกลุ่มผสมผสานที่สามารถบูรณาการทักษะช่างอุตสาหกรรมเข้ากับการแก้ปัญหาจริงในสังคมได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยมีประเด็นอภิปรายที่น่าสนใจดังนี้

1) ประสิทธิภาพนวัตกรรม (E1/E2) ค่าประสิทธิภาพ 81.76/80.83 ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ยืนยันว่าการใช้ MIAP Model ช่วยให้การพัฒนาสื่อเป็นระบบ ผู้เรียนมีอิสระในการสืบค้นข้อมูลเชิงเทคนิคผ่านระบบออนไลน์ร้อยละ 70 และมีเวลาฝึกปฏิบัติงานช่างขั้นสูงในโรงงานอีกร้อยละ 30 ส่งผลให้เกิดสมรรถนะวิชาชีพที่สูงขึ้นกว่าการเรียนแบบปกติ [6]

ในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ผู้วิจัยได้กำหนดบทบาทของเครื่องมือให้ทำหน้าที่เป็นกลไกขับเคลื่อนการเรียนรู้ที่ชัดเจน โดย MIAP Model ทำหน้าที่เป็น 'โครงสร้างลำดับการเรียนรู้' (Learning Sequence) ที่ช่วยจัดระบบการรับข้อมูลจากง่ายไปสู่ยาก ขณะที่เทคนิค STAD ทำหน้าที่เป็น กลไกการเรียนรู้แบบร่วมมือ (Collaborative Mechanism) ที่กระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างผู้เรียนผ่านการคละความสามารถ ส่วนการเรียนรู้แบบผสมผสาน (Blended Learning) ทำหน้าที่เป็นช่องทางการจัดการเรียนรู้ที่ยืดหยุ่น เพื่อให้ชุดโครงงานเป็นภารกิจหลักที่เชื่อมโยงความรู้เชิงทฤษฎีสู่การปฏิบัติจริง

2) การพัฒนาทักษะนวัตกร ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด (นัยสำคัญ .01) เป็นผลจากการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) ที่เน้น การลงมือปฏิบัติจริงในสภาพจริง ตามทฤษฎีกรวยแห่งการเรียนรู้ของ Edgar Dale ซึ่งช่วยให้ผู้เรียนมีความคงทนในการจำถึงร้อยละ 90 การที่นักเรียนสามารถเปลี่ยนปัญหา (Pain Point) เรื่องยุงพาหะนำโรคให้เป็นระบบขายึดแรงเสียดทาน (Friction Mounting) ที่ได้รับอนุสิทธิบัตร แสดงให้เห็นถึงทักษะการคิดเชิงระบบและการคิดวิพากษ์ที่มีประสิทธิภาพ [18], [21]

3) มิติด้านสังคมและคุณภาพชีวิต นวัตกรรมนี้ไม่เพียงแต่เป็นสื่อการสอน แต่คือเครื่องมือยกระดับสุขอนามัยชุมชน ผลการติดตั้งจริงพบว่าสามารถลดระยะเวลาติดตั้งลงกว่าร้อยละ 99 (เหลือเพียง 4 วินาทีต่อจุด) และป้องกันแมลงได้ตามมาตรฐานกีฏวิทยา ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานอาชีวศึกษา มาตรฐานที่ 3 ในด้านการสร้างนวัตกรรมเพื่อพัฒนาท้องถิ่น [2] สอดคล้องกับความต้องการของชุมชนที่ต้องการป้องกันแมลงโดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิม การที่ผู้อ่านเห็นภาพกายภาพของบ้านพักที่มีช่องลมอิฐบล็อกช่วยย้ำเตือนถึงความสำคัญของการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาพอากาศเขตร้อน ซึ่งนวัตกรรมนี้ได้เข้าไปปิดช่องว่าง (Gap) ของการป้องกันโรคติดต่อโดยไม่ขัดขวางการระบายอากาศธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการยอมรับในระดับสูงและมีการรับรู้คุณค่าเชิงพื้นที่อย่างแท้จริงความสำเร็จของการจัดการเรียนรู้ครั้งนี้เกิดจากการสร้างสภาวะพึ่งพาเกื้อกูลกันเชิงบวก (Positive Interdependence) ผ่านเทคนิค STAD ที่จัดกลุ่มคละความสามารถ (1:2:1) ช่วยลดความเครียดและสร้างความภาคภูมิใจในผลงานร่วมกัน สอดคล้องกับทฤษฎีกรวยแห่งการเรียนรู้ของ Edgar Dale ที่เน้น การลงมือปฏิบัติจริงในสภาพจริง (Doing the Real Thing) ทำให้ผู้เรียนมีความคงทนในการจำถึงร้อยละ 90[18] และสามารถเปลี่ยนความรู้ทางวิศวกรรมเรื่องแรงเสียดทานสถิตให้เป็น

ESTACON 2026 | 17th

ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการคุ้มครองทางกฎหมายและมีคุณค่าต่อสังคม (Social Innovation) อย่างแท้จริง[4]

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคิดเห็นของกลุ่มเป้าหมายในชุมชนต่อชุดโครงงานฯ

ข้อที่	รายการประเมินความคิดเห็นต่อชุดโครงงานนวัตกรรม	ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$)	S.D.	ระดับความคิดเห็น
1	เนื้อหาครอบคลุมจุดประสงค์ มาตรฐาน และคำอธิบายรายวิชา	4.63	0.49	มากที่สุด
2	เนื้อหามีความทันสมัยและมีความเหมาะสม	4.67	0.48	มากที่สุด
3	เนื้อหาได้รับการจัดเรียบเรียงหัวข้ออย่างเป็นระบบ	4.63	0.49	มากที่สุด
4	เนื้อหาและจุดประเมินผลมีความสอดคล้องสัมพันธ์กัน	4.67	0.48	มากที่สุด
5	การจัดกลุ่มเนื้อหามีความสมดุล	4.46	0.51	มาก
6	รูปแบบการนำเสนอถูกต้องตามหลักวิชาการ	4.46	0.51	มาก
7	การนำเสนอเป็นไปตามลำดับความยากง่ายของเนื้อหา	4.63	0.49	มากที่สุด
8	ส่งเสริมแนวคิดที่หลากหลายเพื่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม	4.79	0.41	มากที่สุด
9	ส่งเสริมให้ผู้เรียนเข้าใจแนวคิด (Concept) ที่สำคัญ	4.67	0.48	มากที่สุด
10	มีการค้นคว้าอ้างอิงที่ถูกต้องและเชื่อถือได้	4.75	0.44	มากที่สุด
11	การออกแบบ วางรูปประกอบ และจัดพิมพ์ตามหลักศิลป์	4.75	0.44	มากที่สุด
12	มีประโยชน์ต่อความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ	4.63	0.49	มากที่สุด
13	มีประโยชน์ต่อผู้เรียน ครู และบุคลากรทางการศึกษา	4.67	0.48	มากที่สุด
	เฉลี่ยรวม	**4.64**	**0.41**	**มากที่สุด**

หมายเหตุ: ค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Alpha Coefficient) เท่ากับ **0.9698**

การยอมรับในระดับสูงสุด ประชาชนในชุมชนมีความคิดเห็นต่อชุดโครงงานนวัตกรรมในภาพรวมอยู่ในระดับ มากที่สุด ($\overline{X}$ =4.64) ซึ่งยืนยันว่านวัตกรรมนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในเชิงเทคนิค แต่ยังสามารถสร้างคุณค่าที่ชุมชนยอมรับได้จริง คุณค่าทางวิชาการและการต่อยอด ประเด็นที่ได้รับคะแนนสูงสุดคือ การส่งเสริมแนวคิดหลากหลายเพื่อการศึกษาเพิ่มเติม ($\overline{X}$ =4.79) สะท้อนให้เห็นว่าชุดโครงงานนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตร) เป็นสื่อที่มีคุณภาพสูงและเป็นต้นแบบสำหรับการสร้างสรรค์นวัตกรรมอื่น ๆ ในอนาคต การพัฒนาคุณภาพชีวิต ผลการประเมินยืนยันว่าเนื้อหามีความทันสมัยและมีประโยชน์ต่อการพัฒนาวิชาชีพ (ข้อ 2 และ 12) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการยกระดับสุขอนามัยในที่พักอาศัยจากการป้องกันแมลงพาหะนำโรคได้อย่างเป็นรูปธรรม[9]

5.8 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผนการทดลองกลุ่มเดียว (One-group Design) และมีกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กจำนวน 11 คน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการอ้างอิงผลลัพธ์ในวงกว้าง ดังนั้น การตีความผลการวิจัยในส่วนของทักษะนวัตกรจึงเป็นเพียงผลจากการประเมินเบื้องต้นในบริบทเฉพาะกลุ่ม และควรมีการขยายผลการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างที่มีความหลากหลายมากขึ้นในอนาคตเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือทางสถิติ ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ ครูผู้สอนควรบริหารจัดการเวลาในสัดส่วนออนไลน์ 70% และออนไซต์ 30% อย่างเคร่งครัด โดยใช้กระบวนการ MIAP กระตุ้นความสนใจจากปัญหาจริงในชุมชน และใช้เทคนิค STAD จัดกลุ่มคละความสามารถ (1:2:1) เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมความร่วมมือ [5]

2) การขยายผลสู่เชิงพาณิชย์ ควรศึกษาวิจัยการผลิตในรูปแบบ Mass Production ด้วยเครื่องจักร CNC เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจตามแนวทางอาชีวศึกษา 4.0[12]

3) การบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูง ในอนาคตควรมีการเปรียบเทียบประสิทธิผลกับเทคโนโลยีใหม่ เช่น ความเป็นจริงเสริม (AR) หรือการเชื่อมต่อกับระบบบ้านอัจฉริยะ (Smart Home) โดยติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ เพื่อยกระดับสภาวะน่าสบายภายในที่พักอาศัยอย่างยั่งยืน

4) การขยายผลสู่บริการวิชาการ สถาบันการศึกษาควรนำผลสำเร็จนี้ไปต่อยอดในรูปแบบของ การจัด Workshop ฝึกอบรมให้แก่คนใน

ชุมชน หรือการจัดทำ คู่มือการติดตั้งและผลิตนวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลมแบบประชาชนทำได้เอง เพื่อส่งเสริมให้เกิดการแพร่กระจายนวัตกรรมไปยังพื้นที่อื่น ๆ ที่มีบริบททางกายภาพคล้ายคลึงกัน และควรผลักดันให้เป็นนโยบายบริการวิชาการสู่ชุมชนของสถานศึกษาอาชีวศึกษาอย่างเป็นรูปธรรม

5.9 คุณค่าทางวิชาการของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ส่งมอบผลลัพธ์ที่มีคุณค่าต่อวงการวิชาการและอาชีวศึกษาใน 3 มิติหลัก ดังนี้

1) มิติด้านนวัตกรรมการเรียนรู้ เป็นต้นแบบการจัดการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) ที่มีประสิทธิผลสูง โดยพิสูจน์ให้เห็นว่าการบูรณาการ Blended Learning (70:30) ร่วมกับ MIAP Model และ เทคนิค STAD สามารถเปลี่ยนบทบาทผู้เรียนจาก ผู้รับความรู้ ไปสู่ นวัตกรผู้สร้างองค์ความรู้ (Change Agent) ที่มีความคิดเชิงระบบและทักษะวิพากษ์ในระดับสูง [6], [10]

2) มิติด้านวิศวกรรมและทรัพย์สินทางปัญญา นวัตกรรมแผ่นมุ้งปิดช่องลม (อนุสิทธิบัตรเลขที่ 22029) คือหลักฐานเชิงประจักษ์ของการประยุกต์ใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ [13] เรื่องแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) มาแก้ปัญหาเชิงโครงสร้างอาคารได้อย่างแยบคาย[10] ถือเป็นความสำเร็จสูงสุดตามตัวบ่งชี้ของมาตรฐานอาชีวศึกษาที่มุ่งเน้นให้ผลงานของผู้เรียนได้รับการคุ้มครองทางกฎหมายและต่อยอดสู่เชิงพาณิชย์ได้จริง [13], [14]

3) มิติด้านสุขอนามัยและคุณภาพชีวิต งานวิจัยนี้ก้าวข้ามขอบเขตห้องเรียนสู่การแก้ปัญหา Area-based โดยเปลี่ยนข้อเสนอแนะเชิงกีฏวิทยาระดับสากลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ D.I.Y. ที่ปฏิวัติกระบวนการติดตั้งด้วยระบบขายึดแรงเสียดทาน ซึ่งลดเวลาการทำงานลงกว่าร้อยละ 99 ช่วยลดความเสี่ยงจากโรคระบาดและยกระดับสุขอนามัยของชุมชนได้อย่างยั่งยืน[3] ตามมาตรฐานศตวรรษที่ 21



ภาพที่ 4 ก้าวข้ามขอบเขตห้องเรียนสู่การแก้ปัญหา

นอกจากมิติด้านสุขอนามัย งานวิจัยนี้ยังสะท้อนถึงแนวคิด การออกแบบนวัตกรรมเพื่อชุมชน (Community-based Innovation) ที่มุ่งเน้นการแก้ปัญหา Pain Point ของท้องถิ่นด้วยทรัพยากรที่เข้าถึงง่าย และถือเป็นรูปแบบ การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ท้องถิ่น (Technology Transfer) ที่มีประสิทธิภาพ โดยการเปลี่ยนความรู้ทางวิศวกรรมเรื่องแรงเสียดทานสถิตให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ D.I.Y. ที่ประชาชนสามารถติดตั้งและดูแลรักษาได้เอง ช่วยลดช่องว่างในการเข้าถึงเทคโนโลยีเพื่อสุขอนามัยและสร้างความยั่งยืนในการพึ่งพาตนเองของชุมชน

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความกรุณาและการสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ โดยคณะครู บุคลากรทางการศึกษา และผู้บริหาร ทั้งหมดในการสร้างสรรค์นวัตกรรม คณะผู้เชี่ยวชาญ ดร.จรูญ เตชะเจริญกิจ, รศ.ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์, ผศ.ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์, นายจักรินทร์ คงสิบ ครูเชี่ยวชาญวิทยาลัยเทคนิคชัยนาท และนายอนุชาติ อินสด ครูเชี่ยวชาญวิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย และครูชำนาญการพิเศษทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัยให้มีความเที่ยงตรงตามหลักวิชาการ ผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ขอขอบใจนักเรียนระดับ ปวช. 3 แผนกช่างกลโรงงาน และประชาชนในเขตอำเภอเมืองจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ กลุ่มตัวอย่างสำคัญที่ให้ความ

ร่วมมือในการทดลองและสะท้อนข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชนอย่างยิ่ง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทรัพย์สินทางปัญญา. (2560). **ความรู้เบื้องต้นด้านทรัพย์สินทางปัญญา**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพาณิชย์.

[2] กระทรวงศึกษาธิการ. (2562). **หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2562 (ปรับปรุง พ.ศ. 2565) สาขาวิชาช่างกลโรงงาน**. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา.

[3] กล้า ทองขาว. (2561). **การจัดการศึกษาและนวัตกรรมฐานชุมชน**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสวนดุสิต.

[4] จตุรงค์ เลาหะเพ็ญแสง. (2562). **การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างจากไม้สักขนาดเล็กเพื่อการพาณิชย์และใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน**. วารสารวิจัยและนวัตกรรม, 2(1), 110-125.

[5] เจตปรียา บุญเสริม และคณะ. (2563). **ผลการใช้เทคนิค STAD ในวิชาโครงงานเทคโนโลยีสารสนเทศ**. วารสารวิจัยและนวัตกรรมสถาบันการอาชีวศึกษากรุงเทพมหานคร, 3(2).

[6] ทิศนา แขมมณี. (2562). **ศาสตร์การสอน: องค์ความรู้เพื่อการจัดกระบวนการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพ** (พิมพ์ครั้งที่ 20). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[7] ธัณย์สิตา ศรีเจริญวิโรฒ. (2565). **การพัฒนาบทเรียนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการฝึกอบรม เรื่อง การสร้างหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ สำหรับครู**. วารสารวิชาการครูอาชีวศึกษา.

[8]ประคอง กรรณสูต. (2538). **สถิติเพื่อการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[9]พุทธชาติ แผนสมบุญ และคณะ. (2565). **รูปแบบการจัดการเรียนรู้เพื่ออาชีพและทักษะอนาคต**. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา.

[10]ภูมิพัฒน์ วนพิพัฒน์พงศ์. (2567). **การพัฒนารูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานโดยใช้โครงงานเป็นฐาน เพื่อส่งเสริมทักษะการคิดเชิงนวัตกรรมสำหรับนักศึกษาอาชีวศึกษา**. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาการบริหารอาชีวศึกษา.

[11]ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ. (2538). **เทคนิคการวิจัยทางการศึกษา**. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.

[12]วิชัย วงศ์ใหญ่ และมารุต พัฒผล. (2562). **การคิดเชิงนวัตกรรม**. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผู้นำนวัตกรรมหลักสูตรและการเรียนรู้.

[13]วิริยะ แสงศรีจันทร์. (2562). **หลักการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร**. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.

[14]สมเกียรติ จิตรวุฒิการ. (2559). **วัสดุศาสตร์และการประยุกต์ใช้งานในที่พักอาศัย**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เอสซีจี.

[15]สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA). (2562). **คู่มือการสร้างนวัตกรรมสำหรับผู้ประกอบการ**. กรุงเทพฯ: กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

[16]เอสซีจี บิลดิ้ง แมททีเรียล. (2562). **การออกแบบช่องเปิดอาคารเพื่อการระบายอากาศและสุขอนามัย**. สืบค้นจากระบบออนไลน์ของ SCG.

[17] **Ahmad, S. (2018). HOTS through blended learning and project-based learning models. Educational Research International.**

[18] Dale, E. (1969). **Audiovisual Methods in Teaching** (3rd ed.). New York: Dryden Press.

[19] Gouge, D. H., & Olson, C. (2009). **How to Bug Proof Your Home**. Arizona: University of Arizona, College of Agriculture and Life Sciences.

[20] Hasyim, M. (2020). **Blended Project-Based Learning: Improving Engineering Skills**. International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology.

[21] Lestari, I., & Isnania, N. (2019). **The Effect of Blended Project-Based Learning on Critical Thinking Skills**. Journal of Science and Education.
[22] Seage, S., & Türegün, M. (2020). **Blended learning and innovation in higher education**. Innovative Higher Education.
[23] Slavin, R. E. (1978). **Student teams achievement divisions (STAD)**. Journal of Research and Development in Education.

การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับอัตโนมัติผ่าน Google Workspace และ LINE เพื่อสนับสนุนการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Development of an Automated Notification and Response System Using Google Workspace and LINE to Support Administrative Services at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

อุไรวรรณ อูปแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น
E-mail : uraiwan.ub@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบแจ้งเตือนและติดตามข้อมูลการลาไปราชการ การสอนแทน และการสอนชดเชย โดยบูรณาการ Google Forms และ Line Application เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น กลุ่มตัวอย่างคืออาจารย์ผู้สอน จำนวน 50 คน ทดลองใช้งานระบบเป็นระยะเวลา 3 เดือน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ระบบที่พัฒนาขึ้นและแบบประเมินความพึงพอใจ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติ t-test

ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถรวบรวมข้อมูลการลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยผ่าน Google Forms พร้อมบันทึกข้อมูลอัตโนมัติและแจ้งเตือนผ่าน Line Application ส่งผลให้เจ้าหน้าที่สามารถจัดเก็บข้อมูลรายเดือนเพื่อใช้ประกอบการเบิกจ่ายค่าตอบแทนและจัดทำรายงานได้อย่างเป็นระบบ ภายหลังการใช้งาน ระดับความพึงพอใจต่อการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยรวมเพิ่มจาก 3.74 เป็น 4.78 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 0.56 เป็น 0.46 ผู้ใช้มีความพึงพอใจด้านการใช้งานระบบในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.79) ส่วนด้านประสิทธิภาพของระบบมีค่าเฉลี่ย 4.15 โดยรายการ "ระบบใช้งานง่าย" ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{x}$ = 4.82) ผลการทดสอบด้วยสถิติ t-test พบว่าระดับความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($p < .01$)

สรุปได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการข้อมูล ลดขั้นตอนการปฏิบัติงาน และยกระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จึงสามารถประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการงานด้านวิชาการและงานสนับสนุนในสถาบันอุดมศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบฟอร์มกูเกิล; แอปพลิเคชันไลน์; ระบบแจ้งเตือน; ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่สายสนับสนุน; การบริหารจัดการในสถาบันอุดมศึกษา

Abstract

This study aimed to develop a notification and information management system for official leave, substitute teaching, and make-up teaching by integrating Google Forms with the LINE application. The system was designed to support the administrative tasks of support staff at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. The participants comprised 50 instructors who used the system over a three-month period. The research instruments included the developed system and a user satisfaction questionnaire. Data were analyzed using descriptive statistics, including the mean and standard deviation, together with a paired-samples *t*-test.

The results demonstrated that the proposed system effectively collected information on official leave, substitute teaching, and make-up teaching through Google Forms while automatically storing the submitted data and sending notifications via the LINE application. This streamlined the monthly compilation of records for remuneration reimbursement and facilitated the preparation of administrative reports. Following system implementation, user satisfaction with administrative operations increased significantly, with the overall mean score rising from 3.74 to 4.78 and the standard deviation decreasing from 0.56 to 0.46. Overall satisfaction with system usability was rated at the highest level ($\bar{x}$ = 4.79), while the system performance dimension achieved a mean score of 4.15. Among all evaluation items, *"The system is easy to use"* received the highest mean score ($\bar{x}$ = 4.82). The paired-samples *t*-test revealed a statistically significant difference between pre-implementation and post-implementation satisfaction scores at the .01 significance level ($p < .01$).

In conclusion, the developed system significantly improved the efficiency of information management, reduced administrative workload, and enhanced user satisfaction. The findings suggest that the proposed system can serve as an effective solution for supporting academic administration and administrative support services in higher education institutions.

Keywords: Google Forms; Line Application; Notification System; Support Staff Efficiency; Higher Education Management

1.บทนำ

ในปัจจุบันการบริหารจัดการภาระงานของอาจารย์ผู้สอนในสถาบันอุดมศึกษามีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่อาจารย์ต้องลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย ซึ่งส่งผลต่อการจัดตารางเรียนและการประสานงานระหว่างเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนและอาจารย์ผู้สอน การแจ้งข้อมูลเหล่านี้มักดำเนินการผ่านช่องทางที่หลากหลาย เช่น การส่งอีเมล, การโทรศัพท์, หรือการแจ้งด้วยเอกสาร ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ได้แก่

- ข้อมูลตกหล่นหรือคลาดเคลื่อนจากการสื่อสารหลายช่องทาง
- ความล่าช้าในการแจ้งและตอบกลับ ส่งผลต่อการจัดการเรียนการสอน
- ภาระงานที่เพิ่มขึ้นของเจ้าหน้าที่ในการติดตามและประสานงาน
- ขาดระบบที่สามารถตรวจสอบย้อนหลังหรือวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารสนเทศ การนำเครื่องมือดิจิทัลมาใช้ในการแจ้งเตือนและตอบกลับจึงเป็นแนวทางที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารภายในองค์กรได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้ Google Forms ร่วมกับ Google Sheets และ Line Application ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่เข้าถึงง่ายและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย สามารถช่วยให้การแจ้งข้อมูลเป็นไปอย่างรวดเร็ว, ถูกต้อง, และสามารถติดตามผลได้อย่างเป็นระบบ ดังนั้นการพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับผ่าน Google และ Line Application เพื่อสนับสนุนการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญในการยกระดับการบริหารจัดการภาระงานของอาจารย์ผู้สอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ และส่งเสริมการทำงานร่วมกันอย่างมีระบบและทันสมัย ด้วยเหตุนี้ การนำเทคโนโลยีที่เข้าถึงง่ายและมีความสามารถในการเชื่อมโยงข้อมูล จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับที่มีความทันสมัย, ใช้งานง่าย, และสามารถปรับให้เหมาะสมกับบริบทของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบดังกล่าวจะช่วยให้การแจ้งข้อมูลการลาไปราชการ และการสอนแทนหรือการสอนชดเชย เป็นไปอย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยอาจารย์ผู้สอนสามารถกรอกข้อมูลผ่านแบบฟอร์มออนไลน์ และระบบจะส่งการแจ้งเตือนอัตโนมัติไปยังเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องผ่านช่องทางที่บุคลากรส่วนใหญ่ใช้งานเป็นประจำอยู่แล้ว นอกจากนี้ยังสามารถจัดเก็บข้อมูลไว้ในรูปแบบที่สามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ และนำไปใช้ในการวิเคราะห์หรือวางแผนการจัดการภาระงานในอนาคต ดังนั้น การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับผ่าน Google และ Line Application จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการยกระดับการบริหารจัดการภายในคณะให้มีความคล่องตัว, ลดภาระงานของเจ้าหน้าที่, และส่งเสริมการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในยุคดิจิทัล

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบในการพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับการไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยของอาจารย์ผู้สอนในคณะวิศวกรรมศาสตร์

2.2 เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการนำ Google Forms และการแจ้งเตือนผ่าน Line Application มาใช้ในการทำงานของฝ่ายสนับสนุน

2.3 เพื่อประเมินผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความพึงพอใจในการใช้ระบบแจ้งเตือนและตอบกลับการไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยของอาจารย์ผู้สอนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ก่อนและหลังการนำระบบมาใช้

2.4 เพื่อนำผลการศึกษามาใช้เป็นข้อเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาอุปสรรค์และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ระบบแจ้งเตือนและตอบกลับการไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย เพื่อการเบิกจ่ายค่าสอนมากยิ่งขึ้น

3. กรอบแนวคิดงานวิจัย

กรอบแนวคิดกระบวนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดกระบวนการวิจัย

กรอบแนวคิดกระบวนวิจัยครั้งนี้ คือการนำเทคโนโลยีมาพัฒนาและปรับใช้ระบบการติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติด้วย Google Forms และ Line Application เพื่อการแจ้งวันลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย สำหรับอาจารย์ผู้สอนในส่วนการแจ้งการไปราชการในแต่ละเดือน อาจารย์ผู้สอนสามารถลงวันไปราชการได้โดยผ่านจากทางเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนที่ทำแบบฟอร์มการลาการไปราชการ และการสอนแทนหรือสอนชดเชย ทางแพลตฟอร์ม Google From โดยจะมีการแจ้งเตือนผ่าน Line Application แบบกลุ่มที่ตั้งขึ้นมา

4. ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับผ่าน Google Forms และ Line Application เพื่อสนับสนุนการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน ในการติดตามและแจ้งเตือนการไปราชการ และการสอนแทนหรือการสอนชดเชยของอาจารย์ผู้สอน โดยประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาทั้ง 14 สาขา ภาคปกติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น กลุ่มตัวอย่างจำนวน 50 คน

5. ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิศวัสต์ ปาริยะประเสริฐ. (2564). “การพัฒนาแอปพลิเคชันบน Line Liff ร่วมกับ Google Application สำหรับการาติดตามและประเมินผลความสม่ำเสมอในการรับประทานยาของผู้ป่วยวัณโรค โรงพยาบาลชัยนาทนเรนทร งานวิจัยนี้เป็นนวัตกรรมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลผู้ป่วยวัณโรค โดยใช้เพื่อติดตามการทานยา ลดปัญหาการขาดยา และอำนวยความสะดวกให้บุคลากรทางการแพทย์ประเมินผลได้สะดวกยิ่งขึ้นผ่าน การใช้แอปพลิเคชันบน LINE LIFF ร่วมกับ Google Apps Script ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการรับประทานยาของผู้ป่วยวัณโรคได้อย่างมีนัยสำคัญ

สุทธิดา เหล็กกล้า. (2564). "ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้งาน LINE OA ของพนักงานเพื่อการเรียนรู้องค์กร" พบว่าการรับรู้ประโยชน์และความง่ายในการใช้งานมีอิทธิพลสูงสุดต่อความตั้งใจใช้งานของพนักงาน โดยองค์กรสามารถประยุกต์ใช้ LINE OA เป็นเครื่องมือเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพผ่านการนำเสนอเนื้อหาที่กระชับและการใช้ Rich Menu ที่เข้าถึงง่าย. ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลทางสังคมจากหัวหน้างานและสิ่งอำนวยความสะดวกในองค์กรเป็นปัจจัยสนับสนุนสำคัญที่ส่งเสริมให้พนักงานใช้งานอย่างต่อเนื่อง.

แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการใช้สื่อออนไลน์ (Social Media) อ้างอิงจากแนวคิด ดร.ภิเษก ชัยนิรันด์ (2553) ให้นิยามสื่อสังคมออนไลน์ว่าเป็นสื่อที่แพร่กระจายด้วยการปฏิสัมพันธ์เชิงสังคม เปิดโอกาสให้ผู้คนแสดงความคิดเห็นได้อย่างไร้ขีด ผู้วิจัยจึงได้นำเป็นแนวคิดกรอบวิจัย และนำวิจัยที่เกี่ยวข้อง อรวรรณ วงศ์แก้วโพธิ์ทอง (2553) กล่าวไว้ว่า สื่อสังคมออนไลน์คือ สื่อดิจิทัลหรือซอฟต์แวร์ที่ทำงานอยู่บนระบบเว็บ (Web-based) เป็นเครื่องมือในการปฏิบัติการทางสังคมที่ช่วยให้ผู้คนในโลกออนไลน์สามารถแลกเปลี่ยน แบ่งปันข้อมูลข่าวสาร ทั้งข้อความ ภาพ และวิดีโอได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ Google Form นิติพงษ์ ศรีระพันธ์ (2561) ให้แนวคิดว่า Google Forms เป็นเครื่องมือบนระบบเครือข่ายสำหรับสร้างแบบสอบถาม แบบประเมิน หรือฟอร์มลงทะเบียนออนไลน์ ที่สามารถนำมาปรับใช้ได้ในชีวิตประจำวันและภาคการทำงาน เพื่อรวบรวมความเห็นหรือข้อมูลดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

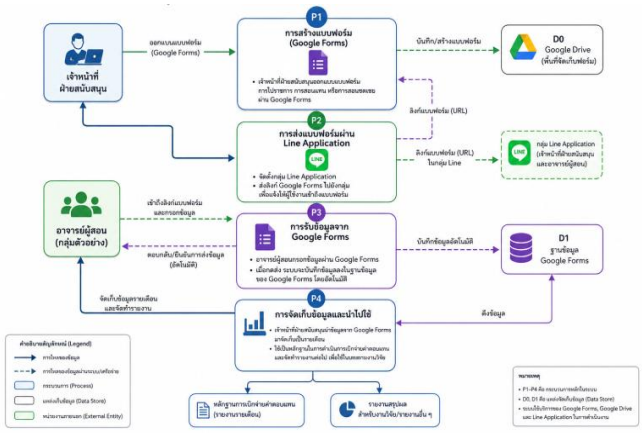
แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ แอปพลิเคชั่นไลน์ (LINE Application) LINE จัดเป็นสื่อสังคมออนไลน์ (Social Media) ประเภทหนึ่งในกลุ่มโปรแกรมสนทนาทันที (Instant Messaging Application) บนสมาร์ทโฟนและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ส่งข้อความตัวอักษร เสียง และภาพเคลื่อนไหวผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ศุภศิลป์ กุลจิตต์เจือวงศ์, (2556 : 46-47) ได้สรุปไว้ "ลักษณะเฉพาะที่ทำให้ผู้บริโภคเลือกใช้งานและเป็นสมาชิกของแอปพลิเคชัน LINE" ไว้ 2 ประการหลัก 1. เป็นการติดต่อสื่อสารสองทาง (Two-way Communication): LINE เป็นการสื่อสารโดยตรงจากผู้ส่งสารไปยังผู้รับสาร เพื่อส่งข้อความ รูปภาพ เอกสาร หรือข้อมูลข่าวสารตามวัตถุประสงค์เพื่อก่อให้เกิดการรับรู้และพฤติกรรมที่ผู้ส่งสารต้องการ 2.สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้เฉพาะกลุ่ม (Group Communication): เมื่อผู้ใช้ต้องการพื้นที่เฉพาะสำหรับติดต่อสื่อสารภายในแวดวงที่มีความเกี่ยวข้องกันระหว่างบุคคลหลายๆ คน (เช่น กลุ่มเพื่อน กลุ่มครอบครัว หรือกลุ่มงานในองค์กร) ก็สามารถตั้งค่าสร้างกลุ่มเพื่อแชร์ข้อมูลข่าวสารร่วมกันได้สะดวก

แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพ ทิพวรรณ หล่อสุวรรณรัตน์ (2556) ได้ให้นิยามประสิทธิภาพ หมายถึง การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าหรือให้เกิดประโยชน์สูงสุด และวัดได้เป็นอัตราส่วนระหว่างผลผลิตกับปัจจัยนำเข้า(Output/input) คำศัพท์ อื่นที่มีความหมายใกล้เคียงกับประสิทธิภาพคือผลิตภาพ (Productivity)

6. วิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาปัญหาและรวบรวมข้อมูลเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ศึกษาสภาพปัญหาในการแจ้งการไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย ศึกษาช่องทางการแจ้งเตือนที่เหมาะสม มีกลุ่มตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาทั้ง 14 สาขา ภาคปกติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จำนวน 50 คน

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดำเนินการในการสร้างระบบการแจ้งเตือนและตอบกลับการสอนแทนหรือการสอนชดเชย ผ่าน Google Forms และ Line Application แสดงการไหลของข้อมูล Data Flow Diagram ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนการไหลของข้อมูล (Data Flow Diagram)

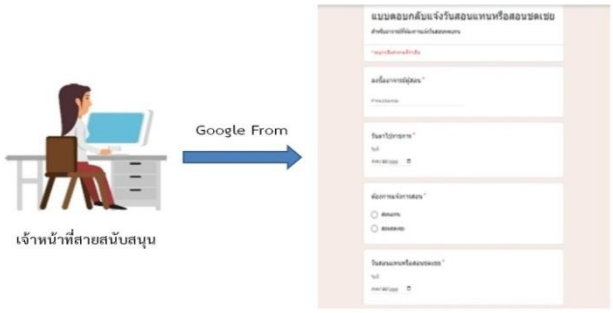
โดยมีขั้นตอนในการปฏิบัติ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วัตถุประสงค์และการออกแบบเครื่องมือจัดเก็บข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการงานวิชาการ เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนได้จัดทำแบบฟอร์มออนไลน์ด้วย Google Forms โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1. การแจ้งไปราชการ เพื่อบันทึกข้อมูล วัน เวลา และภารกิจการปฏิบัติงานนอกสถานที่ของอาจารย์ผู้สอน

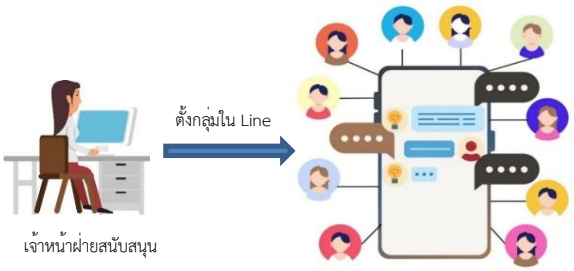
2. การบริหารจัดการชั้นเรียน เพื่อรองรับการแจ้งข้อมูลการสอนแทน หรือการนัดหมายสอนชดเชยในกรณีที่ไม่สามารถทำการสอนในเวลาปกติได้

โดยระบบนี้ถูกส่งไปยังกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอาจารย์ผู้สอนเพื่อทำการตอบกลับ ทุกสัปดาห์ทำให้เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนที่เกี่ยวข้องสามารถรวบรวมข้อมูลในแต่ละสัปดาห์ นำไปประมวลผล และตรวจสอบความถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพแบบ Real-time เพื่อสรุปผลตั้งเบิกเป็นรายเดือน



รูปที่ 3 แสดงการออกแบบฟอร์มของเจ้าหน้าที่

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการและเครื่องมือในการประสานงาน ในส่วนของขั้นตอนการดำเนินงานเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการสร้างเครือข่ายการสื่อสาร โดยการจัดตั้งกลุ่มบนแพลตฟอร์ม Line Application ซึ่งเป็นเครื่องมือในการแจ้งเตือน และรับการตอบกลับ จากกลุ่มตัวอย่างโดยสมาชิกภายในกลุ่มประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนผู้รับผิดชอบระบบ และอาจารย์ผู้สอน เพื่อใช้ติดต่อ และผลการดำเนินงานให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ



การตั้งกลุ่ม Line Application เพื่อรับการแจ้งเตือนและตอบกลับ

รูปที่ 4 แสดงการตั้งกลุ่ม Line เพื่อแจ้งเตือน

ขั้นตอนที่ 3 การเชื่อมโยงระบบจัดเก็บข้อมูลและการแจ้งเตือนแบบทันท่วงที(Real-time Integration) เพื่อให้การบริหารจัดการภารกิจวิชาการเป็นไปอย่างไร้รอยต่อ เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนจึงได้นำส่งลิงก์แบบฟอร์มการแจ้งไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยด้วย Google Forms ที่สร้างขึ้น ผ่านระบบ Line Application กลุ่ม ซึ่งเป็นช่องทางที่เข้าถึงง่ายและรวดเร็ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อาจารย์ผู้สอน ได้รับการแจ้งเตือน ตลอดจนสามารถตอบกลับและส่งข้อมูลสำคัญดังกล่าวกลับเข้าสู่ระบบได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ในการประสานงานภายในหน่วยงาน

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล ในส่วนของขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล อาจารย์ผู้สอน ที่มีคำสั่งหรือกำหนดการไปราชการประจำเดือนนั้นๆ และการสอนแทนหรือการสอนชดเชย จะทำการบันทึกข้อมูลผ่านลิงก์แบบฟอร์มออนไลน์ที่ได้รับจากกลุ่มประสานงานในระบบ Line Application

หลังจากได้รับการตอบกลับข้อมูลดังกล่าวแล้ว เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนจะดำเนินการนำเข้าข้อมูล (Data Logging) บันทึกวันเวลาการไปราชการตลอดจนรายละเอียดการสอนแทนหรือการสอนชดเชยของกลุ่มตัวอย่าง เพื่อจัดทำสรุปยอดภาระงานสอนและเตรียมความพร้อมสำหรับขั้นตอนการอนุมัติเบิกจ่ายค่าสอนประจำเดือนให้มีความถูกต้อง แม่นยำและโปร่งใส

ในการเข้าถึงข้อมูลกำหนดการไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย ของอาจารย์(กลุ่มตัวอย่าง) แจ้งกลับผ่านลิงก์ Google Forms ผู้ที่จะเข้าถึงข้อมูลนี้ได้ คือเจ้าหน้าที่ผู้ประสานงานที่เกี่ยวข้องเท่านั้น



รูปที่ 5 แสดงขบวนการแจ้งเตือนและตอบกลับวันการออกแบบ แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลได้ออกแบบสอบถาม (Questionnaire) แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงก่อนทดลองใช่ระบบ และหลังใช่ระบบดังนี้

- แบบสอบถามก่อนทดลองใช่ระบบการแจ้งเตือนและตอบกลับการลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย ผ่าน Google Forms และ Line Application แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ ซึ่งเป็นข้อคำถามในลักษณะตรวจ

รายการ (Checklist) และเป็นคำถามปลายปิด (Close Ended Questionnaires)

ส่วนที่ 2 แบบแบบสอบถามเกี่ยวกับความพึงพอใจในขบวนการเบิกจ่ายเงินค่าสอนแทน หรือสอนชดเชย

- แบบสอบถามหลังทดลองใช่ระบบการแจ้งเตือนและตอบกลับผ่าน Google Forms และ Line Application การลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ ซึ่งเป็นข้อคำถามในลักษณะตรวจรายการ (Checklist) และเป็นคำถามปลายปิด (Close Ended Questionnaires)

ส่วนที่ 2 แบบแบบสอบถามเกี่ยวกับความพึงพอใจในขบวนการเบิกจ่ายเงินค่าสอนแทนหรือสอนชดเชย

ส่วนที่ 3 แบบสอบถามเกี่ยวกับความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบแจ้งเตือนและตอบกลับการลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยผ่าน Google Forms และ Line Application โดยมีองค์ประกอบ 2 ด้าน ประกอบด้วย ความพึงพอใจในด้านการใช้งาน และ ความพึงพอใจในประสิทธิภาพของระบบ ข้อคำถามจะเป็นรูปแบบมาตราส่วนแบบประมาณค่า (Rating Scale) ใช้เกณฑ์การให้คะแนนตามแนวทางของ Likert (Likert Five's Rating Scale)

ส่วนที่ 4 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม จำนวน 1 ข้อ ซึ่งเป็นคำถามปลายเปิด (Open ended Questionnaires) ให้ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างเสรี ในการตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability) ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (Try Out) กับอาจารย์ผู้สอนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน เพื่อตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบสอบถามทั้งฉบับมีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.93 ซึ่งอยู่ในระดับดีเยี่ยม และเมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.81–0.93 แสดงว่าแบบสอบถามมีความสอดคล้องภายในของข้อคำถามในระดับดี และมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลครั้งนี้

7. ผลการวิจัย

ผลข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ด้านเพศ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย มีจำนวน 33 คน คิดเป็นร้อยละ 66.00 รองลงมาเป็นเพศหญิง มีจำนวน 17 คน คิดเป็นร้อยละ 34.00

ด้านประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่มากกว่า 11 ปีขึ้นไป มีจำนวน 31 คน คิดเป็นร้อยละ 62.00 รองลงมามีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ตั้งแต่ 1-5 ปี มีจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 20.00 มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ตั้งแต่ 6 - 10 ปี มีจำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 12.00

มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ต่ำกว่า 1 ปี มีจำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 6.00

ผลการศึกษาความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง ก่อนและหลังทดลองใช้ระบบแจ้งเตือนลาไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชย

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย $\bar{x}$		เปรียบเทียบผล
	ก่อนทดลองใช้	หลังทดลองใช้	
- เจ้าหน้าที่มีความกระตือรือร้นและเอาใจใส่	4.32	4.92	เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน
- เจ้าหน้าที่มีความรู้และชำนาญ	4.04	4.78	เพิ่มขึ้นมาก
- การเร่งรัดและติดตามการเบิกจ่าย	3.98	4.76	ดีขึ้นอย่างมาก
- ความเข้าใจในระเบียบและกฎหมาย	3.88	4.72	เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน
- การแจ้งเตือนการส่งหนังสือลาราชการ	3.84	4.70	ดีขึ้นมาก
- ความสามารถในการดำเนินการตามเป้าหมาย	3.64	4.66	พัฒนาขึ้นชัดเจน
- ความถูกต้องของขั้นตอนเบิกจ่าย	3.62	4.5	ลดข้อผิดพลาดได้ดี
- ความไม่ซับซ้อนของขั้นตอน	3.38	4.34	ลดความยุ่งยากได้มาก
- ความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ	3.18	4.66	เพิ่มขึ้นอย่างโดดเด่น
ภาพรวมทั้งหมด	3.74	4.78	ดีขึ้นอย่างมาก

ค่าคะแนนเฉลี่ยในทุกด้านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำมาใช้ในการพัฒนาการดำเนินงานของเจ้าหน้าที่ โดยสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ ดังนี้ ด้านความกระตือรือร้นและเอาใจใส่ของเจ้าหน้าที่ มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.32 เป็น 4.92 แสดงถึงการมีส่วนร่วมและความใส่ใจที่มากขึ้นอย่างชัดเจน ด้าน ความรู้และความชำนาญของเจ้าหน้าที่ เพิ่มขึ้นจาก 4.04 เป็น 4.78 สะท้อนถึงการพัฒนาทักษะและความเข้าใจในงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้านการเร่งรัดและติดตามการเบิกจ่าย มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 3.98 เป็น 4.76 แสดงถึงการปรับปรุงกระบวนการให้มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้านความเข้าใจในระเบียบและกฎหมาย เพิ่มขึ้นจาก 3.88 เป็น 4.72 แสดงถึงการส่งเสริมความรู้ความเข้าใจในข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง ด้านการแจ้งเตือนการส่งหนังสือลาราชการ เพิ่มขึ้นจาก 3.84 เป็น 4.70 สะท้อนถึงการจัดการเอกสารที่มีความแม่นยำและทันเวลา ด้านความสามารถในการดำเนินการตามเป้าหมาย เพิ่มขึ้นจาก 3.64 เป็น 4.66 แสดงถึงการบรรลุเป้าหมายที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้านความถูกต้องของขั้นตอนเบิกจ่าย เพิ่มขึ้นจาก 3.62 เป็น 4.50 แสดงถึงการลดข้อผิดพลาดในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ด้านความไม่ซับซ้อนของขั้นตอน เพิ่มขึ้นจาก 3.38 เป็น 4.34 แสดงถึงการลดความยุ่งยากและทำให้ขั้นตอนต่าง ๆ เป็นระบบมากขึ้น ด้านความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ เพิ่มขึ้นจาก 3.18 เป็น 4.66 ซึ่งถือว่าเป็นการพัฒนาอย่างโดดเด่นและมีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยตรง

ผลการศึกษาความพึงพอใจในด้านการใช้งานของระบบแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชย แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความพึงพอใจในด้านการใช้งานของระบบแจ้งเตือน

ความพึงพอใจในด้านการใช้งาน	ค่าเฉลี่ย $\bar{x}$	S.D.	ระดับความสำคัญ
- ระบบนี้มีประโยชน์ต่อการใช้ในการเรียนแจ้ง	4.92	0.27	มากที่สุด
- ระบบสามารถเข้าใจและใช่งานได้ง่าย	4.78	0.62	มากที่สุด
- ระบบสามารถแสดงรายละเอียดกิจกรรมได้	4.76	0.62	มากที่สุด
- ระบบมีการตอบสนองได้รวดเร็ว	4.72	0.64	มากที่สุด
- ระบบช่วยลดเวลาและกระบวนการทำงาน	4.66	0.66	มากที่สุด
ภาพรวมของด้าน	4.79	0.53	มากที่สุด

ภาพรวมของด้านการใช้งาน ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.79 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.53 ระดับความสำคัญความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ซึ่งหากแยกเป็นรายข้อ ทั้งหมดมีระดับความสำคัญความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด โดยเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ ความพึงพอใจระบบนี้มีประโยชน์ต่อการใช้ในการเรียนแจ้ง ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.92 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.27 ความพึงพอใจระบบสามารถเข้าใจและใช่งานได้ง่าย ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.78 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.62 ความพึงพอใจระบบสามารถแสดงรายระเอียดกิจกรรมได้ ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.76 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.62 เป็นต้น

ผลการศึกษาความพึงพอใจในประสิทธิภาพของระบบการแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชยแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความพึงพอใจในประสิทธิภาพของระบบการแจ้งเตือน

ความพึงพอใจในประสิทธิภาพของระบบ	ค่าเฉลี่ย $\bar{x}$	S.D.	ระดับความสำคัญ
- โดยภาพรวมแล้วระบบใช้งานง่าย	4.82	0.52	มากที่สุด
- ลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนได้เป็นอย่างดี	4.70	0.58	มากที่สุด
- ระบบมีความถูกต้องของข้อมูล	4.50	0.51	มากที่สุด
- ทำให้เกิดความสะดวกในการจัดเก็บติดตามและแจ้งเตือน	4.34	0.69	มากที่สุด
- ระบบมีความยืดหยุ่น (เข้าใช้ได้กับอุปกรณ์ที่หลากหลาย)	4.10	0.86	มาก
ภาพรวมของด้าน	4.51	0.50	มากที่สุด

ภาพรวมของประสิทธิภาพของระบบ ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.51 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.50 ระดับความสำคัญความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ซึ่งหากแยกเป็นรายข้อ ทั้งหมดมีระดับความสำคัญความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด โดยเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ ความพึงพอใจโดยภาพรวมแล้วระบบใช้งานง่าย ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.82 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.52 รองลงมา ความพึงพอใจลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนได้เป็นอย่างดี ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.70 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.58 ความพึงพอใจระบบมีความถูกต้องของข้อมูล ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.50 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.51 เป็นต้น

ผลการศึกษาความแตกต่างความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนรับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง ก่อนและหลังทดลองใช้ระบบแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชยแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความแตกต่างความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง ก่อนและหลังทดลองใช้ระบบแจ้งเตือน

กลุ่มตัวอย่าง	ก่อนใช้ระบบ		หลังใช้ระบบ			
	Mean	SD.	Mean	SD.	t	P
ความพึงพอใจในเบิกจ่ายเงินค่าสอน	**3.74**	**0.56**	**4.78**	**0.46**	**-37.15**	**0.000****

ความแตกต่างของผลการทดสอบก่อน-หลังการใช้ระบบ การแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชย ทั้งหมด 9 ข้อ ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจก่อนใช้ระบบอยู่ที่ 3.74 (SD = 0.56) ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปานกลาง หลังจากใช้ระบบ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 4.78 (SD = 0.46) ซึ่งอยู่ในระดับสูงมาก ผลการวิเคราะห์ด้วย *t-test* พบว่า ค่า t = -37.15 และ ค่า p = 0.000 ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ($p < .01$) การใช้ระบบใหม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความพึงพอใจในในระบบการแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชย โดยระดับความพึงพอใจเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหลังจากมีการใช้ระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่นำมาใช้นั้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษาความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง พบว่า ค่าเฉลี่ยภาพรวมเพิ่มขึ้นจาก 3.74 เป็น 4.78 โดยทุกด้านมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น สะท้อนว่าระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ ลดความซับซ้อนของขั้นตอน เพิ่มความถูกต้องในการดำเนินงาน และสร้างความพึงพอใจแก่ผู้ใช้งานในระดับสูง.

การศึกษาความพึงพอใจในด้านการใช้งานของระบบแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชยผลการประเมินความพึงพอใจด้านการใช้งานระบบการแจ้งไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยผ่าน Google Forms ร่วมกับ LINE Application พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.79, S.D. = 0.53) โดยเฉพาะด้านประโยชน์ของระบบต่อการใช้งาน ($\bar{x}$ = 4.92) รองลงมา ได้แก่ ระบบสามารถเข้าใจและใช้งานได้ง่าย ($\bar{x}$ = 4.78) และระบบสามารถแสดงรายละเอียดกิจกรรมได้อย่างครบถ้วน ($\bar{x}$ = 4.76) สะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี มีความสะดวก ใช้งานง่าย และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน

การศึกษาความพึงพอใจในประสิทธิภาพของระบบการแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชย พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.51, S.D. = 0.50) โดยผู้ใช้งานเห็นว่าระบบใช้งานง่าย ($\bar{x}$ = 4.82) สามารถลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน ($\bar{x}$ = 4.70) และมีความถูกต้องของข้อมูล ($\bar{x}$ = 4.50) อยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน ลดภาระงาน และสนับสนุนการจัดเก็บ ติดตาม และแจ้งเตือนข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าด้านความยืดหยุ่นในการเข้าใช้งานผ่านอุปกรณ์ที่หลากหลายจะได้รับการประเมินในระดับมาก ($\bar{x}$ = 4.10) แต่ยังคงสะท้อนว่า

ระบบสามารถรองรับการใช้งานได้เป็นอย่างดีในภาพรวม

การศึกษาความแตกต่างความพึงพอใจในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนรับผิดชอบในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง ก่อนและหลังทดลองใช้ระบบแจ้งเตือนลาไปราชการ และ การสอนแทนหรือการสอนชดเชย พบว่า หลังการใช้ระบบ ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อการเบิกจ่ายเงินค่าสอนสูงกว่าก่อนการใช้ระบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($t = -37.15$, $p < .001$) โดยค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเพิ่มขึ้นจาก 3.74 (S.D. = 0.56) เป็น 4.78 (S.D. = 0.46) สะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเบิกจ่ายเงินค่าสอน ทำให้การดำเนินงานมีความสะดวก รวดเร็ว และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในระดับที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน

9. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

9.1 หน่วยงานที่มีลักษณะการดำเนินงานคล้ายกันควรนำระบบการแจ้งไปราชการและการสอนแทนหรือการสอนชดเชยผ่าน Google Forms ร่วมกับ LINE Application ไปประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการรับส่งข้อมูล ลดขั้นตอนการดำเนินงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามการเบิกจ่ายเงินค่าสอน

9.2 ควรจัดอบรมหรือจัดทำคู่มือการใช้งานระบบให้แก่ผู้ใช้งานและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถใช้งานระบบได้อย่างถูกต้องและเกิดประโยชน์สูงสุด

9.3 ควรมีการติดตามและประเมินผลการใช้งานระบบอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำข้อเสนอแนะของผู้ใช้งานมาปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับการปฏิบัติงานที่เปลี่ยนแปลงไป

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณบดี รองคณบดีฝ่ายวิชาการ และคณะผู้บริหารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้อนุมัติทุนให้ผู้วิจัยได้ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาระบบแจ้งเตือนและตอบกลับผ่าน Google และ แอปพลิเคชั่นไลน์ เพื่อสนับสนุนการให้บริการ
เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตามสัญญาเลขที่ ENG 14/68
อนึ่งผู้วิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชา และกัลยาณมิตรทุกท่านในสำนักงานในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตอบแบบสอบถาม การช่วยเหลือในด้านข้อมูลเพื่อใช้ในการอ้างอิงจนครบกระบวนการ และการให้การสนับสนุนมาโดยตลอด จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

11. เอกสารอ้างอิง

[1] จักรินทร์ ศิลารัตน์. (2568). การพัฒนาเว็บไซต์หน่วยงานสนับสนุนวิชาการโดยใช้เทคโนโลยี Google Workspace กรณีศึกษา สถาบันการสอนวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วารสารวิชาการ ปขมท. , ปีที่ 14 ฉบับที่ 1.

[2] อังคณา ธนานุภาพพันธุ์. (2564). ปัจจัยที่

ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากร กรณีศึกษาของบริษัทธุรกิจให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่แห่งหนึ่ง.วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นมนุษยศาสตร์ และสังคมศาสตร์.

[3] วิชุดา ไชยศิวามงคล, เยาวลักษณ์ สมพงษ์, สุชิราภรณ์ สุนทรภักดิ์, และ สุธารัตน์ พิทยาวัฒนชัย. (2565). การพัฒนาไลน์ แชทบอทสำหรับระบบห้องสมุดอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 30(6), 1-18.

[4] ทิพวรรณ หล่อสุวรรณรัตน์. (2556). งบประมาณแบบมีส่วนร่วม: บทเรียนจากต่างประเทศและความท้าทาย สำหรับประเทศไทย. วารสารการจัดการภาครัฐและภาคเอกชน.

[5] ขวัญฤดี ฮวดหุ่น. (2560). อิทธิพลของแอพพลิเคชั่นไลน์ในการสื่อสารยุคปัจจุบัน. วารสารศิลปการจัดการ, 1(2), 75-88

[6] พิชิต วิจิตรบุญยรักษ์. (2553). สื่อสังคมออนไลน์: สื่อแห่งอนาคต Social Media : Future Media. วารสารนักบริหาร มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, 3(2), 99-103.

[7] ศุภศิลป์ กุลจิตต์เจือวงศ์. (2556, ตุลาคม-ธันวาคม). ไลน์รูปแบบการสื่อสารบนความสร้างสรรค์ของสมาร์ทโฟน : ข้อดีและข้อจำกัดของแอปพลิเคชัน. วารสารนักบริหาร. 33(4), 42-54

[8] มนต์ทิชา รัตนพันธ์, และ ฉัตรวดี สายใยทอง. (2566). การพัฒนา Line Chatbot สำหรับงานบริการด้านงานวิจัย. กรณีศึกษา สถาบันวิจัยและพัฒนา.

[9] สำนักบริหารงานการศึกษาพิเศษ. (2557). คู่มือการใช้งาน LINE Application เพื่อการสื่อสาร. กรุงเทพฯ : สำนักงาน คณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานกระทรวงศึกษาธิการ

[10] สุขสวัสดิ์ แซ่ลิ่ม, และพรเทพ น้ำใจสุข. (2563). การพัฒนาระบบแชทบอทสำหรับการให้บริการข้อมูลของศูนย์สุขภาพ ชุมชนเมือง มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. งานประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. (9 - 10 กรกฎาคม 2563), น. 535-542.

[11] อภิชัย ตระหง่านศรี. (2566). การพัฒนาระบบสารสนเทศอัตโนมัติเพื่อแสดงผลข้อมูลการเรียนผ่านไลน์แชทบอท. สหวิทยาการสังคมศาสตร์ และการสื่อสาร, 6(2), 127-138

[12] ดร.ภิเษก ชัยนิรันดร์ (2553). การตลาดแนวใหม่ผ่าน Social media. พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ด.

[13] วิศวัสต์ ปาริยะประเสริฐ. (2564). “การพัฒนาแอปพลิเคชันบน Line Liff ร่วมกับ Google Application สำหรับการาติดตามและประเมินผลความสม่ำเสมอในการรับประทานยาของผู้ป่วยวัณโรค โรงพยาบาลชัยนาทนเรนทร, โรงพยาบาลชัยนาทนเรนทร จังหวัดชัยนาท.

[14] สุทธิดา เหล็กกล้า. (2564). "ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจในการใช้งาน LINE OA ของพนักงานเพื่อการเรียนรู้องค์กร". สาขาวิชาการจัดการความรู้และนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

[15] นิติพงษ์ ศรีระพันธ์ (2561)."คู่มือการทำแบบสอบถามออนไลน์เพื่อการพัฒนาด้วย Google Forms". จัดพิมพ์โดย สถาบันพัฒนาองค์กรชุมชน (องค์การมหาชน)

[16] กรชนก เพิ่มคำ. (2563). ปัจจัยที่มีผลต่อกระสิทธิภาพการเบิกจ่ายงบประมาณของกรมทางหลวงสังกัดส่วนกลาง. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพ.

[17] ทิพวรรณ หล่อสุวรรณรัตน์. (2556). งบประมาณแบบมีส่วนร่วม: บทเรียนจากต่างประเทศและความท้าทาย สำหรับประเทศไทย. วารสารการจัดการภาครัฐและภาคเอกชน.

[18] ธีรพร สิริวันต์. (2559). การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์ แอปพลิเคชัน (Line Application) เพื่อเป็นช่องทางการสื่อสารการปฏิบัติงานในองค์กร. วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยมหิดล.

[19] วัชระ สะท้อนดี. (2559). ปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อประสิทธิผลการเบิกจ่ายงบประมาณประจำปีของสำนักการศึกษากรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพ.

[20] ฐิติกร ทองเอียด. (2565). การใช้ Line Chatbot เพื่อการแพทย์. เรียกใช้เมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2568 จาก WU BLOGS Walailak University LearningCommunity: https://blog.wu.ac.th/?p=365#:~:text=ChatBot%20Line%20คือ%20บัญชีไลน์,Dialogflow%20 ที่ใช้งานง่าย

[21] โสพิชญ์ สุขเจริญ. (2561). โปรแกรมส่งข้อความแจ้ง เตือนไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วย Google Calendar ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักวิทยบริการและ เทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 256,จาก http://www.eresearch.ssru.ac.th/bitstream/123456789/1528/1/งานวิจัย%20โสพิชญ์. pdf.

[12] อุทุมพร มณีวรรณ์, มลฑาทิพย์ ทาษรักษา และเอกสิทธิ์ ปัญญามี. (2563) การพัฒนาระบบแจ้งเตือนวัน กำหนดส่งคืนหนังสืออัตโนมัติผ่านไลน์แอปพลิเคชัน. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2568, จาก https://pulinet2021.pulinet.org/uploads filecompletely/2020-12-29/stefany-IS.pdf.

การศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายค่าตอบแทนการสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

A Study of Factors Associated with the Efficiency of Teaching Compensation Reimbursement at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

อุไรวรรณ อูปแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น
E-mail : uraiwan.ub@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนของเจ้าหน้าที่ฝ่ายยายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ประชากรคืออาจารย์ผู้สอนทั้งหมดจาก 14 สาขาวิชา จำนวน 170 คน เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถาม วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมทั้งทดสอบสมมติฐานด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA: F-test) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยด้านทักษะ ความรู้ และความสามารถในการบริการ มีความสำคัญในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.36, SD = 0.71) รองลงมา ได้แก่ ด้านวัฒนธรรมองค์กร (4.04, SD = 0.93) ด้านการบริหารจัดการ (4.02, SD = 0.87) ด้านบุคลากร (3.72, SD = 0.92) และด้านระเบียบกฎหมาย และข้อบังคับ (3.61, SD = 0.99) โดยภาพรวมทุกปัจจัยมีความสำคัญอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.94, SD = 0.69) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่า ปัจจัยด้านบุคลากร (r = 0.669) และด้านระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับ (r = 0.663) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงในระดับสูง ขณะที่ด้านทักษะ ความรู้ และความสามารถ (r = 0.586) ด้านวัฒนธรรมองค์กร (r = 0.520) และด้านการบริหารจัดการ (r = 0.455) มีความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง โดยทุกปัจจัยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01.

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพการทำงาน, ประสิทธิภาพการเบิกจ่าย, ความพึงพอใจ, สายสนับสนุน, ความถูกต้องแม่นยำ, ลดการผิดพลาด

Abstract

This study was conducted as part of the Fiscal Year 2025 Research Grant Project funded by Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. The objective of this study was to investigate the factors associated with the efficiency of teaching compensation reimbursement managed by the support staff at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. The sample consisted of 170 instructors from 14 academic programs. Data were collected using a structured questionnaire and analyzed using descriptive statistics, including frequency, percentage, mean, and standard deviation. The research hypotheses were tested using one-way analysis of variance (One-way ANOVA: *F*-test), and the relationships among variables were examined using Pearson's correlation coefficient. The findings revealed that service skills, knowledge, and competency were rated as the most important factor (Mean = 4.36, SD = 0.71), followed by organizational culture (Mean = 4.04, SD = 0.93), management practices (Mean = 4.02, SD = 0.87), personnel factors (Mean = 3.72, SD = 0.92), and regulations, laws, and institutional policies (Mean = 3.61, SD = 0.99). Overall, all factors were perceived to be important, with an overall mean score of 3.94 (SD = 0.69). Pearson's correlation analysis indicated that personnel factors (r = 0.669) and regulations, laws, and institutional policies (r = 0.663) were strongly associated with the efficiency of teaching compensation reimbursement. In contrast, service skills, knowledge, and competency (r = 0.586), organizational culture (r = 0.520), and management practices (r = 0.455) demonstrated moderate positive correlations with reimbursement efficiency. All correlations were statistically significant at the 0.01 level ($p < .01$).

Keywords: Performance, Disbursement Efficiency, Satisfaction, Support, Accuracy, Error Reduction

1.บทนำ

ในยุคที่การบริหารจัดการภาครัฐต้องเผชิญกับความท้าทายด้านความโปร่งใส ความรวดเร็ว และประสิทธิภาพ การเบิกจ่ายเงินค่าสอนในสถาบันอุดมศึกษาถือเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพการจัดการเรียนการสอนและความพึงพอใจของบุคลากร โดยเฉพาะในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีลักษณะการเรียนการสอนที่หลากหลายและซับซ้อน ทั้งในด้านภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ การเบิกจ่ายเงินค่าสอนจึงต้องดำเนินการอย่างมีระบบ มีความถูกต้อง และทันเวลา เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น เป็นสถาบันที่มุ่งเน้นการผลิตบัณฑิตสายวิชาชีพที่มีคุณภาพ การบริหารจัดการด้านงบประมาณและการเบิกจ่ายเงินค่าสอนจึงมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนภารกิจดังกล่าว อย่างไรก็ตาม

จากการสังเกตพบว่า กระบวนการเบิกจ่ายเงินค่าสอนยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความล่าช้าในการดำเนินการ ความไม่ชัดเจนของขั้นตอน ความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนในระเบียบข้อบังคับ รวมถึงการประสานงานระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการเบิกจ่าย ดังนั้น การศึกษาปัจจัยที่ความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และระบุปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ส่งผลต่อความสำเร็จหรืออุปสรรคของกระบวนการดังกล่าว อันจะนำไปสู่การปรับปรุงระบบการบริหารจัดการให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับบริบทของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่ได้กล่าวข้างต้น ในฐานะที่ผู้วิจัยได้ปฏิบัติหน้าที่ในตำแหน่งเจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป ระดับปฏิบัติการ ปฏิบัติหน้าที่ด้านการเงิน การบัญชี และมีหน้าที่ความรับผิชอบที่เกี่ยวข้องกับการเงินภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ เช่น งานเบิกจ่ายการเดินทางไปราชการ งานเบิกจ่ายค่าสอน ค่าสอนแทนหรือสอนชดเชยเป็นต้น เพื่อให้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการเบิกจ่ายเงินค่าสอน เพื่อหาแนวทางในการส่งเสริมขบวนการการเบิกจ่ายเงินค่าสอนให้มีประสิทธิภาพ และเอื้ออำนวยต่ออาจารย์ผู้สอน และผู้เบิกจ่ายค่าสอน เพื่อเป็นประโยชน์นำผลที่ได้ที่มีคุณค่าสรควรเสริมให้มีการเผยแพร่และนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางวิชาการ และการเพิ่มศักยภาพของหน่วยงานฝ่ายบริหารงานทั่วไป.

2.วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเบิกจ่ายเงินค่าสอน.

2.2 เพื่อศึกษาระดับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

2.3 เพื่อศึกษาระดับความคิดเห็นของอาจารย์ผู้สอนที่มีต่อการให้บริการด้านการเบิกจ่ายเงินค่าสอนของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

3. ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเบิกจ่ายเงินค่าสอน โดยเลือกศึกษากระบวกการเบิกจ่ายเงินค่าสอนโดยประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาทั้ง 14 สาขา ภาคปกติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ทั้งหมดจำนวน 170 คน.

4. ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Figueroa González et al. (2024) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง การบริหารทรัพยากรมนุษย์ (Human Talent Management) กับ ผลการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน (Job Performance of Administrative Staff) ในกองบริการการศึกษาของมหาวิทยาลัย Juárez University of the State of Durango ประเทศเม็กซิโก และนำผลการศึกษาไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของบุคลากรสายสนับสนุน พบว่า การบริหารทรัพยากรมนุษย์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ Spearman's Rho = 0.426 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่าเมื่อองค์กรมีการบริหารทรัพยากรมนุษย์ที่มีประสิทธิภาพ ผลการปฏิบัติงานของบุคลากรก็มีแนวโน้มดีขึ้นตามไปด้วย การคัดเลือกบุคลากรที่เหมาะสม (Personnel Selection) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้บุคลากรสามารถปฏิบัติงานได้ตรงตามความรู้ ความสามารถ และความรับผิดชอบ ส่งผลให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น การฝึกอบรมและพัฒนาบุคลากร (Job Training) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มทักษะ ความรู้ และความสามารถในการทำงาน ช่วยให้บุคลากรสามารถบรรลุเป้าหมายขององค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาวะผู้นำและวัฒนธรรมองค์กร มีส่วนสนับสนุนการพัฒนาผลการปฏิบัติงาน โดยองค์กรควรมีผู้นำที่ส่งเสริมการเปลี่ยนแปลง (Transformational Leadership) และสร้างวัฒนธรรมองค์กรที่เข้มแข็ง เพื่อยกระดับคุณภาพการบริการและมาตรฐานการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน.

Chuchu Liang, Ben Lourie, Alexander Nekrasov และ Tonni Shijun Xia.(2025). เพื่อศึกษาว่า บุคลากรฝ่ายสนับสนุน (Administrative Support Staff) ส่งผลต่อผลการดำเนินงานขององค์กร (Firm Performance) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนบุคลากรฝ่ายสนับสนุนในองค์กร (Administrative Intensity) กับผลการดำเนินงานด้านต่าง ๆ ขององค์กร พบการเพิ่มจำนวนบุคลากรฝ่ายสนับสนุนเกินระดับที่เหมาะสมอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมขององค์กรลดลง จึงสะท้อนให้เห็นว่าการบริหารทรัพยากรบุคคลที่สมดุลเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลการปฏิบัติงานขององค์กร.

สุจิรา สาหา สุรยุทธ ทองคำ และพนิตสุภา ธรรมประมวล (2564) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง การจัดการความรู้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาระดับการจัดการความรู้และประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน (2) เปรียบเทียบระดับการจัดการความรู้และประสิทธิภาพการปฏิบัติงานจำแนกตามปัจจัยส่วนบุคคล ได้แก่ อายุ ระดับการศึกษา ประสบการณ์การทำงาน ประสบการณ์การเข้ารับการอบรม และประเภทบุคลากร และ (3) ศึกษาการจัดการความรู้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน ผลการวิจัยพบว่า ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การส่งเสริมให้บุคลากรมีการแสวงหาความรู้ จัดเก็บองค์ความรู้ และนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานอย่างเป็นระบบ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุนได้อย่างมีประสิทธิผล ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสามารถใช้สนับสนุนแนวคิดด้านทักษะ ความรู้ ความสามารถ และการพัฒนาบุคลากร ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติงานในองค์กร.

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน นคเรศ ณ พัทลุง (2554) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของบุคลากรสายสนับสนุนวิชาการ โดยอธิบายว่าประสิทธิภาพการทำงานเป็นผลลัพธ์ของการปฏิบัติงานที่สะท้อนความสามารถของบุคลากรในการดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมายขององค์กรอย่างมี

คุณภาพ รวดเร็ว และเกิดความคุ้มค่าในการใช้ทรัพยากรขององค์กร ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดองค์ประกอบของประสิทธิภาพการทำงานไว้ 5 ด้าน ได้แก่ สมรรถนะการทำงาน นโยบายองค์การ ภาวะผู้นำหัวหน้าหน่วยงาน สมรรถนะการทำงาน / คุณภาพชีวิตการทำงานและ วัฒนธรรมองค์การ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสำเร็จของการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุนวิชาการ.

อังคณา ธนานุภาพพันธุ์ และคณะ (2564) ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน โดยอธิบายว่า ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานเป็นความสามารถของบุคลากรในการปฏิบัติงานให้บรรลุเป้าหมายขององค์กรอย่างมีคุณภาพ รวดเร็ว ถูกต้อง และเกิดความคุ้มค่าในการใช้ทรัพยากรขององค์กร ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสามารถของบุคลากรเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยเฉพาะการทำงานเป็นทีมและคุณภาพชีวิตการทำงาน ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านการทำงานเป็นทีมและคุณภาพชีวิตการทำงานมีอิทธิพลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะการมีเป้าหมายร่วมกัน การเปิดโอกาสให้บุคลากรแสดงบทบาทในการทำงานร่วมกัน การได้รับค่าตอบแทนที่เป็นธรรม ความก้าวหน้าและความมั่นคงในอาชีพ รวมทั้งการดำเนินงานขององค์กรที่แสดงถึงความรับผิดชอบต่อสังคม ซึ่งช่วยส่งเสริมให้บุคลากรสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและบรรลุเป้าหมายขององค์กร.

แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการ

Gulick และ Urwick (1937) ได้เสนอแนวคิดการบริหารที่เรียกว่า POSDCORB ซึ่งเป็นแนวคิดสำคัญในการบริหารองค์การ โดยอธิบายว่าหน้าที่ของผู้บริหารประกอบด้วยกิจกรรมหลัก7ประการ ได้แก่ การวางแผน(Planning)การจัดองค์การ (Organizing) การจัดบุคลากร (Staffing) การอำนวยการ(Directing)การประสานงาน (Coordinating) การรายงานผล (Reporting) และการจัดทำงบประมาณ(Budgeting) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีความสัมพันธ์กันและช่วยให้องค์กรสามารถดำเนินงานได้อย่างเป็นระบบและบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้.

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับทักษะความรู้ความสามารถการบริการ ตามทฤษฎีสมรรถนะ (Competency Theory) ของ Spencer และ Spencer (1993) อธิบายได้ว่า เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนที่มีความรู้เกี่ยวกับระเบียบและขั้นตอนการปฏิบัติงาน มีทักษะในการให้บริการ การใช้เทคโนโลยี และการสื่อสาร รวมทั้งมีความสามารถในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา จะสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการและความพึงพอใจของผู้รับบริการ ดังนั้น ด้านทักษะ ความรู้ และความสามารถ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัฒนธรรมองค์กร

Denison (1990) อธิบายได้ว่า วัฒนธรรมองค์กรที่ส่งเสริมการมีส่วนร่วมของบุคลากร มีค่านิยมและแนวปฏิบัติร่วมกัน สนับสนุนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลง และมีเป้าหมายการดำเนินงานที่ชัดเจน

จะช่วยให้เจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดความร่วมมือในการทำงาน มีการสื่อสารและประสานงานที่ดี และสามารถให้บริการได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และตอบสนองต่อความต้องการของผู้รับบริการได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น วัฒนธรรมองค์กรจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับบุคลากร แนวคิดการบริหารทรัพยากรมนุษย์ของ Dessler (2020) และทฤษฎีทุนมนุษย์ของ Becker (1964) สามารถอธิบายได้ว่า บุคลากรที่ได้รับการสรรหาและคัดเลือกอย่างเหมาะสม ได้รับการพัฒนาองค์ความรู้และทักษะอย่างต่อเนื่อง มีแรงจูงใจในการปฏิบัติงาน และได้รับการสนับสนุนจากองค์กร จะสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความรับผิดชอบ และให้บริการแก่ผู้รับบริการได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีคุณภาพ ดังนั้น ด้านบุคลากรจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับ ตามทฤษฎีระบบราชการ (Theory of Bureaucracy) ของ Weber (1947) อธิบายได้ว่า การปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนที่ยึดถือระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับของมหาวิทยาลัยและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง มีความเข้าใจในขั้นตอนการดำเนินงาน และปฏิบัติงานตามมาตรฐานที่กำหนด จะช่วยให้การให้บริการมีความถูกต้อง โปร่งใส รวดเร็ว และตรวจสอบได้ ลดความผิดพลาดในการดำเนินงาน และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้รับบริการ ดังนั้น ด้านระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

4. กรอบแนวคิด



5. วิธีดำเนินงาน

5.1 ประชากรที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาทั้ง 14 สาขา ภาคปกติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ทั้งหมดจำนวน 170 คน.

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดำเนินการในการสร้างแบบสอบถามเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บรวมรวมข้อมูล โดยในการออกแบบแบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้ออกแบบสอบถาม (Questionnaire) แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ ซึ่งเป็นข้อคำถามในลักษณะตรวจรายการ (Checklist) และเป็นคำถามปลายปิด (Close Ended Questionnaires)

ส่วนที่ 2 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิผลการเบิกจ่ายค่าสอน โดยมีองค์ประกอบ 5 ด้าน ประกอบด้วย ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ ด้านการบริหารจัดการ ด้านบุคลากร และด้านวัฒนธรรมองค์กร ข้อคำถามจะเป็นรูปแบบมาตราส่วนแบบ ประมาณค่า (Rating Scale) ใช้เกณฑ์การให้คะแนนตามแนวทางของ Likert (Likert Five's Rating Scale)

ส่วนที่ 3 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายค่าสอน ข้อคำถาม จะเป็นรูปแบบมาตราส่วนแบบประมาณค่า (Rating Scale) ใช้เกณฑ์การให้คะแนนตามแนวทางของ Likert (Likert Five's Rating Scale)

ส่วนที่ 4 เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับปัญหา อุปสรรคเกี่ยวกับการเบิกจ่าย จำนวน 1 ข้อ และคำถามเกี่ยวกับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม จำนวน 1 ข้อ ซึ่งเป็นคำถามปลายเปิด (Open ended Questionnaires) ให้ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสรเสรี

ในการตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability) ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (Try Out) กับอาจารย์ผู้สอนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน เพื่อตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบสอบถามทั้งฉบับมีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ **0.91** ซึ่งอยู่ในระดับดีเยี่ยม และเมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง **0.81–0.91** แสดงว่าแบบสอบถามมีความสอดคล้องภายในของข้อคำถามในระดับดี และมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลครั้งนี้

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

6.1 เพื่อให้ทราบระดับคุณภาพการให้บริการของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนการเบิกจ่ายเงินค่าสอน ตามความคิดเห็นของอาจารย์ผู้สอน.

6.2 เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพการให้บริการกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุน.

6.3 เพื่อใช้ผลการวิจัยเป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุงและพัฒนาการให้บริการด้านการเบิกจ่ายเงินค่าสอนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น.

6.4 เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้บริหารและผู้ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดแนวทางพัฒนาการบริหารงานสนับสนุน และใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต.

7. ผลการวิจัย

ผลข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ด้านเพศ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย มีจำนวน 122 คน คิดเป็นร้อยละ 71.76 รองลงมาเป็นเพศหญิง มีจำนวน 48 คน คิดเป็นร้อยละ 28.24 ด้านประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่มากกว่า 11 ปีขึ้นไป มีจำนวน 105

คน คิดเป็นร้อยละ 61.76 รองลงมามีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ตั้งแต่ 6 – 10 ปี มีจำนวน 32 คน คิดเป็นร้อยละ 18.82 มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ตั้งแต่ 1 – 5 ปี มีจำนวน 26 คน คิดเป็นร้อยละ 15.29 มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ต่ำกว่า 1 ปี มีจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 4.12

ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเบิกจ่ายค่าสอน โดยมีองค์ประกอบ 5 ด้าน ประกอบด้วย ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ ด้านการบริหารจัดการ ด้านบุคลากร และ ด้านวัฒนธรรมองค์กร.

ปัจจัยภายในที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเบิกจ่ายเงินค่าสอน	ค่าเฉลี่ย $\bar{x}$	S.D	ความสำคัญ
ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ	4.36	0.71	มากที่สุด
ด้านวัฒนธรรมองค์กร	4.04	0.93	มาก
ด้านการบริหารจัดการ	4.02	0.87	มาก
ด้านบุคลากร	3.72	0.92	มาก
ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ	3.61	0.99	มาก
ภาพโดยรวม	**3.94**	**0.69**	**มาก**

ปัจจัยภายในของภาพรวมในแต่ละด้าน พบว่า ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ มีความสำคัญอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.36 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.71 รองลงมาคือด้านวัฒนธรรมองค์กร มีความสำคัญอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.04 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.93 ด้านการบริหารจัดการ มีความสำคัญอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.02 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.87 ด้านบุคลากร มีความสำคัญอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.72 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.92 และ ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ มีความสำคัญอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.61 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.99 โดยจากภาพโดยรวมพบว่าความสำคัญอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.94 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.69

ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ เจ้าหน้าที่มีความกระตือรือร้นและใส่ใจในการทำงาน $\bar{x}$=4.46 และ S.D.=0.65 เจ้าหน้าที่เข้าใจระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับเกี่ยวกับการเบิกจ่ายเงิน $\bar{x}$= 4.34 และ S.D.=0.65 เจ้าหน้าที่มีความรู้และชำนาญเฉพาะด้านในการเบิกจ่ายเงิน $\bar{x}$=4.33 และ S.D.=0.65 เจ้าหน้าที่มีมนุษยสัมพันธ์ดีในการทำงานร่วมกับผู้อื่น $\bar{x}$=4.42 และ S.D.=0.69 เจ้าหน้าที่ดำเนินการเบิกจ่ายเงินให้เสร็จตามเป้าหมาย $\bar{x}$= 4.15 และ S.D.=0.80 เจ้าหน้าที่มีการติดตามงานอย่างสม่ำเสมอ $\bar{x}$=4.05 และ S.D.=0.83 ภาพรวมด้านทักษะ ความรู้ ความสามารถ มีค่าเฉลี่ย $\bar{x}$= 4.36 และ S.D.=0.71 ซึ่งจัดอยู่ในระดับมากที่สุด

ด้านวัฒนธรรมองค์กร เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องให้ความสำคัญกับการเบิกจ่ายเงินค่าสอนเป็นไปตามเป้าหมายโดยมุ่งหวัง ให้เกิดประโยชน์กับส่วนรวม $\bar{x}$=4.24 และ S.D.=0.85 เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องให้ความร่วมมือเพื่อให้การดำเนินการ จัดทำงบประมาณ การจัดซื้อจัดจ้าง และการเบิกจ่ายเงินค่าสอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ $\bar{x}$=4.14 และ

S.D.=0.88 เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องให้ความสำคัญในการปฏิบัติงาน ตามขั้นตอนกระบวนการเบิกจ่ายเงินค่าสอน $\bar{x}$=3.90 และ S.D.=1.04 เมื่อเกิดปัญหาและอุปสรรคที่เกี่ยวข้องกับการเบิกจ่ายเงินค่าสอน เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องร่วมกันแก้ไขปัญหาเพื่อให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนสำเร็จลุล่วง ถูกต้อง $\bar{x}$=3.89 และ S.D.=0.92 เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องมีความมุ่งหวังให้การดำเนินงาน ด้านการเบิกจ่ายเงินค่าสอนสำเร็จตามเป้าหมายและระยะเวลาที่กำหนด $\bar{x}$=3.83 และ S.D.=1.05 ภาพรวมด้านวัฒนธรรมองค์กร ค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ $\bar{x}$=4.04 และ S.D.=0.93 ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสำคัญมาก.

ด้านการบริหารจัดการ ผู้บริหารกล้าตัดสินใจในการดำเนินการต่าง ๆ และ สามารถแก้ไขปัญหาและความขัดแย้งในหน่วยงาน $\bar{x}$=3.86 และ S.D.=1.06 ผู้บริหารเร่งรัดและติดตามการเบิกจ่ายเงินค่าสอนอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอ $\bar{x}$=3.85 และ S.D.=0.94 ผู้บริหารให้ความสำคัญในการวางแผนการบริหารงบประมาณ และการเบิกจ่ายเงินค่าสอนให้มีประสิทธิภาพ ตามระเบียบ ที่เกี่ยวข้องอย่างเคร่งครัด $\bar{x}$=3.82 และ S.D.=0.87 ผู้บริหารมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ การเบิกจ่ายงบประมาณได้อย่างรวดเร็ว $\bar{x}$=3.70 และ S.D.=0.99 ภาพรวมด้านการบริหารจัดการค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ $\bar{x}$=4.02 และ S.D.=0.87 ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสำคัญมาก.

ด้านบุคคลากร มีการมอบหมายบุคลากรที่ปฏิบัติหน้าที่ด้านการเบิกจ่ายเงินค่าสอนได้อย่างเหมาะสมกับตำแหน่ง $\bar{x}$=4.02 และ S.D.=1.00 บุคลากรมีจำนวนที่เหมาะสมกับปริมาณงานด้านการเบิกจ่ายเงินค่าสอน $\bar{x}$=3.85 และ S.D.=0.88 บุคลากรได้รับการสนับสนุนในการพัฒนาตนเองในด้านที่เกี่ยวข้องกับการเบิกจ่ายเงินค่าสอนอย่างต่อเนื่อง $\bar{x}$=3.57 และ S.D.=1.12 ขั้นตอนในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนไม่มีความซับซ้อน $\bar{x}$=3.42 และ S.D.=**1.29** ภาพรวมด้านบุคคลากร ค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ $\bar{x}$=3.72 และ S.D.=0.92 ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสำคัญมาก.

ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ ระเบียบกฎหมาย และข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การเบิกจ่ายเงินค่าสอน เข้าใจง่าย และสามารถนำไปปฏิบัติงาน โดยไม่เกิดข้อผิดพลาด $\bar{x}$=3.68 และ S.D. = 0.99 ระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเบิกจ่ายเงินเหมาะสมกับการปฏิบัติงานในปัจจุบัน ทำให้การปฏิบัติงานสะดวกและรวดเร็ว $\bar{x}$=3.61 และ S.D.=1.16 หน่วยงานมีคู่มือและขั้นตอน แนวทางในการสนับสนุน การปฏิบัติงานด้านการเบิกจ่ายเงิน เพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการเบิกจ่ายเงินงบประมาณ$\bar{x}$=3.46 และ S.D.=1.22 ภาพรวมด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ ค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ $\bar{x}$=3.61 และ S.D.= 0.99 ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสำคัญมาก.

ส่วนที่ 3 การทดสอบสมมติฐานด้วยการหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปร

สมมติฐานที่ 1 ประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จำแนกตามประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่ พบว่า ค่าสถิติ F เท่ากับ 14.94 และมีค่าความน่าจะเป็น (Sig.) เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ($p < .05$) แสดงให้

เห็นว่า ผู้ตอบแบบสอบถามที่มีประสบการณ์ในการปฏิบัติหน้าที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปร	ทักษะความรู้ความสามารถการบริการ	ระเบียบกฎหมายข้อบังคับ	การบริหารจัดการ	บุคลากร	วัฒนธรรมองค์กร	ประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอน
ทักษะความรู้ความสามารถการบริการ	1	.693**	.523**	.514**	.437**	.586**
ระเบียบกฎหมายข้อบังคับ	.693**	1	.610**	.549**	.368**	.663**
การบริหารจัดการ	.523**	.610**	1	.362**	.308**	.455**
บุคลากร	.514**	.549**	.362**	1	.859**	.669**
วัฒนธรรมองค์กร	.437**	.368**	.308**	.859**	1	.520**
ประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอน	.586**	.663**	.455**	.669**	.520**	1

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ด้านทักษะความรู้ความสามารถในการบริการ จากการวิเคราะห์ พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.586, Sig. = 0.000) ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.586 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง และเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อบุคลากรมีทักษะ ความรู้ และความสามารถในการปฏิบัติงานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

ด้านระเบียบ กฎหมาย ข้อบังคับ มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จากการวิเคราะห์ พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.663, Sig. = 0.000) ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.663 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับมากและเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อบุคลากรมีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถปฏิบัติตามระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับที่เกี่ยวข้องกับการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน ประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

ด้านการบริหารจัดการ มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จากการวิเคราะห์ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.455, Sig. = 0.000) ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.455 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง และเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อการบริหารจัดการมีประสิทธิภาพมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านการวางแผน การกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงาน การประสานงาน การติดตาม และการควบคุมการดำเนินงาน ประสิทธิภาพการ

เบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

ด้านบุคลากร มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จากการวิเคราะห์พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.669, Sig. = 0.000) ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.669 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับมาก และเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อบุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ความรับผิดชอบ ความเพียงพอของกำลังคน และสามารถปฏิบัติงานตามบทบาทหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

ด้านวัฒนาธรรมองค์กร มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง จากการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยด้านวัฒนธรรมองค์กรมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.520, Sig. = 0.000) ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.520 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง และเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อองค์กรมีวัฒนธรรมที่ส่งเสริมการทำงานร่วมกัน การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ การยึดมั่นในกฎระเบียบ ความรับผิดชอบ และการมุ่งเน้นผลสัมฤทธิ์ในการปฏิบัติงาน ประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ.

8. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษาพบว่า ผู้ที่มีสบการณ์ในการปฏิบัติงานที่ที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (F = 14.94, p < .05) สะท้อนให้เห็นว่าประสบการณ์ในการปฏิบัติงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยพัฒนาความรู้ ความชำนาญ และทักษะในการดำเนินงาน ส่งผลให้เข้าใจในขบวนการปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และลดข้อผิดพลาดในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง ผลการศึกษาสอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์ของ Kolb (1984) ที่อธิบายว่าประสบการณ์ตรงช่วยเสริมสร้างการเรียนรู้และเพิ่มความสามารถในการปฏิบัติงาน รวมทั้งสอดคล้องกับแนวคิดด้านทุนมนุษย์ (Human Capital Theory) ของ Becker (1964) ซึ่งระบุว่าความรู้และทักษะที่สะสมจากประสบการณ์การทำงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ของการปฏิบัติงาน.

การศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านทักษะ ความรู้ และความสามารถการบริการ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.586) ความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่าเมื่อบุคลากรมีความรู้ ความเข้าใจ และทักษะในการปฏิบัติงานเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงมีความถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดของ Bloom (1956) ที่อธิบายว่าความรู้เป็นพื้นฐานของการพัฒนาทักษะและการปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับแนวคิด

สมรรถนะของ McClelland (1973) ที่ระบุว่าความรู้และทักษะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อผลสัมฤทธิ์ในการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุจิรา สาหา และคณะ (2564) ที่พบว่าการพัฒนาความรู้และการจัดการความรู้ของบุคลากรมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุนอย่างมีนัยสำคัญ.

การศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.663) ความสัมพันธ์อยู่ในระดับมาก แสดงให้เห็นว่า การที่บุคลากรมีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถปฏิบัติตามระเบียบที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง จะช่วยให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงเป็นไปอย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดระบบราชการของ Weber (1947) ที่ให้ความสำคัญกับการปฏิบัติงานภายใต้ระเบียบ กฎหมาย และข้อบังคับที่ชัดเจน เพื่อให้การดำเนินงานมีมาตรฐาน โปร่งใส และตรวจสอบได้ นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ นคเรศ ณ พัทลุง ที่พบว่า การปฏิบัติงานตามระเบียบและมาตรฐานที่กำหนดเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยยกระดับประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน.

การศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.455) ความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่า การบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ ทั้งด้านการวางแผน การกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงาน การประสานงาน การติดตาม และการควบคุมงาน มีส่วนช่วยให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงดำเนินไปอย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดของ Drucker (2006) ที่ให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการที่มุ่งผลสัมฤทธิ์และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การดำเนินงานบรรลุเป้าหมายขององค์กร.

การศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านบุคลากรมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (r = 0.669) ความสัมพันธ์อยู่ในระดับมาก แสดงให้เห็นว่า การมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ ความรับผิดชอบ และมีจำนวนเพียงพอต่อการปฏิบัติงาน ช่วยให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงเป็นไปอย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดการบริหารทรัพยากรมนุษย์ของ Dessler (2020) ที่อธิบายว่าการพัฒนาศักยภาพและการบริหารบุคลากรอย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานขององค์กร รวมทั้งสอดคล้องกับแนวคิดทุนมนุษย์ (Human Capital Theory) ของ Becker (1964) ที่ระบุว่าความรู้ ทักษะ และศักยภาพของบุคลากรเป็นทรัพยากรสำคัญที่ช่วยเพิ่มผลสัมฤทธิ์และประสิทธิภาพในการดำเนินงานขององค์กร.

การศึกษาพบว่า ปัจจัยด้านวัฒนธรรมองค์กรมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่

ระดับ .01 (r = 0.520) ความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่า วัฒนธรรมองค์กรที่ส่งเสริมการทำงานร่วมกัน การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ การยึดมั่นในระเบียบ และการมุ่งเน้นผลสัมฤทธิ์ มีส่วนช่วยให้การเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงเป็นไปอย่างถูกต้อง รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดวัฒนธรรมองค์กรของ Denison (1990) ที่อธิบายว่าวัฒนธรรมองค์กรที่เข้มแข็งและเอื้อต่อการมีส่วนร่วม ความสอดคล้องในการปฏิบัติงาน และการมุ่งสู่เป้าหมาย จะช่วยยกระดับประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กร และสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุจิรา สาหา และคณะ (2564) ที่พบว่าวัฒนธรรมองค์กรที่สนับสนุนการเรียนรู้และการทำงานร่วมกันส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน.

9. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

9.1 หน่วยงานควรส่งเสริมการพัฒนาความรู้และทักษะของเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง โดยจัดให้มีการอบรมเกี่ยวกับระเบียบ หลักเกณฑ์ และขั้นตอนการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริง รวมทั้งพัฒนาทักษะการใช้เทคโนโลยีและระบบสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มความถูกต้องและลดข้อผิดพลาดในการปฏิบัติงาน.

9.2 ควรปรับปรุงและทบทวนระเบียบ ขั้นตอน และแนวปฏิบัติในการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงให้มีความชัดเจน ทันสมัย และเข้าใจง่าย พร้อมทั้งจัดทำคู่มือหรือแนวปฏิบัติมาตรฐาน (Standard Operating Procedure: SOP) เพื่อใช้เป็นแนวทางเดียวกันในการ ปฏิบัติงาน.

9.3 ผู้บริหารควรพัฒนาระบบการบริหารจัดการที่สนับสนุนการปฏิบัติงาน เช่น การวางแผน การติดตามผล การประสานงาน และการนำระบบดิจิทัลมาใช้ในกระบวนการเบิกจ่าย เพื่อเพิ่มความรวดเร็ว ความถูกต้อง และลดขั้นตอนการดำเนินงาน.

9.4 หน่วยงานควรส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพของบุคลากร โดยจัดให้มีระบบพี่เลี้ยง (Mentoring) การถ่ายทอดองค์ความรู้จากผู้มีประสบการณ์ การแลกเปลี่ยนเรียนรู้ภายในหน่วยงาน และการพัฒนาสมรรถนะอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้บุคลากรสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

9.5 ควรส่งเสริมวัฒนธรรมองค์กรที่เน้นการทำงานเป็นทีม การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ ความรับผิดชอบ ความโปร่งใส และการเรียนรู้ร่วมกัน เพื่อสร้างบรรยากาศการทำงานที่เอื้อต่อการพัฒนาประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนตามจริงอย่างต่อเนื่อง.

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณบดี รองคณบดีฝ่ายวิชาการ และคณะผู้บริหารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้อนุมัติทุนให้ผู้วิจัยได้ทำวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเบิกจ่ายเงินค่าสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตามสัญญาเลขที่ ENG 13/68

อนึ่งผู้วิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชา และกัลยาณมิตรทุกท่านใน

ESTACON 2026 | 17th

สำนักงานในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตอบแบบสอบถาม การช่วยเหลือในด้านข้อมูลเพื่อใช้ในการอ้างอิงจนครบกระบวนการ และการให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี·

11.เอกสารอ้างอิง

[1] Chuchu Liang, Ben Lourie, Alexander Nekrasov และ Tonni Shijun Xia. (2025) . Too Much of a Good Thing? Administrative Support Staff and Firm Performance. *Journal of Accounting, Auditing & Finance* (OnlineFirst).

[2] Figueroa González et al. (2024). Management of Human Talent and Work Performance of Administrative Staff in Academia. *RAN – Revista Academia & Negocios*, Vol. 10(2), หน้า 210–221.

[3] นคเรศ ณ พัทลุง. (2554). ตัวแบบการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของบุคลากรสายสนับสนุนวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏ เขตกรุงเทพมหานคร. วารสารวิจัย มสด. สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2554 หน้า 49–57 DOI: 10.14456/sdu-human.2011.20.

[4] สุจิรา สาหา และคณะ. (2564). การจัดการความรู้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสายสนับสนุน มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.วารสารวิจัยรำไพพรรณี ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 (กันยายน–ธันวาคม 2564).

[5] ธนายุ ภู่วิทยาธร. (2561). วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต (2016): มกราคม - มิถุนายน 2559 – บทความวิจัย “ความสัมพันธ์ระหว่างความสมดุลของชีวิตกับประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของ บุคลากรโรงพยาบาลสุราษฎร์ธานี” ปีที่ 12 ฉบับที่ 1.

[6] อังคณา ธนานุภาพพันธุ์. (2564). ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากร กรณีศึกษาของบริษัทธุรกิจให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่แห่งหนึ่ง. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์.

[7] กรชนก เพิ่มคำ. (2563). ปัจจัยที่มีผลต่อกระสิทธิภาพการเบิกจ่ายงบประมาณของกรมทางหลวงสังกัดส่วนกลาง. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพ.

[8] Spencer, L. M., & Spencer, S. M. (1993). *Competence at Work: Models for Superior Performance*. New York: John Wiley & Sons.

[9] Gulick, L., & Urwick, L. (1937). *Papers on the Science of Administration*. New York: Institute of Public Administration.

[10] Denison, D. R. (1990). *Corporate Culture and Organizational Effectiveness*. New York: John Wiley & Sons.

[11] Becker, G. S. (1964). *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. New York: Columbia University Press.

[12] Dessler, G. (2020). *Human Resource Management* (16th ed.). Pearson.

[13] Weber, M. (1947). *The Theory of Social and Economic Organization*. Translated by A. M. Henderson & Talcott Parsons. New York: Oxford University Press.

[14] นริศ กระชังแก้ว. (2563). ปัจจัยที่ส่งผลต่อความภักดีในองค์กรของบริษัทประกันวินาศภัยแห่งหนึ่งในเขต กรุงเทพมหานคร. (ปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

[15] สุชาดา ใจซื่อ. (2560). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของผู้สูงอายุที่พักอาศัยในอาคารสูง กรุงเทพมหานคร [ปริญญาพยาบาลศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การพัฒนาสมรรถนะบัณฑิตนักปฏิบัติด้านวิศวกรรมระบบควบคุมผ่านการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานร่วมกับการประเมินผลแบบสมรรถนะ

Developing Practitioner Engineering Competencies through Project-Based Learning and Competency-Based Assessment in Control Systems Education

สุรินทร์ อ่อนน้อม[1], ทนงศักดิ์ มากทอง อนันตชัย โยนะพันธ์[1] อัตถ์ ศรีเนตร[2] และ ภากร นาคศรี[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [2] วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ surin.ah@rmuti.ac.th, โทร. 0866498850

บทคัดย่อ

รายวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม (03-407-503-203) ถูกออกแบบให้บูรณาการทฤษฎีและปฏิบัติในกรอบ Outcome-Based Education (OBE) โดยมีเป้าหมายให้นักศึกษาบรรลุผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับรายวิชา (CLOs) ครบทั้ง 7 ด้าน ซึ่งเชื่อมโยงสู่ PLO ของหลักสูตร งานวิจัยในชั้นเรียนนี้นำเสนอกรอบการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐาน (PBL) สำหรับนักศึกษา 17 คน (6 กลุ่ม) โดยใช้โครงงานระบบควบคุม PID ระดับน้ำในถังบูรณาการ Arduino Uno R3 HC-SR04 ปั๊มดีซี 24 โวลต์ และ LabVIEW เป็นแกนกลางของการนำทฤษฎีสู่การปฏิบัติ CLO1–CLO4 ด้านทฤษฎีวัดผลด้วยการสอบพบว่าค่าเฉลี่ยกลาง (Mean = 64.4% ± SD = 10.9% ผ่านเกณฑ์ 76.5%) และ CLO5–CLO7 ด้านปฏิบัติวัดผลด้วยรูบริก 7 ระดับ 5 มิติ ได้ Mean = 78.2% ± SD = 5.04% ผ่าน 100% ทั้งสองด้านร่วมกันผลักดันการบรรลุ PLO4 PLO5 และ PLO7 ตามหลัก Constructive Alignment ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลาเติมน้ำกับปริมาตรเป้าหมาย ($y = 3.53x + 4.83$, $R^2 = 0.964$ และ $p = 0.003$) ยืนยันความสอดคล้องกับ First-Order Tank Model ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการจัดการเรียนการสอนที่บูรณาการทฤษฎีและ PBL ภายใต้กรอบ Constructive Alignment สามารถพัฒนาบัณฑิตนักปฏิบัติที่บรรลุ CLO และ PLO ได้อย่างครบถ้วนในบริบทมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

คำสำคัญ บัณฑิตนักปฏิบัติ, โครงงานเป็นฐาน, PID Controller, Rubric 7 ระดับ, CLO/PLO, OBE, LabVIEW, Arduino

Abstract

Control Systems Engineering course (03-407-503-203) is designed to integrate theory and practice within an Outcome-Based Education (OBE) framework, targeting the attainment of all seven Course Learning Outcomes (CLOs) aligned with Program Learning Outcomes (PLOs). This classroom-based research presents a Project-Based Learning (PBL) framework for 17 students (6 groups), using a PID Water Tank Level Control project integrating Arduino Uno R3, HC-SR04 ultrasonic sensor, DC 24V pump, and LabVIEW as the bridge between theory and real implementation. Theory-based CLO1–CLO4 were assessed through examinations (Mean = 64.4%, SD = 10.9%, pass rate 76.5%), while practice-based CLO5–CLO7 were assessed using a seven-level analytic rubric covering five dimensions, yielding Mean = 78.2%, SD = 5.04%, pass rate 100%. Together, both assessment streams supported attainment of PLO4, PLO5, and PLO7 under the Constructive Alignment principle. The linear relationship between filling time and target volume ($y = 3.53x + 4.83$, $R^2 = 0.964$, $p = 0.003$) confirmed consistency with the first-order tank model. Findings demonstrate that theory-integrated PBL under a Constructive Alignment framework can develop practitioner engineers who achieve all CLOs and PLOs in the Rajamangala University of Technology context.

Keywords Practitioner Engineer, Project-Based Learning, PID Control, CLO/PLO, OBE, 7-Level Rubric, Constructive Alignment, LabVIEW, Arduino

1.บทนำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร. อีสาน) มีปรัชญาสถาบัน "เทคโนโลยีสู่ความเป็นเลิศ" และพันธกิจหลักในการผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติ (Practitioner Engineer) ที่สามารถนำทฤษฎีไปแก้ปัญหาวิศวกรรมจริงในภาคอุตสาหกรรมได้ [1] หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและหุ่นยนต์ประยุกต์จึงออกแบบให้ ผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับโปรแกรม (PLOs) ของนักศึกษาปีที่ 2 ครอบคลุมทักษะ การวิเคราะห์ระบบควบคุม การสร้างต้นแบบและการบูรณาการระบบ Hardware-Software อย่างไรก็ตาม ช่องว่างทางการสอนที่พบคือ การสอนวิชาวิศวกรรมระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ที่เน้นทฤษฎีและการคำนวณมักไม่เพียงพอต่อการพัฒนา Hands-on Competency [2] นักศึกษาสามารถคำนวณ Transfer Function ได้แต่ขาดประสบการณ์ใน การนำ Controller ที่ออกแบบไปใช้งานกับระบบจริง งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรอบ PBL ที่ใช้โครงงาน PID Water Tank Level Control เป็น โจทย์ปัญหาในการสร้างระบบควบคุมของเหลวตลอดภาคการศึกษา การมีส่วนร่วมหลักของงานวิจัยมี 3 องค์ประกอบหลัก ประกอบด้วย (1) กรอบ PBL 14 ใบงานที่จัดเรียงให้สอดคล้องกับเนื้อหาการสอนและการปฏิบัติ 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดผลลัพธ์การเรียนรู้ตาม CLO1 ผลักดันให้บรรลุ YLOs และ PLOs ของชั้นปีที่ 2 ตามปรัชญาบัณฑิตนักปฏิบัติ (2) หลักฐานเชิงประจักษ์จากการประยุกต์ใช้องค์ความรู้จากส่วนทฤษฎีและใบปฏิบัติงานเพื่อสร้างแบบจำลองระบบควบคุมของเหลวในที่นี้คือการสร้างระบบควบคุมการสอบน้ำเข้าถังและปล่อยน้ำออก และ (3) ตัวอย่าง Best Practice ของการผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติที่วัดผลได้จริงในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงงานเป็นฐาน (Project based Learning PBL) ในวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

Prince & Felder [2] พบว่า Active/Project-Based Learning พัฒนาทักษะการแก้ปัญหา และการทำงานเป็นทีมได้ดีกว่าการบรรยายแบบดั้งเดิม Kolmos et al. [3] ชี้ว่า โครงงาน Hardware-in-the-Loop บังคับให้นักศึกษาเผชิญข้อจำกัดของโลกจริง ซึ่งตรงกับเป้าหมาย "บัณฑิตนักปฏิบัติ" ของ มทร. อีสาน

2.2 รูบริค(Rubric) ในการประเมินโครงงานวิศวกรรม

Moskal [4] แสดงว่ารูคลิค หลายระดับให้ การสะท้อนผลการประเมินที่มีความหมายมากกว่าคะแนนรวม ช่วยให้นักศึกษาเข้าใจสมรรถนะที่ต้องพัฒนา Jonsson & Svingby [5] ยืนยันว่า Analytic Rubric เพิ่มความน่าเชื่อถือของ การประเมินโครงงานวิศวกรรมเมื่อเทียบกับการให้คะแนนแบบรวม

2.3 LabVIEW Arduino ในการศึกษาวิศวกรรมควบคุม

Stefanovic et al. [6] รายงานว่าห้องปฏิบัติการแบบ LabVIEW ช่วยให้นักศึกษาบรรลุผลลัพธ์การเรียนรู้และเข้าใจระบบควบคุมได้

ดีกว่าห้องปฏิบัติการแบบดั้งเดิม Gadia and Marcos [7] แสดงให้เห็นว่า Platform LabVIEW Arduino สามารถพัฒนาได้ด้วยต้นทุนประมาณ 1,200 บาทต่อชุด และยังคงประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับสร้างเป็นสื่อประกอบการสอนที่สามารถใช้งานได้จริง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บริบทการวิจัยและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างคือนักศึกษาปีที่ 2 สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะฯ จำนวน 17 คน (ชาย 14 คน หญิง 3 คน) ที่ลงทะเบียน รายวิชา 03-407-503-203 ซึ่งเป็นรายวิชาทฤษฎี ภาคการศึกษา 2/2568 แบ่งเป็น 6 กลุ่มๆละ 3 คนและมีหนึ่งกลุ่มที่มี 2 คน โดยคำนึงถึงความหลากหลายทักษะโดยมีทั้งนักศึกษาที่สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาและผู้สำเร็จการศึกษาสายวิชาชีพระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ แต่ละกลุ่มสร้างระบบควบคุม PID Water Tank ของตนเอง

ตารางที่ 1 การ Align CLOs กับ PLOs ตามหลัก OBE (รายวิชา 03-407-503-203)

CLO	PLO	ระดับ Bloom	วิธีวัด	สมรรถนะ
CLO1	PLO1	Understand	สอบ	อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลตอบสนองพลวัต
CLO2	PLO1	Apply	สอบ	คำนวณ Transfer Function และ Block Diagram
CLO3	PLO4	Analyze	สอบ + โครงงาน	วิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวชดเชย
CLO4	PLO3,4	Evaluate	สอบ + โครงงาน	ประเมิน Step Response ของระบบ 1st/2nd Order
CLO5	PLO5	Apply	โครงงาน (Rubric)	ประยุกต์ LabVIEW + Arduino พัฒนาระบบควบคุม
CLO6	PLO6	Create	โครงงาน + นำเสนอ	ออกแบบและพัฒนาโครงงาน PID พร้อมนำเสนอ
CLO7	PLO7	Evaluate	สังเกตการณ์	แสดงทีมงาน จรรยาบรรณ และสื่อสารวิศวกรรม

3.2 ออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมของเหลว

จากรูปที่ 1 ระบบควบคุมของเหลวแบบ PID ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ (1) HC-SR04 วัดระยะความสูงน้ำในรูปแบบความจุมีหน่วยเป็นลูกบาศก์ลิตร (2) Arduino Uno R3 Interface ผ่าน LINX Firmware (USB Serial 115200 bps) (3) LabVIEW PID Toolkit แสดงการเขียนโปรแกรมในรูปที่ 2 [8]

$$H = \left(\frac{1}{A}\right) \int (q_{in} - q_{out})\, dt \quad (1)$$

$$qout = a \times \sqrt{2gh} \quad (2)$$

A คือพื้นที่หน้าตัดของถังของเหลว

H คือระดับความสูงของน้ำ

q คือปริมาตรน้ำ

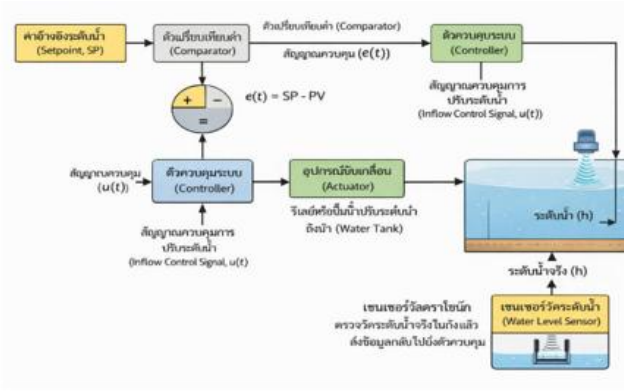
g คือแรงดึงดูดของโลก

สมการควบคุมของตัวควบคุม *PID* คือ

$$\boldsymbol{m_{PID(t)} = Kp\, e(t) + Kp\, Ki \int e(t)dt + Kp\, Kd \left(\frac{de(t)}{dt}\right)} \quad (3)$$

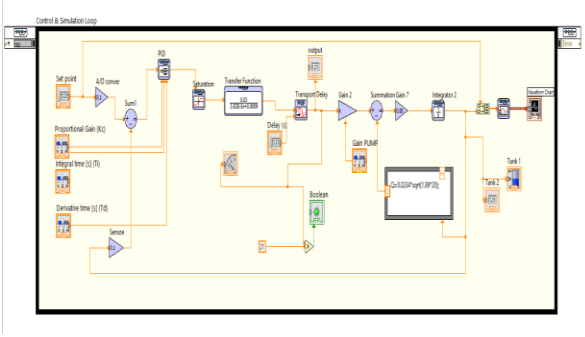
$$\boldsymbol{M_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_j s} + T_d s\right)} \quad (4)$$

ค่าขาออกของตัวควบคุม *PID* ในรูปของการแปลงลาปลาซสามารถนำสมการมาเขียนโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2 (4) รีเลย์ 5 โวลต์ สั่งปั๊ม ZYW680 ขนาด 24 โวลต์ และ (5) แหล่งจ่ายไฟตรง 24 โวลต์ แสดงภาพการเขียนโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์ ปั๊มน้ำ เพื่อให้ได้ระดับน้ำตรงกับค่าอินพุตที่กำหนดและแสดงผลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำแบบเรียลไทล์ในรูปที่ 3 และในรูปที่ 4 แสดงค่าจอกราฟฟิกเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน และภาพชิ้นงานจริงแสดงในรูปที่ 5 ตามลำดับ

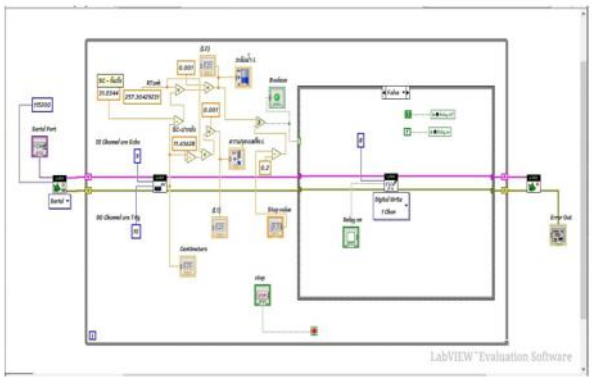


รูปที่ 1 บล็อคไดอะแกรมระบบ Closed-loop PID Water Tank Level Control

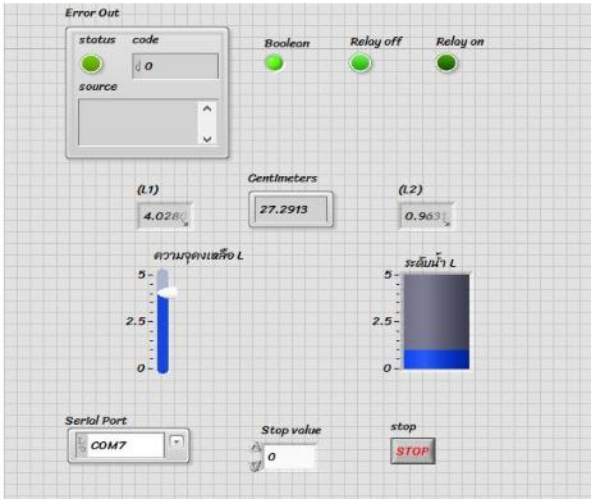
LabVIEW VI ที่พัฒนาขึ้นทำงานใน While Loop Rate = 100 ms ประกอบด้วย LINX Ultrasonic Distance VI (TrigD9, EchoD8) การแปลงค่าเป็น Water Level (cm) PID Toolkit VI (Output 0–100% PWM) และใช้ LINX Digital Write ควบคุม Relay และ Waveform Chart แสดงผลเรียลไทม์



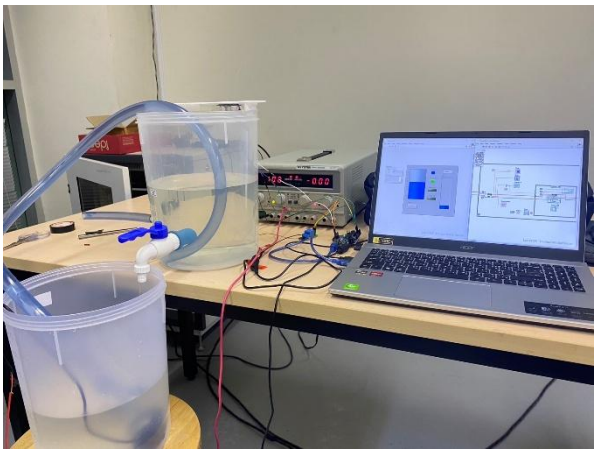
รูปที่ 2 โปรแกรม PID ควบคุมระดับน้ำในถัง



รูปที่ 3 โปรแกรมเชื่อมต่อเซนเซอร์และควบคุมปั๊มน้ำ



รูปที่ 4 หน้าต่างกราฟฟิกแสดงผลแบบเรียลไทม์



รูปที่ 5 ชิ้นงานจริง

4. การออกแบบการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน (1) ทดสอบความแม่นยำ HC-SR04 โดยวัดปริมาตรน้ำที่ 1–5 ลิตร ซ้ำ 5 ครั้งต่อระดับ เปรียบเทียบกับค่า Reference วัดด้วยกระบอกตวงมาตรฐานคำนวณ

% Error = |ค่าวัด – ค่าจริง| / ค่าจริง × 100 (2) ทดสอบ Response ของ Closed-loop PID Control วัด Rise Time Settling Time และ Steady-state Error ที่ Setpoint 1–5 ลิตร

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 ความแม่นยำของเซนเซอร์ HC-SR04

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบความแม่นยำ HC-SR04 จำนวน 5 ระดับ (n = 5 ครั้ง/ระดับ) ค่า Mean % Error รวม = 1.60% (SD = 1.11%) ตามมาตรฐานที่ยอมรับในงานวิจัยด้านเซนเซอร์อัลตราโซนิก ค่า % Error ที่ยอมรับได้สำหรับงานควบคุมระดับของเหลวในบริบทการศึกษาคือต่ำกว่าร้อยละ 5 [12, 13] ซึ่งสอดคล้องกับ Datasheet ของ HC-SR04 ที่ระบุความแม่นยำ ±3 mm ในระยะ 2–400 เซนติเมตร ดังนั้น Mean % Error = 1.60% จึงอยู่ภายในเกณฑ์ที่ยอมรับ (Error < 5%) และสอดคล้องกับค่า Steady-state Error < 5% ที่ทุกกลุ่มทดลองทำได้จริง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความแม่นยำ HC-SR04 (n = 5 ครั้ง/ระดับ)

ปริมาตรอ้างอิง (ลิตร)	ค่าเฉลี่ยวัดได้ (ลิตร)	% Error
1.00	0.99	1.00%
2.00	2.06	3.00%
3.00	2.98	0.67%
4.00	3.97	0.75%
5.00	4.87	2.60%
เฉลี่ยรวม	—	1.60% (SD = 1.11%)

5.2 เวลาเติมน้ำ Regression Analysis และ First-Order Tank Model

ตารางที่ 3 แสดงเวลาเฉลี่ยในการเติมน้ำแต่ละระดับพร้อม SD การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นได้สมการ

$$y = 3.53x + 4.83$$

($R^2 = 0.964$, $r = 0.982$, $p = 0.003$)

โดยที่ y คือค่าเวลาเติมน้ำ (วินาที) และ x คือค่า ปริมาตรเป้าหมาย (ลิตร) ค่า SD = 1.08 วินาที กระจายแบบสุ่มรอบศูนย์ ยืนยันความเหมาะสมของ Linear Model ค่า p = 0.003 แสดงว่าความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 3 เวลาเฉลี่ยการเติมน้ำแต่ละระดับพร้อมค่าทำนายและ Residual (n = 5 ครั้ง)

เป้าหมาย (L)	เวลาเฉลี่ย (s)	SD (s)	ค่าคำนวณ (s)	Residual (s)
1	9.60	2.08	8.36	+1.24
2	10.30	0.58	11.89	−1.59
3	15.00	1.00	15.42	−0.42
4	19.60	1.53	18.95	+0.65
5	22.60	1.15	22.48	+0.12

จากตารางที่ 3 พบว่า สมการ (1) และ (2) First-Order Tank Model เมื่อ qin มีค่า คงที่ (ปั๊มทำงานที่ PWM คงที่) และพื้นที่หน้าตัดถัง A คงที่ ดังนั้น dV/dt = qin มีค่าคงที่ จึงได้ t_fill = Vtarget / qin ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ใน Laplace Domain สอดคล้องกับ Integrating Plant G(s) = K/s

5.3 การบรรลุ CLO ด้านทฤษฎีและปฏิบัติ (OBE Assessment Evidence)

ตารางที่ 4 สรุปผลการบรรลุ CLO ครบทั้ง 7 ด้าน แบ่งเป็น 2 กลุ่มตามประเภทการประเมินที่สอดคล้องกับ Constructive Alignment ด้านทฤษฎี (CLO1 – CLO4) วัดผลด้วยการสอบ และด้านปฏิบัติ (CLO5 – CLO7) วัดผลด้วยรูบริกโครงงาน

ตารางที่ 4 ผลการบรรลุ CLO ด้านทฤษฎีและปฏิบัติ (n = 17) พร้อมการเชื่อมโยงสู่ PLO

CLO	กลุ่ม	วิธีวัด	Mean (%)	SD (%)	ผ่าน (%)	PLO
CLO1	ทฤษฎี	สอบกลางภาค + ปลายภาค	64.4	10.9	76.5	PLO1
CLO2	ทฤษฎี	สอบกลางภาค + ปลายภาค	64.4	10.9	76.5	PLO1
CLO3	ทฤษฎี+ ปฏิบัติ	สอบปลายภาค + โครงงาน	79.3	5.0	100	PLO4
CLO4	ทฤษฎี+ ปฏิบัติ	สอบปลายภาค + โครงงาน	79.3	5.0	100	PLO3, PLO4
CLO5	ปฏิบัติ	โครงงาน PID (Rubric)	78.2	5.04	100	PLO5
CLO6	ปฏิบัติ	โครงงาน + นำเสนอ	78.2	5.04	100	PLO6
CLO7	ปฏิบัติ	สังเกตการณ์ + กลุ่ม	สอดคล้อง	—	100	PLO7

ผลที่สำคัญ CLO5–CLO7 ด้านปฏิบัติบรรลุ 100% (70–88%) ยืนยันว่า PBL ที่ผนวกกับทฤษฎีช่วยพัฒนาสมรรถนะที่วัดผลผ่านรูบริกได้ ขณะที่ CLO1–CLO4 ด้านทฤษฎีมีค่าเฉลี่ย 64.4% ± 10.9% (ผ่าน 76.5%) แสดงให้เห็นว่านักศึกษาบางส่วนยังต้องพัฒนาสมรรถนะทางทฤษฎีให้มากขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณที่ชี้แนะการปรับปรุงการออกแบบการสอนในภาคการศึกษาถัดไป ทั้งสองกลุ่มร่วมกันผลักดันการบรรลุ PLO4 (ออกแบบระบบควบคุม), PLO5 (สร้างต้นแบบนวัตกรรม) และ PLO7 (สื่อสารวิศวกรรม) ตามกรอบ OBE

5.4 การบรรลุสมรรถนะบัณฑิตนักปฏิบัติ

จากการสังเกตในห้องปฏิบัติการและการประเมินรูบริก พบว่า (1) ทุกกลุ่ม (6/6) สาธิตการควบคุมระดับน้ำที่ Setpoint ได้จริง Steady-state Error < 5% (2) 5 จาก 6 กลุ่มสร้าง VI ที่แสดงผล Water Level Real-time พร้อม PID Control Output Graph (3) 4 จาก 6 กลุ่มนำเสนอผลการเปรียบเทียบ P/PI/PD/PID Response อย่างละเอียด (4) นักศึกษาที่ได้คะแนนสูงสุด (88%) สามารถอธิบายหลักการ Integral และ Derivative ได้ แสดงว่า PBL ช่วยพัฒนาความเข้าใจในทฤษฎีที่เรียนมาที่สามารถมาประยุกต์ใช้ออกแบบระบบการควบคุมการเติมน้ำที่อยู่ในเกณฑ์ระบบควบคุมอัตโนมัติ สอดคล้องกับเป้าหมาย Constructive Alignment ที่กิจกรรมปฏิบัติย้อนกลับมาเสริมทฤษฎี

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในชั้นเรียนนี้แสดงให้เห็นว่า รายวิชาที่ออกแบบให้ทฤษฎีและ PBL ทำงานร่วมกันภายใต้กรอบ Constructive Alignment สามารถพัฒนาบัณฑิตนักปฏิบัติของ มทร.อีสาน ที่บรรลุ CLO ครบทั้ง 7 ด้านและเชื่อมสู่ PLO ตามหลัก OBE ได้อย่างมีหลักฐานเชิงประจักษ์

ด้านที่ 1 CLO ด้านปฏิบัติบรรลุ 100% CLO5–CLO7 ทุกคน (17/17) ผ่านในช่วง 70–88% โดยมีค่าเฉลี่ย 78.2% ± 5.04% ผลักดัน PLO4, PLO5 และ PLO7 อย่างเป็นรูปธรรม รูบริก 7 ระดับ เป็นเครื่องมือวัดสมรรถนะที่การสอบข้อเขียนวัดไม่ได้

ด้านที่ 2 CLO ด้านทฤษฎีมีช่องว่างในการปรับปรุงกระบวนการสอนและวัดผลเพื่อบรรลุ

CLO1–CLO4 ค่าเฉลี่ยโดยร่วมอยู่ที่ 64.4% ± 10.9% (ผ่านเพียง 76.5%) เป็นหลักฐานสำคัญที่ชี้ให้ทีมวิจัยปรับปรุง TLA ด้านทฤษฎี เช่น เพิ่มโจทย์ตัวอย่างที่แสดงขั้นตอนวิธีการแก้โจทย์อย่างละเอียดเพิ่มจำนวน Quiz ระหว่างภาคการศึกษา การสร้างระบบ AI ผู้ช่วยในการอธิบายโจทย์และวิธีการแก้ปัญหาโจทย์

ด้านที่3 ต้นทุนคุ้มค่า โดยต้นทุนชุดทดลองต่อกลุ่มประมาณ 1,200 บาท และเป็นต้นแบบการสอนที่สร้างตัวอย่างฮาร์ดแวร์จากทฤษฎีเพื่อให้รายวิชาอื่นใน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. (2565). แผนยุทธศาสตร์การพัฒนามหาวิทยาลัย พ.ศ. 2566–2570. นครราชสีมา มทร.อีสาน.

[2] Prince, M. J. and Felder, R. M. (2006). Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. J. Eng. Educ., 95(2), 123–138.

[3] Kolmos, A., Fink, F. K., and Krogh, L. (2004). The Aalborg PBL Model: Progress, Diversity and Challenges. Aalborg University Press.

[4] Moskal, B. M. (2000). Scoring rubrics What, when and how? Practical Assessment, Research & Evaluation, 7(3).

[5] Jonsson, A. and Svingby, G. (2007). The use of scoring rubrics. Educational Research Review, 2, 130–144.

[6] Stefanovic, M. et al. (2011). A LabVIEW-based remote laboratory. Computer Applications in Engineering Education, 19(3), 538–549.

[7] Gadia, R. G. and Marcos, R. V. (2025). A cost-effective LabVIEW-Arduino framework. IJIET, 15(8), 1584–1596.

[8] Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering. 5th ed. Prentice Hall.

[9] Biggs, J. and Tang, C. (2011). Teaching for Quality Learning at University. 4th ed. Open University Press.

[10] Åström, K. J. and Hägglund, T. (2006). Advanced PID Control. ISA Society.

[11] Gratchev, I. (2023). Replacing exams with project-based assessment. Education Sciences, 13(4), 408.

[12] Mohamad, M. et al. (2022). HC-SR04 Sensor Application in Liquid Level Monitoring. Journal of Physics: Conference Series.

[13] Singh, V. & Kaur, P. (2023). Ultrasonic level sensor performance in educational control labs.IJECE,13(2),1456–1465

การจัดการเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐานตามแนวคิด CDIO เพื่อพัฒนาสมรรถนะด้านจลนศาสตร์หุ่นยนต์ของนักศึกษาวิศวกรรม

CDIO-Based Project-Based Learning for Developing Robot Kinematics Competencies in Engineering Students

สุรินทร์ อ่อนน้อม[1], อนันตชัย โยนะพันธ์[1],นพดล พานงูเหลือม[1], ภากร นาคศรี[2],อัตถ์ ศรีเนตร[2] และ ทนงศักดิ์ มากทอง[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [2] วิทยาลัยนวัตกรรมวิชาชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ surin.ah@rmuti.ac.th, โทร. 0866498850

บทคัดย่อ

ช่องว่างระหว่างทฤษฎีกลศาสตร์วิศวกรรมกับทักษะปฏิบัติในนักศึกษาปีที่ 1 เป็นปัญหาเชิงระบบที่ส่งผลต่อคุณภาพบัณฑิตวิศวกรรมหุ่นยนต์ในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา งานวิจัยนี้นำเสนอและตรวจสอบเชิงประจักษ์กรอบ Project-Based Learning (PBL) 15 สัปดาห์ในรายวิชา 03-407-502-105 กลศาสตร์พื้นฐานสำหรับวิศวกรรมหุ่นยนต์ ซึ่งบูรณาการสี่ส่วนประกอบหลักตามวงจร CDIO ได้แก่ (1) แพลตฟอร์ม EEZYbotARM Mk2 แบบ Open-source โดย Carlo Franciscone (2) การผลิตชิ้นส่วนด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3) อัลกอริทึม FK/IK แบบ Closed-form ตาม Modified DH Proximal Method โดยไม่ต้องใช้การวนซ้ำเชิงตัวเลข และ (4) การเขียนโปรแกรมด้วย LabVIEW 2022 Q3 บน Arduino Uno R3 การตรวจสอบเบื้องต้น (Preliminary Validation) ของแบบจำลอง FK แสดงความคลาดเคลื่อนของพิกัดปลายแขนกล ≤2 mm เมื่อเทียบกับแบบจำลอง SolidWorks ภายใต้สภาวะ Manufacturing Tolerance ของชิ้นส่วน FDM โครงสร้างการประเมินภาคปฏิบัติ 60% ด้วยรูบริก 7 ระดับ และต้นทุนการสร้างต่ำกว่า 1,200 บาทต่อชุด เป้าหมายผลการเรียนรู้รายวิชา (CLOs) ทั้ง 7 ด้านกำหนดไว้ที่ร้อยละ 70–80 ซึ่งรายงานผลการวัดจริงจากนักศึกษาในฉบับสมบูรณ์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากรอบ PBL นี้ออกแบบให้ CLOs ทั้ง 7 สอดคล้องกับ PLOs ตามมาตรฐาน OBE และฮาร์ดแวร์เชิงพาณิชย์ต้นทุนต่ำสามารถขับเคลื่อนการศึกษาวิศวกรรมหุ่นยนต์คุณภาพสูง

คำสำคัญ: การเรียนรู้แบบโครงงานเป็นฐาน; จลนศาสตร์หุ่นยนต์; ระเบียบวิธีเดนาวิต-ฮาร์เทนเบิร์ก; การพิมพ์ 3 มิติ; LabVIEW; Arduino; การจัดการศึกษามุ่งเน้นผลลัพธ์ (OBE); EEZYbotARM

Abstract

The gap between engineering mechanics theory and practical skill development among first-year students is a systemic issue affecting robotics engineering graduate quality in developing-country contexts. This study presents and evaluates a 15-week CDIO-aligned Project-Based Learning (PBL) framework implemented in course 03-407-502-105, Fundamental Mechanics for Robotics Engineering, integrating four core components: (1) the open-source EEZYbotARM Mk2 platform by Carlo Franciscone, (2) FDM 3D-printed part fabrication, (3) closed-form FK/IK algorithms based on the Modified Denavit-Hartenberg Proximal Method — eliminating numerical iteration — and (4) LabVIEW 2022 Q3 programming on an Arduino Uno R3. Preliminary FK validation yields end-effector position errors ≤2 mm relative to SolidWorks simulation, attributable to FDM manufacturing tolerances. A 60% practical weighting assessed via a 7-level holistic rubric, combined with a per-unit build cost under 1,200 THB, demonstrates feasibility for resource-constrained institutions. All seven Course Learning Outcomes target 70–80% achievement, with full empirical data from student cohorts to be reported in the complete study. The framework is designed so that all seven CLOs align with Programme Learning Outcomes (PLOs) under OBE standards, establishing that low-cost commodity hardware can drive high-quality robotics engineering education.

Keywords: Project-Based Learning; Robot Kinematics; Denavit-Hartenberg; 3D Printing; LabVIEW · Arduino; OBE; EEZYbotARM.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติ (Automation Industry) ของไทยเติบโตสอดคล้องกับนโยบาย Thailand 4.0 และ Eastern Economic Corridor (EEC) ก่อให้เกิดความต้องการวิศวกรที่มีทักษะบูรณาการทั้งกลศาสตร์เชิงกล การเขียนโปรแกรม และจลนศาสตร์หุ่นยนต์อย่างเร่งด่วน รายงานของ World Economic Forum (WEF) [1] ระบุว่า การคิดเชิงวิเคราะห์ (Analytical Thinking) และการใช้เทคโนโลยี (Technology Use) เป็นทักษะอันดับ 1–2 ของแรงงานยุคใหม่ อย่างไรก็ตาม นักศึกษาวิศวกรรมชั้นปีที่ 1 มักขาดสะพานเชื่อมระหว่างทฤษฎีสถิตยศาสตร์กับการประยุกต์ใช้งานจริง [4]

ผลงานวิจัยดังกล่าวพบว่า PBL ยกระดับการเรียนรู้เชิงลึกและทักษะการแก้ปัญหาซับซ้อน [10] แต่ส่วนใหญ่ขาดการประเมินสมรรถนะบูรณาการ งานนี้จึงนำเสนอกรอบ PBL 15 สัปดาห์ที่บูรณาการ (1) เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) (2) ระเบียบวิธี Modified Denavit-Hartenberg (DH) แบบ Proximal สำหรับแขนกล EEZYbotARM 4 แกน (Degree of Freedom DOF) และ (3) LabVIEW/Arduino พร้อมโครงสร้างการประเมินตามการศึกษาโดยมุ่งผลลัพธ์ (Outcome-Based Education OBE) ที่เชื่อมผลลัพธ์การเรียนรู้ (Course Learning Outcomes CLOs) กับผลลัพธ์หลักสูตร (Program Learning Outcomes PLOs) โดยกำหนดแผนการสอน

(1) แผนบูรณาการ PBL 15 สัปดาห์ตามกรอบ Conceive-Design-Implement-Operate (CDIO) เชื่อม CLOs 7 ข้อ กับ PLOs ตามมาตรฐาน OBE

(2) การส่งมอบจลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics FK) และจลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics IK) แบบ Closed-form แก่นักศึกษาชั้นปีที่ 1 สำเร็จโดยไม่ต้องอาศัยการวนซ้ำเชิงตัวเลข

(3) โครงสร้างการประเมินภาคปฏิบัติ 60% โดยใช้การแข่งขันหุ่นยนต์ (Robot Competition) เป็นตัววัดสมรรถนะบูรณาการ

(4) ต้นทุน พิสูจน์ความเป็นไปได้สำหรับต้นแบบสื่อการสอนต้นทุนต่ำ

2. ทบทวนวรรณกรรม

Krajcik & Shin [10] พบว่า PBL ยกระดับการเรียนรู้เชิงลึกและทักษะการแก้ปัญหา แต่ Helle et al. [4] โดยชี้ว่างานส่วนใหญ่ขาดการประเมินสมรรถนะบูรณาการ Craig [5] วางรากฐาน DH Convention แต่งานส่วนใหญ่สอน DH เฉพาะชั้นปีที่ 3–4 [6] แสดงว่า EEZYbotARM ที่มีกลไก Parallelogram Linkage ลดสมการ 3 มิติเหลือสามเหลี่ยม 2 มิติ ทำให้นักศึกษาปีที่ 1 เข้าถึงได้ Gadia & Marcos [7] และ Coelho et al. [8] รายงานว่า LabVIEW/Arduino ลดภาระทางปัญญา (Cognitive Load) ด้านไวยากรณ์ (Syntax) ทำให้นักศึกษาเน้นที่ตรรกะการควบคุม (Control Logic) IEEE Xplore [2, 9] ยืนยันศักยภาพของแขนกลราคาประหยัดในการศึกษาวิศวกรรม ตารางที่ 1 สรุปช่องว่างและการเติมเต็มของงานนี้

ตารางที่ 1 แนวทางวิจัย

ช่องว่าง	แนวคิดทำวิจัย
DH/FK/IK สำหรับปีที่ 1	Geometric Reduction EEZYbotARM Mk2 Mk3
วัดสมรรถนะบูรณาการ	การแข่งขันหุ่นยนต์
งบประมาณต่ำ	แพลตฟอร์ม Open-source
กรอบ OBE ที่ตรวจสอบได้	ตาราง CLOs และ PLOs

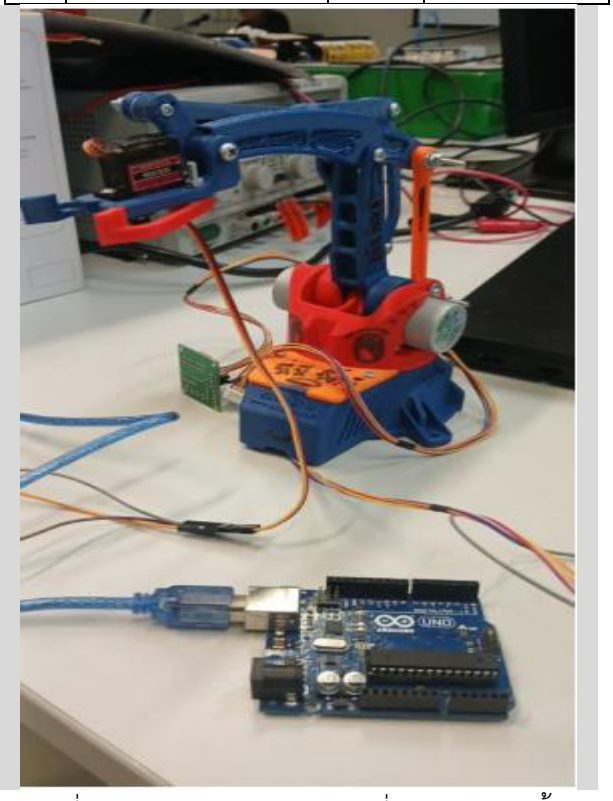
3. ระเบียบวิธีวิจัยและการออกแบบรายวิชา

3.1 สถาปัตยกรรมการเรียนรู้ PBL

รายวิชา 3 หน่วยกิต (บรรยาย 2 + ปฏิบัติ 3 ชั่วโมง/สัปดาห์) ออกแบบตามกรอบ OBE และวงจร Conceive-Design-Implement-Operate (CDIO) มีโครงงาน EEZYbotARM Mk2 Mk3 เป็น ต้นแบบเพื่อถอดสู่ภาคปฏิบัติตลอด 15 สัปดาห์ กลุ่มเป้าหมายคือนักศึกษาปีที่ 1 สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและหุ่นยนต์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2569 รูปที่ 1 แสดงแขนกลที่ใช้เป็นแพลตฟอร์มหลัก ตารางที่ 2 แสดงแผน 17 สัปดาห์ตามวงจร CDIO ทุกกิจกรรมเชื่อมโยงกับ CLOs ตามแนวทาง Constructive Alignment [10]

ตารางที่ 2 แผนการสอน 17 สัปดาห์ตามวงจร CDIO และ CLOs

สป.	กิจกรรม PBL / CDIO	CLOs	เครื่องมือ
1–2	[Conceive] วิเคราะห์เวกเตอร์/แรง, Teardown EEZYbotARM, จัดทำรายการวัสดุ (BOM)	1, 6	CAD+BOM
3–4	[Design] วิเคราะห์โครงสร้าง จุดศูนย์ถ่วง พิมพ์ 3 มิติชิ้นส่วน	1, 6	FDM, Cura
5–7	[Design] คำนวณแรงบิด เลือกมอเตอร์ ประกอบโครงสร้าง ทางกล	2,3,5,7	Servo Spec
8–9	เสนอความก้าวหน้า สอบกลางภาค	1–3	Rubrics
10–12	[Implement] พัฒนา FK/IK ใน LabVIEW + Arduino	4	LabVIEW
13–14	[Operate] ทดสอบ Payload การชดเชยความคลาด เคลื่อน Safety	5, 7	Load Cell
15–17	[Operate] รายงาน การแข่งขันหุ่นยนต์ สอบปลายภาค	3–5,7	Competition



รูปที่ 1 แขนกล EEZYbotARMที่ประกอบจากชิ้นส่วนพิมพ์ 3 มิติและชุดอิเล็กทรอนิกส์ Arduino/PCA9685

ตารางที่ 2 แผนการสอน 17 สัปดาห์ตามวงจร CDIO และ CLOs

สป.	กิจกรรม PBL / CDIO	CLOs	เครื่องมือ
1–2	[Conceive] วิเคราะห์เวกเตอร์/แรง, Teardown EEZYbotARM, จัดทำรายการวัสดุ (BOM)	1, 6	CAD+BOM
3–4	[Design] วิเคราะห์โครงสร้าง จุดศูนย์ถ่วง พิมพ์ 3มิติชิ้นส่วน	1, 6	FDM, Python
5–7	[Design] คำนวณแรงบิด เลือกมอเตอร์ ประกอบโครงสร้าง ทางกล	2,3,5,7	Servo Spec
8–9	เสนอความก้าวหน้า สอบกลางภาค	1–3	Rubrics
10–12	[Implement] พัฒนา FK/IK ใน LabVIEW + Arduino	4	LabVIEW
13–14	[Operate] ทดสอบ Payload การชดเชยความคลาด เคลื่อน Safety	5, 7	Lab Test
15–17	[Operate] รายงาน การแข่งขันหุ่นยนต์ สอบปลายภาค	3–5,7	Competition

3.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ไปข้างหน้า

ซึ่งการออกแบบใช้งาน Modified DH Proximal Convention [6] พารามิเตอร์ DH แสดงในตารางที่ 3 เมทริกซ์การแปลงเอกพันธุ์ (Homogeneous Transformation Matrix) ${}^{0}T_{4} = {}^{0}T_{1}\cdot{}^{1}T_{2}\cdot{}^{2}T_{3}\cdot{}^{3}T_{4}$ ให้สมการตำแหน่งปลายแขนกล (End-Effector:ee)

$$x\_ee = \cos(\theta_1)\cdot[\cos(\theta_2+\theta_3)\cdot L_3 + \cos(\theta_2)\cdot L_2] \quad .(1)$$

$$y\_ee = \sin(\theta_1)\cdot[\cos(\theta_2+\theta_3)\cdot L_3 + \cos(\theta_2)\cdot L_2] \quad (2)$$

$$z\_ee = L_1 + \sin(\theta_2)\cdot L_2 + \sin(\theta_2+\theta_3)\cdot L_3 \quad (3)$$

3.3 แบบจำลองจลนศาสตร์ผกผัน

กลไก Parallelogram Linkage ลด IK สามมิติ 4 ตัวแปร เหลือสามเหลี่ยมสองมิติ 3 ตัวแปร ซึ่งนักศึกษาปีที่ 1 แก้ได้ด้วยกฎโคไซน์และ atan2 เพียงอย่างเดียว ขั้นตอน IK แบ่งเป็น 3 ขั้น

$$\theta_1 = \text{atan2}(y\_ee, x\_ee) \quad (4)$$

$$\theta_3 = -(\pi - \cos^{-1}[(b^2+c^2-a^2)/(2bc)]) \quad (5)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}[(b^2+a^2-c^2)/(2ba)] + \text{atan2}(z_4, \beta) \quad (6)$$

โดยที่ $a = \sqrt{z_4^2+\beta^2}$, $b = L_2$, $c = L_3$, $\beta = \sqrt{x_4^2+y_4^2}$

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ DH (Proximal Method) ของ EEZYbotARM Mk2

n	a_{n-1} (mm)	α_{n-1}	d_n (mm)	θ_n
1	0	0	L_1=92	θ_1 (yaw ฐาน)
2	0	π/2	0	θ_2 (pitch แขนหลัก)
3	L_2=135	0	0	θ_3 (pitch ก้านต่อ)
4	L_3=147	0	L_4=87	θ_4 (Parallelogram)

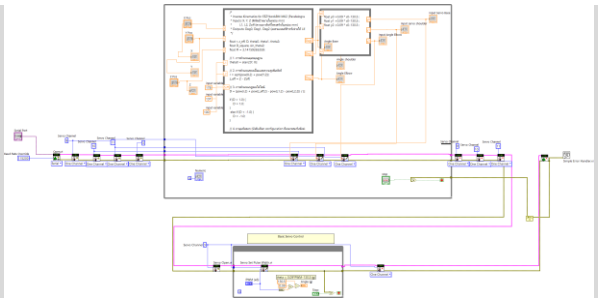
3.4 ระบบควบคุม LabVIEW–Arduino

ในการสอนเลือกใช้ LabVIEW 2022 Q3 ประมวลผล FK/IK และสร้างส่วนต่อประสานผู้ใช้แบบกราฟิก (Graphical User Interface GUI) ส่งคำสั่งมุมผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port) ที่ 115,200 bps ไปยัง Arduino Uno R3 ซึ่งขับสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation PWM) ผ่านตัวควบคุมเซอร์โว PCA9685 แบบ I2C 16 ช่อง ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ 4 ตัว ความล่าช้า ≥ 5 วินาทีป้องกันการชนของบัฟเฟอร์ข้อมูล (Buffer Collision) และกระแสเกิน (Over-current) รูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมบล็อก (Block Diagram) ของ LabVIEW

4. การออกแบบการประเมินผล

โครงสร้างการประเมินเน้นภาคปฏิบัติ 60% โดยการสร้างแขนหุ่นยนต์ การทดลองการควบคุมผ่านโซเวอร์มอเตอร์ หรือสเต็ปปิ้งมอเตอร์ การแข่งขัน

หุ่นยนต์เป็นการประเมินเชิงสภาพจริง (Authentic Assessment) [4] นักศึกษาต้องสั่งงานแขนกลที่ตนเองประกอบและเขียนโปรแกรมให้หยิบวางวัตถุในพื้นที่กำหนด ตารางที่ 4 สรุปโครงสร้างการประเมิน



รูปที่ 2 โปรแกรม LabVIEWสำหรับควบคุมแขนกล EEZYbotARM

ตารางที่ 4 โครงสร้างการประเมินและเป้าหมายชั้นเรียน

เครื่องมือประเมิน	ทฤษฎี %	ปฏิบัติ %	CLOs	เป้าหมาย
สอบกลางภาค	20	—	1,2	≥70%
สอบปลายภาค	20	—	3,4,5,7	≥70%
การแข่งขันหุ่นยนต์	—	20	4 (บูรณาการ)	≥80%
ทดสอบ Payload+Safety	—	10	5,7	≥70%
รายงานวิศวกรรม	—	15	1–5	≥70%
นำเสนอ+Peer Eval.	—	15	6,7	≥80%
รวม	**40%**	**60%**	**1–7**	**≥70**

ตารางที่ 5 รูบริก 7 ระดับสำหรับการแข่งขันควบคุมแขนกล (7-Level Holistic Rubric)

ระดับ	ระดับประสิทธิภาพ	เกณฑ์การพิจารณา
7	ดีเยี่ยม (Excellent)	หยิบ-วางวัตถุได้ครบ ≥5 จุดในเวลา <3 นาที ไม่มีข้อผิดพลาดใด ๆ FK/IK ถูกต้องสมบูรณ์
6	ดีมาก (Very Good)	หยิบ-วางได้ 4–5 จุด เวลาไม่เกิน 4 นาที มีข้อผิดพลาดเล็กน้อย ≤1 ครั้ง
5	ดี (Good)	หยิบ-วางได้ 3–4 จุด เวลาไม่เกิน 5 นาที ข้อผิดพลาด ≤2 ครั้ง FK/IK มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย
4	พอใช้ (Satisfactory)	หยิบ-วางได้ 2–3 จุด เวลาไม่เกิน 6 นาที ระบบควบคุมทำงานได้แต่ต้องปรับค่าระหว่างทดสอบ
3	ผ่านขั้นต่ำ (Passing)	หยิบ-วางได้ 1–2 จุด ระบบเคลื่อนที่ได้แต่ FK/IK มีข้อผิดพลาดที่แก้ไขได้ในที่คุม
2	ต้องปรับปรุง (Developing)	ระบบเคลื่อนที่ได้บางส่วน FK/IK มีข้อผิดพลาดที่ยังแก้ไขไม่สำเร็จในเวลาที่กำหนด
1	ไม่ผ่าน (Beginning)	ระบบไม่เคลื่อนที่หรือโปรแกรมไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถสาธิตการทำงานของ FK/IK ได้

เกณฑ์ผ่านชั้นเรียน นักศึกษา ≥80% ต้องได้ระดับ 4 (พอใช้) ขึ้นไป เกณฑ์ต่ำกว่าระดับ 3 ถือว่ายังไม่บรรลุ CLO4

5. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

5.1 ความสามารถในการคำนวณจลนศาสตร์

ทดสอบ FK ที่ θ_1=0°, θ_2=45°, θ_3=30° ได้พิกัดปลายแขนกล x_ee=133.5 mm, z_ee=329.5 mm สอดคล้องกับแบบจำลอง 3 มิติ สมการ IK แบบ Closed-form ให้ผลเฉลยมุมที่เสถียรตลอดพื้นที่ปฏิบัติการ (Workspace) โดยไม่ต้องวนซ้ำ เหมาะกับนักศึกษาปีที่ 1

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน

การทดสอบบนฮาร์ดแวร์จริงซอฟต์แวร์คำนึงข้อบังคับ 2 ประการ (1) ต้องมีความล่าช้า ≥ 5 วินาทีระหว่างชุดคำสั่ง เพื่อหลีกเลี่ยงการชนของบัฟเฟอร์ สะท้อนข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบเรียลไทม์ (Real-Time Control) และ (2) ต้องสอบเทียบ (Calibration) ค่ามุมเซอร์โวหรือสเต็ปปิ้งมอเตอร์เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงโครงสร้าง (Structural Error) จากการพิมพ์ 3 มิติ ทั้งสองเป็นทักษะที่วิศวกร

อุตสาหกรรมใช้จริง รูปที่ 3 แสดงนักศึกษาขณะทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่3นักศึกษาทดสอบระบบควบคุมแขนกล EEZYbotARM ด้วย LabVIEW ผ่าน Arduino ในห้องปฏิบัติการ

5.3 ความสอดคล้อง CLOs กับทักษะ WEF 2025

CLO1–2 วัดการคิดเชิงวิเคราะห์ (≥70%) ผ่านสอบและรายงาน CLO3–5 วัดทักษะเทคโนโลยีและปฏิบัติ (70–80%) ผ่านการแข่งขันดังแสดงในรูปที่ 4 และ Payload Test CLO6–7 วัดทีมงานและจริยธรรม (≥80%) ผ่านการนำเสนอ

6. การอภิปรายผล

กลไก Parallelogram Linkage รักษาระนาบตัวจับให้ขนานกับฐาน ทำให้ θ_4 ไม่เป็นตัวแปรอิสระ ลด IK จาก 4 ตัวแปร 3 มิติ เหลือ 3 ตัวแปร 2 มิติ นักศึกษาปีที่ 1 แก้ได้ด้วยกฎโคไซน์เท่านั้น ต่างจากแขนกล 6 แกนที่ต้องใช้เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) และการวิเคราะห์ค่าเอกฐาน (Singularity Analysis)



รูปที่ 4 การแข่งขันควบคุมแขนกล EEZYbotARM ในห้องปฏิบัติการ

ต้นทุน EEZYbotARM แบบ Open-source ทำให้สามารถสร้างสื่อการสอนในต้นทุนต่ำสำหรับการสอนการเรียนในรายวิชาหุ่นยนต์ได้ สอดคล้องกับ IEEE Xplore [9] ที่รายงานผลลัพธ์เทียบเคียงกันระหว่างแพลตฟอร์มราคาต่ำและสูง

การทดสอบฮาร์ดแวร์จริงมีเงื่อนไขที่จำกัดของซอฟต์แวร์ (1) ข้อจำกัดด้านเวลา (Timing Constraint) ของการสื่อสารอนุกรมสะท้อนความจริงของระบบควบคุมแบบเรียลไทม์ (2) การชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงโครงสร้างจากชิ้นส่วนพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลให้เกิดปัญหาพิกัดความเผื่อในการผลิต (Manufacturing Tolerance) ที่วิศวกรต้องพบในงานจริง ทั้งสองกรณีนี้ทำให้สามารถฝึกทักษะความยืดหยุ่นในการแก้ปัญหา (Adaptive Problem-Solving) ที่ WEF [1] ระบุเป็นทักษะสำคัญอันดับต้น

7. บทสรุปและทิศทางการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบ PBL 15 สัปดาห์ที่บูรณาการ EEZYbotARM เครื่องพิมพ์ 3 มิติ Modified DH FK/IK และ LabVIEW/Arduino สำหรับรายวิชากลศาสตร์หุ่นยนต์ปีที่ 1 ผลสำคัญ (1)จากการใช้เรขาคณิตมาช่วยในการสอนการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ Closed-form Geometric Method) ทำให้การประยุกต์ใช้ทฤษฎีตามหลักจลนศาสตร์ถูกนำมาใช้งานได้จริงสำหรับปีที่ 1 (2) การแข่งขันหุ่นยนต์เป็นเครื่องมือวัดสมรรถนะบูรณาการ (3) ต้นทุนการสร้างสื่อในต้นทุนต่ำกว่า 1,200 บาท (4) การชดเชยความคลาดเคลื่อนสอนทักษะที่ซอฟต์แวร์จำลองให้ไม่ได้ทั้งการสร้าง การประเมินวัสดุ ต้นทุน การสื่อสารข้อมูลโปรแกรม การคลาดเคลื่อนทางฮาร์ดแวร์ การสร้างวัตถุผ่านเครื่องพิมพ์ 3มิติ ซึ่งเป็นกระบวนการสอนที่ทำให้นักศึกษาได้ลงปฏิบัติจริง เปรียบเทียบผล CLO ระหว่าง PBL กับการสอนแบบบรรยาย ขยายสู่ EEZYbotARM Mk 2/3 พร้อมการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ด้วย Raspberry Pi OpenCV และขยายผลสู่การทำนวัตกรรมการเรียนรู้ราคาต่ำ สู่การศึกษาในระดับที่ต่ำกว่าปริญญาตรี กรอบ PBL นี้ออกแบบให้ CLOs ทั้ง 7 สอดคล้องกับ PLOs ตามมาตรฐาน OBE และแสดงให้เห็นว่าฮาร์ดแวร์ Open-source ต้นทุนต่ำสามารถเป็นแนวทางต้นแบบสำหรับสถาบันในอาเซียน

8.เอกสารอ้างอิง.

[1] World Economic Forum, Future of Jobs Report 2025. World Economic Forum, Geneva, Switzerland, Jan. 2025. [Online]. Available: https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/

[2] Gonzalez-De-Soto, M., et al. (2022). Prototyping and Control of an Educational Manipulator Robot Using Open-Source Tools. IEEE Access, 10, 29802–29815. doi10.1109/ACCESS.2022.3158352.

[3] C. Franciscone (daGHIZmo), "EEZYbotARM," Instructables, 2015. [Online]. Available: https://www.instructables.com/EEZYbotARM/. [Accessed: Jul. 2025].

[4] L. Helle, P. Tynjälä, and E. Olkinuora, "Project-based learning in post-secondary education: Theory, practice and rubber sling shots," Higher Education, vol. 51, no. 2, pp. 287–314, 2006, doi: 10.1007/s10734-004-6386-5.

[5] J. J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.

[6] C. Franciscone (daGHIZmo), "EEZYbotARM MK2," Thingiverse, Apr. 2016. [Online]. Available: https://www.thingiverse.com/thing:1454048. [Accessed: Jul. 2025].

[7] R. G. Gadia and R. V. Marcos, "A cost-effective LabVIEW–Arduino framework for control system computation and PID simulation in engineering education," Int. J.

Inf. Educ. Technol., vol. 15, no. 8, 2025. [Online].Available: https://www.ijiet.org/vol15/IJIET-V15N8-2360.pdf.

[8] J. P. Coelho, J. A. B. Coelho, and J. Gonçalves, "Integrating SolidWorks, LabVIEW, and Arduino in robotics education," in Lecture Notes in Educational Technology. Berlin: Springer, 2025, pp. 637–647, ISBN 9789819718139.

[9] Albarbar, A., & Jaber, M. (2020). Low-Cost Arduino-Based Robotic Arm for Engineering Education. IEEE Transactions on Education, 63(4), 301–308. doi10.1109/TE.2020.2975957.

[10] J. Krajcik and N. Shin, "Project-based learning," in The Cambridge Handbook of the Learning Sciences, 2nd ed., R. K. Sawyer, Ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014, pp. 275–297, doi: 10.1017/CBO9781139519526.018.

ประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด จังหวัดนครราชสีมา

Efficiency of Operational Performance in Improving Residential Environments for the Elderly and Persons with Disabilities: A Case Study of Hin Dat Subdistrict Administrative Organization, Nakhon Ratchasima Province

ศราวุฒิ ใจอดทน[1,*] และ ขวัญนภา สิทธิ์ประเสริฐ[2]

[1-2] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: E-mail sarawut_ex@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 086-8654578

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการดำเนินงาน และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงสภาพที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา กลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรในองค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด และตัวแทนผู้นำชุมชนที่มีบทบาทหน้าที่ในการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัย จำนวน 10 คน งานวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงคุณภาพ เครื่องมือในการเก็บข้อมูล คือ แบบสัมภาษณ์เชิงลึก และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา ผลการศึกษา พบว่า รูปแบบการดำเนินงานปรับปรุงสภาพที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนกระบวนการเริ่มต้น 2) ส่วนกระบวนการปรับปรุงที่พักอาศัย และ 3) ส่วนกระบวนการตรวจสอบและประเมินผล ส่วนด้านประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ 4 ด้าน คือ ด้านปริมาณงาน ด้านคุณภาพ ด้านเวลา และด้านงบประมาณ โดยภาพรวมดำเนินงานได้ตามเป้าหมาย แต่พบว่าการปรับปรุงที่พักอาศัยให้เหมาะสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการยังไม่เป็นไปตามมาตรฐาน และบางส่วนใช้ระยะเวลาการดำเนินงานเกินแผนงาน และด้านปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานมี 8 ด้าน คือ ด้านลักษณะงานมีความสอดคล้องกับผู้ดำเนินงาน ด้านความสำเร็จของงานมีผลต่อผู้ดำเนินงาน ด้านการได้รับการพัฒนาความรู้เกี่ยวกับงาน และมีผลต่อความก้าวในสายงาน ด้านความรู้ความสามารถ และการแก้ปัญหาเป็นที่เชื่อถือยอมรับ ด้านการมีส่วนร่วมในการดำเนินงาน และความสัมพันธ์ระหว่างผู้ดำเนินงาน ด้านการจัดสวัสดิการและสิ่งตอบแทนสำหรับผู้ดำเนินงาน ด้านการกำกับ ติดตามการดำเนินงาน และการให้คำแนะนำจากผู้บริหาร และ ด้านลักษณะสภาพแวดล้อมในการทำงาน วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งสนับสนุนการทำงาน ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้ องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาดสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุและคนพิการต่อไป

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ การปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่พักอาศัย ผู้สูงอายุและคนพิการ องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด

Abstract

This research aimed to examine the operational model, operational efficiency and factors affecting the efficiency of housing improvement for elderly and persons with disabilities implemented by Hin Dat Subdistrict Administrative Organization, Huai Thalaeng District, Nakhon Ratchasima Province. The study employed a qualitative research approach. The key informants consisted of 10 participants, including personnel of Hin Dat Subdistrict Administrative Organization and community leaders who were responsible for housing improvement activities for elderly and persons with disabilities. Data were collected through in-depth interviews and analyzed using qualitative content analysis. The findings revealed that: the operational model of housing improvement for older adults and persons with disabilities emphasized community participation and consisted of three main stages: 1) the initial process 2) the housing improvement process and 3) the monitoring and evaluation process. Regarding the efficiency of housing improvement operations for the elderly and persons with disabilities, there are four aspects: quantity of work, quality, time, and budget. Overall, the implementation achieved its objectives in all dimensions. However, some housing improvement projects did not fully comply with the standards for elderly and persons with disabilities, and certain projects required a longer implementation period than originally planned. Eight factors affecting operational efficiency were identified: job characteristics and their suitability to personnel; job achievement and its impact on workers; opportunities for knowledge development and career advancement; knowledge, competencies, and problem-solving abilities recognized by others; participation and interpersonal relationships among personnel; welfare and compensation provided to workers; supervision, monitoring, and guidance from administrators; and the working environment, materials, equipment, and supporting resources. The results of this study can be applied by Hin Dat Subdistrict Administrative Organization and other local administrative organizations to enhance the efficiency of housing improvement programs and to promote more suitable living environments for elderly and persons with disabilities.

Keywords: Efficiency, Improving Residential Environments, Elderly and Persons with Disabilities, Hin Dat Subdistrict Administrative Organization

1. บทนำ

ประเทศไทยได้เข้าสู่การเป็นสังคมสูงอายุ (Aged Society) และคาดการณ์ว่า ในปี พ.ศ. 2585 ประเทศไทยจะกลายเป็นสังคมสูงอายุระดับสุดยอด (Super Aged Society) การเปลี่ยนแปลงทางร่างกายของผู้สูงอายุมีมากขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น สมรรถภาพร่างกายเสื่อมถอยลงมากขึ้น ส่งผลให้มีโรครุมเร้ามากมาย และมีผลให้จำเป็นต้องได้รับการดูแลระยะยาวจากสมาชิกในครอบครัว เป็นผู้สูงอายุที่อยู่ในภาวะพึ่งพิงผู้อื่น เกิดปัญหาค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพผู้สูงอายุเพิ่มขึ้น และยังมีปัญหาการเข้าไม่ถึงสวัสดิการที่ภาครัฐจัด รวมถึงยังมีปัญหาในด้านอื่น ๆ สำหรับสถานการณ์ด้านสภาพแวดล้อมนั้น ประชากรก่อนวัยสูงอายุขาดความตระหนักในการเตรียมสภาพแวดล้อมและสิ่งอำนวยความสะดวกในที่พักอาศัยให้เหมาะสมสำหรับการใช้ชีวิตในยามสูงวัย และจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผู้สูงอายุประสบอุบัติเหตุภายในบ้าน รัฐบาลได้ตระหนักถึงความสำคัญของสถานการณ์ดังที่กล่าวมาข้างต้น และมีการเตรียมความพร้อมสู่สังคมผู้สูงอายุ โดยมอบหมาย 6 กระทรวง ร่วมขับเคลื่อนมาตรการเพื่อให้บรรลุผู้สูงอายุเป็นพลวัตพลัง มีสุขภาพที่ดีมีความมั่นคงในชีวิต และมีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนสังคมประเทศ ด้วย 2 มาตรการหลัก โดยในมาตรการหลักที่ 1 การพัฒนาคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุและคนทุกวัย มาตรการย่อยที่ 1.4 ปรับสภาพแวดล้อมชุมชนและบ้านให้ปลอดภัยกับผู้สูงอายุ ให้มีการปรับสภาพแวดล้อมภายในบ้าน ชุมชน และโครงสร้างพื้นฐานเดิมให้เหมาะสมและเอื้อต่อการดำเนินชีวิตของผู้สูงอายุ [1] เพื่อมุ่งเน้นให้ผู้สูงอายุได้ใช้ชีวิตประจำวันในที่พักอาศัยได้อย่างปลอดภัย และเพื่อคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุที่ดีขึ้น

องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา มีบทบาทหน้าที่ในการพัฒนาศักยภาพคนและชุมชนให้เข้มแข็ง ส่งเสริมการอนุรักษ์วัฒนธรรมและประเพณี รวมถึงพัฒนาระบบคมนาคม โครงสร้างพื้นฐาน และสาธารณูปโภค พร้อมยกระดับการบริหารจัดการภาครัฐ โดยภารกิจสำคัญหนึ่งที่มีการดำเนินงานมาอย่างต่อเนื่องคือการปรับปรุงที่พักอาศัยผู้สูงอายุและคนพิการ ซึ่งมีการดำเนินงานหลายขั้นตอน และมีบุคคลที่มีส่วนร่วมดำเนินงานหลายฝ่ายทั้งบุคลากรขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด ผู้นำชุมชน ช่างในชุมชน และชาวบ้านในชุมชน โดยในการดำเนินงานที่ผ่านมาสามารถดำเนินการให้แล้วเสร็จ แต่ในด้านสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมต่อการใช้ชีวิตของผู้สูงอายุและคนพิการในที่พักอาศัยยังไม่เป็นไปตามแนวทางการออกแบบเพื่อคนทั้งมวล (Universal Design) และการสร้างสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาเพื่อนำเสนอแนวทางสำหรับการปรับปรุงพื้นที่ใช้สอยทั้งภายในและภายนอกของที่พักอาศัยให้เหมาะสมกับการใช้ชีวิตของผู้สูงอายุในชุมชนท้องถิ่น ได้แก่ ห้องนอน/พื้นที่นอน พื้นที่พักผ่อน/รับแขก พื้นที่ครัว ห้องน้ำในบ้านและห้องน้ำนอกบ้าน ทางเดินภายในบ้าน เฉลียง/ระเบียง ทางเดินรอบบ้าน ที่จอดรถ และครัวนอกบ้าน [2] ซึ่งเป็นการศึกษาหาแนวทางในทางการพัฒนาสภาพแวดล้อมที่พักอาศัย สำหรับการนำเสนอผลการศึกษาของบทความนี้ ได้มุ่งเน้นการนำเสนอประสิทธิภาพการดำเนินงาน และปัจจัยที่มี

ผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงสภาพที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด ซึ่งจะทำให้ทราบถึงข้อมูลในมิติต่าง ๆ รวมถึงปัญหาในการดำเนินงาน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาการดำเนินงานให้ผลการดำเนินงานเกิดประสิทธิภาพอย่างเต็มที่

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการดำเนินงาน และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงสภาพที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความหมายของประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน

ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน คือ คุณภาพของการมีประสิทธิผลความสามารถในการผลิต และการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อสามารถผลิตหรือบริการในเชิงปริมาณและคุณภาพที่เหมาะสมและต้นทุนน้อยที่สุด คำนึงถึงสถานการณ์ และข้อผูกพันด้านการเงินที่มีอยู่ [3] และต้องใช้ความรู้ความสามารถและประสบการณ์ต่างๆ เพื่อให้งานที่ได้รับมอบหมายแล้วเสร็จ และคำนึงถึงความถูกต้อง รวดเร็วของงาน ความประหยัด ความยุติธรรม และความเสมอภาค รวมถึงปริมาณผลงานที่สอดคล้องกับเป้าหมายขององค์กร [4] สอดคล้องกับการอธิบายถึงประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานว่าเป็นความสามารถของบุคคลในการปฏิบัติงานที่ได้รับมอบหมายให้สำเร็จตามเป้าหมายและตัวชี้วัดที่กำหนดไว้ได้อย่างมีคุณภาพ ถูกต้อง และได้มาตฐาน ให้แล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนด [5]

จากที่กล่าวมาจึงสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน คือ คุณภาพของผลงาน และความสามารถในการปฏิบัติงาน ที่ต้องใช้ความรู้ความสามารถ กลวิธีหรือเทคนิคการทำงานที่จะสร้างผลงานให้เป็นผลงานที่มีคุณภาพที่น่าพอใจ โดยคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรคุ้มค่า คุณภาพของงาน ปริมาณของงาน ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน และวิธีการในการดำเนินงาน

3.2 องค์ประกอบของประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน

องค์ประกอบของประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานสามารถสรุปได้ 4 ข้อ ประกอบด้วย 1. คุณภาพ (Quality) คุณภาพของงานจะต้องมีคุณภาพสูง ผู้ผลิตและผู้ใช้ได้ประโยชน์ คุ้มค่า และมีความพึงพอใจ 2. ปริมาณงาน (Quantity) ปริมาณของงานที่เกิดขึ้นจะต้องเป็นไปตามความคาดหวังของ หน่วยงาน 3. เวลา (Time) เวลาที่ใช้ในการดำเนินงานจะต้องอยู่ในลักษณะที่ถูกต้องตามหลักการ เหมาะสมกับงานและทันสมัย 4. ค่าใช้จ่าย (Costs) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดจะต้องเหมาะสมกับงาน และวิธีการคือ จะต้องลงทุนน้อยให้ได้ผลกำไรมากที่สุด [6]

3.3 การวัดประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน

ประสิทธิภาพสามารถวัดได้หลายมิติตามแต่วัตถุประสงค์ที่ต้องการพิจารณา คือ 1. ประสิทธิภาพในมิติของค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนของการผลิต (Input) ได้แก่ การใช้ทรัพยากรในการบริหาร คือ คน เงิน วัสดุ เทคโนโลยี ที่มีอย่างประหยัดคุ้มค่า และเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด 2. ประสิทธิภาพในมิติของกระบวนการการบริหาร (Process) ได้แก่ การทำงานที่ถูกต้องได้มาตรฐาน รวดเร็ว และใช้เทคโนโลยีที่สะดวกกว่าเดิม 3. ประสิทธิภาพในมิติของผลผลิตและ

ผลลัพธ์ ได้แก่ การทำงานที่มีคุณภาพ เกิดประโยชน์ต่อสังคม เกิดผลกำไร ทันเวลา ผู้ปฏิบัติงานมีจิตสำนึกที่ดีต่อการทำงาน และบริการเป็นที่พอใจของลูกค้าหรือผู้มารับบริการ [7]

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานสามารถแบ่งเป็น 2 ปัจจัย [8] คือ 1. ปัจจัยจูงใจ เป็นปัจจัยที่กระตุ้นและจูงใจให้ผู้ปฏิบัติงานทำงาน ซึ่งจะสนับสนุนให้การปฏิบัติงานเกิดความสำเร็จ ประกอบด้วย ด้านความสำเร็จของงาน ด้านการได้รับการยอมรับ ด้านลักษณะงาน ด้านความก้าวหน้าในตำแหน่งงาน และด้านความรับผิดชอบ และ 2. ปัจจัยค้ำจุน เป็นปัจจัยแวดล้อมที่จะมีผลต่อความพึงพอใจในการทำงานได้ ได้แก่ ด้านนโยบายการบริหารขององค์กร ด้านการบังคับบัญชาและการควบคุมดูแล ด้านความสัมพันธ์กับหัวหน้า และเพื่อนร่วมงาน ด้านตำแหน่งงานเป็นที่ยอมรับจากสังคม ด้านความมั่นคงในงาน ด้านค่าตอบแทนและสวัสดิการ ด้านสภาพแวดล้อมในการทำงานและอุปกรณ์สิ่งสนับสนุน ด้านชีวิตส่วนตัว และด้านความก้าวหน้าและการได้รับพัฒนาในตำแหน่งงาน

4. วิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยพื้นที่การศึกษา คือ ตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา และวิธีการดำเนินการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.1 กลุ่มเป้าหมายการศึกษา

กลุ่มเป้าหมายในการศึกษาครั้งนี้ คือ บุคลากรในองค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด และตัวแทนผู้นำชุมชนที่มีบทบาทหน้าที่ในการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัย จะเป็นกลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants) จำนวน 10 คน ได้แก่ นายก อบต. หินดาด จำนวน 1 คน รองนายก อบต. หินดาด จำนวน 2 คน เลขาฯ นายก อบต. หินดาด จำนวน 1 คน หัวหน้าฝ่ายสวัสดิการสังคม จำนวน 1 คน ผู้ช่วยนักพัฒนาชุมชน จำนวน 1 คน สมาชิกสภา อบต. หินดาด จำนวน 2 คน ผู้ใหญ่บ้าน จำนวน 1 คน และประธานอาสมัครสาธารณะสุขประจำหมู่บ้าน จำนวน 1 คน โดยการคัดเลือกด้วยวิธีเลือกกลุ่มเป้าหมายแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา คือ การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) โดยใช้แบบสัมภาษณ์สำหรับเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการดำเนินงาน และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงสภาพที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา ในช่วงปีที่ผ่านมา สำหรับการสร้างข้อคำถามที่ใช้ในการสัมภาษณ์ได้จากการศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และผ่านการตรวจประเมินความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) ข้อคำถามโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน โดยข้อคำถามทุกข้อมีค่า IOC > 0.5

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และสรุปข้อมูลตามวัตถุประสงค์การศึกษา

5. ผลการศึกษา

5.1 การดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด

1) องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) รับเรื่องจากสำนักพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์จังหวัดนครราชสีมา/กองทุนฟื้นฟูสมรรถภาพจังหวัดนครราชสีมา จากนั้นทำหนังสือประชาสัมพันธ์ให้ผู้ใหญ่บ้านคัดเลือกกลุ่มเป้าหมาย-ของแต่ละหมู่บ้าน

2) สมาชิกสภาองค์การบริหารส่วนตำบล (ส.อบต.)/ผู้ใหญ่บ้านจะทำการส่งเรื่องแจ้งชื่อและข้อมูลผู้สูงอายุ/คนพิการขอรับการปรับสภาพบ้านกลับมาให้ อบต.

3) กลุ่มผู้บริหาร หัวหน้าส่วน และผู้ที่เกี่ยวข้องร่วมพิจารณาคัดเลือกผู้สูงอายุ/คนพิการตามข้อมูลที่ได้รับ จากนั้น อบต. จะแจ้งกลับไปยังบุคคลที่ได้รับเลือก

4) ส.อบต./ผู้ใหญ่ ทำการประชุมลูกบ้านเพื่อแจ้งว่าผู้ใดขอรับการปรับสภาพบ้าน และขอมติที่ประชุมยืนยันผู้ได้รับการปรับสภาพบ้าน

5) ผู้สูงอายุ/คนพิการที่ได้รับการพิจารณาขอรับการปรับสภาพบ้านดำเนินการเรื่องเอกสารกับเจ้าหน้าที่ อบต. ตามขั้นตอน

6) เจ้าหน้าที่ อบต. ร่วมกับผู้นำชุมชน และ ส.อบต. ลงพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูลข้อมูล พร้อมตรวจสอบเอกสารต่างๆ และประสานงานช่างประมาณราคาวัสดุ จากนั้นส่งเอกสารทั้งหมดให้หน่วยงานผู้สนับสนุนงบประมาณ

7) อบต. รับงบประมาณ (ค่าวัสดุ) จัดซื้อวัสดุและลงมือปรับปรุงก่อสร้างตามแบบ โดยช่างในชุมชน กลุ่มชาวบ้าน ผู้นำชุมชน และ ส.อบต. ของแต่ละหมู่บ้านจนแล้วเสร็จ

8) การตรวจสอบผลงานหลังการปรับปรุงบ้านแล้วเสร็จ โดย อบต. และหน่วยงานที่สนับสนุนงบประมาณ

9) ส่งมอบบ้านให้ผู้สูงอายุ/คนพิการ โดยหน่วยงานผู้สนับสนุนงบประมาณ ผู้บริหาร และเจ้าหน้าที่องค์การบริหารส่วนตำบลร่วมส่งมอบบ้าน

การดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด สามารถสรุปและแบ่งได้ 3 ส่วน ดังนี้ (ดังรูปที่ 1)

1) กระบวนการเริ่มต้น (ต้นน้ำ) คือ การประชาสัมพันธ์และประสานงาน การคัดเลือกกลุ่มเป้าหมายเพื่อรับการปรับปรุง การสำรวจบ้านและการจัดทำเอกสารต่าง ๆ โดยบุคลากรของ อบต. และกลุ่มผู้นำชุมชน

2) กระบวนการปรับปรุงที่พักอาศัย (กลางน้ำ) สำหรับการก่อสร้างปรับปรุงบ้านนั้น ได้ช่างก่อสร้างภายในชุมชน ผู้นำชุมชน และชาวบ้านมาร่วมช่วยในการดำเนินงานก่อสร้าง

3) กระบวนการตรวจสอบ และประเมินผลงานหลังการปรับปรุงที่พักอาศัยแล้วเสร็จ (ปลายน้ำ) การตรวจสอบระหว่างปรับปรุงและหลังปรับปรุงบ้านแล้วเสร็จ และส่งมอบบ้าน โดยกลุ่มผู้ควบคุมงาน ผู้บริหาร อบต. และหัวหน้าส่วนงาน รวมถึงหน่วยงานที่สนับสนุนงบประมาณ



รูปที่ 1 การดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการขององค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด

5.2 ประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ

1) ด้านปริมาณงาน พบว่า ผลการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยสามารถปฏิบัติงานได้ครบถ้วนตามแบบและเนื้องานที่กำหนดไว้ โดยการดำเนินงานจะมีช่าง อบต. เป็นผู้ควบคุมงาน และช่วยกำกับดูแล ซึ่งจะส่งผลให้การดำเนินงานให้มีปริมาณงานเป็นไปตามแผนงาน

2) ด้านคุณภาพ พบว่า คุณภาพของผลงานมีความสอดคล้องกับงบประมาณที่ได้รับ โดยสภาพที่พักอาศัยมีสภาพที่ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นกว่าสภาพเดิม แต่เมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพงานที่ปรับปรุงบ้านให้เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการอาจยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานการติดตั้ง จึงส่งผลให้ยังไม่สะดวก หรือยังไม่เหมาะสมในการใช้งานตามลักษณะทางร่างกายของผู้สูงอายุและคนพิการ

3) ด้านเวลา พบว่า สามารถดำเนินการแล้วเสร็จตามกรอบระยะเวลาที่กำหนดไว้ ทั้งในส่วนของการปฏิบัติงานและการจัดทำรายงานผลการดำเนินงาน แต่มีเพียงบ้านบางหลังที่ได้รับการปรับปรุงแล้วไม่เสร็จตามระยะเวลาที่กำหนดซึ่งเป็นส่วนน้อย ทั้งนี้เพราะเจ้าของบ้านอาจขาดเงินในการจ้างแรงงานหรือต้องรอแรงงานมาช่วยปรับปรุงบ้าน

4) ด้านงบประมาณ พบว่า สามารถบริหารจัดการให้อยู่ภายใต้งบประมาณที่ได้รับจัดสรร ซึ่งงบที่ได้รับจัดสรรคืองบค่าวัสดุก่อสร้าง แต่บางกรณีงบที่ได้รับยังไม่เพียงพอ จึงนำมาสู่การได้รับการสนับสนุนเพิ่มเติมทั้งในรูปแบบวัสดุก่อสร้าง และงบประมาณซื้อวัสดุ โดยผู้ที่สนับสนุนวัสดุและงบประมาณเพิ่มเติมได้แก่ ผู้บริหารองค์การบริหารส่วนตำบล ผู้นำชุมชนตลอดจนชาวบ้าน และเจ้าของบ้าน

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ

ปัญหาและอุปสรรคสำคัญในการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ พบว่า ปัญหาหลักที่พบในการปรับปรุงบ้านส่วนใหญ่ คือ ปัญหาข้อจำกัดด้านงบประมาณ ซึ่งการได้รับการจัดสรรงบประมาณปรับปรุงบ้านจากสำนักพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์จังหวัดนครราชสีมา/กองทุนฟื้นฟูสมรรถภาพจังหวัดนครราชสีมาเป็นเพียงงบประมาณค่าวัสดุก่อสร้างเท่านั้นไม่รวมงบด้านค่าแรงในการก่อสร้าง ส่งผลให้ภาระในการจัดหางบประมาณค่าแรงเป็นส่วนที่เจ้าของบ้านและครอบครัวมีส่วนต้องรับผิดชอบ และปัญหาขาดแรงงาน สืบเนื่องจากไม่มีงบประมาณค่าแรง ดังนั้นทางเจ้าของบ้านต้องเป็นผู้จัดหางบค่าแรงช่าง แต่หากไม่มีงบประมาณต้องใช้การแรงงานอาสาจากคนใน

ESTACON 2026 | 17th

ชุมชน จึงต้องรอช่างและแรงงานอาสาจากในชุมชนมีเวลาว่างมาช่วยในการก่อสร้าง ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการปรับบ้านมีระยะเวลานานมากขึ้น

5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ

1) ด้านลักษณะงานมีความสอดคล้องกับผู้ดำเนินงาน พบว่า กระบวนการเริ่มต้น (ต้นน้ำ) ส่วนใหญ่เป็นการดำเนินงานบุคลากรของ อบต. ที่เป็นผู้ดำเนินงานด้านนี้มาอย่างต่อเนื่อง และกลุ่มผู้นำชุมชนที่รับผิดชอบปฏิบัติงานมาต่อเนื่องอยู่แล้ว ลักษณะงานจึงมีความสอดคล้องกับผู้ดำเนินงาน ส่วนกระบวนการปรับปรุงที่พักอาศัย (กลางน้ำ) การก่อสร้างปรับปรุงบ้านโดยช่างชุมชน และคนในชุมชนร่วมกันดำเนินงานก่อสร้าง สามารถปฏิบัติการก่อสร้างได้ แต่เมื่อพิจารณาในด้านเนื้องานการปรับปรุงบ้านผู้สูงอายุและคนพิการอาจยังไม่เป็นไปตามมาตรฐาน เพราะช่างจะมีทักษะเพียงการก่อสร้างอาคารโดยทั่วไปเท่านั้น และส่วนกระบวนการตรวจสอบและประเมินผลงานหลังการปรับปรุงที่พักอาศัยแล้วเสร็จ (ปลายน้ำ) เป็นการตรวจตามปริมาณงาน และสภาพบ้านมีสภาพที่ดีขึ้น โดยกลุ่มผู้ควบคุมงาน ผู้บริหาร อบต. และหัวหน้าส่วนงาน แต่ยังไม่สามารถตรวจถึงมาตรฐานการติดตั้งสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ

2) ด้านความสำเร็จของงานมีผลต่อผู้ดำเนินงาน พบว่า ส่วนใหญ่จะมองในด้านการส่งผลต่อจิตใจ โดยเมื่อมีการดำเนินงานจนแล้วเสร็จจะส่งผลต่อผู้ที่ดำเนินงานปรับปรุงบ้านรู้สึกถึงความภูมิใจ ความพึงพอใจ และดีใจที่ได้ช่วยเหลือผู้ที่ลำบาก (ผู้สูงอายุ/คนพิการ) แต่

3) ด้านการได้รับการพัฒนาความรู้เกี่ยวกับงานและมีผลต่อความก้าวในสายงาน พบว่า มีเพียงผู้กลุ่มบุคลากรของ อบต. เช่น ช่าง อบต. เจ้าหน้าที่ส่วนงานกองสวัสดิการ เป็นต้น ที่เคยได้รับความรู้เกี่ยวกับงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการจากการเข้าร่วมการอบรมของสำนักพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์จังหวัดนครราชสีมา และด้านการมีผลต่อความก้าวในสายงาน พบว่า กลุ่มของบุคลากรของ อบต. ไม่ได้มีผลต่อความก้าวในสายงาน แต่มีเพียงบางส่วนอธิบายว่ามีผลต่อความก้าวในสายงาน และในกลุ่มของ ส.อบต. และผู้ใหญ่บ้านอธิบายว่าไม่ได้มีผลต่อความก้าวในสายงาน

4) ด้านความรู้ ความสามารถ และการแก้ปัญหาเป็นที่เชื่อถือยอมรับ พบว่า ผู้ดำเนินงานส่วนใหญ่ได้รับการยอมรับในด้านความรู้ ความสามารถ และทักษะในการแก้ไขปัญหา เพราะที่ผ่านมาสามารถดำเนินงานให้เป็นไปตามแผนที่กำหนดได้

5) ด้านการมีส่วนร่วมในการดำเนินงาน และความสัมพันธ์ระหว่างผู้ดำเนินงานกับผู้บริหาร ผู้ร่วมงาน และผู้ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การดำเนินงานได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดี โดยผู้บริหารมีบทบาทสำคัญในการกำหนดนโยบายและแนวคิดที่สนับสนุนโครงการ ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญที่นำไปสู่ความสำเร็จของการดำเนินงาน และผู้ร่วมงาน ผู้นำชุมชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีความร่วมมือในการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี โดยมีการทำงานร่วมกันในทุกขั้นตอน

6) ด้านการจัดสวัสดิการและสิ่งตอบแทนสำหรับผู้ดำเนินงาน พบว่า ได้รับการสนับสนุนจากหลายภาคส่วน โดยระหว่างการดำเนินงานเจ้าของบ้านให้การสนับสนุนด้านอาหารและเครื่องดื่มแก่ผู้ปฏิบัติงาน อีก

ทั้งผู้บริหาร อบต. ผู้นำชุมชน และชาวบ้าน มีส่วนสนับสนุนงบประมาณในบางส่วน เช่น ค่าอาหาร หรือวัสดุที่ขาดแคลน เพื่อสร้างขวัญกำลังใจแก่ผู้ดำเนินงาน

7) ด้านการกำกับ ติดตามการดำเนินงาน และการให้คำแนะนำจากผู้บริหาร พบว่า ผู้บริหารมีบทบาทสำคัญในการกำกับ ติดตาม และดูแลอย่างใกล้ชิด อีกทั้งผู้บริหารยังมีส่วนในการช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน โดยทำงานร่วมกับทีมกองสวัสดิการและช่าง อบต. ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมงานให้เป็นไปตามแบบ

8) ด้านลักษณะสภาพแวดล้อมในการทำงาน วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งสนับสนุนการทำงาน พบว่า สภาพแวดล้อมในการดำเนินงานมีบรรยากาศที่ดี เอื้อต่อการปฏิบัติงาน มีความร่วมมือและช่วยเหลือซึ่งกันและกันในชุมชน ส่วนวัสดุอุปกรณ์และสิ่งสนับสนุนการทำงาน ทาง อบต. และผู้บริหารมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนวัสดุที่จำเป็น และช่วยเติมเต็มในส่วนที่ขาดหรือไม่เพียงพอ รวมถึงชาวบ้านในชุมชนก็มีส่วนร่วมในการสนับสนุนทั้งแรงงานและทรัพยากร

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดำเนินงานปรับปรุงสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด จังหวัดนครราชสีมา พบว่า การดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการเริ่มต้น (ต้นน้ำ) กระบวนการปรับปรุงที่พักอาศัย (กลางน้ำ) และกระบวนการตรวจสอบ และประเมินผลงานหลังการปรับปรุงที่พักอาศัยแล้วเสร็จ (ปลายน้ำ) ผลการดำเนินงานสามารถสะท้อนถึงประสิทธิภาพการดำเนินงานโดยรวมอยู่ในระดับปานกลางเมื่อพิจารณาจากผลการดำเนินงานตามองค์ประกอบประสิทธิภาพการดำเนินงาน และเป้าหมายขององค์กร สามารถอธิบายรายด้าน คือ ด้านปริมาณงานสามารถดำเนินงานได้ครบถ้วนตามแบบและแผนงานที่กำหนด ส่วนด้านคุณภาพ ผลงานมีความสอดคล้องกับงบประมาณที่ได้รับและช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุและคนพิการได้ อย่างไรก็ตาม คุณภาพการติดตั้งสิ่งอำนวยความสะดวกบางส่วนยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่เหมาะสมกับสภาพร่างกายของผู้ใช้งาน ส่วนด้านเวลา สามารถดำเนินงานแล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนดเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นบางกรณีที่ประสบปัญหาการขาดแคลนแรงงานหรือข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่าย และส่วนด้านงบประมาณ สามารถบริหารจัดการภายใต้งบประมาณที่ได้รับ แต่ในบางกรณีต้องมีการสนับสนุนเพิ่มเติมจากผู้บริหาร อบต. ผู้นำชุมชน ชาวบ้าน และเจ้าของบ้าน เพื่อให้การปรับปรุงที่พักอาศัยดำเนินงานบรรลุเป้าหมายได้ ตามแนวคิดประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของ Peterson และ Plowman [9] ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดำเนินงาน ประกอบด้วย ด้านความสอดคล้องระหว่างลักษณะงานกับผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งผู้ปฏิบัติงานมีประสบการณ์และความคุ้นเคยกับงานเป็นอย่างดี ด้านความสำเร็จของงานที่ส่งผลต่อผู้ปฏิบัติงานที่สร้างความภาคภูมิใจและความพึงพอใจแก่ผู้ปฏิบัติงาน ด้านการได้รับพัฒนาความรู้ และการมีผลต่อความก้าวในสายงาน พบว่า การที่ไม่มีผลต่อความก้าวในสายงานของบุคลากรของ อบต. ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน ซึ่งปัจจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ สายใจ วานิชสุจิต [10] ที่พบว่า ด้านความก้าวหน้าในอาชีพเป็นปัจจัยที่ส่งผล

ต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในระดับน้อยที่สุด ด้านความน่าเชื่อถือด้านความรู้และความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน ด้านการมีส่วนร่วมและความร่วมมือจากทุกภาคส่วน ด้านการได้รับการสนับสนุนด้านสวัสดิการและทรัพยากร ด้านการกำกับติดตามอย่างใกล้ชิดจากผู้บริหาร และด้านสภาพแวดล้อมการทำงานที่เอื้อต่อการปฏิบัติงานและการสนับสนุนด้านวัสดุอุปกรณ์จากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและชุมชน สอดคล้องกับการศึกษาของ อัชวาน เส็น และคณะ [11] สถานที่ปฏิบัติงานมีสภาพแวดล้อมที่มีเหมาะสมในการปฏิบัติงาน มีวัสดุอุปกรณ์ในการสนับสนุนการ ปฏิบัติงานอย่างเพียงพอและเหมาะสม ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพ

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาด้านกระบวนการดำเนินงานปรับปรุงที่พักอาศัยของผู้สูงอายุและคนพิการ พบว่า กระบวนการปรับปรุงที่พักอาศัย (กลางน้ำ) จะพบปัญหา และอุปสรรคในการดำเนินงานมากที่สุด คือ ปัญหาด้านขาดแคลนแรงงานและงบประมาณค่าแรงช่างก่อสร้าง ส่งผลให้การดำเนินงานมีความล่าช้า และเมื่อพิจารณาด้านคุณภาพของงานตามแนวคิดการออกแบบเพื่อคนทั้งมวล (Universal Design) และการสร้างสภาพแวดล้อมที่พักอาศัยที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ พบว่า ผลการปรับปรุงที่พักอาศัยผู้สูงอายุและคนพิการยังไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องมีการส่งเสริม สนับสนุนและพัฒนาการดำเนินงานในด้านที่ยังมีปัญหาให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อส่งเสริมให้ผู้สูงอายุและคนพิการเข้าถึงที่พักอาศัยที่เหมาะสมต่อการใช้ชีวิตได้อย่างสะดวกและปลอดภัย นำไปสู่การมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1) กำหนดนโยบายการพัฒนาที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการให้เป็นวาระสำคัญ และจัดสรรงบประมาณและบูรณาการงบประมาณร่วมกับหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อสนับสนุนงบประมาณเพิ่มเติมสำหรับค่าวัสดุและค่าแรงในการปรับปรุงที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ

2) ส่งเสริมและกำหนดมาตรฐานการปรับปรุงที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ โดยยึดหลักการออกแบบเพื่อคนทั้งมวล (Universal Design) เพื่อให้ตอบสนองต่อข้อจำกัดทางร่างกายของผู้สูงอายุและคนพิการได้อย่างเหมาะสม และปลอดภัย

3) องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาดควรจัดตั้งเครือข่ายช่างจิตอาสาในชุมชน รวมถึงผลักดันให้บุคลากร ช่างชุมชน และผู้ปฏิบัติงานได้รับการอบรมเกี่ยวกับมาตรฐานการปรับปรุงที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ

7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1) ควรมีการศึกษาในประเด็นความพึงพอใจและคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุและคนพิการหลังได้รับการปรับปรุงที่พักอาศัยในมิติต่าง ๆ เพื่อประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังได้รับการปรับปรุงที่พักอาศัยอย่างรอบด้าน

2) ควรมีการศึกษาในประเด็นการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่าทางสังคมของโครงการการปรับปรุงที่พักอาศัยสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการทั้งในด้านต้นทุน ผลตอบแทน และความคุ้มค่าทางสังคม

3) ควรมีการศึกษาในประเด็นการมีส่วนร่วมของภาคีเครือข่ายในการดำเนินงานของผู้นำชุมชน ประชาชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาแนวทางการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพอย่างยั่งยืน

8. อ้างอิง

[1] กรมกิจการผู้สูงอายุ. (2565). แผนปฏิบัติราชการกรมกิจการผู้สูงอายุ ระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566 - 2570). กรุงเทพมหานคร.

[2] ศราวุฒิ ใจอดทน. (2568). แนวทางการปรับปรุงที่พักอาศัยที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุในชุมชนท้องถิ่น กรณีศึกษา ตำบลตลาดไทร จังหวัดนครราชสีมา. Asian Creative Architecture, Art and Design (ACAAD), 38 (2) (กรกฎาคม-ธันวาคม): e272950-1 - e272950-24.

[3] Peterson, E, & Plowman, E.G. (1989). Business organization and management. Illinois: Irwin.

[4] นลพรรณ บุญฤทธิ์. (2558). ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากรองค์การบริหารส่วนจังหวัดชลบุรี. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา.

[5] ศุภเชษฐ์ สิทธิสุนทรวงศ์. (2565). ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของ บุคลากรสำนักงานตรวจสอบภายในสำนักงานตำรวจแห่งชาติ. สารนิพนธ์หลักสูตรปริญญารัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[6,9] Petersen, E, & Plowman, E.G. (1953). Business organization and management (3rd ed.). ILL: R.D. Irwin.

[7] ทิพาวดี เมฆสวรรค์. (2538). การส่งเสริมประสิทธิภาพในส่วนราชการ. สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน.

[8] Herzberg, F.I., Mausner, B., & Snyderman, B. (1959). The Motivation to Work. New York: Wiley.

[10] สายใจ วานิชสุจิต, สำราญ วิเศษ, และจารุกัญญา อุดานนท์. (2567). ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของบุคลากรองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในเขตอำเภอโพนสวรรค์ จังหวัดนครพนม. วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, 4 (3) (กรกฎาคม - กันยายน), 1083-1099.

[11] อัซวาน เส็น, ฟิตรัน การาวัล, นูรุดดีน ยามา, และอิทธิชัย สีดำ. (2566). ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรสำนักงานเทศบาลนครยะลา. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 14 (น. 1121 - 1136). มหาวิทยาลัยหาดใหญ่.

ภาคผนวก

คำสั่งแต่งตังคณะกรรมการดำเนินงาน การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 17 (Estacon 2026)



คำสั่งมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ที่ ๘๑๒๗/๒๕๖๙
เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงาน การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๑๗ (Estacon 2026) ภายใต้แนวคิด “การประยุกต์นวัตกรรมและเทคโนโลยีรับมือสภาวะวิกฤตของโลก” คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ด้วยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ร่วมกับเครือข่ายสถาบันการศึกษา ๖ สถาบัน และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้จัดการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๑๗ (Estacon 2026) ภายใต้แนวคิด “การประยุกต์นวัตกรรมและเทคโนโลยีรับมือสภาวะวิกฤตของโลก” ในวันที่ ๒๘ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๖๙ ณ อาคารปฏิบัติการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางด้านวิชาการ เผยแพร่ผลงานวิชาการและผลงานวิจัย ของนักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย และหน่วยงานต่างๆ เป็นการสร้างความร่วมมือและเกิดเครือข่ายการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ทางวิชาการระหว่างนักศึกษา นักวิจัย และคณาจารย์ และผลิตวารสารที่มีคุณภาพ เพื่อให้การดำเนินงานจัดโครงการฯ เป็นไปด้วยความเรียบร้อย และบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงาน ดังนี้

๑. คณะกรรมการอำนวยการ

๑.๑	คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	ประธานกรรมการ
๑.๒	รองคณบดีฝ่ายวิชาการ เทคโนโลยีดิจิทัล และพัฒนาองค์กร	รองประธานกรรมการ
๑.๓	รองคณบดีฝ่ายบริหาร และแผนงาน	กรรมการ
๑.๔	รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา และบริการวิชาการ	กรรมการ
๑.๕	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิจัย	กรรมการ
๑.๖	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายมาตรฐานการศึกษา	กรรมการ
๑.๗	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา และกิจการพิเศษ	กรรมการ
๑.๘	ประธานหลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม	กรรมการ
๑.๙	ประธานหลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง ขนส่ง และโลจิสติกส์	กรรมการ
๑.๑๐	ประธานหลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม	กรรมการ
๑.๑๑	ประธานหลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม (ต่อเนื่อง)	กรรมการ
๑.๑๒	ประธานหลักสูตร วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อเนื่อง)	กรรมการ
๑.๑๓	ประธานหลักสูตร อส.บ. สาขาวิชาออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	กรรมการ
๑.๑๔	ประธานหลักสูตร สถ.บ. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม	กรรมการ
๑.๑๕	ประธานหลักสูตร ค.อ.บ. สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์	กรรมการ
๑.๑๖	รักษาราชการแทนหัวหน้าสำนักงานคณบดี	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่ : ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานการจัดกประชุมวิชาการฯ ให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย และมีประสิทธิภาพ

๒. คณะกรรมการฝ่ายงานระบบบทความ

๒.๑	ผศ.ดร.อรอนงค์	แสงผ่อง	ประธานกรรมการ
๒.๒	อาจารย์ณพิตร	วัฒนวีรพงษ์	รองประธานกรรมการ
๒.๓	ผศ.ดร.อ่อนลมี	กมลอินทร์	รองประธานกรรมการ
๒.๔	ผศ.ดร.เมธาวี	ศรีวัฒนพงศ์ โพธิสาร	กรรมการ
๒.๕	ผศ.ดร.กนกพร	บุญจูบุตร	กรรมการ
๒.๖	ดร.ธนภรณ์	สกลภัทรศร	กรรมการ
๒.๗	ดร.อาภา	สธนเสาวภาคย์	กรรมการ
๒.๘	ผศ.ดร.ดวงดาว	วัฒนากลาง	กรรมการ
๒.๙	ดร.ดวงธิดา	โคตรโยธา	กรรมการ
๒.๑๐	ผศ.ดร.ทศพร	จันทร์เผือก	กรรมการ
๒.๑๑	ผศ.ดร.ปรัชญ์	บุญแซม	กรรมการ
๒.๑๒	ผศ.วุฒิพงศ์	แสนบุดดา	กรรมการ
๒.๑๓	ผศ.ดร.พงษ์นรินทร์	ศรีพลอย	กรรมการ
๒.๑๔	ผศ.ดร.มาริสา	หิรัญตียะกุล	กรรมการ
๒.๑๕	ผศ.ดร.วรุทัย	เดชตานนท์	กรรมการ
๒.๑๖	ผศ.ดร.อนุชิต	คงฤทธิ์	กรรมการ
๒.๑๗	ดร.อังคาร	คำเรือน	กรรมการ
๒.๑๘	ดร.จักรกฤษณ์	สุทธานุรักษ์	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่: ๑. การกำหนดมาตรฐานและการรับบทความ

๑.๑ กำหนดแนวทางและเกณฑ์ของการเตรียมต้นฉบับ (ไทย-อังกฤษ) ของบทคัดย่อหรือบทความฉบับเต็มพร้อมตัวอย่าง

๑.๒ กำหนดแบบฟอร์ม วิธีการ ของการส่งผลงานวิชาการ (เพื่อรับการพิจารณา) ทางเว็บไซต์

๑.๓ พิจารณารายชื่อคณะกรรมการพิจารณากลั่นกรองผลงาน (peer review)

๑.๔ พิจารณาผลงานวิชาการให้เป็นไปตามข้อ ๑ จัดหมวดหมู่ และพิมพ์ให้เป็นรูปแบบเดียวกัน และจัดส่งผลงานให้คณะกรรมการพิจารณากลั่นกรองผลงานทำการพิจารณา

๑.๕ กำหนดและตรวจสอบด้านจริยธรรมการวิจัย (Research Ethics) และการขออนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (เช่น IACUC หรือ EC) สำหรับบทความที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์

๒. การกลั่นกรองและคัดเลือกผลงาน

๒.๑ สรุปผลการพิจารณาคัดเลือกผลงานที่เหมาะสมสำหรับเสนอในที่ประชุมวิชาการฯ ทั้งแบบบรรยาย

๒.๒ แจ้งผลการพิจารณา และผลการคัดเลือกแก่ผู้ส่งบทความวิชาการภายในกรอบเวลาที่กำหนด

๓. การจัดการนำเสนอและการควบคุมคุณภาพ

๓.๑ ติดต่อ ทาบทาม ผู้ดำเนินรายการ commentator และเลขานุการประจำห้องนำเสนอในการนำเสนอผลงานทางวิชาการทั้งแบบบรรยาย และแบบโปสเตอร์

๓.๒ กำหนดกฎเกณฑ์ของการนำเสนอผลงานทางวิชาการทั้งแบบบรรยาย

๓.๓ กำกับและดูแลให้การนำเสนอผลงานทางวิชาการทั้งแบบบรรยายให้ดำเนินไปด้วยความราบรื่น และเรียบร้อย

๓.๔ กำหนดแนวทางและกฎเกณฑ์เพิ่มเติมสำหรับการนำเสนอผลงานในรูปแบบออนไลน์หรือเสมือนจริง (ถ้ามีการจัดการประชุมแบบ Hybrid หรือ Virtual Session)

๔. การเผยแพร่และยกระดับคุณภาพ

๔.๑ รับผิดชอบและกำกับดูแลการจัดทำรูปเล่มบทความฉบับสมบูรณ์ (Full Paper Proceedings) หรือวารสาร (ในกรณีที่มีการเผยแพร่ในวารสาร) รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องทางบรรณาธิกร (Editorial Check) และการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน (Plagiarism Check)

๔.๒ กำหนดเกณฑ์และคัดเลือกบทความยอดเยี่ยม (Best Paper Award) และประสานงานกับฝ่ายพิธีการเพื่อมอบรางวัล

๔.๓ ประสานงานและจัดเตรียมเอกสารที่จำเป็นเพื่อยื่นขอพิจารณา การจัดทำดัชนี (Indexing) บทความในฐานข้อมูลระดับชาติหรือนานาชาติ (เช่น Scopus, Web of Science, TCI)

๔.๔ ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๓. คณะกรรมการฝ่ายสารสนเทศ

๓.๑	ดร.จักรกฤษณ์	สุทธานุรักษ์	ประธานกรรมการ
๓.๒	ผศ.ดร.อรอนงค์	แสงผ่อง	รองประธานกรรมการ
๓.๓	อาจารย์ณพิตร	วัฒนวีรพงษ์	กรรมการ
๓.๔	ผศ.ดร.อ่อนลมี	กมลอินทร์	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. จัดทำ ดูแล และปรับปรุงข้อมูลบนเว็บไซต์การประชุมให้ทันสมัยอยู่เสมอ

๒. ประสานงานกับฝ่ายต่างๆ ในการจัดทำข้อมูลในเว็บไซต์

๓. ออกแบบและจัดทำวิธีการลงทะเบียนผ่านเว็บไซต์ จัดทำแบบประเมินออนไลน์

๔. ดูแล อำนวยความสะดวกในการลงไฟล์นำเสนอภายในงานประชุม

๕. ดูแลและจัดการระบบส่งบทความออนไลน์ (Online Submission System) ทั้งในด้านเทคนิค การใช้งาน และการเข้าถึงข้อมูลของบทความ

๖. กำหนดมาตรการและดูแลความปลอดภัยของข้อมูลบนเว็บไซต์และระบบลงทะเบียน (Data Privacy/Security) รวมถึงการสำรองข้อมูล (Backup)

๘. จัดทำคู่มือและให้ความช่วยเหลือทางเทคนิคแก่ผู้นำเสนอเกี่ยวกับรูปแบบไฟล์, อัตราส่วนหน้าจอ, และวิธีการส่งไฟล์ล่วงหน้า

๙. จัดทำและดูแลระบบการสื่อสารผ่านอีเมลอัตโนมัติ (Automated Email) สำหรับการยืนยันการลงทะเบียน, การแจ้งเตือนกำหนดเวลาสำคัญ, และการส่งเอกสารสำคัญ

๑๐. ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๔. คณะกรรมการฝ่ายเอกสาร ประชาสัมพันธ์ และพิธีการ

๔.๑	ดร.ดวงธิดา	โคตรโยธา	ประธานกรรมการ
๔.๒	ผศ.ดร.วรุทัย	เดชตานนท์	รองประธานกรรมการ
๔.๓	อาจารย์จิรวัฒน์	โลพันดุง	กรรมการ
๔.๔	ดร.วิชยา	ริงคะนานนท์	กรรมการ
๔.๕	อาจารย์สุวพัชร	คัดจันทึก	กรรมการ
๔.๖	ผศ.ดร.ภิญญาพัชร์	สวัสดิ์กุลนิธิ	กรรมการ
๔.๗	รศ.ณัฏวรัตน์	ขจัดภัย	กรรมการ
๔.๘	อาจารย์สุภาวดี	เสริมรัมย์	กรรมการ
๔.๙	ผศ.เกรียงไกร	ดวงขจร	กรรมการ
๔.๑๐	นายพงษ์ตรี	ศรีพรหม	กรรมการ
๔.๑๑	ดร.อังคาร	คำเรือน	กรรมการ
๔.๑๒	นายพิชญะ	หงษ์นาง	กรรมการ
๔.๑๓	นายฉัตรชัย	สุดดีพงษ์	กรรมการ
๔.๑๔	นางสาวรสริน	นวกิตติสกุล	กรรมการ
๔.๑๕	นางสาวกรภัทร	ปิ่นรัตนโสภณ	กรรมการ และเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. งานธุรการ สารบรรณ และการติดต่อประสานงาน

๑.๑ การวางแผนและขออนุมัติโครงการ

๑.๒ การออกหนังสือเชิญและหนังสือราชการ ออกหนังสือเชิญวิทยากร, ผู้นำเสนอผลงาน, ผู้กลั่นกรองผลงานทางวิชาการ, และออกหนังสือไปยังหน่วยงานภายนอก

๑.๓ การเชิญประธานและผู้กล่าวรายงาน ร่างหนังสือคำกล่าวรายงาน, คำกล่าวเปิดและปิดการประชุม. ทำหนังสือเชิญคณบดีกล่าวรายงานและปิดงาน และประสานงานและทำหนังสือเชิญอธิการบดีมาเป็นประธานเปิดงาน

๑.๔ การประสานงานวิทยากร ติดต่อทาบทามวิทยากร, ขอประวัติ, รายละเอียดที่เกี่ยวกับวิทยากร, รวมถึงเอกสารประกอบการบรรยาย, และสอบถามอุปกรณ์โสตทัศนูปกรณ์ที่วิทยากรใช้

๑.๕ การเชิญชวนเข้าร่วม ส่งหนังสือเชิญชวนเข้าร่วมนำเสนอผลงานและเข้าร่วมประชุมวิชาการฯ ไปยังมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั่วประเทศ

๑.๖ การสรุปผล ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๑.๗ จัดเตรียมรายชื่อผู้เข้าประชุม บรรจุเอกสารใส่กระเป๋า และขนย้ายเอกสารสำหรับผู้เข้าประชุมจากคณะไปยังห้องประชุม

๑.๘ รับลงทะเบียน แจกป้ายชื่อ และแจกเอกสารสำหรับผู้เข้าประชุม

๑.๙ จัดทำแบบประเมินผลและสรุปผลการประเมิน

๑.๑๐ ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๒. งานพิธีการ ปฏิคม และการต้อนรับ

๒.๑ การจัดการพิธีเปิด-ปิดแก่ำหนดรูปแบบพิธีการเปิด-ปิดการประชุม ดูแลและกำกับพิธีเปิดและปิดการประชุมวิชาการฯ ให้ดำเนินไปด้วยความราบรื่นตลอดการประชุม

๒.๒ การดำเนินรายการ พิธีกรเป็นผู้ดำเนินรายการในทุกห้องประชุมให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย และช่วยแปลคำถามหรือแก้ปัญหาในห้องประชุม

๒.๓ การดูแลวิทยากร (Keynote) ดูแลวิทยากรบรรยายพิเศษ (Keynote speaker) ประสานงานกับโรงแรมที่พักของวิทยากรบรรยายพิเศษ (Keynote speaker)

๒.๔ การจัดเตรียมผู้ช่วยและรางวัล เตรียมนักศึกษาสำหรับช่วยงานพิธีกรในห้องประชุมย่อย คัดกรองและจัดลำดับผู้เข้ารับวุฒิบัตรและรางวัล

๒.๕ ของที่ระลึกและวุฒิบัตร จัดหาของที่ระลึกให้แก่วิทยากรบรรยายพิเศษ (Keynote speaker) และประธานที่มาเปิดงาน และจัดทำวุฒิบัตรผู้นำเสนอผลงานทุกคน

๓. งานประชาสัมพันธ์และสื่อสาร

๓.๑ การเผยแพร่ข้อมูล ประชาสัมพันธ์โครงการผ่านทางรายการเสียงตามสาย, โทรทัศน์, E-mail, Facebook, และ Website ของมหาวิทยาลัย

๓.๒ การเชิญสื่อมวลชน ทำหนังสือเชิญผู้สื่อข่าวมาทำข่าวในวันจัดงานประชุมวิชาการ

๔. งานทะเบียนและเอกสารประกอบ

๔.๑ การจัดทำป้ายชื่อ จัดทำป้ายชื่อของคณะกรรมการ, ผู้เข้าร่วมนำเสนอผลงาน, จัดเตรียมป้ายชื่อผู้ดำเนินรายการ, และป้ายชื่อผู้นำเสนอผลงานในส่วนของห้องนำเสนอกลุ่มย่อย

๔.๒ แบบฟอร์มรายงานตัว: จัดทำแบบฟอร์มรายงานตัวของวิทยากรบรรยายพิเศษ (Keynote speaker) และผู้ทรงคุณวุฒิประจำห้อง

๕. คณะกรรมการฝ่ายการเงิน และงบประมาณ

๕.๑	ผศ.ดร.อ่อนลมี	กมลอินทร์	ประธานกรรมการ
๕.๒	ผศ.ดร.ภิญญาพัชร์	สวัสดิ์กุลนิธิ	กรรมการ
๕.๓	นางสาวอริญชยา	มณูรัตน์	กรรมการ
๕.๔	นางสาวกมลทิพย์	กาพย์กระโทก	กรรมการ
๕.๕	นางสาวกรภัทร	ปิ่นรัตนโสภณ	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. จัดทำงบประมาณสำหรับดำเนินการจัดการประชุมวิชาการ

๒. ประจำโต๊ะลงทะเบียนหน้าห้องประชุม รับเงินค่าลงทะเบียนหน้างานพร้อมออกใบสำคัญรับเงิน

๓. จัดเก็บ และส่งเงินค่าลงทะเบียนเข้าบัญชีธนาคาร ดูแลการเบิกจ่ายเงิน จัดทำรายการใช้จ่ายเงิน ตรวจหลักฐานการเบิกจ่ายให้ถูกต้องตามระเบียบ

๔. ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๖. คณะกรรมการฝ่ายสถานที่

๖.๑	ผศ.วุฒิพงศ์	แสนบุดดา	ประธานกรรมการ
๖.๒	ผศ.ขวัญนภา	สิทธิ์ประเสริฐ	รองประธานกรรมการ
๖.๓	อาจารย์ไพโรจน์	พุทธโอวาท	กรรมการ
๖.๔	ผศ.ดร.เอกวิทย์	หวังกั้นกลาง	กรรมการ
๖.๕	ผศ.ศราวุฒิ	ใจอดทน	กรรมการ
๖.๖	ดร.วิชยา	ริงคนานนท์	กรรมการ
๖.๗	นายศราวุธ	พิสุตปัญญาทร	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. ประสานงานกับฝ่ายประชาสัมพันธ์ เพื่อติดตั้งป้ายทั้งห้องประชุมใหญ่ และห้องประชุมย่อย
๒. ติดต่อและประสานงานหน่วยงาน สถานที่ ที่เกี่ยวข้องเพื่อเตรียมการจัดสถานที่
๓. ดูแลและอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการประชุมวิชาการฯ จัดทำป้ายบอกทาง หรือแผนผัง
๔. ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๗. คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์ และโสตทัศนูปกรณ์

๗.๑	อาจารย์ณพิตร	วัฒนวีรพงษ์	ประธานกรรมการ
๗.๒	อาจารย์ฤทธิรงค์	แจ้งอิ่ม	รองประธานกรรมการ
๗.๓	ดร.รัฐศาสตร์	ลายกนก	กรรมการ
๗.๔	นายพิเชฐ	เกล็ดงูเหลือม	กรรมการ
๗.๕	นางสาววารุณี	คุ้มบัว	กรรมการ
๗.๖	นายคณพศ	พงศ์วรรัศม์	กรรมการ
๗.๗	นายถาวร	สุครีพธ์	กรรมการ
๗.๘	นายวนันต์	สร้อยเพชร	กรรมการ
๗.๙	นายวรวุฒิ	ด่านกระโทก	กรรมการ
๗.๑๐	นายสัมพันธ์	เพียซ้าย	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. มีหน้าที่ดูแลความเรียบร้อยของอุปกรณ์ในห้องประชุม ทั้งห้องประชุมใหญ่ และห้องประชุมย่อย ร่วมกับเจ้าหน้าที่ประจำของอาคาร
๒. ดูแลอำนวยความสะดวกด้านโสตทัศนูปกรณ์ในการประชุมวิชาการ ฯ
๓. จัดเตรียมห้อง เจ้าหน้าที่ และติดตั้งอุปกรณ์โสตทัศนูปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการจัดการประชุมวิชาการ
๔. ถ่ายภาพ และถ่ายวีดีโอ
๕. อำนวยความสะดวกอุปกรณ์ชุดเครื่องเสียง โปรเจคเตอร์ และอื่น ๆ ในพิธีเปิด
๖. อำนวยความสะดวกด้านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
๗. ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

๘. คณะกรรมการฝ่ายสนับสนุนบริการอาหาร และเครื่องดื่ม

๘.๑	ดร.กนกพร	บุญจูบุตร	ประธานกรรมการ
๘.๒	อาจารย์ละอองดาว	ขุนงิ้ว	รองประธานกรรมการ
๘.๓	ผศ.ดร.ภิญญาพัชร์	สวัสดิ์กุลนิธิ	กรรมการ
๘.๔	นายชัยพงศ์	นาคเพชร	กรรมการ
๘.๕	นายเฉลิมศักดิ์	พึ่งสันเทียะ	กรรมการ
๘.๖	นายพิเชฐ	เกล็ดงูเหลือม	กรรมการ
๘.๗	นางสาวบัณฑิตา	มียิ่ง	กรรมการและเลขานุการ
๘.๘	นางวรวรากัญจน์	พีระนวโชติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

หน้าที่ : ๑. ดูแลความเรียบร้อยเรื่องอาหาร และเครื่องดื่มตลอดการประชุม
๒. จัดเตรียมอาหารว่าง อาหารกลางวัน และเครื่องดื่มสำหรับแขกผู้มีเกียรติ กรรมการวิทยากร และผู้เข้าร่วมประชุม

๓. บริหารจัดการน้ำดื่มให้วิทยากร แขกผู้มีเกียรติ ผู้บริหาร
๔. การดูแลอาหารและเครื่องดื่มเครือข่ายและผู้เข้าร่วม ดูแลตัวแทนเครือข่ายทุกเครือข่าย
๕. จัดเตรียมการแสดงต้อนรับผู้เข้าร่วมงาน
๖. ประสานงานกับคณะกรรมการฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลการดำเนินงานภายในฝ่าย

ให้คณะกรรมการแต่ละฝ่ายประชุมคณะกรรมการเพื่อดำเนินงาน โดยมีสิทธิ์เบิกค่าใช้จ่ายจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏเพื่อการพัฒนาท้องถิ่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๙ โครงการการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๑๗ (Estacon 2026) และงบประมาณเงินรายได้รับฝาก โครงการการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๑๗ (Estacon 2026)

สั่ง ณ วันที่ ๒๒ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๖๙

(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศร เนาวนนท์)
อธิการบดี

PEOPLE
INNOVATION
RESILIENCE
SUSTAINABILITY
FOR A BETTER
TOMORROW



https://estacon-fit.nrru.ac.th/

LOCAL WISDOM
GLOBAL SOLUTIONS
FOR A BETTER TOMORROW