

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 (2026)

กรกฎาคม – สิงหาคม 2569

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)





กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม – สิงหาคม 2569)

Vol. 4 No. 4 (July – August 2026)

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

วัตถุประสงค์

จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) เปิดรับทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน โดยมีขอบเขตของวารสาร ดังนี้

- วิศวกรรมทั่วไป (General Engineering)
- วิศวกรรมอุตสาหกรรมและวิศวกรรมการผลิต (Industrial and Manufacturing Engineering)
- วิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering)
- เทคโนโลยีสื่อและประยุกต์ใช้ (Media Technology and Application)
- สถาปัตยกรรม (Architecture)

เงื่อนไขการตีพิมพ์

บทความที่ส่งเข้ามายังวารสารจะได้รับการประเมินคุณภาพของผลงานทางวิชาการโดยหัวหน้ากองบรรณาธิการ (Editor in Chief) ถ้าบทความมีคุณภาพที่อาจได้รับการตีพิมพ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการจะมอบหมายให้บรรณาธิการประจำเรื่อง (Section editor) เป็นผู้พิจารณาและดำเนินการส่งบทความให้ผู้ประเมินบทความ (Peer reviewers) ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ต่างสถาบัน และไม่สังกัดเดียวกับผู้นิพนธ์ ซึ่งบทความที่ถูกส่งไปยังผู้ประเมินจะเป็นแบบปกปิดรายชื่อทั้งผู้เขียนบทความ และผู้ประเมิน (Double-Blinded Review) เมื่อผู้ประเมินบทความส่งข้อคิดเห็นมายังบรรณาธิการประจำเรื่อง บทความที่ถูกประเมินจะได้รับการตัดสินใจจากกองบรรณาธิการโดยอาศัยความคิดเห็นของผู้ประเมินเสียงข้างมาก ดังนี้ ยอมรับให้ตีพิมพ์โดยไม่มีการแก้ไข (Accept Submission) บทความมีการแก้ไข (Revisions Required) และ ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ (Decline Submission)

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดี ด้านวิชาการ การวิจัย การบริการวิชาการ

และการประกันคุณภาพและมาตรฐานการศึกษาทุกระดับ

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดร.วิจิตรา โพธิสาร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สฤติพงศ์ เสี่ยงรัมย์ศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงรัมย์วิบูล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูพงษ์ ทองคำสมุทร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิปาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา ประเมษฐานวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลดล วรรณปะเข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจาภจ จอมโนนเขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.สินาค โกศลนันท์

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

รองศาสตราจารย์ ดร.เกียร ด้วงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ วิหาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ ชัยจิตวณิชกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา ทองสุพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพจน์ สมมูล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ โตอ่อน

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมจัดการบทความและรูปแบบ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ วิหาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี อนุชา ศรีบุญมัย

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมเอกสารและการประสานงาน

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

นางนกร สุตสนธิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

นางสาวนภัทรธิดา พรหมดีราช

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการเผยแพร่ :

ปีละ 6 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์

ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน

ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม

ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน - ธันวาคม

สำนักงาน

กองบรรณาธิการวารสาร "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

โทร: 088-574-2199

Email: jeit@ksu.ac.th

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 เดือนกรกฎาคม – เดือนสิงหาคม ปีพุทธศักราช 2569 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความมาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านจะได้รับประโยชน์จากผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิจัย	
การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรของสายการผลิตเครื่องตีม บรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง	1-19
รุ่งพราย สารคำ และ ประจวบ กล่อมจิตร	
การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยก อัตโนมัติ	20-37
สมโภช เวียงคำ, ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช, วัฒนา จันทะโคตร, เสรีย์ ตู๊ประกาย, นันทน์ภัสร์ อินยิ้ม และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี	
การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กเพื่อจำแนกและตรวจจับไข่มดแดง	38-49
ธรรมรัตน์ บุญรอด, สุขสันต์ พรหมบุญเรือง, บัญชา เหลือผล, เสาวลักษณ์ จิตติมงคล และ จุราวรรณ ภารสถิตย์	
การศึกษาผลของความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนต่อสมรรถนะของเครื่องสับสมุนไพร แบบสองใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชัน	50-64
จิตินันท์ ป้องนาม, ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์ และ สิริธร คีสาลัง	
การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ	65-77
เสาวนีย์ จันทร์สว่าง, อนุวัช แสนพงษ์, อภิชน มุ่งชู และ ไฉไล ชาแสน	
การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ ด้วยระบบควบคุมระยะไกล	78-94
ธีรฉวัลย์ ปานกลาง, รัตนสุตา สุภตน์ยสร, สุทิวัฒน์ ศรีชะแก้ว, กฤษฎา วารินทร์, สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล และ สุรินทร์ ผลงาม	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

**การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริง
เสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก
ด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน**

95-109

ศราวิน ราชานิกรณ์, พรศักดิ์ ปรีเลขา, พรรณเชษฐ ญ ลำพูน, ปิยะวัฒน์ จิระพงษ์สุวรรณ,
รัฐวิชัย ญ ลำพูน และ ศุภณัษ งามประภาวัฒน์

บทความวิจัย (Research Article)

การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรของสายการผลิตเครื่องดื่ม บรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง

รุ่งพราย สารคำ^{1,*} และ ประจวบ กล่อมจิตร¹

¹ สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

*ผู้ประสานงานบทความฉบับนี้: sarakum_r@silpakorn.edu โทรศัพท: 093-8913661

(รับบทความ: 11 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 16 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 18 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพการบำรุงรักษาของเครื่องบรรจุขวดและหุ้มฟิล์มในสายการผลิตเครื่องดื่มบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง โดยนำเสนอซึ่งเป็นเครื่องจักรคอกขวดที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงสุดจากการประเมินด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ทั้งนี้ แนวทางการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิมที่อ้างอิงเพียงคู่มือผู้ผลิตหรือประสบการณ์ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถระบุพฤติกรรมการเสื่อมสภาพที่แท้จริงของเครื่องจักรได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวคิดใหม่โดยการดำเนินงานเป็นการประยุกต์ใช้หลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือผ่านการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Analysis) โดยมีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) เท่ากับ 2.79 เพื่อยืนยันพฤติกรรมการเสียหายแบบสึกหรอ (Wear-Out Failure) จากข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริงจากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาบูรณาการร่วมกับแนวคิดการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ซึ่งแตกต่างจากการประยุกต์ใช้แบบดั้งเดิมที่อาศัยเพียงดุลยพินิจของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้ใช้หลักฐานทางสถิติจากการวิเคราะห์ไวบูลล์เป็นฐานในการกำหนดรายการตรวจสอบและรอบเวลาบำรุงรักษา เพื่อพัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานทางวิศวกรรม ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า สามารถลดระยะเวลาการหยุดเครื่องจักรรวม (Breakdown Time) ลงร้อยละ 44.03 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 ลดเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ร้อยละ 13.63 และเพิ่มเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ได้ถึงร้อยละ 55.70 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลและการวิเคราะห์เชิงระบบสามารถช่วยลดความสูญเสียเพิ่มเสถียรภาพของเครื่องจักร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรประเภทอื่นในสายการผลิตที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม MTBF MTTR ความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร

การอ้างอิงบทความ: รุ่งพราย สารคำ และ ประจวบ กล่อมจิตร, "การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรของสายการผลิตเครื่องดื่มบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 1-19, 2569.

Improvement of a Preventive Maintenance Plan for Machinery in the Canned Beverage Production Line

Rungprai Sarakum^{1,*} and Prachuab Klomjit¹

¹ Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding Author: sarakum_r@silpakorn.edu, Tel: 093-8913661

(Received: March 11, 2026; Revised: May 16, 2026; Accepted: May 18, 2026)

Abstract

This research aims to enhance the reliability and maintenance efficiency of a Tray Packer machine in a canned beverage production line, which was identified as the bottleneck machine with the highest downtime rate through the Weight Score Method. Conventional maintenance approaches that rely solely on manufacturer manuals or operator experience are insufficient for accurately identifying true machine degradation behavior. This study therefore proposes a novel framework by applying reliability engineering principles through Weibull Distribution Analysis, yielding a shape parameter (β) of 2.79, to verify wear-out failure behavior using actual time-to-failure field data. The findings were then integrated with the Total Productive Maintenance (TPM) concept. Unlike conventional TPM applications that depend primarily on operator judgment, this study uniquely employs statistical evidence derived from Weibull analysis as the basis for defining inspection items and maintenance intervals, resulting in a data-driven Preventive Maintenance plan that reflects actual engineering operating conditions. A comparative performance evaluation before and after implementation revealed a statistically significant reduction in total Breakdown Time by 44.03% and Failure Frequency by 35.20%. Furthermore, the Mean Time to Repair (MTTR) decreased by 13.63%, while the Mean Time Between Failures (MTBF) increased by 55.70%, at a statistical significance level of 0.05 ($p < 0.05$). The findings demonstrate that a data-driven preventive maintenance plan developed through systematic analysis can effectively reduce production losses, enhance machine stability, and serve as a replicable model applicable to other machinery with similar operating characteristics in the production line.

Keywords: Preventive Maintenance, Total Productive Maintenance, MTBF, MTTR, Machine Reliability

Please cite this article as: R. Sarakum and P. Klomjit, "Improvement of a Preventive Maintenance Plan for Machinery in the Canned Beverage Production Line," *The Journal of Engineering and Industrial Technology*, Kalasin University, vol. 4, no. 4, pp. 1-19, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตให้ความสำคัญกับความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต เนื่องจากการหยุดชะงักส่งผลกระทบต่อต้นทุน แม้หลายองค์กรจะประยุกต์ใช้การบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบกำหนดรอบเวลา (Time-Based Maintenance) [1-5] แต่ในทางปฏิบัติมักพบข้อจำกัดเรื่องความแตกต่างของสภาพแวดล้อมและภาระงาน ส่งผลให้แผนรูปแบบเดิมไม่สามารถป้องกันการขัดข้องได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Production System) ลักษณะการหยุดทำงานของเครื่องจักรนั้นมีความหลากหลาย ทั้งการหยุดขัดข้องบ่อยครั้งหรือการหยุดซ่อมเป็นระยะเวลานาน (MTTR) ซึ่งการขัดข้องของเครื่องจักรเพียงจุดเดียวสามารถส่งผลกระทบลูกโซ่ให้กระบวนการผลิตทั้งหมดต้องหยุดชะงัก ดังนั้น องค์กรจึงจำเป็นต้องประเมินและคัดเลือกเครื่องจักรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพรวมของสายการผลิตมากที่สุดอย่างเป็นระบบด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) [6] ดังเช่นกรณีศึกษาในสายการผลิตเครื่องตีบรรจุกระป๋องที่ผลการประเมินพบว่า เครื่องบรรจุอัดและหุ้มฟิล์มเป็นคอขวดสำคัญที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงถึงร้อยละ 22.30 สะท้อนให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องระหว่างรอบการตรวจสอบกับพฤติกรรมเสื่อมสภาพที่แท้จริง

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาที่ผ่านมา มักมุ่งเน้นการจัดการเชิงเอกสาร การวางแผนตามรอบเวลา (Time-Based Maintenance) หรือการประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค FMEA [7] ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือ การพึ่งพาดุลยพินิจ ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน หรือคู่มือผู้ผลิตเป็นหลัก โดยไม่ได้สะท้อนถึงสภาพแวดล้อมและภาระงานจริงในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง การจัดการดังกล่าวยังขาดการประเมินความวิกฤตของปัญหาเชิงปริมาณ และขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มารองรับ ทำให้การ

กำหนดรอบการบำรุงรักษาเกิดความคลาดเคลื่อนและไม่สามารถป้องกันการขัดข้องซ้ำได้อย่างเด็ดขาด แม้งานวิจัยในระยะหลังจะเริ่มนำแบบจำลองความน่าเชื่อถือ เช่น การวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) มาประยุกต์ใช้ในบริบทอุตสาหกรรม [8,9] หรือนำหลักการ TPM มาใช้เพื่อยกระดับการมีส่วนร่วมของพนักงาน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงใช้เครื่องมือเหล่านี้แบบแยกส่วน และมักเน้นการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ผลเพียงอย่างเดียว โดยขาดการนำผลลัพธ์ทางสถิติมาแปลงเป็นแผนปฏิบัติงานจริงในระดับหน้างาน [10] นอกจากนี้ ยังขาดการบูรณาการเชิงระบบที่อ้างอิงข้อมูลความเสียหายจริงจากสภาพแวดล้อมการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งถือเป็นช่องว่างสำคัญที่งานวิจัยนี้มุ่งเติมเต็ม

เพื่อเติมเต็มช่องว่างการวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรอบแนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่บูรณาการเครื่องมือเชิงปริมาณและหลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย 1) การประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ที่ให้น้ำหนักกับค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และความถี่การหยุดเครื่องเป็นหลัก เพื่อคัดเลือกเครื่องจักรคอขวดอย่างปราศจากความเอนเอียง 2) การนำข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริง (Time to Failure) มาวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) เพื่อพิสูจน์พฤติกรรมเสื่อมสภาพทางกลไกด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ และ 3) การนำข้อค้นพบทางสถิติดังกล่าวไปบูรณาการร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เพื่อยกระดับวิธีการและรอบการตรวจสอบ ทั้งนี้ นวัตกรรมของงานวิจัยฉบับนี้ ไม่ใช่เพียงการนำเครื่องมือทางวิศวกรรมที่มีอยู่เดิมมาใช้ แต่คือการสร้างกรอบการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลจริง กรอบการวิจัยนี้จึงเป็นการเปลี่ยนผ่านจากการใช้ความรู้สึกในการ

บทความวิจัย (Research Article)

ประเมิน ไปสู่การวางแผนการปรับปรุงการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการสึกหรอทางวิศวกรรม

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล โดยเริ่มต้นจากการประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) เพื่อประเมินและคัดเลือกเครื่องจักรที่เป็นคอขวดของสายการผลิตอย่างเป็นรูปธรรม จากนั้นจึงอาศัยข้อมูลเชิงสถิติและการวิเคราะห์เชิงระบบ มุ่งเน้นการประเมินเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของเครื่องจักร ได้แก่ ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ความถี่ การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) และระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) เพื่อยกระดับความพร้อมใช้งานและเสถียรภาพของเครื่องจักร พร้อมทั้งเสนอเป็นกรอบแนวคิดการบำรุงรักษาแบบอาศัยข้อมูลจริงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบกับเครื่องจักรประเภทอื่นในระบบอุตสาหกรรมการผลิตที่มีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกัน

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance)

การกำหนดรอบเวลาบำรุงรักษา (Time-Based Maintenance) เพื่อป้องกันเครื่องจักรชำรุด [1-5] มักอ้างอิงตามคู่มือผู้ผลิต (OEM) ซึ่งมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้กับสายการผลิตแบบต่อเนื่อง เนื่องจากไม่สะท้อนถึงภาระงานและสภาพแวดล้อมที่แท้จริง ทำให้มักเกิดการสึกหรอก่อนกำหนดหรือเกิดการบำรุงรักษาที่เกินความจำเป็น

2.2 วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (Reliability Engineering)

ศาสตร์ที่มุ่งลดอัตราการเสียและยกระดับความพร้อมใช้งาน (Availability) ของระบบ [10-12] โดยให้ความสำคัญกับการลดความถี่การขัดข้องและควบคุมเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ควบคู่กัน เพื่อเปลี่ยนผ่านจากการบำรุงรักษาเชิงรับ ไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมเครื่องจักรอย่างเป็นรูปธรรม

2.3 การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

แบบจำลองทางสถิติที่นำข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหาย (Time to Failure) มาประเมินหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) [8-9] ซึ่งเป็นดัชนีที่ช่วยยืนยันพฤติกรรมการเสียหาย (Failure Mode) โดยมีการตีความดังนี้

$(\beta) < 1$ หมายถึงการเสียหายในระยะเริ่มต้น (Early Failure) มักเกิดจากความบกพร่องในการผลิตหรือการติดตั้งชิ้นส่วน

$(\beta) = 1$ หมายถึงการเสียหายแบบสุ่ม (Random Failure) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นอย่างคงที่และคาดเดาได้ยาก

$(\beta) > 1$ หมายถึงการเสียหายจากการสึกหรอ (Wear-out Failure) ซึ่งเกิดขึ้นตามอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของกลไก

การวิเคราะห์นี้จึงช่วยยืนยันพฤติกรรมความเสียหายด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถกำหนดรอบเวลาการตรวจสอบได้อย่างแม่นยำ ปราศจากการคาดเดา

2.4 การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM)

กลยุทธ์การจัดการเครื่องจักรเชิงรุกตามแนวทางของ Nakajima [5] ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำ

บทความวิจัย (Research Article)

หลักการ TPM มาบูรณาการร่วมกับข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อพัฒนาเป็นมาตรฐานการทำงานและรายการตรวจสอบ (PM Checklist) ที่สะท้อนถึงจุดเสี่ยงและพฤติกรรมความเสี่ยงสภาพหน้างานจริง อย่างไรก็ตามการนำ TPM ไปใช้ยังคงมุ่งเน้นที่การดำเนินงานและไม่ได้รวมโมเดลวิศวกรรมความน่าเชื่อถือเพื่อกำหนดช่วงเวลาการบำรุงรักษาที่เหมาะสมอย่างชัดเจน

การศึกษาล่าสุดชี้ให้เห็นว่าการรวมการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเข้ากับ TPM สามารถปรับปรุงการตัดสินใจในการบำรุงรักษาได้โดยการเชื่อมโยงพฤติกรรมความเสี่ยงในการดำเนินงานกับการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

2.5 การคัดเลือกเครื่องจักรคอกวดด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method)

เครื่องมือประเมินเชิงปริมาณตามแนวทางของ Jardine and Tsang [6] ที่ใช้แปลงดัชนีความสูญเสีย

ให้เป็นคะแนนรวม โดยกำหนดน้ำหนักตามผลกระทบทางวิศวกรรม เช่น MTTR (ร้อยละ 40) และความถี่การหยุดเครื่อง (ร้อยละ 30) ช่วยให้การระบุเครื่องจักรเป้าหมายมีความแม่นยำและปราศจากความเอนเอียง (Bias) จากดุลยพินิจของบุคลากรที่จะทำงานซ่อมบำรุงเพื่อวิเคราะห์จุดและเห็นความผิดปกติก่อนจะทำการซ่อมบำรุงจุดยากลำบาก ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวมีความโดดเด่นกว่าการประเมินแบบดั้งเดิมในแง่ที่สามารถบูรณาการตัวชี้วัดหลายมิติพร้อมกันได้ในสมการเดียว โดยไม่จำกัดเพียงการพิจารณาจากเวลาหยุดทำงานสะสมเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าน้ำหนักให้สอดคล้องกับบริบทของแต่ละสายการผลิตได้อย่างยืดหยุ่น ทำให้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรในระบบการผลิตแบบต่อเนื่องที่มีความซับซ้อนสูง

ตารางที่ 1 การวิพากษ์แนวคิดและทฤษฎีในอดีต

แนวคิดและทฤษฎี	ข้อวิพากษ์เชิงวิชาการ	การพัฒนางานวิจัย
การจัดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบดั้งเดิม	การกำหนดรอบเวลามักอ้างอิงตามคู่มือผู้ผลิต (OEM) หรือประสบการณ์ผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก ซึ่งไม่สะท้อนถึงภาระงานและสภาพแวดล้อมจริง	กำหนดรอบ PM โดยอ้างอิงข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริง (TTF) แทนการใช้คู่มือผู้ผลิต
การประเมินความเสี่ยงและประสิทธิภาพ (FMEA & OEE)	กระบวนการตัดสินใจยังคงอาศัยดุลยพินิจเชิงคุณภาพของทีมงานเป็นหลัก ขาดแบบจำลองคณิตศาสตร์รองรับ	ใช้การวิเคราะห์ไวบูลล์เพื่อระบุพฤติกรรมความเสี่ยงด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ ลดความเอนเอียงจากดุลยพินิจ
แบบจำลองความน่าเชื่อถือและการจำลองสถานการณ์ (Reliability Simulation)	แม้มีความแม่นยำทางสถิติสูง แต่มักเน้นการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์เพียงอย่างเดียว ขาดการนำผลลัพธ์ไปจัดทำแผนปฏิบัติงานจริง	นำผลการวิเคราะห์ไวบูลล์มาบูรณาการกับ TPM เพื่อจัดทำ PM Checklist ที่ใช้งานได้จริงในระดับหน้างาน

บทความวิจัย (Research Article)

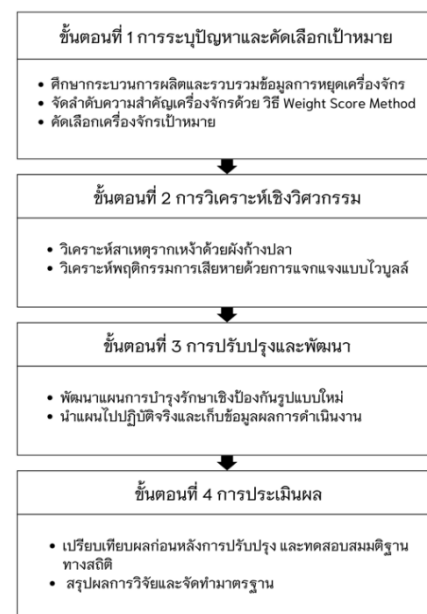
จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่า แนวทางการบำรุงรักษาที่มีอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด ในสองประเด็นหลัก ประเด็นแรกคือ การขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงข้อมูลความเสียหายจริงในการกำหนดรอบการบำรุงรักษา และประเด็นที่สองคือ การขาดกลไกที่เชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ทางสถิติกับแผนปฏิบัติงานในระดับหน่วยงานอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยก่อนหน้าโดยบูรณาการจุดแข็งของแต่ละแนวทางเข้าด้วยกัน กล่าวคือ นำความแม่นยำของการวิเคราะห์ไวบูลล์ [8-9] มาใช้พิสูจน์พฤติกรรมความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรโดยอาศัยข้อมูลความเสียหายที่เก็บรวบรวมจากสภาพการใช้งานจริงในพื้นที่ให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สะท้อนอายุการใช้งานและอัตราการเสื่อมสภาพอย่างแม่นยำและนำหลักการ TPM มาเป็นกรอบในการแปลงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวให้กลายเป็นมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ใช้ได้จริง ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดรอบการตรวจสอบ การระบุจุดวิกฤตที่ต้องเฝ้าระวัง และการจัดทำคู่มือบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่พนักงานทุกระดับสามารถเข้าใจและนำไปปฏิบัติได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแนวทางดังกล่าวแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เครื่องมือเหล่านี้แบบแยกส่วน [10] โดยไม่ได้เชื่อมโยงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณเข้ากับระบบการจัดการบำรุงรักษาในเชิงปฏิบัติอย่างครบวงจร

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สกัดและสังเคราะห์ระเบียบวิธีวิจัยออกมาเป็นกรอบแนวคิดเชิงระบบของการบำรุงรักษาที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลจริง ซึ่งก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่และนวัตกรรมเชิงกระบวนการที่เหนือกว่าวิธีการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิม โดยเปลี่ยนจากการนำเครื่องมือมาตรฐานมาใช้งานแบบแยกส่วน ไปสู่การสร้างเสริมความเชื่อมโยงของข้อมูล (Data Synergy) อย่าง

เป็นระบบโมเดลเชิงแนวคิดประกอบด้วยการบูรณาการ 3 องค์ประกอบด้วยกัน

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษากระบวนการผลิตและจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรเพื่อระบุเป้าหมายหลักที่มีผลกระทบต่อสายการผลิตสูงสุด โดยประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ตามหลักการของ Jardine and Tsang [6] วิธีการนี้ช่วยเปลี่ยนข้อมูลความสูญเสียเชิงประจักษ์ให้เป็นคะแนนเชิงปริมาณ (Total Score) เพื่อระบุเครื่องจักรที่เป็นคอขวด (Bottleneck) ของระบบได้อย่างแม่นยำและปราศจากความเอนเอียง (Bias) โดยกระบวนการดำเนินงานทั้งหมดสามารถเรียงลำดับขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล โดยจะใช้ข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุงและรายงานการหยุดทำงานของเครื่องจักรทั้งหมดในสายการผลิตเครื่องเดิม

บทความวิจัย (Research Article)

บรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง โดยเลือกกลุ่มตัวอย่าง คือ เครื่องจักรประเภทบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์ม เนื่องจากผลการวิเคราะห์คะแนนถ่วงน้ำหนัก พบว่าเป็นเครื่องจักรที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงสุด การศึกษาได้แบ่งระยะเวลาการเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงก่อนการปรับปรุงระยะเวลา 12 เดือนและช่วงหลังการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาระยะเวลา 4 เดือน ทั้งนี้ ข้อมูลเวลาการปฏิบัติงานจริงของเครื่องจักรถือเป็นความลับ จึงนำเสนอตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency) ในรูปแบบดัชนีฐานสัมพัทธ์ (Relative Baseline Index) โดยกำหนดดัชนีช่วงก่อนปรับปรุงให้มีค่าฐานเท่ากับ 100 และการแปลงข้อมูลดังกล่าวใช้เพื่อการนำเสนอเชิงเปรียบเทียบสัดส่วนเท่านั้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าดัชนีสำคัญทางการทดสอบสมมติฐานทางสถิติแต่อย่างใด

ในการกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบสมมติฐาน ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) คือ รูปแบบการบำรุงรักษา 2 ระดับ ได้แก่ แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิม (Time-Based Maintenance) [4] และแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นจากการใช้ข้อมูลความขัดข้องจริงกับการวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) ร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) สำหรับ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) คือดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพ [11-13] ประกอบด้วย ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ได้มีการนำข้อมูลชั่วโมงการทำงานก่อนเสียหาย (TTF) มาวิเคราะห์การ

แจกแจงแบบไวบูลล์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) และค่าพารามิเตอร์มาตราส่วน (η) สำหรับระบุพฤติกรรมความเสี่ยงที่แท้จริงและใช้เป็นเกณฑ์กำหนดรอบการบำรุงรักษา [11,12] จากนั้นจึงประเมินผลสัมฤทธิ์ด้วยสถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) [14] โดยตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นและทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติที่เหมาะสม ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($p < 0.05$) โดยกำหนดขนาดตัวอย่างจากข้อมูลดัชนีชี้วัดสมรรถนะรายเดือน ได้แก่ กลุ่มก่อนปรับปรุง ($n = 12$) และกลุ่มหลังปรับปรุง ($n = 4$) โดยกำหนดสมมติฐาน ดังนี้

H_0 : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ระหว่างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่

H_1 : มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ระหว่างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ ($p < 0.05$)

3.1 การคัดเลือกเครื่องจักรและการวิเคราะห์พฤติกรรมความเสี่ยง

3.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตและรวบรวมข้อมูล

การศึกษาระบวนการดำเนินงานจริงเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 2 ทำให้เห็นภาพรวมของลำดับงานในสายการผลิตเครื่องตีบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง ซึ่งส่วนนี้จะสรุปแหล่งข้อมูลดิบและแนวทางการประเมินด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ที่ใช้ในการระบุและจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรในฐานะส่วนประกอบที่สำคัญ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและจัดการกับเครื่องจักรที่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องในการผลิต (Downtime) อย่างเป็นระบบ

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงลำดับการบรรจุภัณฑ์

นอกจากนี้ การประเมินดังกล่าวยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อแยกระดับความน่าเชื่อถือแผนการซ่อมบำรุงของเครื่องจักร นอกเหนือจากความพร้อมใช้งานตามแผนการผลิต การศึกษานี้ยังเน้นย้ำถึงความสามารถของเครื่องจักรในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเผชิญกับสภาวะการทำงานจริง สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นในตัวชี้วัดที่สำคัญ เช่น ระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ระยะเวลาที่เครื่องจักรหยุดทำงานรวม (Breakdown Time) ความถี่ในการเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) และเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR)

การประเมินนี้ใช้ฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ที่รวบรวมย้อนหลังเป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือนสิงหาคม 2567 โดยอาศัยกลุ่มข้อมูลสารสนเทศการปฏิบัติงานแบบบูรณาการ ซึ่งครอบคลุมทั้งข้อมูลประวัติการหยุดเครื่องจักร ข้อมูลสถานะการทำงานตามเวลาจริง และรายงานผลการบรรจุ เพื่อปรับปรุงการประมาณค่าความน่าเชื่อถือและเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมความ

ขัดข้องของเครื่องจักร การยกระดับและรับประกันความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรคอขวดที่สำคัญ ถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการรักษาการดำเนินงานที่ราบรื่นและลดความสูญเสียในสายการผลิต

3.1.2 การจัดลำดับความสำคัญและคัดเลือกเครื่องจักรเป้าหมาย

การจัดลำดับความสำคัญและคัดเลือกเครื่องจักรเป้าหมายอาศัยข้อมูลรายงานการหยุดทำงานของเครื่องจักร (Machine Breakdown Report) เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือนสิงหาคม 2567 โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกข้อมูลคือ ต้องเป็นบันทึกเหตุขัดข้องทางวิศวกรรมที่ส่งผลให้สายการผลิตหยุดชะงัก (Downtime) และมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Validation) ด้วยการเทียบเคียงข้อมูลระหว่างบันทึกการซ่อมบำรุงกับรายงานผลการผลิตประจำวัน เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน และเพื่อคัดข้อมูลที่ปราศจากข้อมูลที่ไม่จำเป็นมาวิเคราะห์จัดลำดับความสำคัญด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) คำนวณจากผลรวมของคะแนนปัจจัยคูณกับค่าน้ำหนักความสำคัญดังสมการที่ 1

$$\text{Total Score} = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i) \quad (1)$$

โดยที่

Total Score คือ คะแนนรวมของเครื่องจักร

W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยที่ i โดยผลรวมของน้ำหนักทั้งหมดต้องเท่ากับ 100%

S_i คือ คะแนนดิบ หรือ คะแนนที่ปรับฐานแล้วของปัจจัยที่ i

บทความวิจัย (Research Article)

การกำหนดตัวชี้วัดสมรรถนะ (KPIs) 4 ด้าน และค่าน้ำหนัก (W_i) อ้างอิงตามระดับความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อสายการผลิตแบบต่อเนื่อง

(Continuous Production Line) เพื่อสะท้อนสภาพปัญหาหน้างานจริง โดยมีเหตุผลทางวิศวกรรมในการกำหนดค่าน้ำหนักดังสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ค่าน้ำหนักตัวชี้วัดสมรรถนะและเหตุผลทางวิศวกรรมสำหรับการคัดเลือกเครื่องจักร

ตัวชี้วัด (KPIs)	ค่าน้ำหนัก (%)	ผลกระทบต่อสายการผลิต
MTTR (Mean Time To Repair)	40	ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ก่อให้เกิดความสูญเสียโอกาสการผลิตสูง
Frequency of Breakdown	30	สายการผลิตสะดุดบ่อยครั้ง กระทบต่อความเสถียรของเครื่องจักรและเพิ่มภาระงานของผู้ปฏิบัติงาน
Breakdown Time	20	สะท้อนภาพรวมของความสูญเสียด้านเวลาสะสมทั้งหมด ซึ่งเป็นผลกระทบต่อเนื่องมาจาก MTTR และความถี่ในการขัดข้อง
MTBF (Mean Time Between Failures)	10	แม้เป็นดัชนีสำคัญด้านความน่าเชื่อถือ แต่ในบริบทการค้นหาข้อผิดพลาด ผลกระทบเชิงประจักษ์ด้านเวลาซ่อมและความถี่จะส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องที่ชัดเจนกว่า

การบูรณาการค่าน้ำหนักทั้ง 4 ปัจจัยจากตารางข้างต้น นำมาสู่การสร้างสมการประเมินคะแนนความวิกฤตของเครื่องจักรดังสมการที่ 2

$$\text{Score} = (0.40 \times S_{\text{MTTR}}) + (0.30 \times S_{\text{Freq}}) + (0.20 \times S_{\text{BD}}) + (0.10 \times S_{\text{MTBF}}) \quad (2)$$

โดยในการคำนวณได้มีการนำข้อมูลดิบของแต่ละตัวชี้วัดมาปรับฐาน (Normalization) ให้เป็นคะแนน S ในสเกลเดียวกันก่อนนำมาคูณกับค่าน้ำหนัก เพื่อให้สามารถนำตัวแปรที่มีหน่วยต่างกันมาบวกกันได้ อย่างถูกต้องตามหลักคณิตศาสตร์ทำให้จากการจัดลำดับความสำคัญที่ ช่วยระบุคอขวด (Bottleneck) และปราศจากความเอนเอียงทางความรู้สึก พบว่า

เครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม เป็นเครื่องจักรที่มีคะแนนความวิกฤตสูงสุด ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการหยุดทำงานถึงร้อยละ 22.30 ของเวลาสูญเสียทั้งหมดในสายการผลิต โดยรายละเอียดการคำนวณคะแนนถ่วงน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยหลักของความวิกฤตเกิดจากค่า MTTR และความถี่การหยุดเครื่องที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่าปัญหาหลักมาจากกลุ่มระบบจัดการขึ้นรูปถาด ซึ่งมีความถี่ความขัดข้องสูงถึง 82 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 65.60 ของปัญหาทั้งหมด โดยมีอาการของปัญหาที่สามารถจำแนกได้ตามแผนภูมิพาเรโตความถี่ของอาการดังรูปที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คะแนนถ่วงน้ำหนักเครื่อง บรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

ตัวชี้วัด (KPIs)	ค่าน้ำหนัก (%)	คะแนนถ่วงน้ำหนัก
MTTR	40	35.00
Frequency of Breakdown	30	29.15
Breakdown Time	20	19.78
MTBF	10	16.07

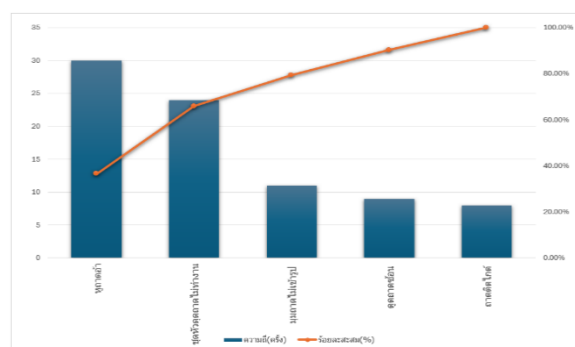
3.1.3 การวิเคราะห์ปัญหาและพฤติกรรมความเสียหาย

เพื่อให้การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นไปอย่างตรงจุดและครอบคลุม จึงได้มีการวิเคราะห์จำแนกข้อมูลความขัดข้องของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์มตามกลุ่มระบบการทำงานดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สถิติความถี่และร้อยละความขัดข้อง จำแนกตามกลุ่มระบบเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

กลุ่มระบบเครื่องจักร	ความถี่ (ครั้ง)	ร้อยละ (%)
ระบบจัดการขึ้นรูปถาด	82	65.60
ระบบจัดการฟิล์มและห่อหุ้ม	25	20.00
ระบบสายพานลำเลียง	18	14.40
ยอดรวม	125	100.00

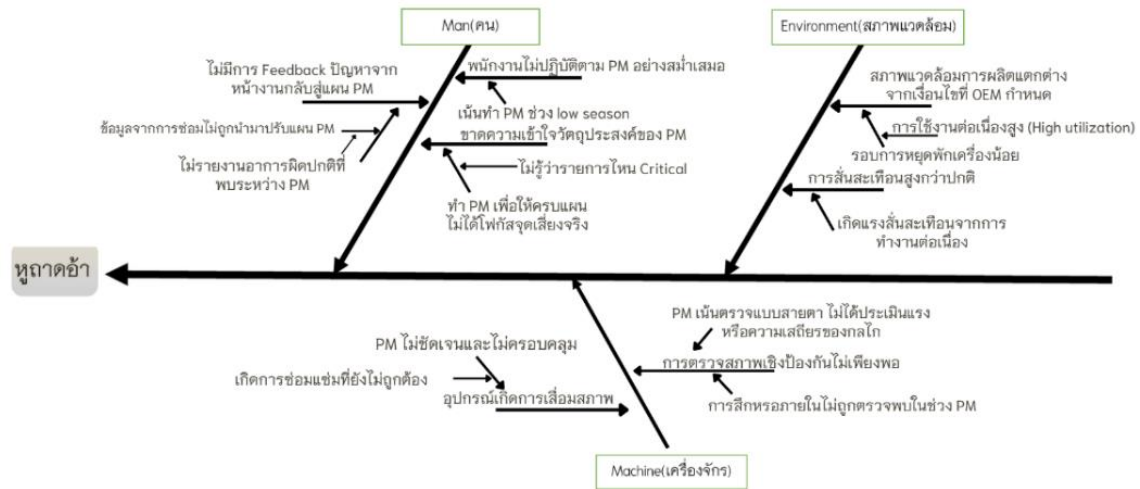
เมื่อดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลความขัดข้องของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์มกลุ่มระบบจัดการขึ้นรูปถาด พบว่า ความสูญเสียหลักเกิดจากปัญหาหูด้าซึ่งมีความถี่ในการเกิดสูงสุดถึง 30 ครั้ง (เฉลี่ย 2.50 ครั้งต่อเดือน) ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกอาการขัดข้องดังกล่าวเป็นกรณีศึกษาหลักในการวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้า ระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาหูด้า โดยเพิ่มการประยุกต์ใช้ผังแสดงเหตุและผล (Fishbone Diagram) ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัจจัยเชิงคุณภาพที่ก่อให้เกิดความขัดข้อง ได้แก่ ความไม่สอดคล้องกันระหว่างระบบพับถาดและระบบฉีดกาวจากกลไกตามรอบการทำงาน



รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตแสดงสัดส่วนอาการของปัญหา ที่พบในเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

อย่างไรก็ตาม เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่อาศัยเพียงประสบการณ์ จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยนำข้อมูลชั่วโมงการทำงานก่อนเสียหาย (TTF) มาทดสอบด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Analysis) จากอาการหูด้าซึ่งเป็นสาเหตุหลักจำนวน 30 เหตุการณ์ ผ่านการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยเลือกใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ดังรูปที่ 5 เพื่อยืนยันพฤติกรรมความเสียหายทางวิศวกรรม (Failure Mode) อย่างเป็นรูปธรรมดังสมการที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (3)$$

เมื่อ

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการเสียหาย ณ เวลา t

t คือ เวลาการทำงานก่อนเสียหาย

β คือ ค่าพารามิเตอร์รูปร่าง ที่บ่งชี้ลักษณะและพฤติกรรมของการเสียหาย

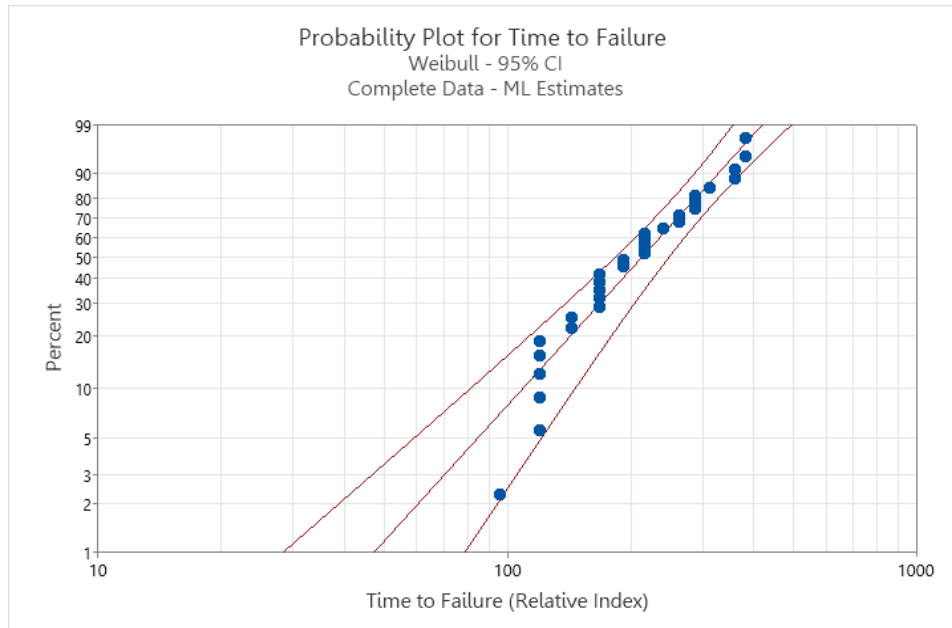
η คือ ค่าพารามิเตอร์มาตราส่วน หรืออายุขัยลักษณะโดยเป็นรูปแบบดัชนีฐาน

จากผลการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์พบว่าค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) มีค่าเท่ากับ 2.79 โดยมีช่วงความเชื่อมั่น 95% (CI: [2.125, 3.679]) ซึ่งขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่นมีค่ามากกว่า 1 อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้เป็นเครื่องยืนยันทางวิศวกรรมความน่าเชื่อถือว่า พฤติกรรมของการเสียหายของชุดปั๊มถาดมีลักษณะเป็น การสึกหรอตามอายุการใช้งาน

(Wear-Out Failure) โดยมีค่าอายุขัยลักษณะ (η) เพื่อใช้เป็นดัชนีฐาน (Baseline Index) สำหรับประเมินอายุการใช้งานที่เครื่องจักรส่วนใหญ่จะเกิดความเสียหาย ข้อมูลเชิงลึกนี้ช่วยเปลี่ยนการบำรุงรักษาจากการคาดเดาหรือทำตามคู่มือมาตรฐานมาเป็นการกำหนดรอบ PM ที่มีหลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือรองรับ ทำให้แผนงานสอดคล้องกับสภาพการเสื่อมสภาพจริงและป้องกันปัญหาซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อมูลเชิงสถิตินี้ช่วยปฏิวัติสมมติฐานการเสียหายแบบสุ่ม (Random Failure) และชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ปัญหาไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดในการเดินเครื่อง แต่เกิดจากรอบการบำรุงรักษาเดิมที่ไม่สัมพันธ์กับการสึกหรอจริง ดังนั้น การนำแนวคิดการบำรุงรักษาทีละขั้นที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เข้ามาบูรณาการเพื่อสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงรุก และกำหนดรอบการตรวจสอบให้สั้นกว่าขีดจำกัดความเสียหายที่วิเคราะห์ได้ จึงเป็นกลยุทธ์ทางวิศวกรรมที่จำเป็นที่สุดในการป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำและเพิ่มความเสถียรของระบบอย่างยั่งยืน

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

3.2 การพัฒนาและประยุกต์ใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ผลการพิสูจน์พฤติกรรมความเสียหายแบบสึกหรอ (Wear-Out Failure) จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณ นำมาสู่การกำหนดกรอบแนวคิดในการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) โดยมุ่งเน้นการบูรณาการข้อมูลความน่าเชื่อถือทางสถิติร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เพื่อยกระดับมาตรการทางวิศวกรรมให้สามารถแก้ไขปัญหาความเสื่อมสภาพของกลไกได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับสถานะการใช้งานจริง

3.2.1 การประเมินข้อจำกัดของแผนการบำรุงรักษาเดิม

การทบทวนแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมพบว่าระบบเดิมอาศัยการกำหนดรอบเวลาตามมาตรฐานคู่มือผู้ผลิตซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สอดคล้องกับภาระงาน และสภาพแวดล้อมการผลิตจริง นอกจากนี้ ยังขาดการนำข้อมูลความน่าเชื่อถือ

ทางสถิติ เช่น ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และ ความถี่การชำรุด มาปรับปรุงรอบการบำรุงรักษา ส่งผลให้ขึ้นส่วนเกิดการสึกหรอก่อนถึงรอบการตรวจสอบ ดังรายละเอียดข้อจำกัดที่สรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางสรุปข้อจำกัดที่พบจากแผน PM เดิมของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

ข้อจำกัดของแผน PM เดิม	รายละเอียดข้อจำกัด
ความถี่ การตรวจสอบไม่เหมาะสม	ใช้ความถี่ ตามคู่มือผู้ผลิต แต่ไม่สอดคล้องกับภาระและรอบการผลิตจริงทำให้เกิดอาการสึกหรอเร็วกว่ารอบ PM

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 ตารางสรุปข้อจำกัดที่พบจากแผน PM เดิมของเครื่องบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์ม (ต่อ)

ข้อจำกัดของแผน PM เดิม	รายละเอียดข้อจำกัด
การใช้ข้อมูลจากการบันทึกไม่เต็มประสิทธิภาพ	บันทึกข้อมูลซ่อมบำรุงไม่สมบูรณ์ ไม่ได้นำ MTTR หรือแนวโน้มการเสียมาใช้ปรับรอบ PM ทำให้แผนไม่เหมาะสม
ไม่สอดคล้องกับสภาพการผลิตจริง	คู่มือของผู้ผลิตไม่รองรับสภาพแวดล้อมการผลิตจริง เช่น สภาพแวดล้อม การสั่นสะเทือน และการใช้งานที่ต่อเนื่องสูง

3.2.2 การพัฒนารอบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่

พัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) รูปแบบใหม่โดยบูรณาการร่วมกับแนวคิด TPM ภายใต้แนวทางเชิงระบบ โดยการนำสาเหตุรากเหง้า (Root Cause) จากการวิเคราะห์ด้วยผังก้างปลาและรูปแบบความเสียหาย (Failure Mode) เพื่อกำหนดจุดตรวจสอบเฉพาะ ควบคู่กับการนำข้อมูลเชิงสถิติจากการบันทึกซ่อมบำรุง ได้แก่ ค่า MTTR ความถี่ของการเกิดปัญหา ระยะเวลาเครื่องจักรหยุดทำงาน (Breakdown Time) และค่า MTBF มาวิเคราะห์เพื่อกำหนดรอบเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงดำเนินการปรับปรุงรายการตรวจสอบให้ครอบคลุมจุดเสี่ยงหลักที่มีผลต่อความเสถียรของชุดผลิต โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบการบำรุงรักษาที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถจัดลำดับความสำคัญก่อนและหลังในการเข้าตรวจสอบหรือซ่อมบำรุงขึ้นส่วนได้อย่างตรงจุด ซึ่งช่วยลดภาระการสุ่มตรวจ เพิ่มมาตรฐานวิธีการ

ตรวจสอบและความแม่นยำในการวัดค่าความสึกหรอและลดความแปรผันของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ TPM เพื่อกำหนดบทบาทและแบ่งแยกขอบเขตงานซ่อมบำรุงเชิงเทคนิคให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น โดยมีการกำหนดบทบาทหน้าที่และขอบเขตการทำงานอย่างชัดเจน กล่าวคือ พนักงานคุมเครื่องจักรหน้างานจะมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบสภาพเบื้องต้นด้วยสายตา (Visual Inspection) และรายงานความผิดปกติของกลไกตามจุดเสี่ยง เพื่อส่งข้อมูลป้อนกลับ (Feedback) ให้กับทีมซ่อมบำรุงอย่างทันท่วงที ในขณะที่ช่างซ่อมบำรุงจะรับผิดชอบการเข้าตรวจสอบตามระยะเวลาที่กำหนดภายในตัวรายการตรวจสอบแต่ละระดับโดยแยกประเภทงานแต่ละงานเพื่อค้นหาจุดผิดปกติก่อนที่จะเกิดความเสียหายและเปลี่ยนชิ้นส่วนเชิงเทคนิคตามระยะเวลาเพื่อเพิ่มสภาพคล่องในการทำงานโดยระบบการเดินเครื่องสามารถกลับมาเดินได้ปกติอีกครั้งโดยไม่มีการหยุดชะงักในระหว่างการทำงาน ผลลัพธ์จากการบูรณาการกระบวนการดังกล่าวนำไปสู่การจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงานและ PM Checklist ฉบับปรับปรุงดังรูปที่ 6 ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงและพร้อมสำหรับการประเมินผลสัมฤทธิ์ในลำดับถัดไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร

ภายหลังจากการนำกรอบแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับเครื่องบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์มเป็นระยะเวลา 4 เดือน เพื่อติดตามและเก็บรวบรวมข้อมูลทำการประเมินผลสัมฤทธิ์โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงระยะเวลา 12 เดือน ทั้งนี้ เนื่องจากข้อมูลเวลาการ

บทความวิจัย (Research Article)

ปฏิบัติงานและรายละเอียดความสูญเสียเชิงประจักษ์ของเครื่องจักร เป็นข้อมูลความลับทางธุรกิจของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งมีข้อจำกัดในการเผยแพร่สู่สาธารณะ ทางผู้วิจัยจึงได้รับอนุญาตให้นำเสนอผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่ MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ในรูปแบบดัชนีฐานสัมพัทธ์และร้อยละการ

เปลี่ยนแปลงแทนการใช้ตัวเลขเวลาจริง โดยกำหนดให้ดัชนีช่วงก่อนปรับปรุงมีค่าฐานเท่ากับ 100 ซึ่งการแปลงข้อมูลดังกล่าวใช้เพื่อการนำเสนอสัดส่วนการพัฒนาเชิงเปรียบเทียบ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการทดสอบสมมติฐานทางสถิติแต่อย่างใด ดังแสดงผลในตารางที่ 6

Checksheet การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance)																									
Department			Production Line No.				PM Interval				Weekly Check														
ITEM		วิธีการตรวจสอบ	ความถี่	ช่วงเวลาการตรวจสอบ				สถานะ	วันเดือนปี :																
				ก่อนการผลิต	ระหว่างผลิต	หลังการผลิต	CIP		กุมภาพันธ์				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม				หมายเหตุ
	Traypacker Machine		สัปดาห์						W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W5	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	
1	ปรับค่าลมหัวดูด	ปรับค่าตามมาตรฐานหน้าเครื่องตามค่าSet point	4	-	/	-	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ตรวจสอบก่อนBlower Shink turner	แรงดันลมต้องไม่เกิน 10% - 15% จากค่าSet pointและคอยสังเกตลักษณะความผิดปกติต่างๆ	15	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
2	ตรวจสอบ Roller	ใช้ด้อยัดหัวไม่เกิน 1.5% - 2% จะะพอสหัวหรืออยู่ที่ประมาณ 2% - 3% ของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟือง	11	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับ Spacer	ปรับตามค่ามาตรฐานเครื่องจักร	5	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
3	ปรับค่าลมหัวดูด	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	8	/	/	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
5	ปรับ Timing Separator	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	11	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับพาวเวอร์ Separator	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	5	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
6	ปรับค่าพาวเวอร์หัวไป	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	5	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับความเร็ว Folding	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	3	/	/	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับตำแหน่งโซ่ Folding	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	3	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	

รูปที่ 6 แผนงาน PM Checklist ฉบับปรับปรุง

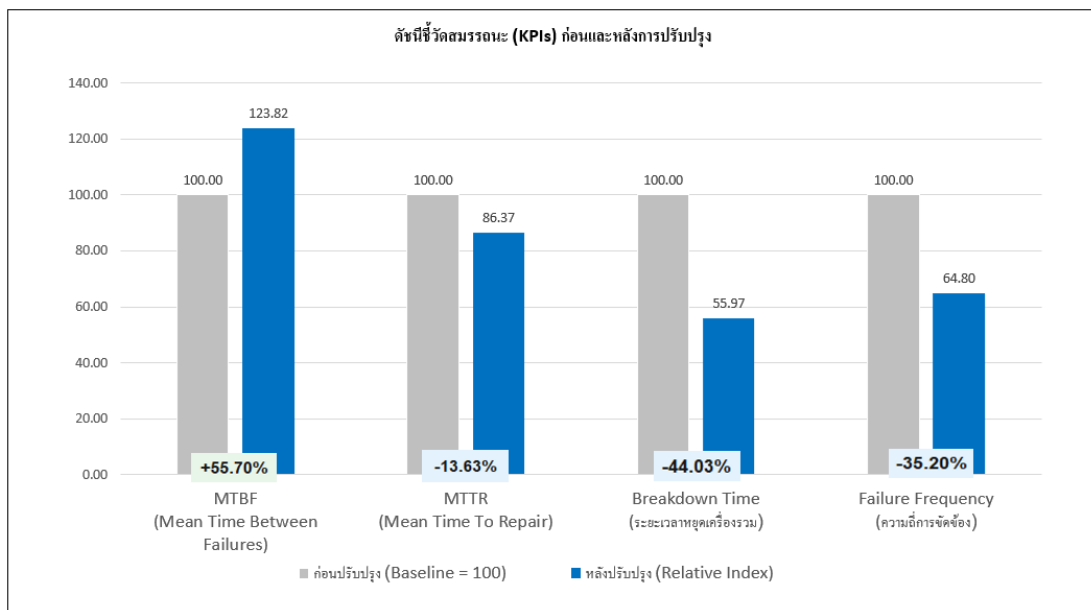
ตารางที่ 6 สรุปผลการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะก่อนและหลังการปรับปรุง

ตัวชี้วัด (KPIs)	ก่อนปรับปรุง (ดัชนีฐาน)	หลังปรับปรุง (ดัชนีสัมพัทธ์)	ผลต่าง (ร้อยละ)	P-Value
MTBF	100.0	123.82	+55.70%	0.037
MTTR	100.0	86.37	-13.63%	0.019
BreakdownTime	100.0	55.97	-44.03%	0.021
Failure Frequency	100.0	64.80	-35.20%	0.014

บทความวิจัย (Research Article)

ผลจากตารางที่ 5 พบว่า แผนการบำรุงรักษาแบบใหม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรดีขึ้นในทุกมิติ โดยระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) ลดลงร้อยละ 44.03 ในขณะที่ความสามารถในการซ่อมบำรุง (Maintainability) ปรับตัวดีขึ้น โดยค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ลดลงร้อยละ 13.63 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 และค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพของเครื่องจักรที่สูงขึ้น

เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของดัชนีชี้วัดสมรรถนะได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า KPIs ทั้ง 4 ตัวชี้วัดได้แก่ MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ในรูปแบบกราฟแท่งเปรียบเทียบ (Grouped Bar Chart) โดยใช้ดัชนีฐานก่อนปรับปรุงเป็น 100 เพื่อสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกรอบแนวคิดที่บูรณาการการวิเคราะห์ไวบูลล์ร่วมกับหลักการ TPM อย่างเป็นรูปธรรม



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะ (KPIs) ก่อนและหลังการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ผลการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันส่งผลเชิงบวกต่อดัชนีชี้วัดสมรรถนะทุกมิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า Breakdown Time ที่ลดลงร้อยละ 44.03 เป็นผลจากการกำหนดรอบการตรวจสอบโดยอ้างอิงค่าอายุขัยลักษณะ (η) จากการวิเคราะห์ไวบูลล์ ทำให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนก่อนเกิดความ

เสียหายได้ทันเวลา ค่า Failure Frequency ที่ลดลงร้อยละ 35.20 เป็นผลจากการแบ่งบทบาทหน้าที่ตามหลักการ TPM ที่ทำให้ตรวจพบความผิดปกติได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ค่า MTTR ที่ลดลงร้อยละ 13.63 เกิดจาก PM Checklist ที่ระบุลำดับการตรวจสอบอย่างชัดเจน ช่วยลดเวลาวินิจฉัยปัญหา และค่า MTBF ที่

บทความวิจัย (Research Article)

เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 สะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการการวิเคราะห์ไวบูลล์ร่วมกับหลักการ TPM ปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสามารถยกระดับเสถียรภาพของเครื่องจักรได้อย่างเป็นรูปธรรม

4.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

เพื่อยืนยันนัยสำคัญของผลลัพธ์ได้ทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลด้วยวิธี Shapiro-Wilk พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ จึงเลือกใช้สถิติทดสอบการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ 2 กลุ่มอิสระ (Two-Sample T-Test) ผลการทดสอบพบว่า ค่า P-Value ของการเปรียบเทียบ MTBF MTTR Failure Frequency และ Breakdown Time มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($p < 0.05$) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) สรุปได้ว่าแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่สามารถยกระดับความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเชื่อมโยงช่องว่างระหว่างแนวทางการบำรุงรักษาแบบกำหนดรอบเวลา (Time-Based Maintenance) กับการประยุกต์ใช้แบบจำลองความน่าเชื่อถือเชิงวิศวกรรมในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง โดยแสดงให้เห็นว่าการกำหนดรอบการบำรุงรักษาบนพื้นฐานข้อมูลความเสียหายจริงสามารถยกระดับสมรรถนะเครื่องจักรได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำผลการศึกษามาพิจารณาเปรียบเทียบในประเด็น ความสอดคล้อง (Similarity) กับทฤษฎีสากล พบว่าผลลัพธ์นี้สนับสนุนหลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือของ Elsayed [11] ที่ชี้ให้เห็นว่าการลดลงของอัตราการเสีย (λ) เป็นตัวบ่งชี้พื้นฐานของการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ

นอกจากนี้ การลดลงของ MTTR อย่างมีนัยสำคัญยังสอดคล้องกับแนวคิดของ Ebeling [12] ที่ระบุว่าค่าความพร้อมใช้งาน (Availability) เป็นตัวชี้วัดที่ต้องอาศัยการจัดการเชิงระบบทั้งด้านการลดความถี่การเสียและการควบคุมเวลาซ่อมควบคู่กัน การประยุกต์ใช้ TPM ตามหลักการของ Nakajima [5] จึงเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สมรรถนะทั้งสองด้านดีขึ้นพร้อมกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในประเด็นความแตกต่าง (Difference) จากแนวทางดั้งเดิม พบว่าการทำ PM ทั่วไปมักอาศัยเพียงดุลยพินิจและคู่มือผู้ผลิตซึ่งไม่สะท้อนภาระงานจริง แต่การศึกษานี้มีความโดดเด่นตั้งแต่การใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ตามแนวทางของ Jardine and Tsang [6] เพื่อระบุเครื่องจักรคอขวดอย่างเป็นรูปธรรม ทำให้การปรับปรุงแผนที่อิงจากข้อมูลวิศวกรรมหน้างานมีความแม่นยำกว่า ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Budimir et al. [8] หรืออ้างอิงต่างประเทศอื่นๆ ที่มักเน้นการจำลองสถานการณ์ (Simulation) [9] งานวิจัยนี้แตกต่างอย่างชัดเจนด้วยการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองความน่าเชื่อถือ (Weibull Analysis) ผ่านข้อมูลการเสียหายจริง (Field Data) ในระดับอุตสาหกรรม

แม้ระยะเวลาการติดตามผลหลังการปรับปรุงจะอยู่ที่ 4 เดือน ซึ่งสั้นกว่าช่วงก่อนการปรับปรุง แต่ช่วงเวลาดังกล่าวครอบคลุมรอบการผลิตปกติหลายรอบ (Complete Production Cycles) โดยได้มีการใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติด้วยวิธี Shapiro-Wilk และการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ Two-Sample T-Test ผ่านโปรแกรม Minitab ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($p < 0.05$) ตามที่ระบุในตารางที่ 5 เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ และดำเนินการภายใต้สภาวะการผลิตที่ไม่มี

บทความวิจัย (Research Article)

ปัจจัยแทรกซ้อนพิเศษ จึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมการทำงานจริงของเครื่องจักรได้อย่างเหมาะสม

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการยกระดับประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องบรรจุกระป๋องลง ภาดและหุ้มฟิล์ม โดยการเปลี่ยนผ่านจากการบำรุงรักษาแบบกำหนดรอบเวลาตามคู่มือ ไปสู่การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) และการประยุกต์ใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์ช่วยให้ค้นพบพฤติกรรมการเสียหายที่แท้จริง และเมื่อบูรณาการร่วมกับหลักการ TPM ส่งผลให้เครื่องจักรมีค่า MTBF เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 ค่า MTTR ลดลงร้อยละ 13.63 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 และลดระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) ได้ถึงร้อยละ 44.03 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ไม่เพียงแต่แก้ปัญหาของกรณีศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรมแต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเครื่องจักรเพียงหนึ่งประเภท และระยะเวลาการติดตามผลหลังการปรับปรุงยังอยู่ในช่วงระยะสั้น ดังนั้นการศึกษาต่อเนื่องในระยะยาวและการประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรประเภทอื่น จะช่วยยืนยันความยั่งยืนและความสามารถในการประยุกต์ใช้ของแนวทางที่เสนอได้ดียิ่งขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

1. ควรติดตามข้อมูล MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Frequency อย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินความเสถียรของเครื่องจักรหลังการปรับปรุง

2. ควรมีการอบรมทีมซ่อมบำรุงในการใช้ข้อมูลในการบันทึกและแผนการบำรุงรักษา ให้เต็มประสิทธิภาพ เพื่อสร้างฐานข้อมูลสนับสนุนการวางแผน PM แบบยั่งยืน

3. ควรนำกรอบแนวคิดที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับเครื่องจักรประเภทอื่นในสายการผลิต เช่น เครื่องปิดฝากระป๋องหรือเครื่องพาสเจอร์ไรส์ เพื่อยืนยันความสามารถในการประยุกต์ใช้ในวงกว้างและรองรับการขยายผลในระดับอุตสาหกรรม

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าศึกษาพื้นที่หน่วยงานจริง สนับสนุนข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุง ตลอดจนให้ความร่วมมือในการนำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่ไปทดลองปฏิบัติจริง ทั้งนี้ ข้อมูลตัวเลขสมรรถนะการผลิตจริงของบริษัทถือเป็นความลับทางธุรกิจ ผู้วิจัยจึงได้รับอนุญาตให้ใช้และเผยแพร่ข้อมูลในรูปแบบของดัชนีฐานสัมพัทธ์ (Relative Baseline Index) เพื่อประโยชน์ในเชิงวิชาการเท่านั้น

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. P. Au-Yong, N. F. Azmi, and N. E. Myeda, "Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept," *Journal of Cleaner Production*, vol. 352, Art. no. 131608, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131608.

บทความวิจัย (Research Article)

- [2] L. Lu, A. M. d'Avigneau, Y. Pan, Z. Sun, P. Luo, and I. Brilakis, "Modeling heterogeneous spatiotemporal pavement data for condition prediction and preventive maintenance in digital twin-enabled highway management," *Automation in Construction*, vol. 174, Art. no. 106134, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2025.106134.
- [3] ประจวบ กล่อมจิตร, การออกแบบโรงงานอุตสาหกรรม: เพื่อเพิ่มผลผลิตและความปลอดภัย, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2555.
- [4] สมชาย เปரியพรม, สุชาติ อารังสุข, และวรรณภรณ์ อนันตเจริญโชติ, "การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตด้วยการวางแผนการบำรุงรักษา: กรณีศึกษาเครื่องจักรสายพานลำเลียงภายในห้องรับ-จ่ายวัตถุดิบ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 201-215, 2564. doi: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.014.
- [5] S. Nakajima, ed., *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA, USA: Productivity Press, 1989.
- [6] A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006, doi: 10.1201/9781420044614.
- [7] รัฐภูมิ วงษ์วิทย์, "การพัฒนาระบบการบำรุงรักษาด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบกรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์คอนกรีต," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, หน้า 59-69, 2566.
- [8] D. Budimir, D. Medić, V. Ružić, and M. Kulej, "Integrated approach to marine engine maintenance optimization: Weibull analysis, Markov chains, and DEA model," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 4, Art. no. 798, 2025, doi: 10.3390/jmse13040798.
- [9] S. Sudadiyo, "Monte Carlo-based reliability- and availability-centered maintenance for GAS multi-purpose reactor pumps: A case study of the PA01-AP03 pump," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 446, Art. no. 114584, 2026, doi: 10.1016/j.nucengdes.2025.114584.
- [10] P. Semotam, "A data-driven approach to reliability and fault analysis in industrial maintenance," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 9, pp. 97-102, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.378.
- [11] E. A. Elsayed, *Reliability Engineering*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [12] C. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 2nd ed. Long Grove, IL, USA: Waveland Press, 2010.
- [13] ดุสิต มุกดา, รสสุคนธ์ ทับพร, และ สุวัจน์ ภูเสถียรพันธ์, "การปรับปรุงประสิทธิภาพของกลุ่มรถบรรทุกโดยใช้เทคนิคการจัดตั้งระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน," *วารสารวิชาการ*

บทความวิจัย (Research Article)

มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1,
หน้า 191-205, 2567.

- [14] D. C. Montgomery and G. C. Runger,
*Applied Statistics and Probability for
Engineers*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA:
John Wiley & Sons, 2018.

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

สมโภช เวียงคำ¹, ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช¹, วัฒนา จันทะโคตร¹, เสรีย์ ตูประกาย¹,
นันทน์ภัสร์ อินย์ม¹ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี^{2,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: phonniphab@sau.ac.th, โทรศัพท์: 084-6516996

(รับบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 19 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 20 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย สำหรับเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยใช้มาตรฐานสากล ISO 13849-1 ร่วมกับ ISO 12100 ในการประเมินความเสี่ยง โดยมีการทำแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องจักร เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเครื่องจักร กรณีศึกษาที่ใช้ในการวิจัยคือสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติด้วยกระบอกลูกกลม ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรในระยะใกล้ โดยมุ่งเน้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์อินพุต ลอจิก และเอาต์พุต ตามหลักการของมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยอาศัยข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่เลือกใช้งาน เช่น ค่าความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน (MTTFd) ความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง (DCavg) และการประเมินความเสี่ยงจากความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF) ผลการวิจัยพบว่าการกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) ถูกกำหนดไว้ในระดับ c มาจากมาตรการลดความเสี่ยงของมาตรฐาน ISO 12100 เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) โดยงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ SF1 และ SF2 โดยระบบ SRP/CS ที่ออกแบบมานั้นบรรลุผล โดยมีระดับประสิทธิภาพในระดับ e ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับประสิทธิภาพที่ต้องการในระดับ c (PL: e > PLr : c) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรกลอัตโนมัติได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐานสากล

คำสำคัญ : มาตรฐานความปลอดภัยของเครื่องจักร ระบบควบคุมความปลอดภัย การประเมินความเสี่ยง ระดับประสิทธิภาพ ความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม

การอ้างอิงบทความ: สมโภช เวียงคำ, ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช, วัฒนา จันทะโคตร, เสรีย์ ตูประกาย, นันทน์ภัสร์ อินย์ม และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี, "การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 20-37, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Evaluation of Machine Safety Control Systems Based on ISO 13849-1 Using 3D Model-Based Design : A Case Study of an Automated Sorting Conveyor System

Sompoch Veangkum¹, Piyarat Premanoch¹, Wattana Chanthakhot¹, Seree Tuprakay¹,
Nannapasorn Inyim¹ and Phonnipha Buriboonsuksri^{2,*}

¹ Department of safety occupational health and environmental engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² Department of safety engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

*Corresponding Author: phonniphab@sau.ac.th, Tel.084-6516996

(Received: February 26, 2026; Revised: May 19, 2026; Accepted: May 20, 2026)

Abstract

The objective of this research is to propose a design framework for safety control systems in automated machinery by integrating the international standards ISO 12100 for risk assessment and ISO 13849-1 for safety design. A three-dimensional (3D) model of the machinery was developed to guide the definition of safety functions from the initial design phase. An automated conveyor system equipped with a pneumatic sorting mechanism was selected as a case study, representing a type of machinery that involves close human-machine interaction. The study focuses on the design and selection of input, logic, and output devices in accordance with ISO 13849-1 principles. This process relies on the technical data of the selected components, including MTTFd, DCavg, and the evaluation of Common Cause Failures (CCF). The research results indicate that the Required Performance Level (PLr) was determined to be at level c, derived from the risk reduction measures of ISO 12100 specifically related to the Safety-Related Parts of Control Systems (SRP/CS). This study identifies two distinct safety functions: SF1 and SF2. The designed SRP/CS successfully achieved a Performance Level of level e, which exceeds the required threshold (PL: e > PLr: c). These findings demonstrate a systematic design approach that can serve as a comprehensive guideline for developing safety control systems in automated machinery, in strict compliance with international standard requirements.

Keywords: Machine Safety Standard, Safety Control System, Risk Assessment, Performance Level, Common Cause Failure

Please cite this article as: S. Veangkum, P. Premanoch, W. Chanthakhot, S. Tuprakay, N. Inyim and P. Buriboonsuksri, "Design and Evaluation of Machine Safety Control Systems Based on ISO 13849-1 Using 3D Model-Based Design : A Case Study of an Automated Sorting Conveyor System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 20-37, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เครื่องจักรประเภทสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติ ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ และอุตสาหกรรมแปรรูป [1] การเพิ่มระดับความเป็นระบบอัตโนมัติของเครื่องจักรกลยังมาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัย โดยเฉพาะในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานทำงานใกล้กับเครื่องจักรโดยตรง เช่น การป้อนชิ้นงาน การตรวจสอบคุณภาพ และการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำงาน [2] จากสถิติอุบัติเหตุที่เกิดจากเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยที่มากเป็นอันดับ 3 จำนวน 13.28% ต่อปีของอันตรายจากการทำงาน [3] สะท้อนให้เห็นว่าระบบควบคุมในปัจจุบันยังขาดการพิจารณาความปลอดภัยเชิงฟังก์ชัน (Functional Safety) ที่เพียงพอซึ่งมีผลให้เครื่องจักรมีการเคลื่อนที่หรือการเริ่มทำงานโดยไม่ตั้งใจ หรือการไม่สามารถหยุดการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างปลอดภัยในสถานการณ์ฉุกเฉิน [4]

เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างเป็นระบบ จึงมีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยจากการศึกษาของ สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย [2] ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้หลักการของ ISO 12100 สามารถนำมาใช้ในการระบุแหล่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และกำหนดมาตรการลดความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Kozłowski et al. [5] ได้เน้นที่ผลวิจัยว่าการกันแยกพื้นที่ด้วยวิธีการหรือเทคนิคต่าง ๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อป้องกันอันตรายจากการที่พนักงานมีความพยายามที่จะเข้าแก้ไขเครื่องจักรเมื่อติดขัด โดยขาดการไตร่ตรองถึงแหล่งอันตราย ในขณะที่มาตรฐานสากลมีความนิยมในการประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยอยู่ 2 แบบคือระบบ PL และ SIL จากข้อมูลของ Sága et al. [6]

ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่าแบบ PL ของ ISO 13849-1 มีความเหมาะสมและยืดหยุ่นกว่ามาตรฐาน SIL ของ IEC 62061 เมื่อนำมาใช้กับระบบนิวเมติกส์

การศึกษาเพื่อหาแนวทางเกี่ยวกับมาตรฐานความปลอดภัยของเครื่องจักร พบว่า ISO 12100 และ ISO 13849-1 มีความเชื่อมโยงกันในการออกแบบติดตั้งระบบความปลอดภัยของเครื่องจักรกล ที่มีการใช้งานส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) กันอย่างเป็นระบบ [7] โดย ISO 12100 ทำหน้าที่เป็นมาตรฐานแม่บท (Type A Standard) ที่กำหนดกรอบแนวคิดในการระบุอันตราย วิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักร ในขณะที่ ISO 13849-1 เป็นมาตรฐานเฉพาะด้าน (Type B Standard) ที่จัดอยู่ในกลุ่ม B1 ประเมินระดับประสิทธิภาพ (Performance Level : PL) และวัดความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันความปลอดภัย [8] กรณีศึกษาของสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกด้วยกระบอบอกสูบในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นระบบนิวเมติกส์ที่อาจพบกรณีกระบอบอกสูบเริ่มทำงานโดยไม่ได้ตั้งใจ [9] และการที่ยังมีกระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังมอเตอร์หลังจากการกดปุ่มหยุดฉุกเฉินแล้วก็ตาม [10] ทั้ง 2 กรณีนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่จะต้องใช้มาตรการและการออกแบบการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ให้ถูกต้องและสอดคล้องกับมาตรฐาน ISO

นอกจากนี้ Ahola. [11] ยังชี้ให้เห็นถึงการส่งออกเครื่องจักรกลไปยังตลาดในประเทศกลุ่มสหภาพยุโรป การปฏิบัติตามมาตรฐานด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรที่ต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลด้านการประเมินความเสี่ยง และการคำนวณระดับประสิทธิภาพของระบบควบคุมความปลอดภัย ถือเป็นข้อกำหนดที่สอดคล้องกับกฎหมายที่สำคัญ เช่น EU Machinery Regulation หรือ แม้แต่ในประเทศญี่ปุ่นที่มีการประกาศให้ถือเป็นแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยของอุตสาหกรรมญี่ปุ่น [12]

บทความวิจัย (Research Article)

งานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการประเมินความเสี่ยงและการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย [13] ในส่วนของประเทศไทยพบว่าม้งานวิจัยที่เน้นเพียงการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันทางกายภาพเข้ากับเครื่องจักรเก่า แต่ในทางปฏิบัติยังพบว่ายังขาดแนวทางที่ชัดเจนในการเชื่อมโยงผลการประเมินความเสี่ยงตาม ISO 12100 เข้ากับการประเมินระดับประสิทธิภาพตาม ISO 13849-1 อย่างเป็นรูปธรรม [14] สำหรับผู้ผลิตเครื่องจักรใหม่ แต่ยังคงขาดการนำเสนอในรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติในขั้นตอนการออกแบบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการสื่อสาร การกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ และการออกแบบฟังก์ชันความปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเสนอแนวทางและการบูรณาการแบบจำลอง 3 มิติ ที่สามารถแสดงผลการคำนวณและยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความปลอดภัยได้อย่างเป็นระบบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษากระบวนการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

2) เพื่อออกแบบและประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ตามมาตรฐาน ISO 13849-1

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐาน ISO 12100 กับความเกี่ยวข้องกับมาตรฐาน ISO 13849-1

มาตรฐาน ISO 12100 [15] ระบุไว้อย่างชัดเจนในหัวข้อ 6.2.11.1 โดยการออกแบบระบบควบคุมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย (Safety-Related Performance) จะต้องถูกเลือกใช้ หรือมีการ

ออกแบบให้มีประสิทธิภาพ ให้ผลในการลดความเสี่ยงที่เพียงพอ โดยมีการอ้างถึงมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยตรงเพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติ อีกทั้งยังมีการกำหนดให้ต้องทำการประมาณการความเสี่ยง (Risk Estimation) ซึ่งผลลัพธ์จากประเมินด้วยพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ความรุนแรง (Severity) ความถี่ (Frequency) ความเป็นไปได้ในการหลีกเลี่ยง (Possibilities to Avoid) จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO 13849-1

2.2 รูปแบบของโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ (Designated Architecture) เพื่อการออกแบบ

รูปแบบโครงสร้างของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มาตรฐานกำหนดไว้ ช่วยให้สามารถออกแบบมีวิธีที่ชัดเจนในการประเมิน ให้สามารถบรรลุระดับประสิทธิภาพ (PL) โดยจะแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ หรือเรียกว่า Category ดังแสดงในรูปที่ 1

เมื่อมีการเลือกใช้ตามประเภทของ Category ต่าง ๆ แล้ว ยังจะต้องมีการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ร่วมกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

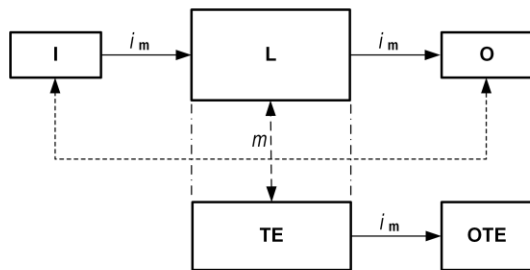
รูปที่ 1(a) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category B เป็นระดับพื้นฐานที่เน้นการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ให้ทนทานต่อสภาวะการทำงานปกติ หากเกิดความผิดปกติอาจทำให้ฟังก์ชันความปลอดภัยล้มเหลวได้ทันที โดยจะต้องมีค่า MTTFd ต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) DCavg ไม่มีค่า (None) และ CCF ไม่เกี่ยวข้อง (Not Relevant) ในส่วนของ Category 1 จะใช้โครงสร้างเดียวกับ Category B โดยต้องใช้อุปกรณ์ที่ผ่านการพิสูจน์การใช้งานมาแล้ว (Well-Tried Components) เพื่อลดโอกาสการเกิดความล้มเหลว โดยจะต้องมีค่า MTTFd

บทความวิจัย (Research Article)

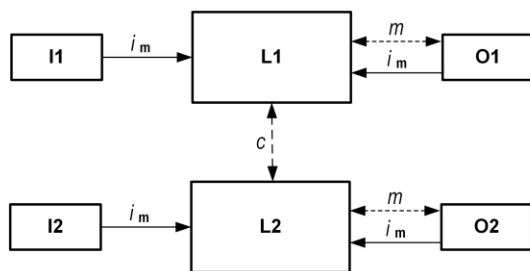
ต้องอยู่ในระดับสูง (High) DCAvg ไม่มีค่า (None)
และ CCF ไม่เกี่ยวข้อง (Not Relevant)



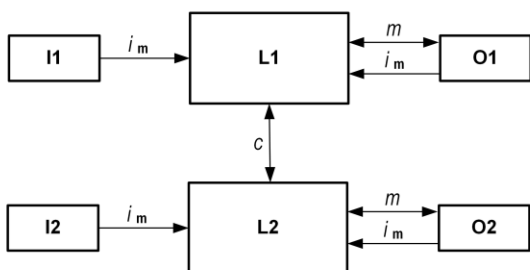
a) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category B และ 1



b) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 2



c) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 3



d) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 4

รูปที่ 1 ข้อกำหนดของโครงสร้างระบบ SRP/CS
ทั้ง 5 รูปแบบ (Category)

รูปที่ 1(b) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 2 เน้นการตรวจสอบผ่าน ฟังก์ชันการทดสอบ (Testing) เป็นระยะ หากเกิดความผิดปกติระหว่างรอบการตรวจสอบ ฟังก์ชันความปลอดภัยอาจเสียไป แต่จะถูกตรวจพบเมื่อถึงรอบการทดสอบครั้งถัดไป โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับต่ำถึงสูง (Low to High) DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และค่า CCF ต้องนำมาพิจารณา

รูปที่ 1(c) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 3 : มีโครงสร้างแบบซ้อน หรือระบบสำรองที่ทำงานคู่กัน (Redundancy) เมื่อตรวจพบความผิดปกติที่จุดใดจุดหนึ่ง ก็จะไม่ทำให้ฟังก์ชันความปลอดภัยล้มเหลว โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับต่ำถึงสูง (Low to High) DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และค่า CCF ต้องนำมาพิจารณา

รูปที่ 1(d) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 4 ซึ่งเป็นระดับสูงสุดที่ทนทานต่อความผิดปกติเดียว และสามารถรับมือกับการสะสมของความผิดปกติ (Accumulation of Faults) ได้โดยไม่ทำให้ระบบสูญเสียความปลอดภัย [16] โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับสูง (High) เท่านั้น DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และ CCF ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบ SPR/CS

2.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน (Mean Time to Dangerous Failure: MTTFd)

ในเชิงทฤษฎี ค่า MTTFd จะแสดงเกณฑ์การประเมินในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ในระบบ SRP/CS โดยแสดงถึงค่าเฉลี่ยเวลาที่คาดว่าจะเกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย การคำนวณค่า MTTFd มักอ้างอิงจากข้อมูลอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ผู้ผลิตให้มา และถูกจัดระดับเป็น Low Medium และ High ตามเกณฑ์ของ ISO

บทความวิจัย (Research Article)

13849-1 ค่า MTTFd ที่สูงแสดงถึงความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในระบบความปลอดภัย

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินค่า MTTFd

ผลการประเมิน	เกณฑ์การประเมิน (ปี)
Low	$3 \leq \text{MTTFd} \leq 10$
Medium	$10 \leq \text{MTTFd} \leq 30$
High	$30 \leq \text{MTTFd} \leq 100$

การรวมผลของ MTTFd ในส่วนอุปกรณ์ Input นั้นสามารถทำการคำนวณแปลงเป็นค่า MTTFd ได้เช่นกัน โดยใช้สมการที่ 1

$$\text{MTTF}_d = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} \quad (1)$$

เมื่อ

B_{10d} คือ จำนวนรอบการทำงานจนกระทั่ง 10% ของส่วนประกอบเกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย (ได้มาจากผู้ผลิต)

n_{op} คือ ค่าจำนวนรอบการทำงานเฉลี่ยต่อปี

โดยในส่วนของการรวมค่า MTTFd ของระบบ SRP/CS ทั้งระบบจะเป็นการรวมผลของค่า MTTFd ของอุปกรณ์ Input Logic และ Output โดยจะรวมผลด้วยสมการที่ 2

$$\frac{1}{\text{MTTF}_d} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \frac{1}{\text{MTTF}_{di}} = \sum_{j=1}^{\tilde{N}} \frac{n_j}{\text{MTTF}_{dj}} \quad (2)$$

อย่างไรก็ดียังคงต้องพิจารณาถึงประเด็นต่าง ๆ ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 13849-1 อย่างละเอียดในแต่ละกรณี ตัวอย่างเช่น เรื่อง Fault Exclusion [16] ที่ใช้พิจารณาการยกเว้นให้อุปกรณ์บางชนิดไม่ต้องนำมาคำนวณ เนื่องจากมีโอกาสน้อยมากที่จะเสียหรือชำรุดจนทำให้ระบบความปลอดภัยทำงานผิดพลาด [17] หรือใช้การรวมผลของค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวอันตรายต่อชั่วโมง (PHFd) ของอุปกรณ์ที่อาจได้มาจากผู้ผลิต และแปลงค่าเป็น MTTFd โดยใช้ตาราง K.1 ในภาคผนวก K ของเล่มมาตรฐาน [18]

2.4 ความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง (Diagnostic Coverage Average: DCavg)

สำหรับค่า DCavg จะแสดงเกณฑ์การประเมินไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัยของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ทั้งระบบ โดยจะสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการตรวจพบความผิดปกติก่อนที่จะนำไปสู่สถานการณ์อันตราย [18] โดย ISO 13849-1 แบ่งระดับ DCavg ออกเป็น 3 ระดับ คือ Low Medium และ High โดยระบบที่ต้องการระดับประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องมี DCavg ในระดับที่เพียงพอ เช่น การใช้การตรวจสอบแบบข้ามช่องสัญญาณ (Cross Monitoring) การวินิจฉัยอย่างต่อเนื่อง (Continuous Diagnostics) หรือใช้แนวทางตามตาราง E.1 ในภาคผนวก E ของมาตรฐาน ISO 13849-1

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินค่า DCavg

ผลการประเมิน	เกณฑ์การประเมิน (%)
None (ไม่ใช้)	$\text{DCavg} < 60\%$
Low	$60\% \leq \text{DCavg} \leq 90\%$
Medium	$90\% \leq \text{DCavg} \leq 99\%$
High	$99\% \leq \text{DCavg}$

สมโภช เจริญคำ และคณะ, การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

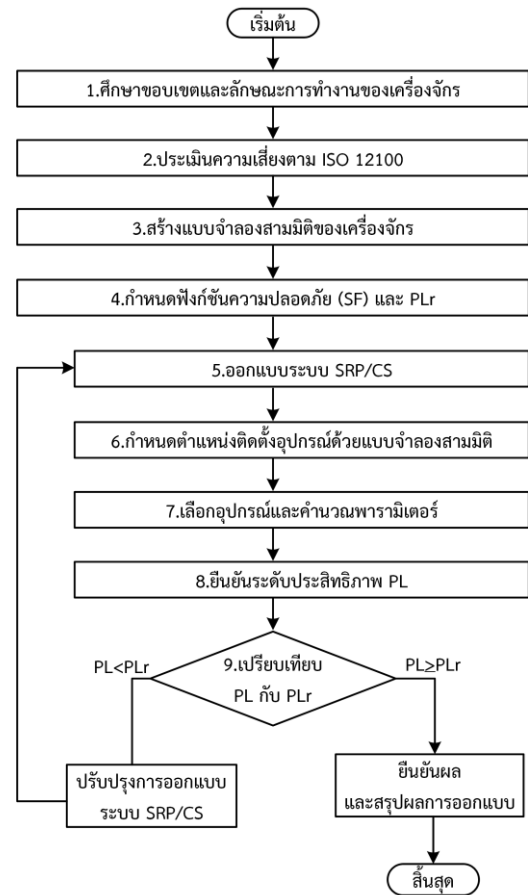
2.5 การประเมินความเสี่ยงจากความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (Common Cause Failure: CCF)

ความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม Common Cause Failure (CCF) และส่งผลต่อหลายช่องสัญญาณพร้อมกัน การประเมิน CCF ดำเนินการในรูปแบบของรายการตรวจสอบ (Checklist) ที่ให้คะแนนตามมาตรการลดความเสี่ยง เช่น การแยกแหล่งพลังงาน การแยกสายสัญญาณ และความหลากหลายของอุปกรณ์ โดยระบบจะถือว่าผ่านเกณฑ์เมื่อได้คะแนนรวมไม่น้อยกว่า 65 คะแนน [18]

การรวมกันของโครงสร้างระบบ ค่า MTTFd ค่า DCavg และผลการประเมิน CCF จะถูกนำมาใช้ในการตัดสินระดับประสิทธิภาพ (PL) ที่ระบบสามารถบรรลุได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ a ถึง e โดยระดับ e เป็นระดับสูงสุดที่มีความน่าจะเป็นของความล้มเหลวอันตรายต่ำที่สุด งานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าการเลือก Category ที่เหมาะสม เช่น Category 3 หรือ Category 4 มีผลโดยตรงต่อระดับ PL ที่สามารถบรรลุได้ และต้องพิจารณาควบคู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์ในระบบ [6]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นรูปแบบการวิจัยเชิงวิศวกรรม (Engineering Research) ที่มุ่งเน้นการออกแบบและประเมินระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยใช้กรณีศึกษาของสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติด้วยกระบอกสุบลมของบริษัทผลิตเครื่องจักรกลแห่งหนึ่งมาเป็นแบบตัวอย่างในการทำกรณีศึกษาและเครื่องมือในงานวิจัย ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยมีการบูรณาการแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องจักร เข้ากับกระบวนการประเมินและออกแบบระบบ SRP/CS



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนลำดับขั้นการวิจัย

3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบการวิจัยของงานนี้จะการใช้มาตรฐาน ISO 12100 เป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักรกรณีศึกษา โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ที่มีประสบการณ์การด้านการสร้างเครื่องจักรไม่น้อยกว่า 5 ปี ประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย ผู้เชี่ยวชาญด้านระบบไฟฟ้าและควบคุม และผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบทางกล ซึ่งผลการประเมินดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

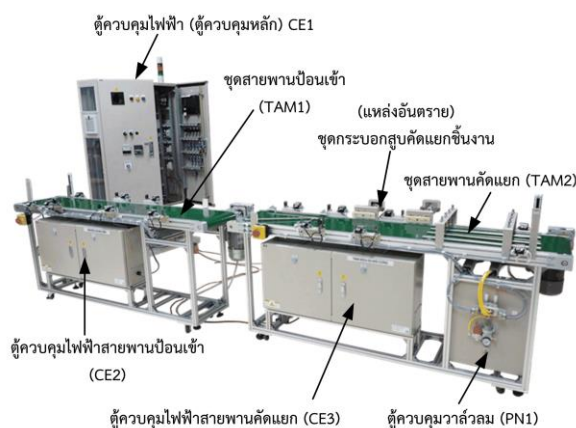
จากนั้น มาตรฐาน ISO 13849-1 จะถูกใช้เป็นกรอบเชิงวิศวกรรมผ่านพารามิเตอร์หลัก 4 ตัว ได้แก่

บทความวิจัย (Research Article)

โครงสร้างของระบบตามข้อกำหนด ค่าเฉลี่ยเวลาที่จะเกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย (MTTFd) ค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัย (DCavg) และความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF) เพื่อใช้ยืนยันระดับประสิทธิภาพของระบบควบคุมความปลอดภัยที่ออกแบบขึ้น โดยลำดับขั้นตอนการวิจัยสรุปได้เป็น 9 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงรูปภาพที่ 2

3.2 การกำหนดขอบเขตและลักษณะเครื่องจักรกลที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

เครื่องจักรกลที่ใช้ในการศึกษา คือ สายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกแบบอัตโนมัติด้วยกระบอบสูบ ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรในขั้นตอนการป้อนชิ้นงาน การตรวจสอบ และการแก้ไขปัญหา โดยเครื่องจักรดังกล่าวถูกเลือกเป็นกรณีศึกษาเนื่องจากมีลักษณะอันตรายที่พบบ่อยในภาคอุตสาหกรรม เช่น การเคลื่อนที่ของสายพาน การเคลื่อนที่เชิงเส้นของกระบอบสูบ และความเสี่ยงจากการเข้าถึงพื้นที่อันตรายโดยไม่ตั้งใจ อีกทั้งผลจากการวิจัยนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงเครื่องจักรกลในรุ่นถัดไปที่จะมีการจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ



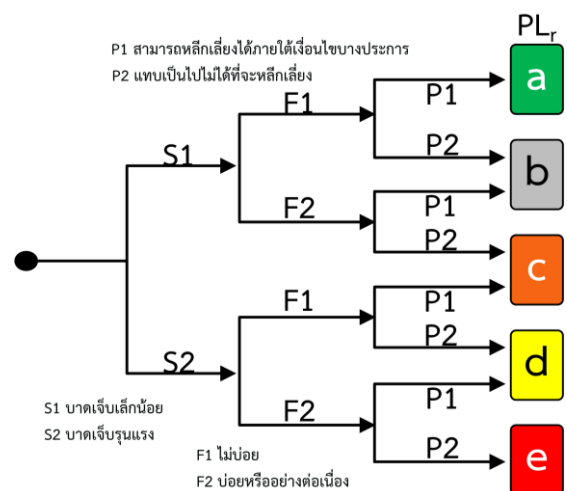
รูปที่ 3 เครื่องจักรเดิมที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

3.3 การประเมินความเสี่ยงเพื่อกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และค่า PLr

การประเมินความเสี่ยงดำเนินการตามหลักการของ ISO 12100 โดยประกอบด้วยขั้นตอนการระบุอันตราย (Hazard Identification) การวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis) และการประเมินความเสี่ยง (Risk Evaluation) ของเครื่องจักร นำไปสู่การกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ SF1 และ SF2 ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 3.4

การกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) มาตรฐาน ISO 13849-1 โดยกำหนดให้ใช้กราฟความเสี่ยง (Risk Graph) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพิจารณาปัจจัยหลัก 3 อย่างได้แก่

- ความรุนแรงของอันตราย (Severity : S)
- ความถี่หรือระยะเวลาการสัมผัสอันตราย (Frequency : F)
- ความเป็นไปได้ในการหลีกเลี่ยงอันตราย (Possibility of Avoidance : P)



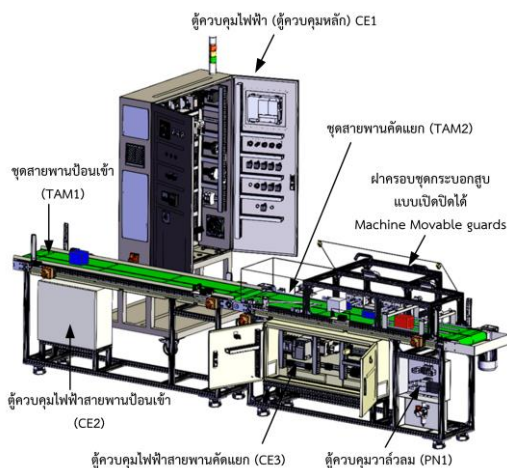
รูปที่ 4 กราฟความเสี่ยงที่ใช้ในการประเมินระดับ PLr

สมโภช เียงคำ และคณะ, การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

3.4 การจัดทำแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องจักร

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาประเด็นการออกแบบและติดตั้งร่วมกับผู้เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงมีการจัดทำแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ความเสี่ยง และใช้อธิบายหลักการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) เพื่อการควบคุมความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติ สำหรับเครื่องจักรใหม่ที่จะใช้ปรับปรุงระบบ SRP/CS

การนำเสนอด้วยแบบจำลอง 3 มิติ (3D Model) จะช่วยให้เห็นภาพแนวทางและใช้อธิบายถึงมาตรการลดความเสี่ยงด้วยฟังก์ชันความปลอดภัย SF1 และ SF2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) Safety Function ที่ 1 (SF1) : การหยุดการทำงานของสายพานลำเลียงเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน มีการออกแบบปรับปรุงเฉพาะระบบควบคุมเท่านั้น โดยไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างเครื่องจักร

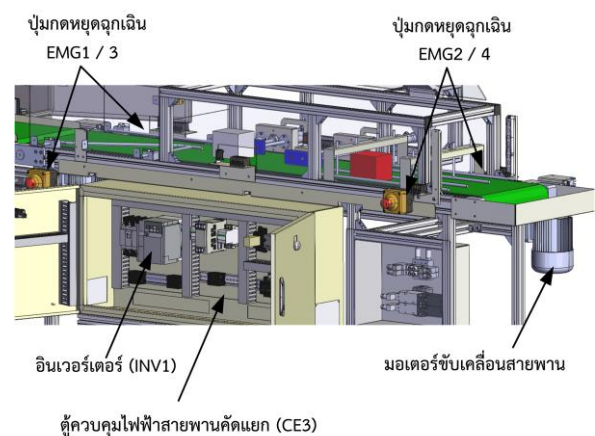
2) Safety Function ที่ 2 (SF2) : การป้องกันการเคลื่อนที่ของกระบอกระบบเมื่อมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่อันตราย มีการออกแบบปรับปรุงระบบควบคุมและการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม คือ เซฟตี้การ์ดแบบเปิด-ปิดได้ และวาล์วนิรภัย

3.5 การออกแบบระบบ SRP/CS

การออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัยดำเนินการตามข้อกำหนดของ ISO 13849-1 โดยแบ่งโครงสร้างระบบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- 1) ส่วนรับสัญญาณ (Input)
- 2) ส่วนประมวลผลเชิงตรรกะ (Logic)
- 3) ส่วนกระทำการ (Output)

สำหรับแต่ละฟังก์ชันความปลอดภัยทั้ง SF1 และ SF2 จะมีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7

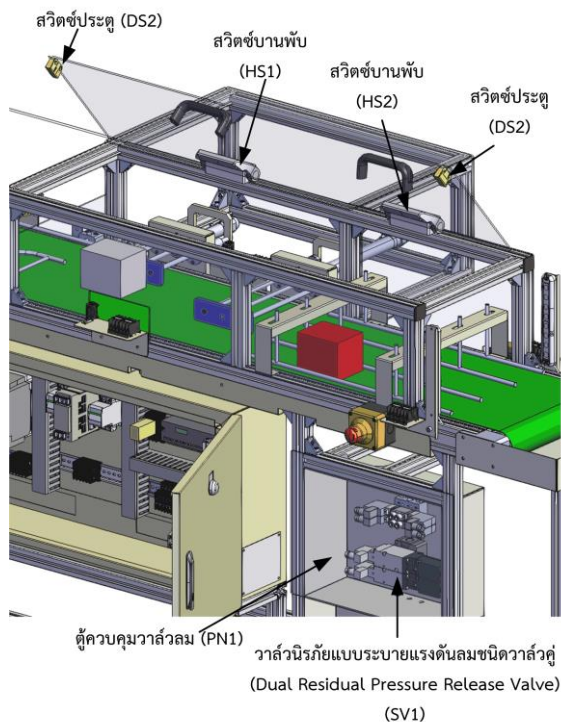


รูปที่ 6 แบบจำลอง 3 มิติ ของ SF1

การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย จะพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเทคนิคของอุปกรณ์ เช่น ค่า MTTFd และค่า DCavg ที่อ้างอิงจากเอกสารของผู้ผลิต และ

บทความวิจัย (Research Article)

ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณระดับ
ประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS



รูปที่ 7 แบบจำลอง 3 มิติ ของ SF2

3.6 การคำนวณและการยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL Verification)

การประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS ดำเนินการตามขั้นตอนของ ISO 13849-1 โดยพิจารณาองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- ค่า MTTFd ของระบบย่อย (Subsystem)
- ค่า DCavg ของระบบ
- การประเมินความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF)
- โครงสร้างระบบตามรูปแบบ (Category)

โดยผลการคำนวณจะถูกสรุปในรูปแบบตารางผลการประเมิน PL และรูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) DCavg MTTFd ของแต่ละฟังก์ชันความปลอดภัย ซึ่งเป็นรูปภาพตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 13849-1

4. ผลการวิจัย (Results)

ผลการวิจัยนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง การออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย และการยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL) ของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) สำหรับเครื่องจักรกลการศึกษา ตามกรอบมาตรฐาน ISO 13849-1 มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการประเมินความเสี่ยงและการกำหนด PLr

จากการประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักรกลสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติ พบว่าอันตรายหลักเกิดจากการเคลื่อนที่ของสายพาน การทำงานของกระบอกสูบลม และการเข้าถึงพื้นที่อันตรายในระหว่างการปฏิบัติงานและการแก้ไข ปัญหา การวิเคราะห์ตามแนวทาง ISO 12100 และการใช้ Risk Graph ส่งผลให้ต้องกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยจำนวน 2 ฟังก์ชัน เพื่อควบคุมความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ดังนี้

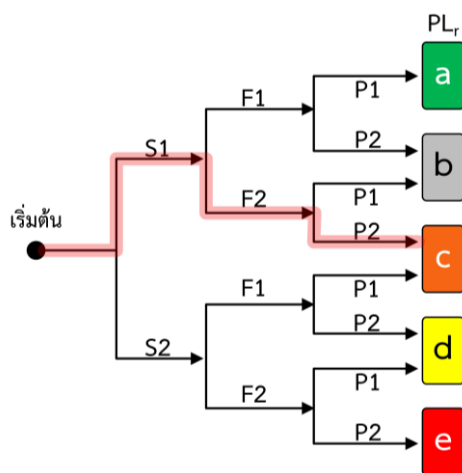
1) Safety Function ที่ 1 (SF1) : การหยุดการทำงานของสายพานลำเลียงเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน

2) Safety Function ที่ 2 (SF2) : การป้องกันการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบลมเมื่อมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่อันตราย

การประเมินโดยใช้กราฟความเสี่ยงพบว่า Safety Function ทั้งสองฟังก์ชัน (SF1, SF2) มีระดับ

บทความวิจัย (Research Article)

ประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) อยู่ในระดับ c ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการใช้ระบบควบคุมความปลอดภัยที่มีความน่าเชื่อถือในระดับปานกลางถึงสูง เพื่อรองรับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร แสดงได้ดังรูปที่ 8

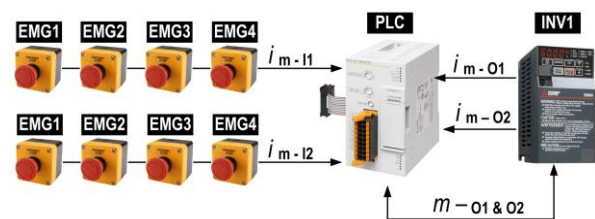


รูปที่ 8 กราฟความเสี่ยงที่ใช้กำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

4.2 ผลการออกแบบโครงสร้างระบบ SRP/CS

ผลการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) แสดงให้เห็นว่าแต่ละ Safety Function จะเลือกใช้ระบบ 2 ช่องสัญญาณ (Dual Channel) รองรับการใช้งานร่วมกับโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) 3 และ 4 แต่เนื่องจาก FX5-SF-MU4T5 ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะเป็น Safety Controller [10] สามารถติดตั้งและเชื่อมต่อสื่อสารกับ PLC เดิมของเครื่องจักรได้ง่าย ลดต้นทุนและพื้นที่การติดตั้ง อีกทั้งยังมีฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์อินพุต ที่มีความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขในโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) 4 จึงมีความเหมาะสมกับระดับ PLr โดย

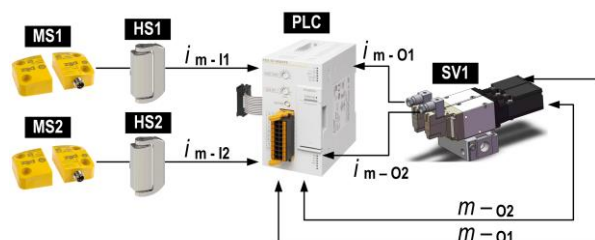
มีการจัดส่วนประกอบ Input Logic และ Output อย่างเป็นระบบ ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ SF1 และ SF2 ตามลำดับ



รูปที่ 9 โครงสร้างระบบของ SF1 โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดไว้ตามรูปแบบ (Category) 4

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 โดยอุปกรณ์อินพุตเป็นปุ่มกดหยุดฉุกเฉินแบบหน้าสัมผัส 2 NC แยกเข้าแต่ละช่องสัญญาณ (Channel) และยังมีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback) ของอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสายพาน

การออกแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 อุปกรณ์อินพุตมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความหลากหลายใน Channel เดียวกัน และยังมีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback) ของอุปกรณ์วาล์วนิรภัยที่ใช้ในการระบายลมออกจากระบบแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 โครงสร้างระบบของ SF2 โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดไว้ตามรูปแบบ (Category) 4

บทความวิจัย (Research Article)

4.3 ผลการคำนวณและการประเมินค่าคะแนนของพารามิเตอร์ที่ใช้

1) ผลการคำนวณค่า Mean Time To Dangerous Failure (MTTFd) ของทั้ง 2 ฟังก์ชันความปลอดภัยแสดงใน ตารางที่ 3 และ 4

สำหรับ SF2 จะเป็นระบบที่มีความซับซ้อน มีการใช้อุปกรณ์ Input ที่หลากหลาย ประกอบกับข้อมูลจากผู้ผลิตส่วนใหญ่เป็นข้อมูล B10d จึงจะต้องมีการรวมค่า MTTFd โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ในการคำนวณและสรุปผลดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF1

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
ข้อมูลการเดินเครื่องจักรกล : มีการใช้งานปีละ 282 วัน ๆ ละ 6 ชั่วโมง และมีการกดปุ่ม EMG เฉลี่ย วันละ 2 ครั้ง (ใช้ในการหาค่า Nop)			
Input EMG1-4	600,000	Fault Exclusion	564
Logic PLC		1.5×10^{-8}	
Output INV		1.5×10^{-8}	100
MTTFd _{Total} (I/L/O)	ใช้รูปแบบผลรวม PHFD = 3.0×10^{-8} นำค่าไปเทียบจาก Table K.1 ในมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] สรุปได้ว่าเป็น Ple MTTFd High อยู่ในช่วง 82 ถึง 91 ปี		

จากข้อมูลตารางที่ 3 และ 4 ผลการคำนวณพบว่าอุปกรณ์ทุกส่วนมีค่า MTTFd อยู่ในช่วง High มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ของมาตรฐาน ISO 13849-1 ส่งผล

ให้ส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ของ SF1 และ SF2 มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการออกแบบฟังก์ชันความปลอดภัย

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF2

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
ข้อมูลการเดินเครื่องจักรกล : มีการใช้งานปีละ 282 วัน ๆ ละ 6 ชั่วโมง และมีการเปิดฝา Movable guards เฉลี่ยวันละ 24 ครั้ง ๆ เป็นการทำงานตามวงจรปกติ (ใช้ในการหาค่า Nop)			
Input MS	2,000,000		6,768
Input HS	6,000,000		6,768
Logic PLC		1.5×10^{-8}	
Output SV1	10,000,000		9,024

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF2 (ต่อ)

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
MTTFd _{Input}	การรวมผล Input ที่มี 2 ช่องสัญญาณ ใช้สมการ D.2 ในเล่มมาตรฐาน [18] (MS = 2,955 และ HS = 7,387) เทียบค่าตาราง K.1 ได้ PHFD 1.13×10^{-9}		
MTTFd _{output}	11,081 ปี เทียบค่าตาราง K.1 ได้ PHFD 9.06×10^{-10}		
MTTFd _{Total} (I/L/O)	ใช้รูปแบบผลรวม PHFD = 1.70×10^{-8} นำค่าไปเทียบจาก Table K.1 ในมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] สรุปได้ว่าเป็น PLe (MTTFd High อยู่ในช่วง 130 ถึง 150 ปี)		

2) ผลการคำนวณค่า DCavg แสดงถึงค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัยของ ภายในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) โดยใช้หลักเกณฑ์ดังแสดงใน ตารางที่ 5 ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในภาคผนวก E ของเล่มมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] ซึ่งจะนำผลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการตรวจสอบระบบในขั้นตอนการออกแบบจริง

จากการตรวจสอบคุณลักษณะจากเอกสารเทคนิคของผู้ผลิตอุปกรณ์ Safety PLC รุ่น FX5-SF-MU4T5 มีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับ Category 4 [8] และถูกใช้เป็นอุปกรณ์ Logic ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นผลการประเมินพบว่า Safety Function ทั้งสองมีการออกแบบที่สอดคล้องกับตารางที่ 5 จึงมีค่า DCavg อยู่ในระดับ High ($\geq 90\%$) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4

3) ผลการประเมินค่าคะแนน CCF ดำเนินการตามแนวทางที่ระบุไว้ในภาคผนวก (Annex F) ของ ISO 13849-1 โดยใช้แบบตรวจสอบรายการ (Checklist) และให้คะแนนตามมาตรการป้องกันความล้มเหลวร่วม

ตารางที่ 5 ค่า DCavg ของระบบ SRP/CS

ข้อ	วิธีการตรวจจับความบกพร่อง	ค่า DCavg (%)	ระดับ
1	โครงสร้างมีระบบสำรอง (Redundant)	99%	High
2	การตรวจสอบการลัดวงจร (การส่งสัญญาณพัลส์ทดสอบ) Short Circuit Monitoring (Test Pluse)	99%	High
3	เลือกใช้ Safety Controller ที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน (เช่น PLe/SIL3)	99%	High
4	มีวงจรป้อนกลับที่ตรวจสอบได้ Monitored Feedback Loops	99%	High

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 6 ผลการประเมิน CCF ของระบบ SRP/CS

รายการประเมิน CCF	มาตรการที่ใช้	คะแนน
การออกแบบ	แยกวงจรจ่ายไฟและมีระบบป้องกัน	15
ความหลากหลายของอุปกรณ์	ใช้อุปกรณ์ต่างรุ่น/ต่างเทคโนโลยี	10
การป้องกันสภาพแวดล้อม	ติดตั้งในตู้ควบคุม IP54	10
	การป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	25
การแยก การแบ่งส่วน	แยกสายและรางเดินสาย	15
การวิเคราะห์และการฝึกอบรม	การวิเคราะห์ FMEA	5
รวมคะแนน CCF		80

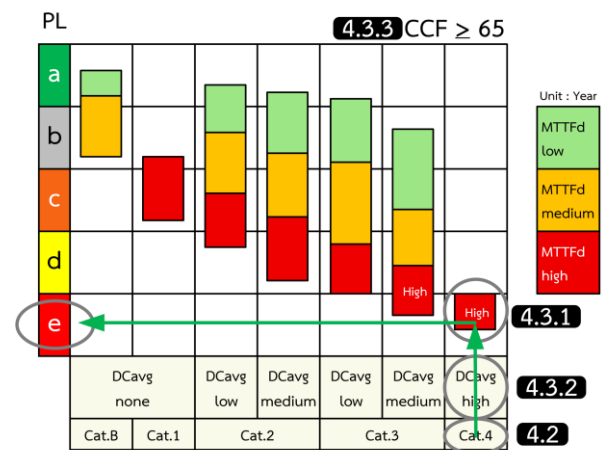
จากข้อมูลตารางที่ 6 ผลการประเมินพบว่าระบบ SRP/CS มีคะแนน CCF รวมเท่ากับ 80 คะแนน ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 65 คะแนน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างระบบและมาตรการป้องกันความล้มเหลวรวมมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบควบคุมความปลอดภัย

4.4 ผลการประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS

ผลการคำนวณระดับประสิทธิภาพของระบบ SRP/CS สำหรับแต่ละ Safety Function เมื่อพิจารณา 4 องค์ประกอบสำคัญไปแล้วนั้น จะมีการนำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อใช้แสดงการสรุปผล PL ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 13 ซึ่งเป็นแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ที่มีความสอดคล้องกัน อีกทั้งยังเป็นแผนภาพสำคัญที่นิยมใช้และพบได้บ่อยครั้งในการแสดงผล PL ของหน่วยงานรับรองมาตรฐาน

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) และระดับประสิทธิภาพที่ได้จากการออกแบบ (PL)

SF	PLr	PL จากการออกแบบ	ผลการประเมิน
SF1	c	e	PL > PLr
SF2	c	e	PL > PLr



รูปที่ 13 ภาพความสัมพันธ์ของ 4 องค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาค่า PL

ผลการประเมินพบว่า Safety Function ที่ 1 สามารถบรรลุระดับ PL = e และ Safety Function ที่ 2 สามารถบรรลุระดับ PL = e ซึ่งทั้งสองกรณีมีค่า PL สูงกว่าหรือเท่ากับค่า PLr ที่กำหนดไว้

4.5 ผลการเปรียบเทียบค่า PL ก่อนและหลังปรับปรุงระบบ

ก่อนการออกแบบในงานวิจัยนี้ เครื่องจักรเดิมมุ่งเน้นการผลิตโดยมุมมองของการใช้งานเป็นหลัก ไม่มีแนวโน้มทางของมาตรฐาน ISO 12100 และ 13849-1 มาวิเคราะห์ฟังก์ชันความปลอดภัยอย่าง

บทความวิจัย (Research Article)

เป็นระบบ ระบบเดิมไม่มีการออกแบบโครงสร้างแบบ Redundancy ไม่มีระบบตรวจจับความบกพร่อง และไม่มีการประเมิน Common Cause Failure (CCF) ตามข้อกำหนดของ ISO 13849-1 ส่งผลให้ไม่สามารถยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบเดิมได้อย่างชัดเจน ภายหลังการออกแบบตามมาตรฐาน ISO 12100 และ ISO 13849-1 ระบบ SRP/CS ถูกพัฒนาให้มีโครงสร้างแบบ 2 ช่องสัญญาณ (Dual Channel) มีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback Monitoring) และมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่รองรับการวินิจฉัยความบกพร่อง ส่งผลให้ระบบสามารถบรรลุระดับประสิทธิภาพ $PL = e$ ซึ่งสูงกว่าค่า PLr ที่กำหนดไว้ที่ระดับ c ผลการปรับปรุงดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้มาตรฐานด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรสามารถช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความปลอดภัย และทำให้กระบวนการออกแบบมีความเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

5. อภิปรายผลและสรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแนวทางการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ด้วยใช้มาตรฐาน ISO 12100 และ ISO 13849-1 ร่วมกับการใช้แบบจำลอง 3 มิติ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัยสำหรับเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยเฉพาะในกรณีของสายพานลำเลียงที่มีการเข้าถึงพื้นที่อันตรายระหว่างการป้อนชิ้นงาน ตรวจสอบ และแก้ไขปัญหา

ผลจากการบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ โดยการประเมินความเสี่ยงและกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยได้ 2 ฟังก์ชัน คือ การหยุดฉุกเฉิน (SF1) และการหยุดเมื่อเปิดประตูเซฟตี้การ์ด (SF1) โดยมีระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) อยู่ในระดับ c และผลการประเมินระดับประสิทธิภาพจากการออกแบบระบบ SRP/CS

โดยใช้โครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 และใช้ PLC Safety Controller กับวาล์วนิรภัยควบคุมการระบายลม และอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ ทำให้ค่า $MTTFd$ อยู่ระดับ High และค่า $DCavg$ ระดับ High พร้อมคะแนน CCF 80 คะแนน ส่งผลให้ค่า PL ที่คำนวณได้บรรลุระดับ e ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายที่ต้องการ ($PL : e > PLr : c$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ihainen. [13] ที่ดำเนินการวิจัยกับเครื่องจักรของบริษัท Schneider Electric

ผลของความคุ้มค่าในการออกแบบที่เลือกใช้โครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 สามารถตรวจสอบความขัดข้องแบบจุดเดียว (Single Fault) และความขัดข้องแบบสะสม (Accumulation of Faults) ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานต้องอยู่ปฏิบัติงานใกล้กับเครื่องจักรตลอดเวลา มีโอกาสส่งผลต่อการประเมินพารามิเตอร์ความถี่ ($F2$) หากมีการทำงานมากขึ้นกว่าปัจจุบัน อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากความบกพร่องที่มองไม่เห็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดีกว่า Category 2 หรือ 3 แม้ต้นทุนเริ่มต้นของโครงสร้าง Category 4 จะสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาตามแนวคิดของ Peltonen. [1] เรื่องการตรวจสอบอัตราการทำงาน (Demand Rate) ระบบที่มี PL สูงกว่ามักมีความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น

ผลจากการทำแบบจำลอง 3 มิติในงานวิจัยทำให้เห็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ SRP/CS และระยะปลอดภัยได้อย่างแม่นยำก่อนการติดตั้งจริง มีผลที่สอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญกับงานวิจัยสากลในกลุ่ม Industry 4.0 ของ Ahola. [11] ที่จะช่วยเพิ่มการมองเห็นและความโปร่งใสของข้อมูล ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลในแฟ้มเอกสารทางเทคนิค เพื่อยืนยันความสอดคล้องตามกฎหมาย ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างการออกแบบและการติดตั้ง ใช้เป็นต้นแบบในการเปลี่ยนจากการคาดเดาความปลอดภัยมาเป็นการคำนวณและยืนยันผล

บทความวิจัย (Research Article)

การนำแนวทางในงานวิจัยนี้ไปใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย [2] ซึ่งเน้นการประเมินความเสี่ยงเพื่อแก้ไขเครื่องจักรเดิม ผ่านมาตรการติดตั้งการป้องกันที่ขอบเขตวิจัยไม่ได้มีการออกแบบและประเมินระบบ SRP/CS หากเกิดความผิดพลาดในเรื่องนี้ เครื่องจักรจะกลายเป็นอันตรายทันที อาจส่งผลกระทบต่อในเชิงเศรษฐศาสตร์จากการจากค่าใช้จ่ายทางอ้อม เช่น การหยุดชะงักของการผลิต (Downtime) และค่ารักษาพยาบาล ซึ่งมักมีมูลค่าสูงกว่าค่าอุปกรณ์ความปลอดภัย ในเชิงสังคมการดำเนินตามแนวทางวิจัยนี้จะช่วยปิดช่องว่างของเหตุจากพฤติกรรมมนุษย์ เช่น การเพิกเฉยต่อสัญญาณหรือการแจ้งเตือน

งานวิจัยนี้อาจมีข้อจำกัดในเรื่องการประเมินที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต ยังขาดขั้นตอนการทดสอบระบบการทำงานจริง ซึ่งจะต้องดำเนินการทดสอบและตรวจสอบมาตรการต่าง ๆ โดยใช้มาตรฐาน ISO 13849-2 เมื่อมีการปรับปรุงหรือสร้างเครื่องจักรขึ้นมาใช้งานจริง

ในส่วนของการข้อเสนอแนะ ควรมีการศึกษาทำวิจัยรูปแบบนี้ในเครื่องจักรประเภทอื่น หรือมีแหล่งอันตรายแบบอื่น ๆ เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย ซึ่งจะช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ผลิตเครื่องจักรไทย ให้ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล ตลอดจนการพัฒนากฎหมายด้านความปลอดภัยของประเทศไทย ให้มีการตรวจสอบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรกลเพิ่มเติม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่งต่ออาจารย์ที่ปรึกษา เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแรงสนับสนุนที่เป็นประโยชน์ตลอดกระบวนการศึกษาวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานภาครัฐที่เอื้อเฟื้อข้อมูลด้านความปลอดภัยในเครื่องจักรกล แหล่งข้อมูลวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศที่ช่วยให้บทความเรื่องนี้สามารถจัดทำได้อย่างสมบูรณ์และมีความน่าเชื่อถือในเชิงวิชาการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Peltonen, “Leveraging Industry 4.0 for machinery safety management,” M.S. thesis, Dept. Automation and Elect. Eng., Aalto Univ., Espoo, Finland, 2023.
- [2] สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และเอกไท วิโรจน์สกุลชัย, “การประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรโดยใช้หลักการ ISO 12100 (กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องสำอาง),” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 53–64, 2567.
- [3] สำนักงานกองทุนทดแทน, “สถานการณ์การประสบอันตรายหรือเจ็บป่วย เนื่องจากการทำงาน ปี 2563–2567,” [ออนไลน์]. Available: https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/65e64958a0565ddc98ebc2ee6cc1fbf4.pdf. [เข้าถึงเมื่อ: 15 มกราคม 2569].
- [4] กองความปลอดภัยแรงงาน, “กรณีศึกษาอุบัติเหตุจากการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร: กรณีเกิดอุบัติเหตุถูกจี้ถูกเครื่องบีบขึ้นรูปกล่องกระดาษหนีบเสียชีวิต,” [ออนไลน์]. Available:

บทความวิจัย (Research Article)

- <https://osh.labour.go.th/wp-content/uploads/2026/03/machine-1047.pdf>. [เข้าถึงเมื่อ: 10 เมษายน 2569].
- [5] A. Kozłowski, J. Smyła, M. Bembenek, P. Wojtas, and L. Kasprzyczak, “The role and importance of risk assessment in machinery design and control systems on the example of a model research line designed for the production of low-emission composite fuel,” *Journal of KONBiN*, vol. 53, no. 1, pp. 25–46, 2023, doi: 10.5604/01.3001.0016.3234.
- [6] M. Sága Jr., I. Kuric, I. Klačková, and D. Więcek, “Comparison of risk assessment approaches and analyzes used in technical transport systems,” *Transportation Research Procedia*, vol. 74, pp. 516–521, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.176.
- [7] *Safety Guide — Safety in the working environment*, 2nd ed., Torino, Italy: Reer S.p.A. , 2025.
- [8] *A Practical Guide to Machinery Safety*, 5th ed., Billingham, U.K. : TÜV SÜD , 2014.
- [9] *Safety in Focus: Machinery Directive and ISO 13849 In Practice*, Tokyo, Japan: SMC Corporation, 2019.
- [10] *Safety Programmable Controller/Safety Controller*, Tokyo, Japan: Mitsubishi Electric Corporation, 2024.
- [11] P. Ahola, “The Influence of CE Marking on Machine Design Solutions,” B.S. thesis, Dept. Mech. Eng. and Machine Automation, Tampere Univ. of Applied Sciences, Tampere, Finland, 2025.
- [12] สำนักงานมาตรฐานแรงงาน, แนวปฏิบัติเกี่ยวกับมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับเครื่องจักร. โตเกียว, ญี่ปุ่น: กระทรวงสาธารณสุข แรงงาน และสวัสดิการ, 2550. [ออนไลน์]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/content/11300000/001408240.pdf>. [เข้าถึงเมื่อ: 4 กุมภาพันธ์ 2569].
- [13] H. Ihainen, “Machine safety: Risk assessment and safety design,” M.S. thesis, Dept. Automation Eng., Seinäjoki Univ. of Applied Sciences, Seinäjoki, Finland, 2019.
- [14] M. E. Del Giudice, M. Sharafkhani, M. Di Nardo, T. Murino, and M. C. Leva, “Exploring safety of machineries and training: An overview of current literature applied to manufacturing environments,” *Processes*, vol. 12, no. 4, Art. no. 684, 2024, doi: 10.3390/pr12040684.
- [15] *Safety of Machinery — General Principles for Design — Risk Assessment and Risk Reduction*, ISO 12100:2010, 2010.
- [16] *Safety Solution Advanced Guide*, 1st ed., Kyoto, Japan: OMRON Corporation, 2018.
- [17] Pizzato Elettrica, “Introduction to safety engineering,” [Online]. Available: <https://www.pizzato.com/media/images/catalog/item/File/Pdf/Document/introdu>

บทความวิจัย (Research Article)

ction_safety.pdf. [Accessed: 15 May 2026].

- [18] *Safety of Machinery — Safety-Related Parts of Control Systems — Part 1: General Principles for Design*, ISO 13849-1:2023, 4th ed., 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กเพื่อจำแนกและตรวจจับไข่มดแดง

ธรรมรัตน์ บุญรอด¹, สุขสันต์ พรหมบุญเรือง^{1,*}, บัญชา เหลือผล¹, เสาวลักษณ์ จิตติมงคล² และ จุราวรรณ ภารสถิตย์³

¹ สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

² สาขาวิชาบริหารธุรกิจ คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

³ ผู้ช่วยนักวิจัย สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: suksun.pr@ksu.ac.th โทรศัพท์: 085-0039640

(รับบทความ: 15 เมษายน 2569; แก้ไขบทความ: 19 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 29 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กในการจำแนกและตรวจจับไข่มดแดงจากภาพถ่ายไข่มดแดงจากโรงเทียม โดยมุ่งเน้นการเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับ เพื่อประมาณปริมาณไข่มดแดงร่วมกับแบบจำลองเชิงลึก YOLO เวอร์ชัน YOLOv11n ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก วิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ การเก็บรวบรวมข้อมูล การปรับปรุงภาพ การฝึกฝนข้อมูลและการทดสอบข้อมูล และการวัดประสิทธิภาพ ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยภาพถ่ายไข่มดแดงจำนวน 47 ภาพ โดยแบ่งออกเป็นชุดฝึก 32 ภาพ ชุดตรวจสอบ 9 ภาพ และชุดทดสอบ 6 ภาพ เป็นสัดส่วน (70:20:10) ตามลำดับ และมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation) ได้แก่ การปรับขนาดภาพ การหมุนภาพ และการปรับค่าความสว่างและสี เพื่อเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลและลดปัญหาการเรียนรู้เกิน (Overfitting) ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับไข่มดแดง โดยมีค่าความแม่นยำ (Precision) เท่ากับ 0.66 และค่าการเรียกคืน (Recall) เท่ากับ 0.79 ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision) ที่ค่า IoU เท่ากับ 0.5 (mAP@0.5) เท่ากับ 0.76 และค่า mAP@0.5:0.95 เท่ากับ 0.49 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับวัตถุขนาดใหญ่ได้ดีกว่าวัตถุขนาดเล็ก งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรอัจฉริยะเพื่อช่วยในการตรวจจับและประเมินปริมาณไข่มดแดงได้

คำสำคัญ: การจำแนก ไข่มดแดง การตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก โยโลเวอร์ชัน11n

การอ้างอิงบทความ: ธรรมรัตน์ บุญรอด, สุขสันต์ พรหมบุญเรือง, บัญชา เหลือผล, เสาวลักษณ์ จิตติมงคล และ จุราวรรณ ภารสถิตย์, "การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กเพื่อจำแนกและตรวจจับไข่มดแดง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 38-49, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Small Object Detection for Red Ant Egg Classification and Detection

Thummarat Boonrod¹, Suksun Promboonruang^{1,*}, Bancha Luaphol¹,
Sawwaluk Jittimongkon² and Jurawan Pansathit³

¹ Department of Business Computer, Faculty of Administrative Science, Kalasin University

² Department of Business Administration, Faculty of Administrative Science, Kalasin University

³ Research Assistant, Faculty of Administrative Science, Kalasin University

* Corresponding Author: suksun.pr@ksu.ac.th, Tel: 085-0039640

(Received: April 15, 2026; Revised: May 19, 2026; Accepted: May 29, 2026)

Abstract

This research aims to apply small object detection techniques to classify and detect red ant eggs from images captured in artificial nests, with the objective of improving detection accuracy for estimating egg quantity. The study employs a deep learning model based on YOLO, specifically the YOLOv11n version, which is an effective approach for small object detection tasks. The research methodology is divided into four main stages: data collection, image preprocessing, model training and testing, and performance evaluation. The dataset consists of 47 images of red ant eggs, divided into 32 training images, 9 validation images, and 6 testing images, corresponding to a ratio of 70:20:10. Data augmentation techniques, including image scaling, rotation, brightness and color adjustment, were applied to increase data diversity and reduce overfitting. The experimental results found that the model can detect red ant eggs with a precision was 0.66 and a recall was 0.79. The mean Average Precision (mAP) at an Intersection over Union (IoU) threshold of 0.5 (mAP@0.5) was 0.76, while the mAP@0.5:0.95 was 0.49. The results also show that the model performs better in detecting larger objects compared to smaller ones. This research shows the potential of applying deep learning-based object detection techniques in smart agriculture systems to support the detect and estimation of red ant egg production.

Keywords: Classification, Red Ant Egg, Small Object Detection, YOLOv11n

Please cite this article as: T. Boonrod, S. Promboonruang, B. Luaphol, S. Jittimongkon and J. Pansathit, "Small Object Detection for Red Ant Egg Classification and Detection," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 38-49, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

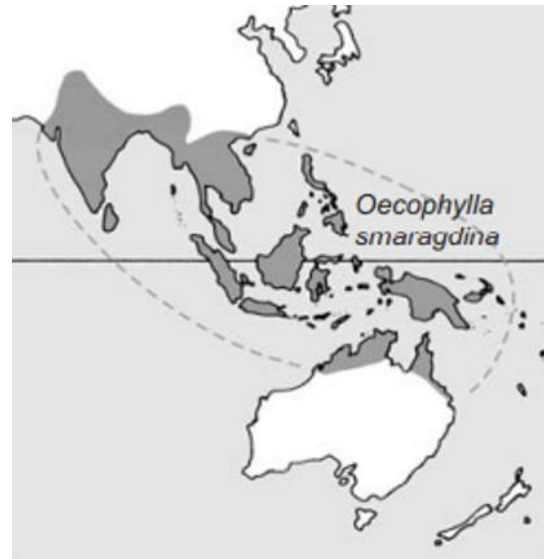
ประเทศไทยตั้งอยู่แถบเส้นศูนย์สูตร สภาพพื้นที่เป็นที่ราบแหล่งน้ำอุดมสมบูรณ์และภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการทำเกษตร อาชีพหลักของชาวไทยส่วนใหญ่ทำอาชีพเกษตร ทำไร่ ทำสวน ทำนา เลี้ยงสัตว์ และสัตว์ที่นิยมเลี้ยงเพื่อจำหน่าย ได้แก่ ไก่ สุกร เป็ด โคเนื้อ กระบือ แพะ โคนม และแกะ ตามลำดับ [1] มดแดงจัดเป็นแมลงสังคม อยู่ในกลุ่มของผึ้ง ต่อ และแตน มดแดงได้รับความนิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร และยังมีบทบาทต่อระบบนิเวศทั้งทางด้านกายภาพและชีวภาพ ช่วยกำจัดศัตรูพืช ผสมเกสรให้กับพืช มดแดงจัดเป็นแมลงเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมและมีราคาสูงโดยปกติมีราคาเฉลี่ย 200-500 บาทต่อกิโลกรัม ช่วงนอกฤดูกาลราคาเฉลี่ย 700-900 บาทต่อกิโลกรัม และมีปริมาณผลผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ดังนั้นการเลี้ยงมดแดงหรือสร้างฟาร์มมดแดงจึงเป็นช่องทางที่ช่วยให้ชาวบ้านมีรายได้จากการขายไข่มดแดง [2] อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงมดแดงผู้เลี้ยงยังพบปัญหาในเรื่องของการวางแผนการผลิตไข่มดแดงเนื่องจากการประเมินปริมาณไข่มดแดงยังคงอาศัยการนำมดแดงออกจากรัง และทำการแยกตัวมดแดงและไข่มดแดงออกจากกัน จึงสามารถวัดปริมาณไข่มดแดงได้ ซึ่งวิธีการนี้มีความเสี่ยงที่ผู้แยกจะโดนมดแดงกัด และต้องใช้เวลาในการแยกมดแดงและไข่มดแดงออกจากกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการพยากรณ์ปริมาณไข่มดแดงเพื่อวางแผนการจำหน่ายคณะผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) มาช่วยในการจำแนกและตรวจจับไข่มดแดง เพื่อประมาณปริมาณไข่มดแดง

การตรวจจับวัตถุ เป็นหนึ่งหัวข้อที่มีความสำคัญต่องานด้านการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) เพื่อการระบุ และจำแนกตำแหน่งของวัตถุภายในภาพหรือวิดีโอ ในอดีต การตรวจจับวัตถุอาศัยเทคนิคแบบดั้งเดิม (Traditional Methods) เช่น Haar-Like Features, Histogram of

Oriented Gradients (HOG) และ Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) ร่วมกับตัวจำแนกประเภท เช่น Support Vector Machine (SVM) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงปี พ.ศ. 2543-2553 ซึ่งอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมอย่างเช่น Viola-Jones algorithm เป็นอัลกอริทึมสำหรับตรวจจับใบหน้าแบบเรียลไทม์ [3,4] อย่างไรก็ตาม วิธีการแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดในการเรียนรู้ลักษณะที่ซับซ้อนของข้อมูล และไม่สามารถปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNNs) ได้เปลี่ยนแปลงรูปแบบการตรวจจับวัตถุจากแบบเดิม โดยจุดเริ่มต้นเกิดจากการจำแนกภาพ (Image Classification) ในงาน ImageNet [5] และนำไปสู่การพัฒนาโมเดลสำหรับการตรวจจับวัตถุโดยเฉพาะ ปัจจุบันเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้รับความนิยมอย่างมากในงานด้านการตรวจจับวัตถุ โดยเฉพาะอัลกอริทึมในกลุ่มโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNNs) เช่น YOLO (You Only Look Once), Faster R-CNN และ SSD ซึ่งสามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง [6-8] อย่างไรก็ตาม การตรวจจับวัตถุยังพบปัญหาของการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก (Small Object Detection: SOD) ซึ่งเป็นความท้าทายของนักวิจัย เนื่องจากวัตถุมีขนาดเล็ก มีรายละเอียดต่ำ จำนวนพิกเซลน้อย และมักถูกรบกวนด้วยสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กถูกนำมาใช้ในการตรวจจับวัตถุและระบุวัตถุ เช่น การตรวจจับรถยนต์จากภาพถ่ายดาวเทียม [9] การตรวจจับการจราจรในเมืองที่มีรถจำนวนมากและภาพรถมีขนาดเล็ก [10] การตรวจจับสัตว์อัตโนมัติในด้านนิเวศวิทยา การอนุรักษ์ การเกษตร และความปลอดภัยสาธารณะ โดยข้อมูลภาพจากโดรน และเซ็นเซอร์ระยะไกล [11] ซึ่งวัตถุขนาดเล็กและวัตถุมีการทับซ้อนกันทำให้ยากต่อการตรวจจับและระบุวัตถุ

บทความวิจัย (Research Article)

ไข่มดแดงจัดเป็นวัตถุดิบขนาดเล็กและวางชิดติดกัน บางส่วนมีทับซ้อนกัน รวมถึงแสงสะท้อนจากพื้นผิวรัง ซึ่งทำให้การตรวจจับด้วยวิธีทั่วไปมีข้อจำกัด ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจจับวัตถุดิบขนาดเล็ก เช่น การใช้ Feature Pyramid Network (FPN), Attention Mechanism และการปรับปรุงโครงสร้างของโมเดล YOLO จึงเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับวัตถุดิบขนาดเล็ก [12,13] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจจับวัตถุดิบขนาดเล็กในการจำแนกและตรวจจับไข่มดแดงจากภาพถ่ายเพื่อประมาณปริมาณไข่มดแดง และเพื่อนำไปสู่การจัดการฟาร์มมดแดงอัจฉริยะในอนาคต



รูปที่ 1 พื้นที่การกระจายพันธุ์ของมดแดงโอเอคอฟิลลาสมาร์กตินา [14]

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 มดแดง (Red Ant)

มดแดง (Red Ant หรือ Green Tree Ant หรือ Weaver Ant) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ โอเอคอฟิลลาสมาร์กตินา (*Oecophylla Smaragdina*) ซึ่งแปลว่า สร้างรังด้วยใบไม้ บางพื้นที่ในประเทศไทยเรียกว่ามดแดงส้ม ปัจจุบันทั่วโลกพบมดชนิดนี้ กระจายในเอเชียทางตอนเหนือของออสเตรเลีย ควีนแลนด์ เกาะโซโลมอน และนิวินี ดังรูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของมดมีความแตกต่างกันไปในแต่ละวรรณะ โดยมดงานมีลำตัวสีแดงหรือแดงส้ม สวณนางพญามด หรือแม่เป้ง เป็นมดชนิดเดียวในโลกที่มีลำตัวสีเขียวมักจะสร้างรังบนต้นไม้โดยการประสานใบไม้หลาย ๆ ใบด้วยเส้นใยที่ผลิตเอง โดยมดงานมีความยาว 5 ถึง 10 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่มีสีส้ม ดังรูปที่ 2 นางพญามดมีความยาว 20 ถึง 25 มิลลิเมตร มีสีน้ำตาลเขียว หัว และอกมีขนสั้น ๆ สีขาว ดังรูปที่ 3 ทำรังบนต้นไม้โดยใช้ใยสีขาวเชื่อมใบไม้ให้ชิดติดกันเป็นรังทรงกลม หากถูกรบกวนจะปล่อยกรดฟอร์มิกออกมาแล้วกัดทำให้เกิดแผลบนผิวหนัง และทำให้แสบร้อน [14]



รูปที่ 2 มดงาน



รูปที่ 3 มदनางพญา

บทความวิจัย (Research Article)

2.2 ไข่แดง (Red Ant Egg)

ไข่แดง คือ ระยะดักแด้หรือตัวหนอนของมดงาน และมดนางพญา ไข่แดงระยะ 7-10 วัน มีลักษณะทรงรีเล็กอยู่ชิดติดกัน ดังรูปที่ 4 ระยะ 10-20 วัน จะมีลักษณะสีขาวขุ่น หัวแหลมท้ายป้าน ดังรูปที่ 5 โดยปกติไข่แดงจะมีเฉพาะช่วงฤดูแล้ง ช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน ปัจจุบันมดแดงถือเป็นสัตว์เศรษฐกิจอีกประเภทหนึ่งที่เกษตรกรนิยมนำมาเลี้ยง โดยเฉพาะภาคอีสาน ปัจจุบันการเลี้ยงนอกฤดูกาลทำได้ยาก ไข่แดงสามารถนำมาทำอาหารได้หลายชนิด เช่น แกงขี้เหล็กใส่ไข่แดง แกงหน่อไม้ใส่ไข่แดง แกงเห็ดใส่ไข่แดง เป็นต้น แต่ไข่แดงหายากในช่วงฤดูฝน ส่วนใหญ่จะพบเฉพาะในช่วงฤดูร้อนเท่านั้น [2]



รูปที่ 4 ไข่แดงระยะ 7-10 วัน



รูปที่ 5 ไข่แดงระยะ 10 ถึง 20 วัน

2.3 Small Object Detection (SOD)

เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเล็กในภาพหรือวิดีโอ เป็นงานสำคัญงานด้านการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ การตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเล็กมีบทบาทต่องานด้านต่าง ๆ เช่น ระบบเฝ้าระวัง การขับอัตโนมัติ การตรวจจับข้อบกพร่องในอุตสาหกรรม การสำรวจจากภาพถ่ายเทียมและ UAV การเกษตรแม่นยำ และการแพทย์ เช่น การตรวจหาก้อนเนื้อหรือรอยโรคขนาดเล็กตั้งแต่ระยะต้น แต่การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กทำได้ยากเนื่องจากปัญหาและข้อจำกัด ได้แก่ ข้อมูลภาพของวัตถุมีจำกัด ความละเอียดต่ำ การถูกบัง (Occlusion) ฉากหลังรบกวนสูง และปัญหาความไม่สมดุลของข้อมูลในชุดฝึกสอน (Training Data Set) นอกจากนี้ การหาตำแหน่งของวัตถุขนาดเล็กทำได้ยากเพราะต้องการความแม่นยำสูงขณะที่โมเดลทั่วไปมักเสียรายละเอียดระหว่างการลดขนาดตัวอย่าง (Downsampling) และมีข้อจำกัดด้านทรัพยากรคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะเมื่อต้องใช้งานแบบเรียลไทม์ ทำให้โมเดลตรวจจับได้ยากกว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ งานวิจัยปัจจุบันมีการพัฒนาแนวทางหลายวิธีเพื่อแก้ปัญหาการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก เช่น การดึงคุณลักษณะหลายสเกล การเพิ่มความละเอียดและคุณภาพของภาพหรือวิดีโอ (Super Resolution) เพื่อเพิ่มความคมชัด การใช้เทคนิคกลไกความสนใจ (Attention Mechanisms) เพื่อเน้นบริเวณสำคัญและการใช้ Transformer Based Architectures เพื่อจับความสัมพันธ์ระยะไกลในภาพ การพัฒนาโมเดลน้ำหนักรวม การทำ Feature Fusion ให้มีประสิทธิภาพขึ้น การใช้ Data Augmentation และ Synthetic Data รวมถึง Knowledge Distillation และ Self-Supervised Learning เพื่อให้โมเดลเรียนรู้ได้ดีแม้มีข้อมูลจำกัด [13] และแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก ได้แก่ แบบจำลองเชิงลึก YOLO เวอร์ชัน YOLOv11 ซึ่งมี 3 ขนาดให้เลือกใช้ ได้แก่ Nano (n), Small (s) และ Medium (m) [15,16]

บทความวิจัย (Research Article)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) การปรับปรุงภาพ (Enhancement and Restoration) การฝึกฝนข้อมูล และการทดสอบข้อมูล (Training Data and Test Data) และ การวัดประสิทธิภาพ (Performance Evaluation)

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนการจัดเตรียมชุดข้อมูลภาพไข่แมลงที่มีคุณภาพ และมีความหลากหลายเพียงพอสำหรับการพัฒนาโมเดลตรวจจับไข่แมลง โดยทำการเก็บข้อมูลจากโรงเลี้ยงแมลงที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาโรงเลี้ยงแมลงสำหรับงานวิจัย โดยเก็บภาพไข่แมลงระยะอายุ 7–10 วัน และไข่แมลงระยะอายุ 10–20 วัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลซึ่งไข่แมลงในระยะนี้แมลงจะนำไข่มาจัดเรียงติดกับรังเทียม โดยรังเทียมที่ใช้เป็นขวดโหลชนิดพลาสติกใส สูง 15 เซนติเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6



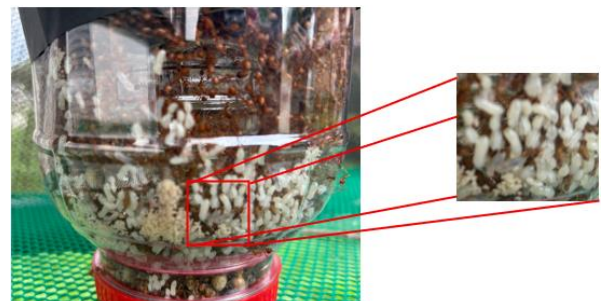
รูปที่ 6 ไข่แมลงในรังเทียม

จากรูปที่ 6 ทำให้สามารถถ่ายภาพเก็บข้อมูลได้สำหรับการถ่ายภาพคณะผู้วิจัยได้ใช้กล้องสมาร์ตโฟนความละเอียดสูง ถ่ายในหลายมุมมองและ

หลากหลายสภาพแสง เพื่อให้ได้ข้อมูลในสภาพจริงมากที่สุด จากนั้นทำการคัดเลือกภาพที่มีคุณภาพดีและจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ .jpg

3.2 การปรับปรุงภาพ

เป็นขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพของภาพไข่แมลงให้เหมาะสำหรับการฝึกฝนข้อมูลและการทดสอบข้อมูล (Train and Test) โดยการนำภาพต้นฉบับที่มีความละเอียดสูงที่ได้จากการถ่ายภาพมาทำการครอบ (Crop) บริเวณส่วนที่เป็นไข่แมลง ดังรูปที่ 7 และภาพที่ใช้เป็นชนิด RGB ปรับขนาดของภาพเป็นขนาด 1024×1024 พิกเซล เนื่องจากไข่แมลงมีขนาดเล็ก หากใช้ขนาดมาตรฐาน 640×640 พิกเซลตามที่ Ultralytics กำหนด จะทำให้เกิดความสูญเสียรายละเอียดของภาพมากเกินไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตรวจจับไข่แมลงที่มีขนาดเล็ก



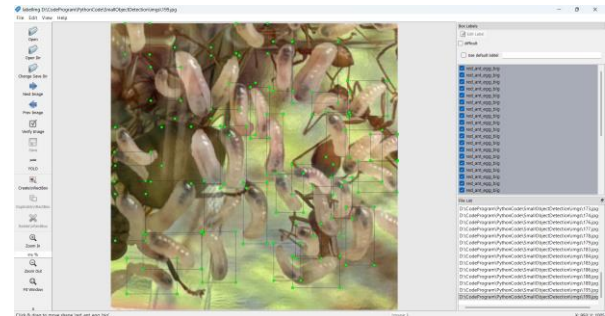
รูปที่ 7 ครอบบริเวณส่วนที่เป็นไข่แมลง

3.3 การฝึกฝนข้อมูลและการทดสอบข้อมูล

การฝึกฝนข้อมูลและการทดสอบข้อมูล (Training and Testing) ในงานวิจัยนี้ใช้โมเดล YOLO (You Only Look Once) ซึ่งเป็นโมเดลตรวจจับวัตถุที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับงานตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก โดยเริ่มจากการนำชุดข้อมูลภาพไข่แมลงจำนวน 47 ภาพ มาทำการกำหนดป้ายกำกับข้อมูล (Annotation) โดยโปรแกรม LabelImg เลือกวัตถุ

บทความวิจัย (Research Article)

ที่เป็นไข่มดแดงด้วยการใช้กรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Box) ได้ทั้งหมดจำนวน 837 Instances แยกตามช่วงอายุของไข่มดแดง แบ่งออกเป็น 2 คลาส โดยไข่มดแดงระยะอายุ 7-10 วัน กำหนดเป็นคลาส red_ant_egg_small จำนวน 362 Instances และไข่มดแดงระยะอายุ 10-20 วัน กำหนดเป็นคลาส red_ant_egg_big จำนวน 475 Instances โดยการ Label จะทำการ Label ไข่มดแดงที่มีความแตกต่างกันชัดเจนเพื่อลดความคลุมเครือของคุณลักษณะ ดังรูปที่ 8 แล้วแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training Set) ชุดตรวจสอบความถูกต้อง (Validation Set) และชุดทดสอบ (Test Set) ในสัดส่วน 70:20:10 ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการฝึกโมเดล YOLO ในการทดลองคณะผู้วิจัยได้ใช้โมเดล YOLOv11 ซึ่งเป็นโมเดลที่มีความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้ดี และมี 3 ขนาดให้เลือกใช้ ได้แก่ Nano (n), Small (s) และ Medium (m) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองฝึกฝนข้อมูลด้วยโมเดล YOLOv11n, YOLOv11s และ YOLOv11m เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 3 ขนาด โดยในการฝึกฝนข้อมูลกำหนดค่าการฝึกฝนข้อมูลทั้ง 3 ขนาด ดังนี้ ขนาดภาพ 1,024 พิกเซล Epochs จำนวน 100 รอบ Batch size เท่ากับ 2 และทำการเพิ่มข้อมูลภาพด้วยเทคนิคการเพิ่มข้อมูล Data Augmentation เพื่อให้โมเดลเรียนรู้ลักษณะ รูปร่าง การย่อขยายภาพ การเอียงบวกลบ 5 องศา การกลับภาพซ้ายขวา และการปรับระดับแสงของไข่มดแดงเพื่อให้ข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกฝนข้อมูลมีจำนวนและความแตกต่างในแต่ละมิติเพิ่มมากขึ้น แต่การทำ Augmentation โดยใช้โมเดล YOLO ในการฝึกฝนข้อมูล YOLO สร้าง Augmentation แบบสุ่มระหว่างการฝึกฝนข้อมูลโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 8 การกำหนดป้ายกำกับข้อมูล (Annotation) ด้วยโปรแกรม Labelling

3.4 การวัดประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการตรวจจับไข่มดแดงโดยใช้โมเดล YOLOv11 ทั้ง 3 ขนาด (n, s, m) ในการตรวจจับไข่มดแดงจากภาพ โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) ที่โมเดลไม่เคยรู้จักมาก่อน เพื่อให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือ โดยใช้ตัววัดประสิทธิภาพ ได้แก่ ค่า Precision ซึ่งแสดงความถูกต้องของการตรวจจับว่าเป็นไข่มดแดงจริง ดังสมการที่ 1 ค่า Recall ซึ่งแสดงความสามารถในการตรวจจับไข่มดแดงได้ครบถ้วน ดังสมการที่ 2 และค่า mean Average Precision (mAP) ดังสมการที่ 3 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินโมเดลตรวจจับไข่มดแดง โดยพิจารณาความแม่นยำของการตรวจจับในหลายระดับค่า Intersection over Union (IoU) และการวิเคราะห์ Confusion Matrix เพื่อศึกษาความผิดพลาดของโมเดล

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

เมื่อ

TP คือ ตรวจจับถูกต้อง (True Positive)

FP คือ ตรวจจับผิด (False Positive)

บทความวิจัย (Research Article)

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดการฝึกฝนข้อมูล ดังรูปที่ 10

เมื่อ

FN คือ ตรวจจับไม่พบวัตถุที่มีอยู่จริง
(False Negative)

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad (3)$$

เมื่อ

N คือ จำนวนคลาส
 AP_i คือ ค่า Average Precision
ของคลาสที่ i



รูปที่ 9 ภาพชุดข้อมูลไข่มดแดง

4. ผลการวิจัย

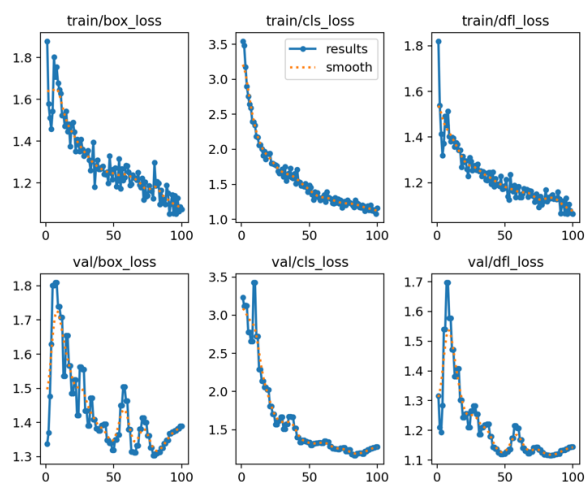
จากการดำเนินการพัฒนาโมเดลตรวจจับไข่มดแดงด้วยเทคนิคการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก โดยใช้โมเดลตรวจจับวัตถุด้วยอัลกอริทึม YOLOv11 ทั้ง 3 ขนาด (n, s, m) โดยใช้ชุดข้อมูลภาพไข่มดแดงทั้งหมดจำนวน 47 ภาพ เนื่องจากในแต่ละภาพมีจำนวนไข่มดแดงจำนวนมากเพื่อเลือกเป็นข้อมูลสำหรับเป็นชุดฝึกฝนข้อมูล ดังรูปที่ 9 และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training Set) จำนวน 32 ภาพ (70%) ชุดตรวจสอบความถูกต้อง (Validation Set) จำนวน 9 ภาพ (20%) และชุดทดสอบ (Test Set) จำนวน 6 ภาพ (10%) ซึ่งมีจำนวนวัตถุรวม 103 ตัวอย่างในชุดตรวจสอบความถูกต้อง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดล YOLOv11n สามารถเรียนรู้ลักษณะของวัตถุขนาดเล็กได้ดีกว่า YOLOv11s และ YOLOv11m ดังตารางที่ 1 และในการฝึกฝนข้อมูล YOLOv11n พบว่าค่า Loss ในส่วนของ Bounding Box (box_loss) ค่า Classification (cls_loss) และค่า Distribution Focal Loss (dfl_loss)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับไข่มดแดงของโมเดล YOLOv11 ทั้ง 3 ขนาด n, s, m

Metric	YOLOv11n	YOLOv11s	YOLOv11m
Small TP	33	32	28
Small FP	54	69	46
Dsmall Recall	80.5%	78.0%	68.3%
Dsmall Precision	37.9%	31.7%	37.8%
Big TP	61	61	57
Big FP	32	52	43
Big Recall	98.4%	98.4%	91.9%
Big Precision	65.6%	54.0%	57.0%

บทความวิจัย (Research Article)

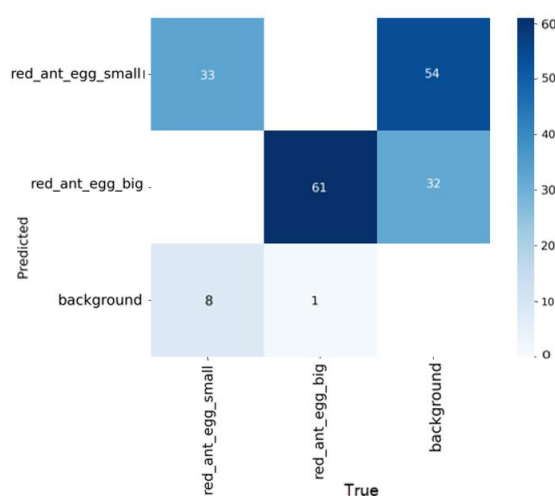


รูปที่ 10 กราฟผลลัพธ์การฝึกโมเดล YOLOv11n

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Loss ได้แก่ box_loss, cls_loss และ dfl_loss ในระหว่างการฝึกฝนโมเดล YOLOv11n ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้ลักษณะของไข่แดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านประสิทธิภาพของโมเดล YOLOv11n พบว่าคลาส red_ant_egg_small ให้ค่า Precision เท่ากับ 37.9% และ Recall เท่ากับ 80.5% และคลาส red_ant_egg_big ให้ค่า Precision เท่ากับ 65.6% และ Recall เท่ากับ 98.4% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถตรวจจับไข่แดงได้ในระดับดี อย่างไรก็ตาม ค่า Precision ต่ำกว่าค่า Recall แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีการตรวจจับผิดพลาด (False Positive) โดยการตรวจจับคลาส red_ant_egg_small ทำนายผิดเป็นพื้นหลังจำนวนมาก เนื่องจากไข่แดงขนาดเล็กมีความคล้ายกับจุดที่เกิดจากการสะท้อนของแสงที่กระทบกับพื้นผิวของรังเทียมทำให้เกิดเป็นจุดสีขาวส่งผลต่อการทำนายของโมเดล YOLOv11n ดังแสดงในตาราง Confusion Matrix ดังรูปที่ 11 นอกจากนี้ ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision) ที่ IoU เท่ากับ 0.5 (mAP@0.5) มีค่าเท่ากับ 0.76 แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ

ได้อย่างถูกต้องถึง 76 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่า mAP@0.5:0.95 มีค่าเท่ากับ 0.49 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความแม่นยำของกรอบล้อมวัตถุ (Bounding Box) ยังวางกรอบไม่แม่นยำ ข้อมูลแสดงประสิทธิภาพของโมเดลในการตรวจจับไข่แดง ดังตารางที่ 2 และตัวอย่างผลการตรวจจับไข่แดงด้วยโมเดล YOLOv11n แสดงดังรูปที่ 12

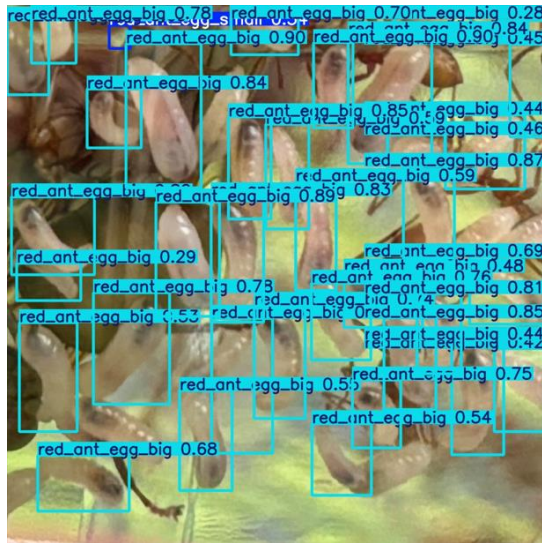


รูปที่ 11 Confusion Matrix ผลการจำแนกไข่แดงของโมเดล

ตารางที่ 2 แสดงค่าประสิทธิภาพของโมเดล YOLOv11n ในการตรวจจับไข่แดง

ตัวชี้วัด (Metric)	ค่า (Value)
Precision (P)	0.66
Recall (R)	0.79
mAP@0.5	0.76
mAP@0.5:0.95	0.49

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 12 ตัวอย่างผลการตรวจจับไข่มดแดง

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กในการจำแนกและตรวจจับไข่มดแดงจากภาพถ่ายไข่มดแดงจากรังเทียม โดยมุ่งเน้นการเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับ เพื่อประมาณปริมาณไข่มดแดง โดยใช้โมเดล YOLOv11n สำหรับการตรวจจับไข่มดแดง จากผลการทดลองพบว่าโมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะของไข่มดแดงที่มีขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความแม่นยำ (Precision) เท่ากับ 0.66 และค่าการเรียกคืน (Recall) เท่ากับ 0.79 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถตรวจจับไข่มดแดงได้ครอบคลุมในระดับที่ดี ขณะที่ค่า mAP@0.5 เท่ากับ 0.76 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามค่า mAP@0.5:0.95 มีค่าเท่ากับ 0.49 แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำของกรอบล้อมวัตถุยังมีข้อจำกัดสำหรับวัตถุขนาดเล็ก เนื่องจากไข่มดแดงขนาดเล็กมีการทับซ้อนกันส่งผลให้การตรวจจับของโมเดล เนื่องจากโมเดลจะมองเห็นเป็นไข่มดแดงเป็นคลาสไข่มดแดงขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 13 และสีของไข่มดแดงใกล้เคียงกับสีพื้นหลังและรังเทียม

เป็นพลาสติกใสเมื่อมีแสงสะท้อนจะมีลักษณะเป็นจุดสีขาว ซึ่งมีลักษณะคล้ายไข่มดแดง

โดยสรุป โมเดล YOLOv11n สามารถนำมาใช้ในการตรวจจับไข่มดแดงได้จริง และมีศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานในภาคการเกษตรหรือระบบอัตโนมัติ สำหรับการปรับปรุงในอนาคต ควรเพิ่มปริมาณข้อมูลฝึกฝนเพื่อเพิ่มความแม่นยำของโมเดล



รูปที่ 13 การตรวจจับไข่มดแดงที่ซ้อนทับกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, “ข้อมูลจำนวนปลูสัตว์ในประเทศไทย 2568,” [ออนไลน์]. Available: <https://ict.dld.go.th/index.php/th/service/report/book/report-book-2568>. [เข้าถึงเมื่อ: 7 เม.ย. 2569].
- [2] นันทิญา มณีโชติ, ขวณพิศ จารัตน์, วัจนรัตน์ วรรดี, นิชาภา เฉตระการ, ฐิตาภรณ์ นิลวรรณ, และยุพเยาว์ โตศิริ, “การเพาะเลี้ยงมดแดงใน

บทความวิจัย (Research Article)

- คริวเรือน กรณีศึกษาพื้นที่แปลงปลูกไม้มีค่าทางเศรษฐกิจในจังหวัดสุรินทร์,” วารสารแก่นเกษตร, ปีที่ 52, ฉบับ 2, หน้า 226–236, 2567, doi: 10.14456/kaj.2024.16.
- [3] P. Viola and M. Jones, “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features,” in *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Kauai, HI, USA, 2001, vol. 1, pp. I-511–I-518, doi: 10.1109/CVPR.2001.990517.
- [4] N. Dalal and B. Triggs, “Histograms of oriented gradients for human detection,” in *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, San Diego, CA, USA, 2005, vol. 1, pp. 886–893, doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
- [5] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, “ImageNet classification with deep convolutional neural networks,” *Commun. ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, Jun. 2017, doi: 10.1145/3065386.
- [6] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [7] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779–788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [8] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg, “SSD: Single shot multibox detector,” in *Computer Vision – ECCV 2016, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9905. Cham, Switzerland: Springer, 2016, pp. 21–37, doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.
- [9] X. Yuan, A. Chakravarty, E. M. Lichtenberg, L. Gu, Z. Wei, and T. Chen, “An empirical study of methods for small object detection from satellite imagery,” arXiv preprint arXiv:2502.03674, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2502.03674.
- [10] C. Deng, L. Chen, and S. Liu, “YOLOSCM: An improved YOLO algorithm for cars detection,” arXiv preprint arXiv:2501.13343, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2501.13343.
- [11] A. Raza, F. Hanif, and H. A. Mohammed, “Analyzing the enhancement of CNN-YOLO and transformer based architectures for real-time animal detection in complex ecological environments,” *Sci. Rep.*, vol. 15, Art. no. 39142, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-26645-2.
- [12] C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y. M. Liao, “YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*

บทความวิจัย (Research Article)

(CVPR), Vancouver, BC, Canada, 2023,
pp. 7464–7475, doi:
10.1109/CVPR52729.2023.00721.

- [13] T.-Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan, and S. Belongie, “Feature pyramid networks for object detection,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 2117–2125, doi: 10.1109/CVPR.2017.106.

- [14] G. M. Dlussky, T. Wappler, and S. Wedmann, “New middle Eocene formicid species from Germany and the evolution of weaver ants,” *Acta Palaeontol. Pol.*, vol. 53, no. 4, pp. 615–626, 2008, doi: 10.4202/app.2008.0406.

- [15] G. Jocher and J. Qiu, “Ultralytics YOLO11,” Ultralytics, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

- [16] X. Gong, J. Yu, H. Zhang, and X. Dong, “AED-YOLO11: A small object detection model based on YOLO11,” *Digit. Signal Process.*, vol. 166, Art. no. 105411, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.DSP.2025.105411.

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาผลของความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนต่อสมรรถนะของเครื่องสับสมุนไพร แบบสองใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชัน

ฐิตินันท์ ป้องนาม¹, ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์² และ สิริธร คีสาลัง^{3,*}

¹ สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตรอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

³ สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: sirithon.su@rmu.ac.th โทรศัพท์: 080-7478248

(รับบทความ: 20 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 15 มิถุนายน 2569; ตอรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนต่อสมรรถนะของเครื่องสับสมุนไพรแบบสองใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชัน ประเมินสมรรถนะชุดสับด้วยความสามารถในการทำงาน ประสิทธิภาพการสับและความสูญเสียในการสับ โดยได้ทำการทดสอบสับไพลและขมิ้นชันที่ความเร็วใบมีด 3 ระดับ คือ 536.25, 715.00 และ 893.75 รอบต่อนาที สำหรับไพลใช้อัตราการป้อน 3 ระดับ คือ 359.64, 617.14 และ 872.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และขมิ้นชันใช้อัตราการป้อน 3 ระดับ คือ 471.00, 621.76 และ 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดสอบพบว่าอัตราการป้อนของทั้งไพลและขมิ้นชันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของชุดใบมีดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามความเร็วใบมีดเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานและประสิทธิภาพการสับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสับไพล ขณะที่การสับขมิ้นชันพบว่าความเร็วใบมีดมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานเช่นกัน โดยค่านัยสำคัญมีระดับเข้าใกล้เกณฑ์การยอมรับที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอัตราการป้อนและความเร็วใบมีดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับสับไพลและขมิ้นชันควรใช้อัตราการป้อน 872.37 และ 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วใบมีด 715.00 และ 536.25 รอบต่อนาที ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการสับเฉลี่ย 97 และ 98 เปอร์เซ็นต์ และความสูญเสียร้อยละ 3 และ 2 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไพล ขมิ้นชัน สองใบมีด ลูกประคบ เครื่องสับ

การอ้างอิงบทความ: ฐิตินันท์ ป้องนาม, ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์ และ สิริธร คีสาลัง, "การศึกษาผลของความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนต่อสมรรถนะของเครื่องสับสมุนไพรแบบสองใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชัน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 50-64, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Effects of Rotational Speed and Feed Rate on the Performance of a Dual-Blade Herbal Chopper for Cassumunar Ginger and Turmeric

Thitinun Pongnam¹, Khanitta Chaibundit² and Sirithon Kisolung^{3,*}

¹ Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Khon Kaen Campus

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Esan, Nakhon Ratchasima

³ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Khon Kaen Campus

*Corresponding Author: sirithon.su@rmuti.ac.th, Tel: 080-7478248

(Received: March 20, 2026; Revised: June 15, 2026; Accepted: July 1, 2026)

Abstract

This study aimed to investigate the effects of cutting blade speed and feed rate on the performance of a dual blade herbal chopping machine optimized for Cassumunar ginger and Turmeric. The machine's performance was evaluated based on throughput capacity, chopping efficiency and chopping loss. The experiments were conducted across three levels of blade rotational speed as 536.25 715.00 and 893.75 rpm. For Cassumunar ginger, the feed rates were varied at three levels as 359.64 617.14 and 872.37 kg/h, while a Turmeric, feed rates were 471.00, 621.76, and 916.81 kg/h. The results showed that, the feed rate for Cassumunar ginger and Turmeric had no statistically significant effect on the chopping efficiency. Conversely, the blade speed was a critical factor that significantly affected both throughput capacity and chopping efficiency at a 95% confidence level, particularly during Cassumunar ginger processing, for turmeric, the blade speed exhibited a similar trend influencing operational performance, with its p-value approaching the threshold of statistical significance at the 95% confidence level. To optimize operational parameters, the recommended settings for during Cassumunar ginger and Turmeric processing are feed rates of 872.37 kg/h and 916.81 kg/h coupled with blade rotational speeds of 715.00 rpm and 536.25 rpm, respectively. These optimal configurations yielded average chopping efficiencies of 97% and 98%, with corresponding chopping losses minimized to 3% and 2%, respectively.

Keywords: Cassumunar Ginger, Turmeric, Double Blade Chopping, Herbal Compresses, Chopper Machine

Please cite this article as: T. Pongnam, K. Chaibundit and S. Kisolung, "Effects of Rotational Speed and Feed Rate on the Performance of a Dual-Blade Herbal Chopper for Cassumunar Ginger and Turmeric," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 50-64, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

พืชวงศ์ขิง (Zingiberaceae) เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสารไฟโตเคมีคัลที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพหลากหลายชนิด ประกอบด้วยพืชล้มลุกอายุหลายปีที่ออกดอกมีกลิ่นหอมประมาณ 52 สกุล และ 1,300 ชนิด มีลักษณะเด่นคือเหง้าที่เลื้อยเป็นแนวนอนหรือเป็นหัว พืชวงศ์ขิงที่มีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายด้วยฤทธิ์ทางชีวภาพที่โดดเด่น เช่น ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านเบาหวาน ฤทธิ์ปกป้องตับ ฤทธิ์ปกป้องระบบประสาท ฤทธิ์ต้านจุลชีพ และฤทธิ์ต้านมะเร็ง พืชที่พบโดยทั่วไปที่เป็นที่นิยมในตระกูลนี้ได้แก่ ขิง (Zingiber Officinale Roscoe), ขมิ้น (Curcuma longa L.), ขิงขาว (Curcuma Zanthorrhiza Roxb.) และขิงไทย (Alpinia Galanga L.) [1] โดยในประเทศไทยได้มีการนำพืชวงศ์ขิงมาเป็นส่วนประกอบของลูกประคบสมุนไพรซึ่งเป็นการนำสมุนไพรพื้นบ้านมาใช้ประโยชน์ทางการรักษาโรคเป็นภูมิปัญญาไทยแบบหนึ่งที่มีมาแต่โบราณ ลูกประคบมีพืชสมุนไพรเป็นส่วนประกอบหลักอย่างน้อย 3 ชนิด ได้แก่ ไพล ขมิ้นชัน และตะไคร้ อาจผสมสมุนไพรชนิดอื่น ๆ เช่น ผิวมะกรูด ใบมะขาม การบูร พิมเสน โดยนำสมุนไพรมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ และห่อด้วยผ้าดิบหรือผ้าฝ้ายแล้วมัดให้แน่นเป็นลูกกลม ๆ นำไปนึ่งให้อุ่นวางประคบตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกายเพื่อช่วยลดอาการปวดเมื่อยและคลายกล้ามเนื้อ [2] ซึ่งการลดขนาดด้วยกระบวนการหั่นหรือสับพืชสมุนไพรที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ค่อนข้างหลากหลายมากกว่าเศษวัสดุพืชอื่น ๆ อีกทั้งปัจจุบันการใช้มีดหั่นย่อยสมุนไพรด้วยมือทำให้การผลิตไม่ทันต่อความต้องการ [3] การลดขนาดหรือหั่นย่อยโดยใช้มีดมีข้อจำกัดในด้านความปลอดภัยไม่สามารถหั่นย่อยให้มีขนาดเล็กและปริมาณมากได้จึงต้องมีการสร้างเครื่องทุ่นแรงแทนการใช้มือ [4] หากมีเครื่องมือที่ช่วยผ่อนแรงในการสับย่อยสมุนไพรก็จะทำให้ประหยัดเวลาลดแรงงานคนในการหั่น ป้องกันการเกิดอันตราย และการเพิ่มอัตราการผลิตที่มากกว่าการหั่นด้วย

แรงงานคน [5] สามารถตอบสนองความต้องการของตลาด นอกจากจะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตลูกประคบแล้วยังช่วยขยายตลาดสินค้าไปสู่การผลิตสมุนไพรสับเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

จากการทบทวนงานวิจัยในด้านสมรรถนะการทำงาน งานวิจัยของ อัครวิน สืบบุญการณ์ และคณะ [6] พบว่าเครื่องสับเนกประสงค์ที่ทำการทดสอบกับหญ้าเนเปียร์ ใบไม้สด และใบไม้แห้งสามารถลดเวลาจากการสับด้วยมือแบบ 1 คนสับได้มากกว่า 60 % โดยลดเวลาในการทำงานลงได้ 2 ใน 3 ของเวลาทำงานปกติ สอดคล้องกับ สัญญา โพธิ์วังษ์ และคณะ [7] พบว่าเครื่องหั่นซอยสมุนไพรสามารถหั่นได้ปริมาณมากกว่าใช้แรงงานคน และหั่นได้เร็วกว่าแรงงานคน ช่วยลดระยะเวลาการหั่นสมุนไพรได้ สามารถนำสมุนไพรไปตากแห้งได้นานกว่าและมากกว่าการใช้แรงงานคน และทำให้มีรายได้จากขมิ้นชันตากแห้งเพิ่มขึ้นจาก 450 บาทต่อวัน เป็น 50,400 บาทต่อวัน กรณีศึกษาจากผู้ผลิตลูกประคบสมุนไพร กลุ่มวิสาหกิจชุมชน บ้านหนองแขง ตำบลหนองแขง อำเภอบ้านแฮด จังหวัดขอนแก่น ซึ่งพบปัญหาค้นตอนการทำลูกประคบคือ ขั้นตอนการหั่นสมุนไพรโดยการหั่นสมุนไพรประเภทหัวและเหง้าไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการและขนาดที่ได้ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนยังคงใช้แรงงานคนในการหั่นส่งผลให้ต้องใช้เวลาและแรงงานเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้หากมียอดการสั่งซื้อลูกประคบสมุนไพรเป็นจำนวนมาก ทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจำเป็นต้องทำการสับสมุนไพรที่ผ่านหั่นและตากแห้งสำเร็จแล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบเนื่องจากไม่สามารถผลิตวัตถุดิบสมุนไพรได้ทันตามความต้องการ ส่งผลให้ต้นทุนในการทำลูกประคบสมุนไพรเพิ่มขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของชุดทดสอบสับสมุนไพรแบบสองใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชัน เพื่อวิเคราะห์และ

บทความวิจัย (Research Article)

เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพด้านการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (C_u) และความสม่ำเสมอของขนาดคละ (C_c) ของสมุนไพรรสขมตากแห้งระหว่างการใช้แรงงานคนกับการใช้ชุดทดสอบสับสมุนไพรรูปแบบสองใบมีด และเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในการสับโพลและขมิ้นชันที่ให้ประสิทธิภาพโดยเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด โดยการทดสอบในงานวิจัยด้านเสถียรภาพใบมีดของ ขนิษฐ์ อุปถัมภ์ และคณะ [8] สำหรับชุดทดสอบแบบ 2 และ 3 ใบมีด พบว่าเมื่อทดสอบการสับลดขนาดลำต้นมันสำปะหลังด้วยชุดทดสอบแบบ 2 ใบมีด ชุดทดสอบไม่เกิดแรงของการสั่นสะเทือนซึ่งในการวางตำแหน่งของใบมีดจะส่งผลต่อความสมดุลของตัวชุดทดสอบ โดยแรงสั่นสะเทือนนี้หากมีมากอาจส่งผลต่อโครงสร้างและอายุการใช้งานของเครื่องจักรให้เกิดความชำรุดเสียหายได้ และการทดสอบจากงานวิจัยด้านอิทธิพลของความเร็วรอบใบมีดสับ สัญญา โพธิ์ วงษ์ และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาเครื่องหั่นฟ้ายะลวยโจรแบบ 2 ใบมีดขนาด 1 แรงม้าพบว่ามีประสิทธิภาพในการหั่นเท่ากับ 99.57% สอดคล้องกับ เทิดศักดิ์ พรหมทา และคณะ [9] ทดสอบเครื่องสับกล้วย 2 ใบมีด 1 แรงม้า มีประสิทธิภาพในการหั่นเท่ากับ 95.32 จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีการศึกษาวิจัยใดที่ทำการวิเคราะห์เชิงลึกถึงอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบใบมีดและอัตราการป้อนที่ส่งผลต่อการสูญเสียและคุณภาพของพืชสมุนไพรรสขมตากแห้งหรือหัวที่มีความหนาแน่นและโครงสร้างทางกายภาพเฉพาะตัวสูง ผู้ศึกษาจึงได้ออกแบบการทดสอบโดยใช้ขีดจำกัดความเร็วใบมีดในการสับแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 536.25, 715.00 และ 893.75 รอบต่อนาที อัตราการป้อนของโพล 3 ระดับ คือ 359.64, 617.14 และ 872.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการป้อนของขมิ้นชัน 3 ระดับ คือ 471.00, 621.76 และ 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และทำการวิเคราะห์คุณภาพของสมุนไพรรสขมตากแห้งโดยใช้พฤติกรรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Sieve

Analysis) และความสม่ำเสมอของขนาดคละ (C_u และ C_c) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของวัตถุดิบในการทำลูกประคบสมุนไพรรสขมตากแห้ง ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเข้ามาเติมเต็มช่องว่างในงานวิจัย โดยทำการทดสอบทางสถิติเพื่อระบุความสัมพันธ์และสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของทั้งอัตราการป้อนและความเร็วใบมีด สำหรับชุดสับสมุนไพรรูปแบบสองใบมีด เพื่อลดการใช้แรงงานคน ยกย่องกำลังการผลิต และควบคุมขนาดอนุภาคให้ได้เกณฑ์สม่ำเสมอสูงสุดตามความต้องการของวิสาหกิจชุมชนเพื่อความยั่งยืน

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องสับสมุนไพรรูปแบบสองใบมีดสำหรับสับโพลและขมิ้นชัน ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการทำลูกประคบสมุนไพรรสขมตากแห้งด้วยลักษณะอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) CISA รุ่น BA 200 N ของโพลและขมิ้นชันที่ผ่านการสับเพื่อผลิตลูกประคบสมุนไพรรสขมตากแห้งจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยทำการชั่งน้ำหนักโพลที่ยังไม่ได้สับตัวอย่างละ 1 กิโลกรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ Tanita รุ่น KD 200 จากนั้นนำโพลและขมิ้นชันมาทำการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการสับด้วยชุดทดสอบการสับแบบสองใบมีดได้แก่ อัตราการป้อนและความเร็วใบมีด โดยมีวิธีการศึกษา และการทดสอบ ดังนี้

2.1 ศึกษาข้อมูลของการทำลูกประคบสมุนไพรรสขมตากแห้งและวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคด้วยการร่อน (Sieve Analysis)

2.1.1 ศึกษาการผลิตลูกประคบและเก็บตัวอย่างสมุนไพรรสขมตากแห้งผ่านกระบวนการสับของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

บทความวิจัย (Research Article)

ศึกษาการผลิตลูกประคบและเก็บตัวอย่างสมุนไพรที่ผ่านกระบวนการสับของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน บ้านหนองแซง ตำบลหนองแซง อำเภอบ้านแฮด จังหวัดขอนแก่น

2.1.2 วิเคราะห์ลักษณะอนุภาคด้วยการร่อน (Sieve Analysis)

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง ดำเนินการโดยการนำสมุนไพรแห้งที่ผ่านกระบวนการสับด้วยมีดจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนมาทำการร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูเปิดเริ่มจากตะแกรงชั้นบนสุดมีขนาดซึ่งมีช่องขนาดต่างๆกัน โดยทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงเปล่าและน้ำหนักสมุนไพรค้ำตะแกรงและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของการกระจายขนาดอนุภาคเพื่อวิเคราะห์หาค่า D10 D30 และ D60 [10] ซึ่งสามารถนำไปคำนวณการกระจายของขนาดสมุนไพร (C_u , Coefficient of Uniformity) และขนาดคละ (C_c , Coefficient of Concavity) ดังแสดงในสมการที่ 1 และสมการที่ 2 [11]

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

เมื่อ

D_{60} คือ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสมุนไพรที่มีเปอร์เซ็นต์ผ่าน 60%, (มิลลิเมตร (มม.))

D_{30} คือ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสมุนไพรที่มีเปอร์เซ็นต์ผ่าน 30%, (มิลลิเมตร (มม.))

D_{10} คือ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสมุนไพรที่มีเปอร์เซ็นต์ผ่าน 10%, (มิลลิเมตร (มม.))

2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับสมุนไพรของชุดทดสอบ

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสับสมุนไพรเพื่อ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสับสมุนไพรด้วยการสับของชุดทดสอบ จึงเลือกศึกษาปัจจัยที่มีผลการสับ คือ อัตราการป้อน ความเร็วใบมีด และค่าซีพีคือประสิทธิภาพ ความสามารถ และการสูญเสีย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 – สมการที่ 5

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{นน.สมุนไพรที่ออกจากช่องทางออก}}{\text{นน.สมุนไพรใส่เข้าในถังบรรจุ}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{ความสามารถการทำงาน} = \frac{\text{นน.สมุนไพรทั้งหมด}}{\text{เวลาในการทำงาน}} \quad (4)$$

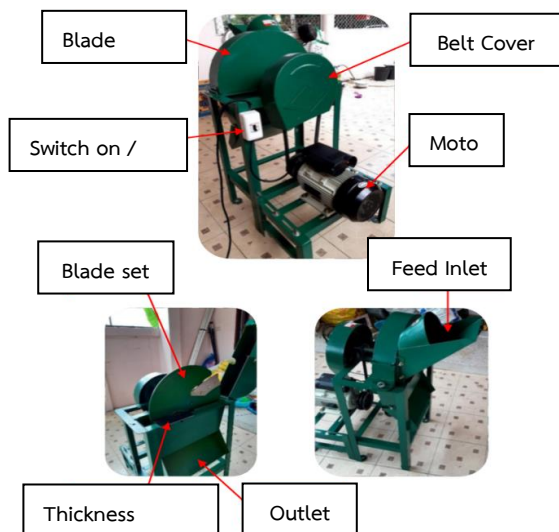
$$\text{การสูญเสีย} = \frac{\text{นน.สมุนไพรที่ค้างในเครื่อง}}{\text{นน.สมุนไพรทั้งหมด}} \times 100\% \quad (5)$$

3. การทดสอบและประเมินผล

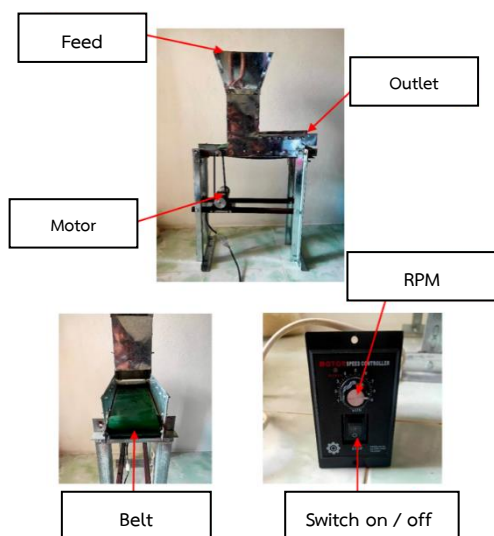
3.1 ศึกษาอัตราการป้อน

การศึกษ้อัตราการป้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อจะศึกษาจำนวนของสมุนไพรที่จะเข้าเครื่องสับ (รูปที่ 1) โดยใช้ชุดป้อนสมุนไพร (รูปที่ 2) ซึ่งสามารถปรับรอบความเร็วได้ 3 ระดับโดยทำการชั่งน้ำหนักสมุนไพรที่ยังไม่สับ 1 กิโลกรัม ป้อนสมุนไพรลงในช่องป้อนและปรับรอบความเร็วในระดับที่ 1 จากนั้นทำการจับเวลาเริ่มป้อนและสิ้นสุด ทำการทดสอบซ้ำจนครบความเร็วทั้ง 3 ระดับ

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องสับสมุนไพรมอเตอร์



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของชุดป้อนสมุนไพรมอเตอร์

3.2 ศึกษาความเร็วใบมีดในการสับ

การศึกษาความเร็วของรอบสับ 3 ระดับ จะได้ความเร็วรอบในการสับ 3 ระดับ โดยใช้วิธีการเปลี่ยนพูลเลย์ตัวขับของชุดเครื่องสับ และคำนวณความเร็วใบมีดจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพูลเลย์ (สมการที่ 3)

$$n_1 \times d_1 = n_2 \times d_2 \quad (3)$$

เมื่อ

n_1 คือ ความเร็วใบมีดของพูลเลย์ขับ, (รอบต่อนาที)

n_2 คือ ความเร็วใบมีดของพูลเลย์ตาม, (รอบต่อนาที)

d_1 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพูลเลย์ขับ, (นิ้ว)

d_2 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพูลเลย์ตาม, (นิ้ว)

3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับความเร็วใบมีดที่ใช้สับโพล และขมิ้นชัน ด้วยชุดทดสอบเครื่องสับสมุนไพรมอเตอร์แบบสองใบมีด

การศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับความเร็วใบมีดที่ใช้สับโพล และขมิ้นชัน ทำโดยป้อนโพล/ขมิ้นชัน ตัวอย่างละ 1 กิโลกรัมพร้อมทั้งจับเวลาที่ใช้ในการสับ ตามความเร็วใบมีดในการสับจากข้อ 2.2 ที่อัตราการป้อน 3 ระดับ จากนั้นเปลี่ยนความเร็วใบมีดในการสับให้ครบทั้ง 3 ความเร็ว โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำสมุนไพรมอเตอร์ไปทำให้แห้ง

3.4 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคสมุนไพรมอเตอร์ด้วยการร่อน (Sieve Analysis)

การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของโพลและขมิ้นชันทำโดยใช้การร่อนโพลและขมิ้นชันหลังการทำให้แห้งแล้วด้วยการร่อนผ่านตะแกรง เพื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายตัว (สมการที่ (1)) และค่าความคละ (สมการที่ (2)) ของสมุนไพรมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการสับด้วยมีดและชุดสับสมุนไพรมอเตอร์แบบ 2 ใบมีด

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการศึกษา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อชุดสับสมุนไพรรูปแบบสองใบมีดสำหรับสับไพลและขมิ้นชัน แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การศึกษาข้อมูลของการทำลูกประคบสมุนไพรรูปแบบของภูมิวิสาหกิจชุมชน การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับสมุนไพรรูปแบบชุดทดสอบ และการทดสอบและประเมินผล ได้ผลการศึกษาของทั้ง 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาข้อมูลของการทำลูกประคบสมุนไพรรูปแบบและวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคด้วยการร่อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

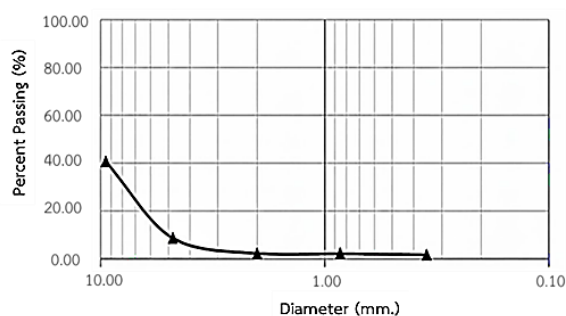
จากการลงพื้นที่และเก็บข้อมูล ณ บ้านหนองแขง ตำบลหนองแขง อำเภอบ้านแฮด จังหวัดขอนแก่น เพื่อศึกษาข้อมูลของการทำลูกประคบสมุนไพรรูปแบบ และเก็บตัวอย่างไพลและขมิ้นชันสับแห้งเพื่อวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคด้วยการร่อนได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาข้อมูลของการทำลูกประคบสมุนไพรรูปแบบของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

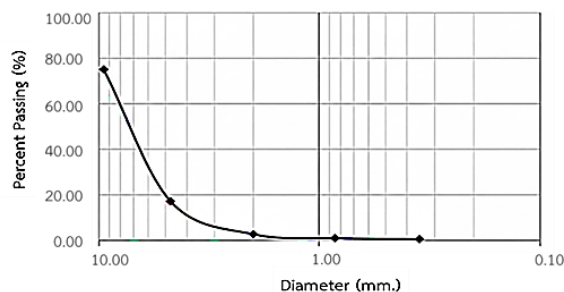
ผลการศึกษาวิธีการทำลูกประคบสมุนไพรรูปแบบของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนได้มีการนำสมุนไพรรูปแบบได้แก่ ไพล ขมิ้นชัน ตะไคร้ ผิวมะกรูด และใบมะขาม มาเป็นส่วนประกอบหลักของลูกประคบ ผ่านกระบวนการล้างให้สะอาดจากนั้นจึงทำการหั่นหรือสับสมุนไพรรูปแบบออกเป็นชิ้นโดยใช้มีดและเขียงรองหั่น จากนั้นนำไปตากให้แห้งเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการคลุกพื้สมุนไพรรูปแบบและการบูรและเกลือแกง ก่อนทำการห่อด้วยผ้าขาวบางซึ่งในกระบวนการหั่นชิ้นสมุนไพรรูปแบบโดยเฉพาะพืชหัวคือไพล และขมิ้นชัน จำเป็นต้องใช้แรงงานคนและเวลาเนื่องจากขนาดที่ไม่แน่นอนของหัวไพลและขมิ้นชัน

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรง

ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงตัวอย่างไพลแห้งและขมิ้นชันแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ดังแสดงใน รูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงตัวอย่างไพลแห้ง



รูปที่ 4 ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงตัวอย่างขมิ้นชันแห้ง

จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักรูปแบบผ่านตะแกรงแต่ละชั้นของไพลแห้งไม่พบน้ำหนักรูปแบบที่ถูกร่อนผ่านตะแกรงในช่วง 60 เปอร์เซ็นต์ จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว และค่าความคละของไพลแห้งได้ ส่วนขมิ้นชันสามารถวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวและค่าความคละได้ 2.16 และ 1.08 ตามลำดับ

บทความวิจัย (Research Article)

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับสมุนไพรรองชุดทดสอบ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับสมุนไพรรองงานวิจัยได้แก่ รั้งสรรค์ พงษ์พัฒน์อำไพ และคณะ [12] พบว่าความเร็วใบมีดในการสับของเครื่องสับหัวมันสำปะหลังแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งเป็นเครื่องสับแบบ 2 ใบมีด และใช้กำลังมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าได้ทำการทดสอบความเร็วใบมีดในการสับระหว่าง 300 - 400 รอบต่อนาที ผลการทดสอบประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าความเร็วใบมีดของเครื่องสับที่ 400 รอบต่อนาที ได้ประสิทธิภาพ 94.45 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการสับได้ 2,091.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (2.09 ตันต่อชั่วโมง) และ ณพล เหลืองพิพัฒน์สร [13] ได้ทำการศึกษารวดเร็วใบมีดการสับและมุมมองสับใบมีดโดยทำการการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยและอัดหญาอาหารสัตว์ สำหรับเกษตรกรรายย่อยเป็นเครื่องสับแบบ 4 ใบมีด และใช้กำลังมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วใบมีดของมอเตอร์ที่ 1,300, 1,500 และ 1,700 รอบต่อนาที ศึกษามุมมองสับใบมีดสำหรับสับย่อยหญ้า 3 ระดับคือ 15, 30 และ 40 องศา ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วใบมีดของมอเตอร์และมุมมองสับของใบมีดที่เหมาะสมในการสับย่อยหญ้าอาหารสัตว์ คือ 1,500 รอบต่อนาที และ 40 องศา ตามลำดับ ให้ความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 229.40 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับสมุนไพรรองงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ความเร็วใบมีดในการสับ และมุมมองสับใบมีดส่งผลต่อความสามารถในการสับ ประสิทธิภาพการสับ และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียจากการสับ แต่งานวิจัยที่ศึกษา ยังไม่มีการทดสอบปัจจัยของอัตราการป้อนที่มีผลต่อการสับ ผู้ศึกษาจึงเลือกทำการศึกษา ความเร็วใบมีดในการสับ และอัตราการป้อน โดยมีค่าค่าชี้ผลคือ ประสิทธิภาพในการสับ ความสามารถในการสับ ความสูญเสียจากการสับ และเปรียบเทียบขนาดอนุภาคด้วยการร่อนระหว่าง

ตัวอย่างสมุนไพรรองที่ได้จากวิสาหกิจชุมชนและจากชุดทดสอบ

4.3 ผลการทดสอบการสับสมุนไพรรองโดยใช้ชุดทดสอบแบบสองใบมีด

จากปัจจัยที่ใช้ทำการศึกษาคือความเร็วใบมีดในการสับ และอัตราการป้อน โดยมีค่าค่าชี้ผลคือ ประสิทธิภาพในการสับ ความสามารถในการสับ ความสูญเสียจากการสับ และเปรียบเทียบขนาดอนุภาคด้วยการร่อนระหว่างตัวอย่างสมุนไพรรองที่ได้จากวิสาหกิจชุมชนและจากชุดทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.3.1 ผลการทดสอบอัตราการป้อน

ผลการทดสอบอัตราการป้อนพบว่าที่ความเร็วระดับที่ 1 โพลและขมิ้นชันมีอัตราการป้อน 359.64, 471.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ระดับความเร็วที่ 2 มีอัตราการป้อน 617.14, 621.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และระดับความเร็วที่ 3 มีอัตราการป้อน 872.37, 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดให้อัตราการป้อนวัตถุดิบเป็นตัวแปรควบคุมคงที่ตลอดกระบวนการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดในงานวิจัยของ Oduntan et al. [14] ที่ระบุว่าประสิทธิภาพการสับย่อย และอัตราความสามารถในการทำงานของเครื่องสับมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบ และมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยการควบคุมปัจจัยดังกล่าวจึงช่วยลดความคลาดเคลื่อนและทำให้สามารถวิเคราะห์อิทธิพลหลักของความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำ

4.3.2 ผลการทดสอบความเร็วใบมีดในการสับ

ผลการทดสอบความเร็วใบมีดในการสับพบว่า พูลเลย์ตัวขับเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว มีความเร็วใบมีดในการสับ 536.24 รอบต่อนาที พูลเลย์ตัวขับเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มี

บทความวิจัย (Research Article)

ความเร็วใบมีดสับ 715.00 รอบต่อนาที พูลเลย์ตัวขับ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว มีความเร็วใบมีดสับ
893.75 รอบต่อนาที

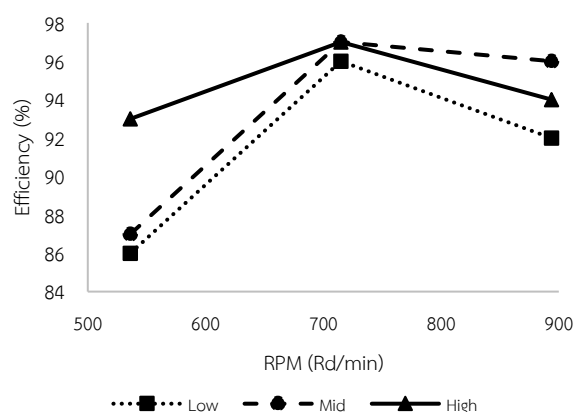
4.3.3 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ
ป้อนกับความเร็วใบมีดที่ใช้สับไพล และขมิ้นชัน

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ
ป้อนกับความเร็วใบมีดที่ใช้สับไพล และขมิ้นชัน ด้วย
ชุดทดสอบเครื่องสับสมุนไพรแบบสองใบมีด ดังแสดง
ใน ตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนของไพล

Feed Rate (kg/hr)	RPM (Rd/min)	Capacity (kg/hr)	Efficiency (%)	Loss (%)
359.64	536.25	123.23	86	14
	715.00	165.83	96	4
	893.75	178.77	92	8
617.14	536.25	141.52	87	13
	715.00	209.56	97	3
	893.75	221.54	96	4
872.37	536.25	172.46	93	7
	715.00	230.11	97	3
	893.75	270.86	94	6

จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อชุดทดสอบทำการสับ
ไพลที่อัตราการป้อน 872.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
ความเร็วใบมีด 715.00 รอบต่อนาที มีความสามารถ
ในการทำงาน 230.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งไม่ใช่
ความสามารถสูงสุดแต่กลับมีประสิทธิภาพสูงสุดถึง
97 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 5) เท่ากับประสิทธิภาพการสับ
ที่อัตราการป้อน 617.14 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็ว
ใบมีดการสับ 715.00 รอบต่อนาที แต่มีความสามารถ
ในการทำงานน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่อัตราการ
ป้อน 872.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วใบมีดการ
สับ 715.00 รอบต่อนาที เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้
สับไพลโดยมีประสิทธิภาพในการสับไพลสูงสุดและค่า
การสูญเสีย 3 เปอร์เซ็นต์



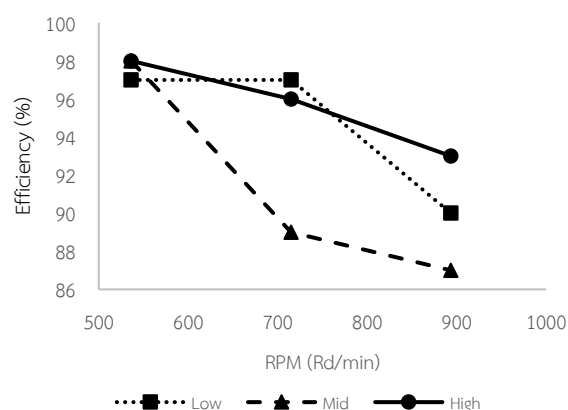
รูปที่ 5 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบใบมีดสับ
และอัตราการป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการสับไพล

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบมีดและอัตราการป้อนของขี้มันชั้น

Feed Rate (kg/hr)	RPM (Rd/min)	Capacity (kg/hr)	Efficiency (%)	Loss (%)
471.00	536.25	158.13	97	3
	715	210.61	97	7
	893.75	241.19	90	10
621.76	536.25	178.07	98	2
	715	231.64	89	11
	893.75	262.33	87	13
916.81	536.25	198.46	98	2
	715	375.52	96	4
	893.75	311.58	93	7

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อชุดทดสอบทำการสับขี้มันชั้นที่อัตราการป้อน 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วใบมีดการสับ 536.25 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทำงาน 198.46 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งไม่ใช่ความสามารถสูงสุดแต่กลับมีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 98 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 6) เท่ากับประสิทธิภาพการสับที่อัตราการป้อน 621.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วใบมีดการสับ 536.25 รอบต่อนาที แต่มีความสามารถในการทำงานน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่อัตราการป้อน 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วใบมีดการสับ 536.25 รอบต่อนาที เป็นค่าที่เหมาะสมในการสับขี้มันชั้นโดยมีประสิทธิภาพในการสับขี้มันชั้นสูงสุดและค่าการสูญเสียเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องสับสมุนไพรดังกล่าวถูกจำกัดให้เหมาะสมต่อการลดขนาดของพืชประเภทหัวที่มีเนื้อสัมผัสแน่นและเปราะ โดยไม่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์หรือทดสอบกับพืชประเภทใบเนื่องจากกลไกการตัดไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 6 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบใบมีดสับและอัตราการป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการสับขี้มันชั้น

จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบใบมีดสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการสับสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดลดลงเนื่องจาก เกิดแรงเหวี่ยงที่สูงขึ้นทำให้สมุนไพรกระเด็นหลุดออกจากคมมีด อีกทั้งเมื่อใบมีดหมุนตัดเร็วเกินไปเมื่อสัมผัสเนื้อสมุนไพรประเภทเหง้าสดทำให้เกิดการแตกหักและเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น

บทความวิจัย (Research Article)

4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมรรถนะของชุดทดสอบเครื่องสับสมุนไพรแบบสองใบมีด จึงได้มีการนำข้อมูลผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและความเร็วใบมีดมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการสับไพลและขมิ้นชันแตกต่างกันอย่างไร โดยพิจารณาจากค่าระดับนัยสำคัญ (P-Value) เพื่อยืนยันความเชื่อมั่นของผลการทดลองและใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกสภาวะการทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า P-Value เพื่อดูอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ

Factor	Efficiency	Capacity
Cassumunar ginger		
Feed Rate	0.299	0.006
RPM	0.029	0.003
Turmeric		
Feed Rate	0.207	0.082
RPM	0.051	0.058

จากตารางที่ 3 พบว่าอัตราการป้อนของสมุนไพรทั้ง 2 ชนิด ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของการสับ ในขณะที่ความเร็วใบมีดสำหรับไพลและขมิ้นชันเป็นปัจจัยที่ผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานและประสิทธิภาพต่อการสับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะไพล แต่ขมิ้นชันมีแนวโน้มที่ความเร็วใบมีดสามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานและประสิทธิภาพต่อการสับที่ P-Value ใกล้เคียง 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. [15] ซึ่งทดสอบสับต้นฝ้ายที่มีความ

หนาแน่นสูงเมื่อใช้ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงตัดและกำลังตัดลดลง โดยในงานวิจัยครั้งนี้สามารถแนะนำอัตราการป้อนและความเร็วใบมีดที่เหมาะสมสำหรับการสับสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดได้ดังแสดงในตารางที่ 4

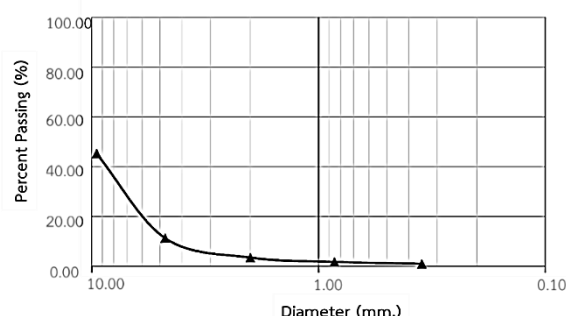
ตารางที่ 4 อัตราการป้อนและความเร็วใบมีดที่เหมาะสมสำหรับการสับสมุนไพรทั้ง 2 ชนิด

Type	Feed Rate (kg/hr)	RPM (Rd/min)	Efficiency %
Cassumunar	872.37	715	97%
Turmeric	916.81	536.25	98%

จากตารางที่ 4 พบว่าการสับไพลและขมิ้นชันที่อัตราการป้อนสูงที่สุดจะต้องใช้ความเร็วใบมีด 715 และ 536.25 จะทำให้ได้ค่าการสูญเสียที่น้อยที่สุด ที่ 3 % และ 2 % ตามลำดับ

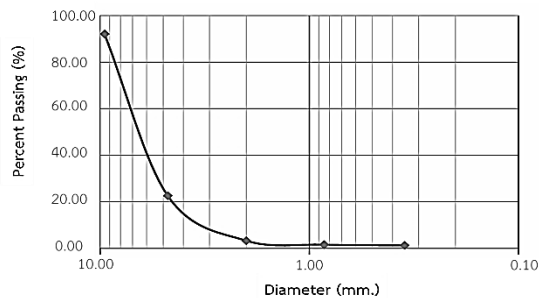
4.5 ผลการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคสมุนไพรแห้งด้วยการร่อน (Sieve Analysis)

ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงไพลแห้งและขมิ้นชันแห้งที่ผ่านการสับโดยใช้ชุดทดสอบแบบ 2 ใบมีด แสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงตัวอย่างไพลแห้ง

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 8 ผลการทดสอบอนุภาคด้วยการร่อนผ่าน
ตะแกรงตัวอย่างขี้มันชัน

ผลการทดสอบพบว่า เปอร์เซนต์น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงแต่ละชั้นของโพลีเอสเตอร์ที่ผ่านน้ำหนักร่อนผ่านตะแกรงในช่วง 60 เปอร์เซนต์ เนื่องจากใบมีดใช้แรงตัดเฉือนสับโพลีเอสเตอร์ออกมาได้ขนาดที่เท่ากันเกือบทั้งหมด โดยขนาดของโพลีเอสเตอร์มีความสม่ำเสมอไม่มีเศษชิ้นโพลีเอสเตอร์กลางหรือขนาดเล็กกระจายตัว จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัวและค่าความคละของโพลีเอสเตอร์ได้ ส่วนขี้มันชันสามารถวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวและค่าความคละได้ 2.42 และ 1.24 ตามลำดับ โดยขนาดของขี้มันชันส่วนใหญ่ยังมีขนาดค่อนข้างเท่ากัน เกิดการเกาะกลุ่มกันของขนาด และมีความต่อเนื่องของขนาดแบบไม่ขาดช่วงซึ่งพฤติกรรมของสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดยืนยันได้ว่าพลังงานกลจากชุดสับสมุนไพรแบบ 2 ใบมีดถูกถ่ายเทไปในรูปแบบแรงตัดเฉือนคงที่จำเพาะซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคสมุนไพรแห้งระหว่างการสับด้วยมีดจากวิสาหกิจชุมชนและชุดสับสมุนไพรแบบ 2 ใบมีด พบว่าค่าการกระจายตัว และค่าความคละของสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดที่สับด้วยชุดทดสอบมีการกระจายตัวและคละกันมากกว่าการสับด้วยมีดจากวิสาหกิจชุมชน เนื่องจากกลไกการทำงานของชุดใบมีดคู่หมุนวนด้วยความเร็วรอบสูงและคงที่ ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงเข้าปะทะเฉือนตัดเนื้อสมุนไพรในทิศทางที่หลากหลายร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างจังหวะการป้อนและอัตราเร็วของใบมีด ส่งผลให้ชิ้น

สมุนไพรบางส่วนถูกตัดเฉือนโดยตรงและบางส่วนถูกแรงกระแทกซ้ำจนเกิดขนาดคละที่มากขึ้นและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากกว่าจังหวะการสับด้วยมือของมนุษย์ซึ่งเป็นแรงกระทำทิศทางเดียว

5. การสรุปและอภิปรายผล

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสับโพลีเอสเตอร์และขี้มันชันด้วยชุดทดสอบเครื่องสับสมุนไพรแบบสองใบมีดพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสับ คือความเร็วใบมีดสับและมุมมองใบมีด ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการสับคือ ประสิทธิภาพในการสับ และเปอร์เซนต์การสูญเสียจากการสับ โดยการทดสอบได้ทำการแบ่งสมุนไพรออกเป็น 2 ชนิดคือโพลีเอสเตอร์และขี้มันชัน ผลการทดสอบชุดสับสมุนไพรแบบสองใบมีดเมื่อทำการทดสอบสับโพลีเอสเตอร์พบว่าเมื่อใช้ความเร็วใบมีดการสับที่ 715.00 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 872.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้ความสามารถในการทำงาน 230.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการสับ 97.00 เปอร์เซนต์ พบเปอร์เซนต์การสูญเสีย 3.00 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นรอบที่เหมาะสมที่สุดในการสับโพลีเอสเตอร์ในส่วนขี้มันชัน เมื่อใช้ความเร็วใบมีดการสับที่ 536.25 รอบต่อนาที ในอัตราการป้อน 916.81 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้ความสามารถในการทำงาน 198.46 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการสับ 98.00 เปอร์เซนต์ เปอร์เซนต์การสูญเสีย 2.00 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นรอบที่เหมาะสมที่สุดในการสับขี้มันชัน ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับประสิทธิภาพของการทดสอบการสับวัสดุเกษตรแบบ 2 ใบมีดในอดีต โดยเมื่อเทียบกับเครื่องสับหัวมันสำปะหลังแบบ 2 ใบมีดของรังสรรค์พงษ์พัฒน์อำไพ และคณะ [12] ซึ่งให้ประสิทธิภาพร้อยละ 94.45 หรือเครื่องสับกล้วย [9] ที่ร้อยละ 95.32 จะเห็นได้ว่าชุดทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถคงระดับประสิทธิภาพการทำงานได้สูงถึงร้อยละ 97-98 ซึ่งมีความจำเพาะและเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการลด

บทความวิจัย (Research Article)

ขนาดพืชสมุนไพรประเภทเหง้าที่มีความหนาแน่นสูง โดยสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดเมื่อผ่านกระบวนการทำให้แห้ง และนำมาร้อนผ่านตะแกรงพบว่ามีการกระจายตัว ความคละกั้นของชิ้นสมุนไพรที่ดีใกล้เคียงกับการสับ ด้วยมีดจากวิสาหกิจชุมชนเมื่อเทียบกับความเร็วใบมีด สับและอัตราการป้อนอื่น ๆ

ดังนั้นชุดสับสมุนไพรแบบสองใบมีดช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพในการสับสมุนไพร ประหยัดเวลา แรงงานคน ลดความเสี่ยงในการเกิดอันตรายขณะ ทำงาน และเพิ่มอัตราการผลิตที่มากกว่าการหั่นด้วย แรงงานคน สามารถลดขนาดพืชสมุนไพรประเภท เหง้าหรือหัวที่มีความหนาแน่นและโครงสร้างทาง กายภาพเฉพาะตัวสูงสามารถสร้างโมเมนต์และแรง ดลทางพลศาสตร์ที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้คงระดับ ประสิทธิภาพการสับย่อยได้สูงถึงร้อยละ 97-98 โดยมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเชิงกลต่ำเพียงร้อยละ 2-3 เมื่อใช้อัตราการป้อนที่เหมาะสม อีกทั้งสามารถ ควบคุมคุณภาพทางกายภาพของวัสดุทางการเกษตร หลังการสับย่อย โดยเมื่อผ่านกระบวนการร้อน วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งให้ พฤติกรรมการคละกั้นของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ ใกล้เคียงกับการใช้แรงงานคนสับด้วยมือของวิสาหกิจ ชุมชน ส่งผลต่อการเปิดหน้าสัมผัสของเซลล์พืชเพื่อ เพิ่มอัตราการระเหยและการสกัดน้ำมันหอมระเหยใน ขั้นตอนการผลิตลูกประคบขึ้นต่อไป โดยในการศึกษา ขึ้นต่อไป ควรพัฒนาชุดทดสอบให้เป็นโครงสร้างถอด เปลี่ยนชิ้นส่วนได้เพื่อศึกษาปัจจัยจำเพาะ เช่น จำนวน ใบมีด มุมองศาการตัด และระยะห่างช่องตัด ทั้งนี้ ควรออกแบบระบบเพื่อแก้ข้อจำกัดเชิงวิศวกรรมที่พบ จากการทดลองจริง ได้แก่ การติดตั้งชุดลดแรงสั่นสะเทือน สะสมจากแรงเหวี่ยงรอบสูง การเลือกใช้วัสดุใบมีดที่มี ความทนทานต่อการสึกหรอเพื่อรองรับแรงเสียดทาน และความร้อนสะสม และการเพิ่มแรงบิดเพื่อป้องกันการ ติดขัดของเส้นใยและยางสมุนไพรในห้องสับที่ สภาวะความเร็วรอบต่ำ เพื่อนำฐานข้อมูลไปใช้

ออกแบบชุดสับสมุนไพรต้นแบบในเชิงพาณิชย์ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราช มงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน จังหวัดนครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเวลา ในการทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. N. Alolga, F. Wang, X. Zhang, J. Li, L.-S. P. Tran, and X. Yin, "Bioactive compounds from the Zingiberaceae family with known antioxidant activities for possible therapeutic uses," *Antioxidants*, vol. 11, no. 7, Art. no. 1281, 2022, doi: 10.3390/antiox11071281.
- [2] จิตต์เรขา ทองมณี, "ลูกประคบสมุนไพร," *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, ปีที่ 53, ฉบับที่ 169, หน้า 1-3, 2548.
- [3] สมศักดิ์ คำมา, จารุวรรณ สิงห์ม่วง, และ พินัย ทองสวัสดิ์วงศ์, "การออกแบบและพัฒนาเครื่อง สับวัสดุพืชเกษตรและเปลือกผลไม้," *วารสารวิชาการเกษตร*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 1, หน้า 58-67, 2563, doi: 10.14456/thaidoa-agres.2020.5.
- [4] สมศักดิ์ คำมา, "การออกแบบและสร้างเครื่อง สับย่อยเศษพืชผักในครัวเรือน," *วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราช*

บทความวิจัย (Research Article)

- ภักดิ์ลาปาง, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 82–95, 2561.
- [5] เพลิงฟ้า เอียงสา, สิริรัตน์ พรหมทา, เสาวลักษณ์ ศรีสุนข่าง, และ อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติกุล, “การพัฒนาเครื่องหั่นใบสมุนไพร,” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, ปีที่ 48, ฉบับที่ 3 (พิเศษ), หน้า 35–38, 2560.
- [6] อัศวิน สืบบุญการณ, ภูเมศร์ นิยมมาก, วัชรกร จันโสม, และ นันทพัทธ์ ปัดภัย, “การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสับเอนกประสงค์เพื่อการเกษตร,” *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 1–7, 2564.
- [7] สัญญา โพธิ์วังษ์, วิรัตน์ อัสวานวัตร, สมพงษ์ แซ่บ่าง, และ เทพรถ อนันต์สูงเนิน, “การสร้างและหาประสิทธิภาพเครื่องหั่น-ซอยสมุนไพรแบบต่อเนื่อง,” *วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 73–82, 2565.
- [8] ขนิษฐา อุปถัมภ์, สมโภชน์ สุดาจันทร์, ชัยยันต์ จันทร์ศิริ, กิตติพงษ์ ลาลูน, และ สิงห์ธัญ ชารี, “อิทธิพลของจำนวนใบมีดและความเร็วเชิงเส้นของใบมีดสับที่มีผลต่อสมรรถนะของชุดสับลดขนาดลำต้นมันสำปะหลังสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด,” *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 88–100, 2564.
- [9] เติตศักดิ์ พรหมทา, สหรัฐ ภูฐาน, อิศระพงษ์ โพธิ์ดอกไม้, และ วันชาติ สุพรรณพิทักษ์, “การออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นสับต้นกล้วย,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 1*, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย, 2562, หน้า 173–177.
- [10] F. Grau, H. Choo, J. W. Hu, and J. Jung, “Engineering behavior and characteristics of wood ash and sugarcane bagasse ash,” *Materials*, vol. 8, no. 10, pp. 6962–6977, Oct. 2015, doi: 10.3390/ma8105353.
- [11] I. C. C. Iloabachie, A. M. Nwankwo, C. F. Nzoiwu, and V. I. Aneke, “Characterization of powdered pentaclethra macrophylla pod as a friction material,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 296–302, May 2026, doi: 10.5281/zenodo.20522455.
- [12] รังสรรค์ พงษ์พัฒนาอำไพ, ปณณ สะอาดดวง, และ ณมน วรณานูวงศ์, “การออกแบบและพัฒนาเครื่องสับหวั่นสำหรับแปะหลังแบบกึ่งอัตโนมัติ,” *รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, มหาสารคาม, 2561.
- [13] ณพล เหลืองพิพัฒน์สร, “การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดหั่วอาหารสัตว์,” *วิทยานิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, ปทุมธานี, 2561.
- [14] O. B. Oduntan, A. I. Bamgboye, O. S. Idogwu, and R. O. Bankole, “Optimization of the efficient shredding process of biogas feedstocks from cassava peels,” *Journal of Wastes and Biomass Management*, vol. 6, no. 1, pp. 30–36, 2024, doi: 10.26480/jwbm.01.2024.30.36.
- [15] W. Huang, J. Xie, S. Cao, J. Tang, and Y. Yang, “Optimization of cutting parameters for cotton stalks using

บทความวิจัย (Research Article)

reciprocating bionic cutters based on
finite element simulation and
experiment,” *Agri Engineering*, vol. 8, no.
5, Art. no. 164, 2026, doi:
10.3390/agriengineering8050164.

บทความวิจัย (Research Article)

การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง^{1,*}, อนุวัช แสนพงษ์¹, อภิชน มุ่งชู¹ และ ไฉไล ชาแสน¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: sawanee.ja@ksu.ac.th โทรศัพท์: 088-7981158

(รับบทความ: 17 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 16 มิถุนายน 2569; ตอรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก และประยุกต์ใช้ผลลัพธ์เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ โดยใช้โพลีเซลล์ร่วมกับโมดูลขยายสัญญาณ HX711 และบอร์ด Arduino Uno ในการเก็บข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-Time) การทดลองดำเนินการโดยปล่อยวัตถุที่มีมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมตำแหน่งและความสูงให้คงที่ ผลการทดลองพบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะการสั่นแบบลดทอนในช่วงทรานเซียนต์ และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Settling Time: T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.22, 65.14, 100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงการซ้อนทับของสัญญาณ จึงกำหนดช่วงเวลาการปล่อยวัตถุขั้นต่ำเป็น $2T_s$ ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดความคลาดเคลื่อนของระบบ นอกจากนี้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุและช่วงเวลาการปล่อยวัตถุมีลักษณะเชิงเส้น จึงสามารถพัฒนาสมการเชิงประจักษ์ได้เป็น $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.982$ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับสูง ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์มาใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนและการซ้อนทับของสัญญาณ และเพิ่มความแม่นยำรวมถึงเสถียรภาพของระบบโดยรวม

คำสำคัญ: โพลีเซลล์ การตอบสนองเชิงพลวัต ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ ระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ การวัดแรงกระแทก

การอ้างอิงบทความ: เสาวนีย์ จันทร์สว่าง, อนุวัช แสนพงษ์, อภิชน มุ่งชู และ ไฉไล ชาแสน, "การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทกเพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 65-77, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Dynamic Response Analysis of a Strain Gauge Load Cell under Impact Loading for Accuracy Improvement in an Automatic Bottle Sorting System

Sawanee Jansawang^{1,*}, Anuwat Saenpong¹, Aphichon Mungchu¹ and Chailai Sasen¹

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology

*Corresponding Author: sawanee.ja@ksu.ac.th, Tel: 088-7981158

(Received: March 17, 2026; Revised: June 16, 2026; Accepted: July 1, 2026)

Abstract

This study aims to investigate the dynamic response behavior of a strain gauge load cell under impact conditions and to apply the findings to improve the accuracy of an automatic sorting system. The experimental setup employed a load cell integrated with an HX711 signal amplification module and an Arduino Uno microcontroller for real-time data acquisition. Experiments were conducted by dropping objects with masses of 30, 50, 120, and 250 grams under controlled position and height conditions. The results showed that the output signal exhibited damped oscillation behavior during the transient period, and the settling time (T_s) increased significantly with the mass of the object. The average settling times for 30, 50, 120, and 250 grams were 50.22, 65.14, 100.02, and 145.03 milliseconds, respectively. To prevent signal overlapping in continuous measurements, the minimum release time was defined as approximately $2T_s$, which improved system stability and reduced measurement errors. Furthermore, a linear relationship between object mass and release time was observed, leading to the development of an empirical calibration equation $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ with a coefficient of determination $R^2 = 0.982$, indicating a high level of model accuracy. The findings demonstrate that the dynamic response characteristics of the load cell can be effectively utilized to determine optimal timing in automatic sorting systems, thereby reducing noise effects and signal overlap while enhancing overall system accuracy and stability.

Keywords: Load Cell, Dynamic Response, Settling Time, Automatic Sorting System, Impact Measurement

Please cite this article as: S. Jansawang, A. Saenpong, A. Mungchu and C. Sasen, "Dynamic Response Analysis of a Strain Gauge Load Cell under Impact Loading for Accuracy Improvement in an Automatic Bottle Sorting System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 65-77, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน ระบบคัดแยกอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความรวดเร็ว และความแม่นยำของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมักใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์หลักในการจำแนกวัตถุ เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้โดยตรงและมีความน่าเชื่อถือสูง โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความไวและความแม่นยำสูง และสามารถทำงานร่วมกับระบบประมวลผลดิจิทัล เช่น HX711 และ Arduino Uno ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง โดยเฉพาะระบบที่ปล่อยวัตถุจากที่สูงลงสู่แท่นชั่ง (เช่น ระบบสายพานลำเลียงหรือระบบแรงโน้มถ่วง) มักเกิดแรงกระแทกในช่วงเวลาสั้น ส่งผลให้โหลดเซลล์แสดงพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตในรูปของสัญญาณทรานเซียนต์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัญญาณพิกการันสะเทือน และการลดทอนก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ พฤติกรรมดังกล่าวอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนหากอ่านค่าทันทีหลังการกระแทก นอกจากนี้ ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Settling Time) ยังเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากหากระบบยังไม่กลับสู่ศูนย์ก่อนที่วัตถุชิ้นถัดไปจะมาถึง จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสมและลดความน่าเชื่อถือของระบบ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของโหลดเซลล์ในสภาวะแรงคงที่หรือเทคนิคการกรองสัญญาณ [1,2] ขณะที่การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตภายใต้แรงกระแทกจริงและการสร้างความสัมพันธ์กับมวลของวัตถุยังมีอยู่อย่างจำกัด [3-7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทกจากการปล่อยวัตถุที่มีมวลแตกต่างกัน โดยเน้นการวิเคราะห์ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) และสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับ T_s

เพื่อใช้กำหนดช่วงเวลาการปล่อยวัตถุที่เหมาะสมในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ การศึกษานี้จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณ เพิ่มความแม่นยำ และยกระดับเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะการทำงานจริง

องค์ความรู้ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ การสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) ภายใต้แรงกระแทกจริง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกอัตโนมัติได้โดยตรง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทบทวนหลักการทำงานของโหลดเซลล์และพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงกระแทกแบบพลวัต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบคัดแยกอัตโนมัติและกำหนดแนวทางการทดลอง

2.1 หลักการทำงานของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจ

โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจ (Strain Gauge Load Cell) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงแรงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสเตรนเกจเมื่อเกิดความเครียด (Strain) [1,3] เมื่อวัตถุกระทำแรงต่อโหลดเซลล์ โครงสร้างยืดหยุ่นภายในจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างน้อย ทำให้ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำในสเตรนเกจเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปตามหลัก Gauge Factor [2,8]

สเตรนเกจมักถูกติดตั้งในรูปแบบวงจร Wheatstone Bridge เพื่อเพิ่มความไวและลดสัญญาณรบกวน [9] เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้โมดูล HX711 ซึ่งเป็นตัว

บทความวิจัย (Research Article)

ขยายสัญญาณและแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 24 บิต ก่อนส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino Uno [1,10] หลักการดังกล่าวทำให้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจมีทั้งความแม่นยำสูงและความเป็นเชิงเส้นที่ดี เหมาะสำหรับงานวัดน้ำหนักทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต

2.2 พฤติกรรมของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทก

ภายใต้สภาวะแรงกระแทก (Impact Loading) โหลดเซลล์จะแสดงพฤติกรรมเชิงพลวัตที่แตกต่างจากแรงคงที่ (Static Load) อย่างมีนัยสำคัญ [4,5] เมื่อวัตถุตกกระทบจะเกิดแรงกระแทกแบบฉับพลันทำให้สัญญาณเอาต์พุตพุ่งขึ้นถึงค่าสูงสุด (Peak Signal) ที่สูงกว่าน้ำหนักจริง จากนั้นสัญญาณจะเกิดการแกว่งแบบลดทอน (Damped Oscillation) ก่อนค่อย ๆ เข้าสู่สถานะคงที่ [7,11] ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมนี้ ได้แก่ คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างรองรับ ความแข็งของวัสดุ และอัตราการดูดซับพลังงาน [9] งานวิจัยพบว่าระยะเวลาในการนิ่งตัวของสัญญาณ (Settling Time) ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานจลน์ที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ [5] หากอ่านค่าก่อนที่สัญญาณจะนิ่งสนิท จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบคัดแยกอัตโนมัติที่ต้องการความเร็วและความต่อเนื่อง [7]

2.3 ผลของมวลวัตถุต่อการตอบสนองของสัญญาณ

มวลของวัตถุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดแรงกระแทกและพฤติกรรมของสัญญาณ [12] แรงกระแทกมีความสัมพันธ์กับโมเมนตัม ยิ่งมวลมากยิ่งก่อให้เกิดพลังงานจลน์สูง ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณพีกและระยะเวลาการแกว่งเพิ่มขึ้น [3,6] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าระยะเวลาการคืนค่าเป็น

ศูนย์ (Zero Recovery Time) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับมวลของวัตถุ [11] เมื่อมวลเพิ่มขึ้น โครงสร้างจะเกิดการสั่นสะเทือนรุนแรงและใช้เวลานานขึ้นในการลดทอนสัญญาณ [6] ความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปสร้างสมการเปรียบเทียบเพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบได้

2.4 ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของโหลดเซลล์

ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Set Zero Time หรือ Settling Time) คือระยะเวลาที่สัญญาณใช้ในการกลับสู่ค่าอ้างอิงศูนย์หลังการปลดโหลด [4,5] หากระบบปล่อยวัตถุขึ้นถัดไปก่อนที่สัญญาณจะคืนศูนย์สมบูรณ์ จะเกิดสัญญาณตกค้างและความคลาดเคลื่อนสะสม [6,7] ปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ มวลของวัตถุ โครงสร้างรองรับ และคุณสมบัติของวัสดุซับแรง [8] งานวิจัยชี้ว่าการกำหนดระยะเวลาหน่วงอย่างน้อย $2T_s$ (โดยที่ T_s คือ Settling Time) สามารถลดการซ้อนทับของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวัดในสภาวะคงที่หรือการกรองสัญญาณ [1,2] ขณะที่การศึกษาพฤติกรรมของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกจริงและการสร้างความสัมพันธ์เชิงพลวัตยังมีจำกัด [3,6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวเพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์สำหรับกำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมของระบบคัดแยกอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนสะสม และยกระดับประสิทธิภาพของระบบในสภาวะจริง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกและการคืนค่าเป็นศูนย์ โดยจำลองสภาวะ

บทความวิจัย (Research Article)

การทำงานของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของโพลีเซลล์

ความแม่นยำของการวัดน้ำหนักแบบพลวัตได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยโพลีเซลล์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ ซึ่งเมื่อเกิดแรงกระทำจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการสั่นแบบลดทอนและมีค่าสัญญาณฟิคในช่วงเริ่มต้น ส่งผลให้การอ่านค่าในทันทีอาจเกิดความคลาดเคลื่อน

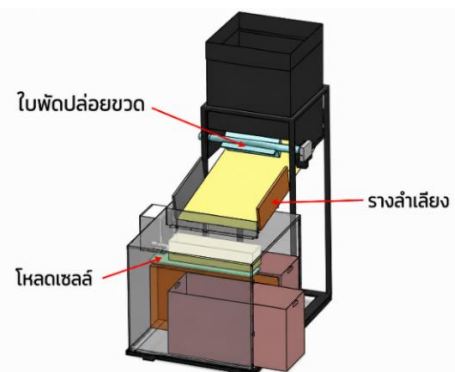
โครงสร้างแท่นรองรับเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของสัญญาณ หากมีความแข็งแรงไม่เพียงพอจะเกิดการสั่นสะเทือนต่อเนื่อง ทำให้แรงที่ส่งถึงโพลีเซลล์ไม่คงที่ ขณะเดียวกันมวลของวัตถุที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกระทำและระดับการสั่นสะเทือนของระบบสูงขึ้น ส่งผลให้สัญญาณฟิคมีค่ามากขึ้น พารามิเตอร์สำคัญในการประเมินผลการวัดได้แก่ ระยะเวลาการนิ่งตัว (Settling Time) และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Zero Recovery Time) เนื่องจากการอ่านค่าในช่วงที่สัญญาณยังไม่คงที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสม โดยเฉพาะในระบบที่ทำงานต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอก เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟ และอุณหภูมิแวดล้อม

ดังนั้นการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของโพลีเซลล์จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบการทดลอง การกำหนดตัวแปรควบคุม และการวางแผนการเก็บข้อมูล เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและสะท้อนสถานะการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบสำหรับการทดลองมีขนาด $80 \times 100 \times 160$ เซนติเมตร ออกแบบเพื่อรองรับระบบลำเลียง ระบบชั่งน้ำหนัก และกลไกคัดแยกวัตถุ โดยใช้โครงสร้างเหล็กซึ่งมีความแข็งแรงและช่วยลดการสั่นสะเทือนที่อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของสัญญาณจากโพลีเซลล์ โครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนลำเลียงและปล่อยวัตถุ ส่วนแท่นชั่งน้ำหนัก และส่วนกลไกคัดแยกวัตถุ

ส่วนลำเลียงและปล่อยวัตถุประกอบด้วยถังบรรจุและกลไกใบพัดสำหรับควบคุมการปล่อยวัตถุทีละชิ้น เพื่อลดการชนกันและควบคุมแรงกระทำให้สม่ำเสมอ วัตถุเคลื่อนที่ผ่านรางเอียงที่มุม 30 องศา เพื่อควบคุมความเร็วและตำแหน่งการตกกระทบให้คงที่ ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงและความสามารถในการเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติที่ออกแบบ

ส่วนแท่นชั่งน้ำหนักติดตั้งโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจในแนวรับแรงโดยตรง พร้อมวัสดุซับแรงกระทำอย่างสังเคราะห์ Neoprene (CR) หนา 2 เซนติเมตร เพื่อลดแรงกระทำ การสั่นสะเทือน และช่วยให้สัญญาณกลับสู่ค่าอ้างอิงได้รวดเร็วและสม่ำเสมอ

บทความวิจัย (Research Article)

ขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดความเสียหายและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

ส่วนกลไกคัตแยกใช้เซอร์โวมอเตอร์ควบคุมการหมุนของใบพัดเพื่อกำหนดทิศทางวัตถุตามผลการประมวลผล โดยมีตัวควบคุมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรควบคุม เพื่อป้องกันความเสียหาย ลดสัญญาณรบกวน และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน



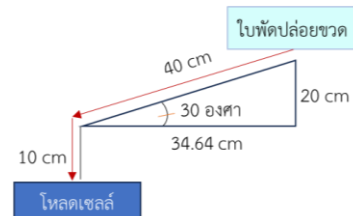
รูปที่ 2 เครื่องคัตแยกขวดอัตโนมัติ

โดยรวมเครื่องต้นแบบสามารถจำลองสภาวะการทำงานจากระบบคัตแยกอัตโนมัติได้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทก รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงระบบในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 การคำนวณแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์

ในการออกแบบเครื่องทดสอบ ได้วิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำต่อโหลดเซลล์จากการปล่อยวัตถุ โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงเพื่อประเมินความเร็วขณะกระทบและน้ำหนักพลวัตที่เกิดขึ้น ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการ

ออกแบบโครงสร้างและการเลือกโหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 มุมของรางลำเลียง

ความเร็วของวัตถุขณะกระทบแท่นรองรับ (v) คำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุตกอิสระภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังแสดงในสมการที่ 1

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

โดยที่

v คือ ความเร็วของวัตถุขณะกระทบ, (เมตรต่อวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81, (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

h คือ ความสูงที่ปล่อยวัตถุ, (เมตร)

เมื่อทราบค่าความเร็วแล้ว ค่าแรงกระแทกเฉลี่ยที่กระทำต่อโหลดเซลล์ (F) สามารถคำนวณได้จากหลักการงานและพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)

$$F = \frac{mv^2}{2s} \quad (2)$$

โดยที่

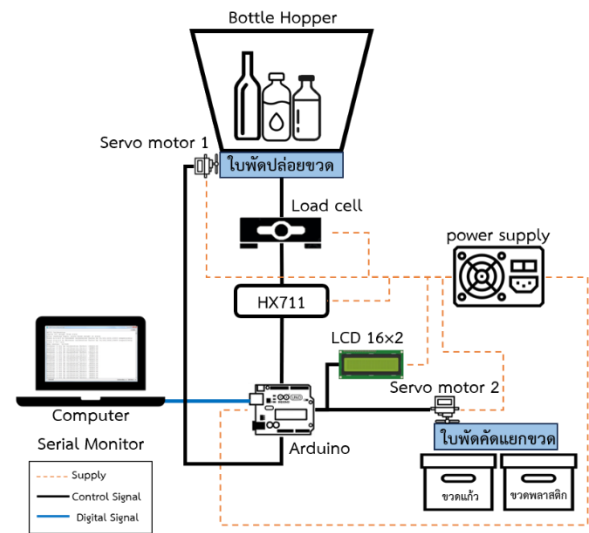
- F คือ แรงกระแทกที่กระทำต่อโหลดเซลล์, (นิวตัน)
- m คือ มวลของวัตถุที่ปล่อยตก, (กิโลกรัม)
- v คือ ความเร็วของวัตถุขณะกระทบ, (เมตรต่อวินาที)
- s คือ ระยะหยุดหรือระยะยุบตัวของระบบขณะเกิดการกระทบ, (เมตร)

ผลการคำนวณภายใต้เงื่อนไขการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าน้ำหนักสถิตหลายเท่า ดังนั้นจึงเลือกใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม ซึ่งมีพิกัดรับน้ำหนักสูงกว่าน้ำหนักสูงสุดของวัตถุทดลอง (250 กรัม) อย่างเพียงพอ สามารถรองรับแรงกระแทกได้อย่างปลอดภัย และยังคงมีความละเอียดเหมาะสมสำหรับการวัดน้ำหนักในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกจากการปล่อยวัตถุ โดยใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม ร่วมกับโมดูล HX711 และ Arduino Uno สำหรับบันทึกข้อมูลแบบเวลาจริง

โครงสร้างทางกลและการเชื่อมต่อของระบบทดลอง ประกอบด้วย รางปล่อยวัตถุแบบเอียงมุม 30 องศา วัตถุทดลอง (ขวด) แท่นซึ่งพร้อมโหลดเซลล์สเตรนเกจ วัสดุซับแรงกระแทก Neoprene โมดูล HX711 บอร์ด Arduino Uno และ การเชื่อมต่อ กับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพโครงสร้างของชุดทดลองการวัดพฤติกรรมโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทก

วัตถุทดลองเป็นขวดพลาสติกและขวดแก้ว 4 ระดับน้ำหนัก (30, 50, 120 และ 250 กรัม) โดยกำหนดตำแหน่งและความสูงในการปล่อยคงที่ การทดลองดำเนินการซ้ำ 100 ครั้งต่อระดับ สัญญาณจากโหลดเซลล์ถูกประมวลผลผ่าน HX711 และ Arduino Uno แล้วบันทึกผ่าน Serial Monitor ข้อมูลถูกวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแนวโน้มของสัญญาณ ขั้นตอนการทดลองประกอบด้วย

- 1) เตรียมตัวอย่างขวด 4 ระดับน้ำหนัก ระดับละ 100 ตัวอย่าง
- 2) เปิดโปรแกรม Serial Monitor
- 3) บ้อนขวดเข้าสู่ระบบ
- 4) เริ่มการทำงานของระบบ
- 5) ปล่อยขวดจากตำแหน่งที่กำหนดให้ตกกระทบบนแท่นซึ่ง
- 6) บันทึกข้อมูลสัญญาณ
- 7) ทำการทดลองซ้ำจนครบ 100 ครั้งในแต่ละระดับ
- 8) วิเคราะห์ข้อมูล

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง และคณะ, การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

การทดลองนี้เลือกใช้วิธีปล่อยวัตถุจากความสูง (Free-Fall Impact) เพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติที่ใช้วิธีลำเลียงด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งแตกต่างจากวิธี Dynamic Load แบบควบคุมด้วยเครื่องจักรในงานวิจัยส่วนใหญ่ วิธีการนี้ช่วยให้ผลการทดลองสะท้อนพฤติกรรมและแรงกระทบในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมได้อย่างใกล้เคียง และสอดคล้องกับหลักการทดสอบแบบ Drop Test ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมเซนเซอร์

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการการวิจัย

ข้อมูลการทดลองถูกจัดเก็บในรูปแบบข้อมูลเชิงเวลา (Time-Series Data) ซึ่งประกอบด้วยค่าความเร็ว แรงกระทบ ค่าสัญญาณฟิค และระยะเวลาการคืนค่าเสถียรของโหลดเซลล์ โดยใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิคัด 0–5,000 กรัม ที่มีความแม่นยำ $\pm 0.05\%$ FS ร่วมกับโมดูลขยายสัญญาณ HX711 ซึ่งมีอัตราการสุ่มข้อมูลสูงสุด 80 Hz และความละเอียด 24 บิต และใช้บอร์ด Arduino Uno ที่มีความถี่สัญญาณนาฬิกา 16 MHz เป็นหน่วยประมวลผลหลักของระบบ และเพื่อรองรับแรงกระทบจากการตกของวัตถุ ได้ติดตั้งวัสดุดูดซับแรงกระแทกชนิดยางสังเคราะห์ Neoprene (CR) ความหนา 2 เซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ ข้อมูลที่ได้ถูกตรวจสอบค่าผิดปกติ (Outliers) และวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) ช่วงความเชื่อมั่น 95% และค่าความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability Error) เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ โดยนำเสนอผลในรูปแบบตารางและกราฟ พร้อมใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในการแปลผลการทดลอง

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

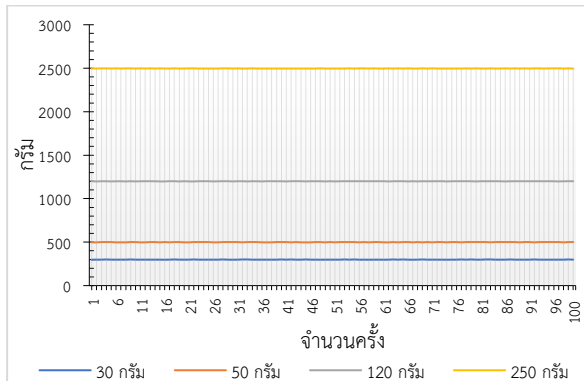
การทดลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระทบจากการปล่อยวัตถุ 4 ระดับน้ำหนัก ได้แก่ 30, 50, 120 และ 250 กรัม ภายใต้เงื่อนไขคงที่ โดยวิเคราะห์ค่าสัญญาณฟิค ระยะเวลาการนิ่งตัว และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อความแม่นยำและการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกอัตโนมัติ เพื่อลดการซ้อนทับของสัญญาณ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 วิเคราะห์น้ำหนักที่มากระทำต่อโหลดเซลล์ช่วงเริ่มต้น

จากการทดลองวัตถุ 4 ระดับน้ำหนัก ได้แก่ 30, 50, 120 และ 250 กรัม โดยทำซ้ำ 100 ครั้งต่อระดับ พบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้มีค่า 299.58, 499.17, 1198.79 และ 2497.64 กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ค่าที่วัดได้สูงกว่าน้ำหนักจริงเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักพลวัต (Dynamic Load) ซึ่งรวมผลของพลังงานจลน์ขณะกระทบ ส่งผลให้เกิดแรงตอบสนองที่สูงกว่าน้ำหนักสถิต

เมื่อพิจารณาผลการทดลองตลอด 100 รอบ พบว่าค่าที่ตรวจวัดได้มีความคงที่และไม่ปรากฏแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง (Drift) โดยข้อมูลมีการกระจายตัวต่ำและไม่พบค่าผิดปกติ (Outlier) ที่ส่งผลต่อแนวโน้มของข้อมูล ค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับน้ำหนักมีความสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) อยู่ในระดับดี

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 ค่าสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ในช่วงเริ่มต้นการกระทบ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่ในช่วง 0.51–0.76 กรัม และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) อยู่ระหว่าง 0.02–0.26% เท่านั้น ขณะที่ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability Error) มีค่าเพียง 0.08–1.02% และช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% CI) ของทุกระดับน้ำหนักมีช่วงแคบ สะท้อนว่าระบบมีความเสถียรสูง และให้ผลการวัดที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง

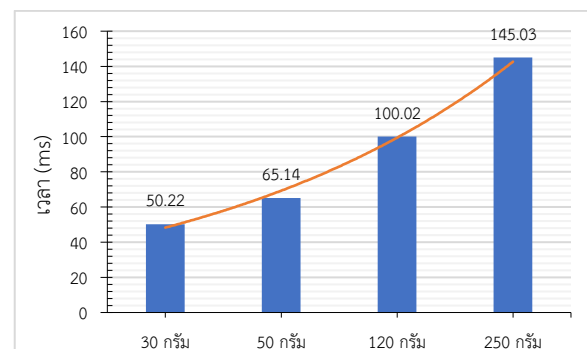
นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างมวลของวัตถุกับค่าสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ โดยเมื่อมวลของวัตถุเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 299.58 กรัม สำหรับวัตถุมวล 30 กรัม เป็น 2,497.64 กรัม สำหรับวัตถุมวล 250 กรัม ซึ่งสะท้อนอิทธิพลของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ [3,6,12] ในทางกลับกัน วัตถุที่มีมวลน้อยให้ค่าการตอบสนองและการสั่นสะเทือนของระบบต่ำกว่า ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น [6,11]

ผลการทดลองยังยืนยันว่าโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน เนื่องจากค่าการตอบสนองสูงสุดเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้จากวัตถุมวล 250 กรัม เท่ากับ 2,497.64 กรัม

ซึ่งคิดเป็น 49.95% ของพิกัดรับน้ำหนักสูงสุดของโหลดเซลล์ จึงยังมีช่วงความปลอดภัยเพียงพอสำหรับรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในการทดลองโดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาและยืนยันว่าโหลดเซลล์ที่เลือกใช้งานสามารถให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพ และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติภายใต้สภาวะการทำงานจริง [3,12]

4.2 วิเคราะห์ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของสัญญาณ

ผลการทดลองพบว่าภายหลังการยกวัตถุออกจากแท่นชั่ง สัญญาณจากโหลดเซลล์เกิดการสั่นแบบลดทอน (Damped Oscillation) ก่อนกลับเข้าสู่ค่าอ้างอิงศูนย์ ซึ่งเป็นลักษณะการตอบสนองของระบบอันดับสอง (Second-Order System) ภายใต้แรงกระแทก โดยวัตถุมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม มีค่า Settling Time เฉลี่ยเท่ากับ 50.22, 65.14, 100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมวลของวัตถุเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของระบบจะเพิ่มขึ้นตามอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุและระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) ของโหลดเซลล์

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง และคณะ, การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ต่อระดับมวล (รวม 400 ชุดข้อมูล) โดยใช้โมดูล HX711 ที่มีอัตราการสุ่มข้อมูล 80 Hz (ทุก 12.5 มิลลิวินาที) ทำให้ข้อมูลมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ส่วนเส้นแนวโน้ม (Trend Line) แสดงความสัมพันธ์โดยรวมระหว่างมวลของวัตถุกับ T_s

ในการศึกษานี้กำหนดให้ T_s เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณเข้าสู่ช่วง $\pm 5\%$ ของค่าอ้างอิงสุดท้าย ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่นิยมใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบทางวิศวกรรม [4,7] พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ (Mass-Spring-Damper System) โดยเมื่อมวลเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ที่เข้าสู่ระบบจะสูงขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นและใช้เวลานานขึ้นในการสลายพลังงาน [6,7] นอกจากนี้ระบบมีลักษณะเป็น Underdamped System ซึ่งเกิดการสั่นก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อมวลเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของระบบจะลดลง ส่งผลให้ค่า T_s เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีระบบเชิงกลและงานวิจัยที่ผ่านมา [4,6,7]

ดังนั้นค่า T_s จึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบระบบคัดแยกอัตโนมัติ เนื่องจากการปล่อยวัตถุใหม่ก่อนที่สัญญาณจะเข้าสู่สภาวะคงที่ อาจทำให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณและเพิ่มความคลาดเคลื่อนในการวัด ส่งผลต่อความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบโดยรวม [5,6]

4.3 วิเคราะห์ระยะเวลาที่เหมาะสมของการปล่อยวัตถุ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 พบว่าระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงนำข้อมูลทั้งหมด 400 ชุด (4 ระดับ น้ำหนัก $\times$ 100 ครั้ง) มาสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) สมการ 3 ที่ได้ คือ

$$T_s = 0.416M + 43.23 \quad (3)$$

โดยที่

T_s คือ ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของสัญญาณ, (มิลลิวินาที)

M คือ มวลของวัตถุ, (กรัม)

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและมีนัยสำคัญสูง ($F = 10,874.6$, $p < 0.001$) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.982$ แสดงว่ามวลของวัตถุสามารถอธิบายความแปรปรวนของ T_s ได้ถึง 98.2% แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบนัยสำคัญของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น

Source	Regression	Residual	Total
DF	1	398	399
SS	458,723.8	16,792.2	475,516.0
MS	458,723.8	42.19	-
F-value	10,874.6	-	-
p-value	< 0.001	-	-

หมายเหตุ: การวิเคราะห์ดำเนินการจากข้อมูลทั้งหมด 400 ชุด (4 ระดับ น้ำหนัก $\times$ 100 ครั้ง)

เพื่อป้องกันการซ้อนทับของสัญญาณระหว่างวัตถุชิ้นปัจจุบันกับชิ้นถัดไป จึงกำหนดระยะเวลาการปล่อยวัตถุ (T_{release}) ไม่น้อยกว่า $2T_s$ ดังแสดงในสมการที่ 4

$$T_{\text{release}} = 2T_s \quad (4)$$

บทความวิจัย (Research Article)

โดยที่

T_{release} คือ ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยวัตถุ, (มิลลิวินาที)

เมื่อนำสมการที่ 3 มาแทนค่าในสมการที่ 4 จะได้สมการสำหรับคำนวณระยะเวลาการปล่อยวัตถุโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ 5

$$T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46 \quad (5)$$

สมการนี้ช่วยให้ระบบสามารถคำนวณช่วงเวลาที่เหมาะสมของการปล่อยวัตถุตามมวลที่แตกต่างกันได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนสะสมและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุกับระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ ผลการทดลองที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

1) ค่าน้ำหนักที่โพลีเซลล์ตรวจวัดได้มีค่าเฉลี่ย 299, 499, 1,199 และ 2,497 กรัม สำหรับวัตถุมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม ตามลำดับ ค่าที่ได้สูงกว่าน้ำหนักสถิตเนื่องจากอิทธิพลของพลังงานจลน์ขณะเริ่มต้น และยังคงอยู่ในพิสัยรับน้ำหนักของโพลีเซลล์ 5,000 กรัม แสดงถึงความเหมาะสมของอุปกรณ์ [3,12]

2) ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ โดยมีค่าเฉลี่ย 50.22, 65.14,

100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ ระบบแสดงพฤติกรรมแบบ Underdamped ของแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ โดยเมื่อมวลเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ที่เข้าสู่ระบบสูงขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มและใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สมดุล [6,7]

3) พบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างมวลกับ T_s สามารถสร้างสมการ $T_s = 0.416M + 43.23$ และสมการสำหรับช่วงเวลาการปล่อยวัตถุ $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.982 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับสูง การกำหนดช่วงเวลาปล่อยวัตถุขั้นต่ำที่ $2T_s$ ช่วยลดการซ้อนทับของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5,6]

งานวิจัยนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับพฤติกรรมเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนสะสมและยกระดับเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะการทำงานจริง

6. ข้อเสนอแนะ

- 1) เพิ่มช่วงและจำนวนระดับน้ำหนักของวัตถุเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลอง
- 2) ประยุกต์ใช้เทคนิคกรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจากแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน
- 3) พัฒนาระบบควบคุมการปล่อยวัตถุแบบปรับตัวตามมวล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Avia Semiconductor, “HX711 24-bit analog-to-digital converter (ADC) for weigh scales,” datasheet, ver. 2.0. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [2] M. N. Annisa, F. N. Fadilla, M. Luthfi, S. Hidayat, and C. A. Rosalia, “Rancang Bangun Sistem Load Cell untuk Pengujian Beban Tekan Berbasis Arduino,” in *Proc. 16th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*, Bandung, Indonesia, Jul. 2025, pp. 303–309, doi: 10.35313/irwns.v16i1.6676.
- [3] O. S. Al-Dahiree et al., “Design and Shape Optimization of Strain Gauge Load Cell for Axial Force Measurement for Test Benches,” *Sensors*, vol. 22, no. 19, Art. no. 7508, 2022, doi: 10.3390/s22197508.
- [4] G. I. Zarate Garnica, E. O. L. Lantsoght, and Y. Yang, “Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 18, no. 10–11, pp. 1558–1580, 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2063906.
- [5] C. T. Noh et al., “Measurement of Force and Position Using a Cantilever Beam and Multiple Strain Gauges: Sensing Principles and Design Considerations,” *Sensors*, vol. 25, no. 21, Art. no. 6561, 2025, doi: 10.3390/s25216561.
- [6] M. Tiboni, R. Bussola, F. Aggogeri, and C. Amici, “Experimental and Model-Based Study of the Vibrations in the Load Cell Response of Automatic Weight Fillers,” *Electronics*, vol. 9, no. 6, Art. no. 995, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9060995.
- [7] L. Xiong, T. Zhang, A. Yuan, and Z. Zhang, “Research on Filtering Algorithm of Vehicle Dynamic Weighing Signal,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 6, Art. no. 254, 2024, doi: 10.3390/wevj15060254.
- [8] J. Gajda, R. Sroka, P. Burnos, and M. Daniol, “Long-Term Assessment of the Properties of Load Sensors Applied in Weigh-in-Motion Systems,” *Sensors*, vol. 25, no. 8, Art. no. 2421, 2025, doi: 10.3390/s25082421.
- [9] PCB Load & Torque Division, *Load Cell Handbook: A Technical Overview and Selection Guide*, Farmington Hills, MI, USA: PCB Piezotronics, 2023.
- [10] Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd., “TML Transducers 2025–2026: Load Cells, Displacement Transducers, Pressure Transducers, Acceleration Transducers, Product Catalog, Version 2,” [Online]. Available: <https://tml.jp/eng/documents/Catalog/tranducers2025-2026.pdf>. [Accessed: July 2026].

บทความวิจัย (Research Article)

- [11] G. Guo et al., “Effect of Additional Mass on Natural Frequencies of Weight-Sensing Structures,” *Sensors*, vol. 23, no. 17, Art. no. 7585, 2023, doi: 10.3390/s23177585.
- [12] R. Ouyang and R. D. Howe, “Low-Cost Fiducial-based 6-Axis Force-Torque Sensor,” in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 1653–1659, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196925.

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ ด้วยระบบควบคุมระยะไกล

ธีรฉัตร ปานกลาง¹, รัตนสุดา สุภตน์ยศ^{2,*}, สุทธิวัฒน์ ศรีชะแก้ว¹ กฤษฎา วารินทร์²,
สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล² และ สุรินทร์ ผลงาม³

¹ สาขาวิชาคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

² สาขาวิชาเทคโนโลยีสุขภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: rattanasuda.su@bsru.ac.th โทรศัพท์: 087-1026957

(รับบทความ: 6 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 27 มิถุนายน 2569; ตอรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมของต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์สำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ ต้นแบบประกอบด้วยถุงมือหุ่นยนต์ ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมด้วยเซอร์วอมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และระบบควบคุมระยะไกลผ่านแพลตฟอร์ม Blynk โดยสามารถควบคุมการกำ-แบ่นิ้วมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ การทดสอบประสิทธิภาพของระบบดำเนินการในระดับต้นแบบเชิงวิศวกรรม โดยประเมินการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความโค้งงอ การตอบสนองของระบบควบคุม และความเสถียรของการสื่อสารไร้สาย ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถตรวจจับและถ่ายทอดข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้อย่างถูกต้อง โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ยประมาณ 59 มิลลิวินาที และระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ ได้มีการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จำนวน 30 คน จากการคัดเลือกแบบเจาะจง ซึ่งเป็นการประเมินในกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไป โดยผลการประเมินพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.42) ครอบคลุมด้านความสะดวกในการใช้งาน ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความเสถียรของระบบ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นการทดสอบในระดับต้นแบบเชิงวิศวกรรม และยังไม่มีการประเมินประสิทธิผลทางคลินิกกับผู้ป่วยจริงผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าต้นแบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพมือ และสามารถพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทางการแพทย์ในอนาคต

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ฟื้นฟู ถุงมือหุ่นยนต์ การฟื้นฟูสมรรถภาพมือ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

การอ้างอิงบทความ: ธีรฉัตร ปานกลาง, รัตนสุดา สุภตน์ยศ, สุทธิวัฒน์ ศรีชะแก้ว, กฤษฎา วารินทร์, สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล และ สุรินทร์ ผลงาม, "การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกล, "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 78-94, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Development of a Robotic Glove Prototype for Hand Rehabilitation Using a Remote Control System

Theerathawan Panklang¹, Rattanasuda Supadanaison^{2,*}, Suthiwat Srisakaew¹, Kitsada Warin²,
Sunisa Jitsoonthonchaiyakul² and Surin Pholngam³

¹ Department of Computer Electronics, Faculty of Science and Technology Bansomdejchaopraya Rajabhat University

² Department of Health Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

³ Department of Information Technology and Data Science of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

*Corresponding Author: rattanasuda.su@bsru.ac.th, Tel: 087-1026957

(Received: February 6, 2026; Revised: June 27, 2026; Accepted: July 1, 2026)

Abstract

This research aimed to design, develop, and evaluate the engineering performance of a robotic glove prototype for hand rehabilitation. The prototype consisted of a robotic glove, a pneumatic actuation system integrated with servo motor-controlled pneumatic valves, an ESP8266 microcontroller, and a remote control system via the Blynk platform. The system was capable of controlling hand grasping and finger extension movements in both collective and independent finger control modes. The system performance was evaluated at the engineering prototype level by assessing flex sensor readings, control system response, and wireless communication stability. The results showed that the system was able to accurately detect and transmit finger movement data, with an average response time of approximately 59 milliseconds. The system also demonstrated continuous and stable operation. In addition, user satisfaction was evaluated with 30 participants selected through purposive sampling, representing general users rather than target patients. The evaluation results indicated that the overall user satisfaction was at a high level (Mean = 4.42), covering usability, accuracy, safety, and system stability. However, this study was limited to engineering prototype testing and did not include clinical effectiveness evaluation with actual patients. The findings suggest that the developed robotic rehabilitation glove has potential for application as a hand rehabilitation assistive device and could be further developed for future medical and rehabilitation technology applications.

Keywords: Rehabilitation Robot, Robotic Glove, Hand Rehabilitation, Internet of Things (IoT)

Please cite this article as: T. Panklang, R. Supadanaison, S. Srisakaew, K. Warin, S. Jitsoonthonchaiyakul and S. Pholngam, "Design and Development of a Robotic Glove Prototype for Hand Rehabilitation Using a Remote Control System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 78-94, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โรคหลอดเลือดสมองเป็นสาเหตุสำคัญของความพิการในระยะยาวและการสูญเสียสมรรถภาพทางกายของผู้ป่วยทั้งในระดับโลกและในประเทศไทย โดยมีแนวโน้มของการะโรคและจำนวนผู้ป่วยเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับประเทศและระดับโลก [1,2] ผู้ป่วยจำนวนมากมีความบกพร่องด้านการเคลื่อนไหวของร่างกายส่วนบน โดยเฉพาะการทำงานของมือและนิ้วมือ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำกิจวัตรประจำวัน การประกอบอาชีพ และคุณภาพชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ [3] ผู้ป่วยกลุ่มหนึ่งแม้จะยังคงมีแรงกล้ามเนื้อและแขนเหลืออยู่บางส่วน แต่มีภาวะกล้ามเนื้อเกร็งงอร่วมด้วย ทำให้ช่วงการเคลื่อนไหวของข้อต่อจำกัดและจำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูอย่างต่อเนื่องจึงจะสามารถฟื้นคืนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] การฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองโดยทั่วไปอาศัยการออกกำลังกายซ้ำ ๆ ภายใต้การดูแลของนักกายภาพบำบัด นักกิจกรรมบำบัด และทีมสหสาขาวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง ซึ่งต้องใช้เวลาและทรัพยากรบุคลากรจำนวนมาก [5] ขณะเดียวกันผู้ป่วยจำนวนมากยังมีข้อจำกัดด้านการเดินทางและค่าใช้จ่าย ทำให้ไม่สามารถเข้ารับบริการฟื้นฟูในสถานพยาบาลได้อย่างสม่ำเสมอ ความถี่และความต่อเนื่องของการฝึกจึงไม่เพียงพอ ส่งผลให้ผลลัพธ์ด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพไม่เป็นที่พึงพอใจตามศักยภาพสูงสุด นอกจากนี้ การฝึกด้วยวิธีดั้งเดิมมักขาดระบบบันทึกข้อมูลเชิงปริมาณของรูปแบบการเคลื่อนไหวและระยะเวลาการฝึก ทำให้ยากต่อการประเมินและติดตามความก้าวหน้าของผู้ป่วยอย่างเป็นระบบ [6]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทถุงมือหุ่นยนต์แบบสวมใส่ (Wearable Robotic Glove) ที่ใช้แนวคิดของ Soft Robotics เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความปลอดภัยในการใช้งาน งานวิจัยล่าสุดได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ระบบ

ขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม (Pneumatic Actuation) และวัสดุใหม่ เช่น งานของ Lim et al. [7] ที่พัฒนาถุงมือหุ่นยนต์แบบผ้าเพื่อช่วยฟื้นฟูการทำงานของมือในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง รวมถึงงานของ Bazina et al. [8] และ Lee et al. [9] ที่ได้ออกแบบถุงมือหุ่นยนต์แบบ Soft Pneumatic ซึ่งสามารถเลียนแบบการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้ใกล้เคียงธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การใช้ระบบช่วยตามแรง (Assist-as-Needed Control) และการประยุกต์ใช้ระบบตรวจจับสัญญาณชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟู อย่างไรก็ตาม แม้ว่างานวิจัยในต่างประเทศจะมีความก้าวหน้าและเริ่มมีการทดสอบในระดับผู้ป่วยจริงแล้ว แต่ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ต้นทุนอุปกรณ์ที่สูง ความซับซ้อนของระบบ และการพึ่งพาเทคโนโลยีนำเข้า นอกจากนี้ อุปกรณ์บางประเภทไม่รองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ หรือยังไม่รองรับการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายเพื่อการติดตามผลจากระยะไกลอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

แม้ว่าปัจจุบันจะมีการพัฒนาถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือทั้งในเชิงงานวิจัยและเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม และระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของมือ แต่ระบบส่วนใหญ่ยังมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ ซึ่งมีความสำคัญต่อการฟื้นฟูการทำงานของมือในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง เนื่องจากผู้ป่วยแต่ละรายอาจมีระดับความบกพร่องของนิ้วมือแตกต่างกัน การฝึกเฉพาะนิ้วที่มีปัญหาจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของข้อต่อลดภาวะนิ้วหดเกร็ง และส่งเสริมการฟื้นคืนการทำงานของกล้ามเนื้อเนื้อมัดเล็กได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น นอกจากนี้ อุปกรณ์บางประเภทมีต้นทุนสูง ใช้ระบบควบคุมที่ซับซ้อน และพึ่งพาอุปกรณ์นำเข้า ทำให้ยาก

บทความวิจัย (Research Article)

ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของการฟื้นฟูที่บ้านหรือสถานพยาบาลทั่วไป

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์หุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่ใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ มีต้นทุนไม่สูง และสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต เพื่อรองรับการควบคุมและติดตามผลจากระยะไกล จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยเดิม โดยมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หุ่นยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและการฝึกฟื้นฟูจากระยะไกล

การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ 2) ประเมินประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมของระบบในด้านการตอบสนองและความเสถียรของการทำงาน และ 3) ประเมินความเหมาะสมในการใช้งานเบื้องต้นของระบบจากผู้ใช้งานทั่วไป

2. ทบทวนวรรณกรรม

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์ฟื้นฟู (Rehabilitation Robotics) ระบบอินเทอร์เฟซระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain-Computer Interface) ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานเวชศาสตร์ฟื้นฟูและวิศวกรรมการแพทย์อย่างแพร่หลาย [10] มีรายงานว่าการใช้หุ่นยนต์ช่วยฟื้นฟูร่างกายส่วนบนร่วมกับกิจกรรมบำบัดสามารถเพิ่มความเข้มข้นของการฝึก ช่วยให้การเคลื่อนไหวมีความแม่นยำสม่ำเสมอ และสนับสนุนการประเมินผลฟื้นฟูด้วยข้อมูลเชิงปริมาณ [6] ขณะเดียวกัน โรงพยาบาลหลายแห่งในประเทศไทยเริ่มนำหุ่นยนต์ฟื้นฟูมาใช้ในการฝึก

และรายงานบทบาทของเทคโนโลยีดังกล่าวต่อการฟื้นฟูผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง [4] อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์หุ่นยนต์ฟื้นฟูเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีนำเข้า มีราคาสูง และต้องพึ่งพาชิ้นส่วนเฉพาะทาง ทำให้การจัดหาและบำรุงรักษาทำได้ยากในบริบททรัพยากรจำกัด

ในประเทศไทย มีความพยายามพัฒนาอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองหลายรูปแบบ ทั้งแขนหุ่นยนต์กายภาพบำบัดแบบสวมใส่ และอุปกรณ์ช่วยใช้งานมือสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง รวมถึงอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูการเดินสำหรับผู้ป่วยที่มีภาวะขาอ่อนแรง [3,5] ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมภายในประเทศในการพัฒนาอุปกรณ์ฟื้นฟูที่เหมาะสมกับบริบทของระบบบริการสุขภาพไทย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นอุปกรณ์ขนาดใหญ่หรือระบบเฉพาะทาง และยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริงในระดับครัวเรือนหรือการฟื้นฟูที่บ้าน

ในระดับนานาชาติ งานวิจัยด้านถุงมือหุ่นยนต์ (Robotic Glove) และอุปกรณ์เสริมการเคลื่อนไหวของมือ (Hand Exoskeleton) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยี Soft Robotics ที่เน้นความยืดหยุ่นและความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น งานของ Polygerinos et al. [11] ที่พัฒนา Soft Robotic Glove โดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมเพื่อช่วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ และงานของ In et al. [12] ที่พัฒนา Exo-Glove ซึ่งใช้ระบบสายดึงเพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของมือ นอกจากนี้ งานวิจัยล่าสุดยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์แบบผ้าและแบบแรงดันลมที่สามารถใช้งานร่วมกับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองได้จริง และช่วยเพิ่มความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวัน [7] ในด้านกลไกการขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม (Pneumatic Actuation) ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และมีความ

บทความวิจัย (Research Article)

ปลอดภัยต่อผู้ใช้งานเมื่อเทียบกับระบบมอเตอร์แข็ง อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวมักมีข้อจำกัดด้านการควบคุมแรงดันและความแม่นยำในการเคลื่อนไหว [7,11] ขณะเดียวกัน การใช้เซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ โดยทำหน้าที่วัดระดับการดัดงอของนิ้วและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบ ตัวอย่างเช่น งานของ Yang et al. [13] ได้พัฒนาถุงมือที่ติดตั้ง Flex Sensor เพื่อวัดการเคลื่อนไหวของนิ้วมือข้างปกติ และส่งข้อมูลไปควบคุม hand Exoskeleton ของอีกข้างหนึ่งสำหรับการฟื้นฟูแบบ Bilateral Rehabilitation อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ผสานการทำงานร่วมกับระบบ Internet of Things (IoT) ซึ่งเป็นจุดที่งานวิจัยนี้นำมาต่อยอด [13] นอกจากนี้ Lim et al. [7] ได้พัฒนาถุงมือหุ่นยนต์แบบนุ่ม (Soft Robotic Glove) ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบนิวแมติก (Pneumatic System) เพื่อช่วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ โดยมุ่งเน้นการออกแบบโครงสร้างให้มีความยืดหยุ่น ปลอดภัย และเหมาะสมกับการใช้งานด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมือ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังมุ่งเน้นด้านกลไกและการออกแบบอุปกรณ์เป็นหลัก และยังไม่ได้ผสานระบบควบคุมแบบไร้สายหรือการเชื่อมต่อผ่าน IoT สำหรับการติดตามผลระยะไกล [7]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยด้านถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาด้านกลไกการขับเคลื่อน ความยืดหยุ่นของอุปกรณ์ และความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเฉพาะระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมและเทคโนโลยี Soft Robotics อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ การรองรับการใช้งานฟื้นฟูที่บ้านผ่านระบบควบคุมระยะไกล รวมถึงต้นทุนของอุปกรณ์และความซับซ้อนของระบบควบคุม นอกจากนี้ แม้ว่าบางงานวิจัยจะมีการประยุกต์ใช้ระบบเซนเซอร์และระบบ

IoT เพื่อสนับสนุนการติดตามผลจากระยะไกล แต่ยังไม่พบการออกแบบที่มุ่งเน้นการผสานระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลมร่วมกับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระโดยใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่ให้ความสำคัญกับ 1) การควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ 2) การควบคุมและติดตามผลระยะไกลผ่านระบบไร้สาย และ 3) การออกแบบระบบที่มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

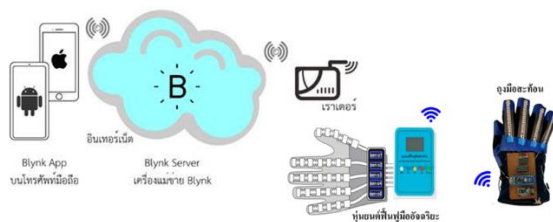
3. วิธีการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือโดยใช้ระบบ IoT ได้ออกแบบเพื่อช่วยฟื้นฟูกล้ามเนื้อเนื้อมือของผู้ใช้งานผ่านระบบควบคุมอัตโนมัติ และสามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk โดยผสมผสานเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ระบบสื่อสารไร้สาย และเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือในงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) ซึ่งเป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่งที่ว่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามระดับการดัดงอของนิ้วมือ โดยเมื่อผู้ใช้งานทำการกำหรือแบมือ เซนเซอร์จะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของมุมงอและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก เพื่อนำไปประมวลผลในระบบควบคุม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การออกแบบระบบ การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ การทดสอบเชิงวิศวกรรม และการประเมินผลการใช้งาน ซึ่งการพัฒนามีการเชื่อมต่อในภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 1

ในการออกแบบระบบควบคุมของถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ งานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ประเภท ได้แก่ ESP8266 และ Arduino Nano โดยแต่ละส่วนของระบบถูกออกแบบให้เหมาะสมกับ

บทความวิจัย (Research Article)

ลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ส่วนของถุงมือฟื้นฟูมือใช้ ESP8266 เนื่องจากมีโมดูล Wi-Fi ในตัวสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และแพลตฟอร์ม Blynk ได้โดยตรงเหมาะสำหรับการควบคุมและสั่งงานจากระยะไกล ในขณะที่ถุงมือสะท้อนเลือกใช้ Arduino Nano เนื่องจากมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ และมีขาอินพุตแอนะล็อกที่เหมาะสมสำหรับการรับค่าสัญญาณจาก Flex Sensor ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถทำงานร่วมกับโมดูลสื่อสาร NRF24L01 ได้อย่างเสถียรสำหรับการส่งข้อมูลแบบไร้สายระยะไกล การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนช่วยให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพ ลดความซับซ้อน และเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 1 ภาพรวมการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

ระบบหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ 1) ชุดถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ ซึ่งทำหน้าที่สร้างการเคลื่อนไหวของนิ้วมือด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม 2) กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ สำหรับเลือกโหมดการทำงาน 3) ถุงมือสะท้อน ซึ่งใช้ Flex Sensor ตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือและส่งข้อมูลแบบไร้สายเพื่อควบคุมถุงมือฟื้นฟู และ 4) ระบบควบคุมระยะไกลผ่านแพลตฟอร์ม Blynk สำหรับสั่งงานและติดตามการทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดย

องค์ประกอบแต่ละส่วนทำงานร่วมกันเพื่อสนับสนุนการฟื้นฟูสมรรถภาพมือแบบเรียลไทม์ ดังนี้

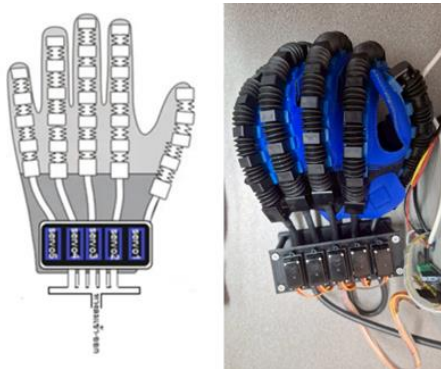
3.1 ชุดอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือสำหรับสวมใส่มือในการฟื้นฟู

มีการออกแบบสำหรับสวมใส่เพื่อช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ใช้งาน โดยให้สามารถสวมใส่เพื่อช่วยในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ใช้งานโดยระบบขับเคลื่อนที่ใช้หลักการนิวแมติก (Pneumatic System) อาศัยปั๊มลมสุญญากาศขนาดเล็กจำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถสร้างแรงดันลมได้ทั้งแบบบวกและแบบลบ (การอัดและการดูดอากาศ) เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือผ่านถุงลม (Air Bladder) ที่ติดตั้งในนิ้วมือทั้งห้า ซึ่งปั๊มลมที่ใช้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 5-12 โวลต์ มีกระแสไฟฟ้าในช่วงประมาณ 450-700 mA และมีอัตราการไหลของอากาศประมาณ 4-7 ลิตรต่อนาที โดยมีการใช้โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของอากาศจากปั๊มลม เพื่อเลือกการจ่ายลมเข้า (แรงดันบวก) หรือการดูดลมออก (แรงดันลบ) ในระบบ

ในส่วนของการควบคุมลมที่ส่งไปยังนิ้วมือแต่ละนิ้ว ใช้วาล์วลมแบบเปิด-ปิด (On-off Valve) ที่ติดตั้งอยู่บนสายลมของถุงมือ โดยมีเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วลมในแต่ละนิ้วในลักษณะเชิงกล ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์จะหมุนตามมุมที่กำหนดเพื่อเปิดทางให้อากาศไหลเข้าสู่ถุงลมหรือปิด/ระบายอากาศออก ส่งผลให้นิ้วมือเกิดการงอ (Flexion) และคลายตัว (Extension) ได้ตามคำสั่งเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ผ่านสัญญาณ PWM ทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างอิสระและแม่นยำ

บทความวิจัย (Research Article)

ผู้ใช้งานสามารถเลือกโหมดการทำงานของระบบ ฟังก์ชันได้จากกล่องควบคุมที่ติดตั้งกับอุปกรณ์ ได้แก่ โหมดกำมือ โหมดแบมือ และโหมดกำ-แบอัตโนมัติ นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการควบคุมแบบไร้สายผ่าน เครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยใช้แพลตฟอร์ม Blynk ผ่าน เว็บเบราว์เซอร์ ทำให้สามารถสั่งงานจากระยะไกลได้ นอกจากนี้ยังมีโหมดควบคุมผ่านถุงมือสะท้อนแบบไร้ สาย ซึ่งใช้มือข้างปกติของผู้ใช้งานหรือนัก กายภาพบำบัดในการควบคุมการเคลื่อนไหวของถุงมือ ฟังก์ชันแบบเรียลไทม์ เพื่อใช้ในการฝึกการกำ-แบมือ และการหยาบจับวัตถุในกิจกรรมประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 2



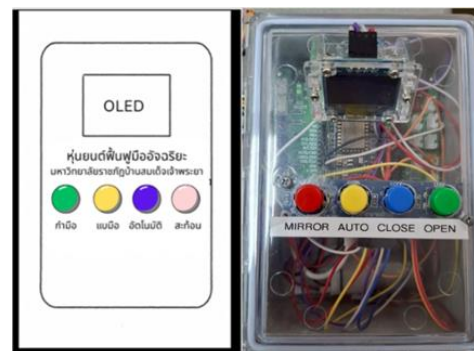
รูปที่ 2 โครงสร้างถุงมือหุ่นยนต์ฟังก์ชันมือและระบบ ขับเคลื่อนด้วยแรงดันลม โดย (ซ้าย) แสดงการจัดวาง ถุงลมในนิ้วมือ และ (ขวา) แสดงชุดวาล์วลมและการ เชื่อมต่อท่อลมกับถุงมือ

จุดสำคัญของระบบที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้ คือ การ รองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยก อิสระผ่านถุงมือสะท้อนแบบไร้สาย โดยใช้ Flex Sensor ตรวจจับการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้ว และส่งข้อมูลไปควบคุมระบบถุงมือฟังก์ชันแบบ เรียลไทม์ ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการ เคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างเป็นธรรมชาติ

นอกจากนี้ ระบบยังสามารถควบคุมการกำ-แบมือใน ภาพรวมผ่านกล่องควบคุมและแพลตฟอร์ม Blynk เพื่อรองรับการใช้งานในการฝึกฟื้นฟูสมรรถภาพมือ จากระยะไกลได้ การออกแบบดังกล่าวช่วยเพิ่มความ ยืดหยุ่นในการใช้งาน และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ ในการฟื้นฟูสมรรถภาพมือของผู้ป่วยโรคหลอดเลือด สมอง

3.2 กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟังก์ชันมืออัจฉริยะ

ที่ติดกับตัวชุดอุปกรณ์ถุงมือหุ่นยนต์ ประกอบด้วย ปุ่มควบคุม การกำมือ การแบมือ การกำมือ-แบมือ อัตโนมัติ และการควบคุมด้วยถุงมือสะท้อน ดังแสดง ในรูปที่ 3



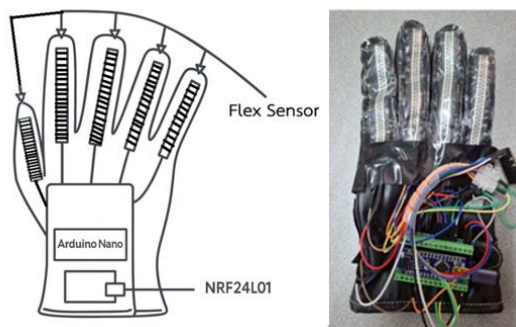
รูปที่ 3 กล่องควบคุมหุ่นยนต์ฟังก์ชันมืออัจฉริยะ

3.3 ถุงมือสะท้อน

มีหลักการทำงานโดยติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) บริเวณนิ้วมือแต่ละนิ้ว ดังแสดงในรูป ที่ 4 ซึ่งเซนเซอร์ดังกล่าวเป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่งที ค่าความต้านทานจะเปลี่ยน แปลงตามระดับการดัดงอ ของนิ้วมือ เมื่อผู้ใช้งานทำการกำหรือแบมือ เซนเซอร์ จะตรวจจับการเปลี่ยน แปลงของมุมการงอ และแปลง เป็น สัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อกส่งไปยัง

บทความวิจัย (Research Article)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano เพื่อประมวลผล จากนั้นข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือจะถูกส่งผ่าน โมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ที่ความถี่ 2.4 GHz ไปยังระบบถุงมือหุ่นยนต์พื้นฟูมือ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนให้สอดคล้องกับการเคลื่อนไหวของมือผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ด้านขวา) การออกแบบระบบในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือได้อย่างเป็นธรรมชาติ โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของมืออีกข้างหนึ่งของผู้ใช้งาน หรือผู้ดูแล เพื่อใช้ในการฝึกฟื้นฟูสมรรถภาพมือ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการควบคุมการหยิบจับวัตถุในกิจกรรมประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 4

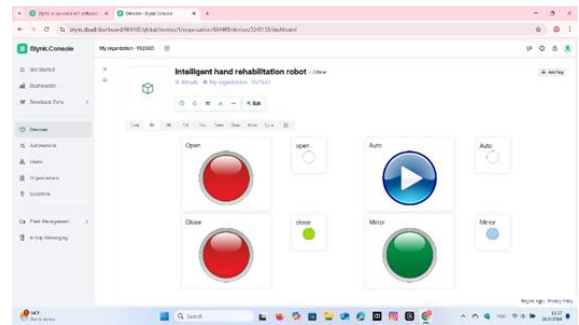


รูปที่ 4 ถุงมือสะท้อน โดย (ซ้าย) แสดงตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) และการเชื่อมต่อกับ Arduino Nano และโมดูล NRF24L01 และ (ขวา) แสดงอุปกรณ์จริงที่พัฒนา

3.4 Blynk Server

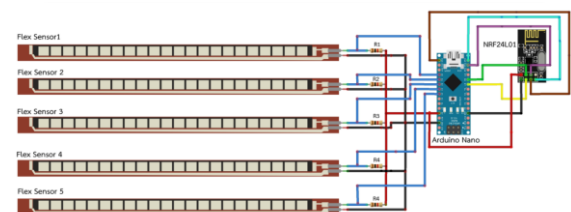
เป็นเครื่องมือในการควบคุมถุงมือหุ่นยนต์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากเว็บเบราว์เซอร์ซึ่งควบคุมปรับค่ากำมือ แบมือ การกำและแบมือตามเวลาที่กำหนด การทำงานได้จากระยะไกล ทำให้ผู้ดูแลผู้ป่วย

หรือนักกายภาพบำบัดสามารถฝึกการใช้งานมือให้ผู้ป่วยได้จากทุกที่ทั่วโลก ดังรูปที่ 5

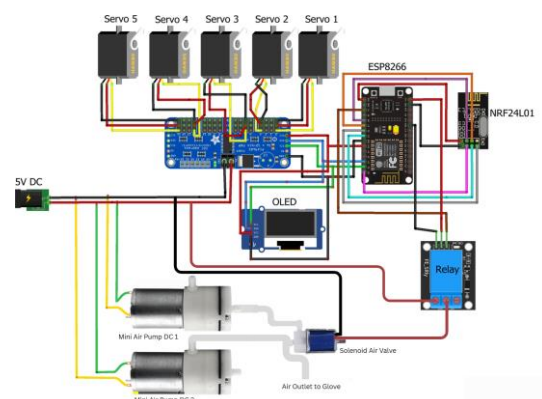


รูปที่ 5 Blynk Server

การเชื่อมต่อส่วนต่างๆ กันผ่านวงจรไฟฟ้าเพื่อทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบของหุ่นยนต์พื้นฟูมืออัจฉริยะทั้ง 4 ส่วนดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มีรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนผังวงจรถุงมือสะท้อน



รูปที่ 7 แผนผังวงจรถุงมือหุ่นยนต์พื้นฟู

ธีรฉวีรักษ์ ปานกลาง และคณะ, การออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกล

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการวิจัย

จากการพัฒนาและทดสอบต้นแบบอุปกรณ์สามารถสรุปผลการทดสอบดังนี้

4.1 การทดสอบการอ่านค่าจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลของเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor)

ติดตั้งด้านทานขนาด $1\text{ k}\Omega$ บนถุงมือและ Pull-up ดำเนินการโดยเก็บข้อมูลจำนวน 10 ครั้ง ผ่านการอ่านค่าจาก Serial Monitor ของ Arduino IDE ภายในระยะเวลา 10 วินาที การทดสอบประกอบด้วยการอ่านค่าในสภาพที่นิ้วยังอยู่ในท่าปกติไม่เกิดการดัดงอ และในสภาพที่มีการดัดนิ้วจนสุด เพื่อเปรียบเทียบช่วงค่าที่เกิดขึ้นจากทั้งสองสภาวะ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมควบคุมและกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ เพื่อให้สามารถตรวจจับระดับการดัดนิ้วได้อย่างถูกต้องและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง ผลการอ่านค่าแต่ละสภาวะสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอ่านค่า ADC ที่ได้จากเซนเซอร์ดัดงอที่ติดกับถุงมือสะท้อนในแต่ละนิ้ว

นิ้ว	ระดับการดัดงอของนิ้วมือ				
	0%	25%	50%	75%	100%
ก้อย	1023	940	850	760	692
นาง	1023	924	760	650	595
กลาง	1023	810	710	660	628
ชี้	1023	849	650	495	356
โป้ง	1023	900	760	600	474

ผลการทดสอบจากตารางที่ 1 พบว่า เมื่ออยู่ในสภาวะนิ้วปกติ เซนเซอร์ให้ค่า ADC สูงสุดใกล้เคียง

1023 ในทุกนิ้ว เนื่องจากเซนเซอร์ไม่มีการดัดงอ เมื่อเพิ่มระดับการกำมือเป็นร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 พบว่าค่า ADC มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามระดับการงอของนิ้วมือ โดยแต่ละนิ้วมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนไหวและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้กำหนดช่วงค่า (Threshold) สำหรับการตรวจจับระดับการงอนิ้วและการควบคุมการเคลื่อนไหวของถุงมือหุ่นยนต์ได้อย่างเหมาะสม

4.2 การตอบสนองของการสื่อสารข้อมูลระหว่างถุงมือสะท้อนและถุงมือฟื้นฟู

การทดสอบเวลาตอบสนองของระบบ เป็นการประเมินเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือจากถุงมือสะท้อนผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ไปยังถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก Flex Sensor จนกระทั่งเซอร์ไวโมเตอร์ของระบบฟื้นฟูเริ่มทำงาน การทดลองดำเนินการจำนวน 10 รอบ และบันทึกค่าระยะเวลาที่วัดได้เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดสอบดำเนินการโดยใช้ฟังก์ชันจับเวลาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano โดยเริ่มต้นจากการบันทึกเวลาเมื่อถุงมือสะท้อนส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของนิ้วมือออก (T0) จากนั้นเมื่อโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 บนถุงมือหุ่นยนต์รับข้อมูลสำเร็จ จะบันทึกเวลาเป็นค่า (T1) และเมื่อระบบส่งงานเซอร์ไวโมเตอร์ให้เริ่มเคลื่อนไหว จะบันทึกเวลาเป็นค่า (T2) โดยเวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) การบันทึกค่า T0, T1 และ T2 ใช้ฟังก์ชัน millis() ซึ่งเป็นการนับเวลาแบบสะสม (Timestamp) ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของระบบ โดยค่าที่นำมาวิเคราะห์เป็นผลต่างของเวลาในแต่ละรอบการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่า

บทความวิจัย (Research Article)

ระยะเวลาการตอบสนองที่แท้จริงของระบบ ทั้งนี้ การทดลองกำหนดให้มีการส่งข้อมูลในช่วงเวลาที่ประมาณ 120 มิลลิวินาที (Fixed Interval) เพื่อควบคุมตัวแปรและให้ผลการวัดมีความสม่ำเสมอการทดลองวัดเวลาตอบสนองดำเนินการในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor Environment) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างถังมือสะท้อนและถังมือหุ่นยนต์คงที่ที่ประมาณ 1 เมตร ใช้การสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 ความถี่ 2.4 GHz และควบคุมให้ไม่มีอุปกรณ์ไร้สายอื่นใช้งานในบริเวณใกล้เคียงเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ทั้งนี้ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและเสถียรตลอดการทดสอบ อย่างไรก็ตาม การทดสอบยังดำเนินการภายใต้สภาวะเครือข่ายเดียวและระยะทางคงที่ซึ่งไม่ได้ครอบคลุมสภาวะการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มเติมในการศึกษาครั้งต่อไป ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเวลาการตอบสนองของระบบ (Response Time Test) กำหนด T_0 = เวลาเวลาที่ถังมือสะท้อนส่งข้อมูล T_1 = เวลาเมื่อ NRF24L01 รับข้อมูลได้ และ T_2 = เวลาส่งงานมอเตอร์

ครั้ง	T_0 (ms)	T_1 (ms)	T_2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม ($T_2 - T_0$) (ms)
1	1000	1012	1059	59
2	1120	1131	1179	59
3	1240	1253	1300	60
4	1360	1372	1418	58
5	1480	1491	1539	59
6	1600	1612	1659	59
7	1720	1733	1780	60

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเวลาการตอบสนองของระบบ (Response Time Test) กำหนด T_0 = เวลาเวลาที่ถังมือสะท้อนส่งข้อมูล T_1 = เวลาเมื่อ NRF24L01 รับข้อมูลได้ และ T_2 = เวลาส่งงานมอเตอร์ (ต่อ)

ครั้ง	T_0 (ms)	T_1 (ms)	T_2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม ($T_2 - T_0$) (ms)
8	1840	1852	1900	60
9	1960	1970	2018	58
10	2080	2094	2141	61
เฉลี่ย				59
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				1.05
ค่าต่ำสุด (Min)				58
ค่าสูงสุด (Max)				61
%CV				1.78%

จากตารางที่ 2 การทดสอบวัดเวลาการตอบสนองของระบบถังมือหุ่นยนต์ โดยวัดช่วงเวลาตั้งแต่ถังมือสะท้อนส่งข้อมูล (T_0) จนกระทั่งระบบส่งงานเซอร์โวมอเตอร์ (T_2) ผ่านการสื่อสารไร้สายด้วยโมดูล NRF24L01 ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าเวลาตอบสนองรวม ($T_2 - T_0$) มีค่าอยู่ในช่วง 58–61 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 59 มิลลิวินาที และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 1.05 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าความแปรปรวนสัมพัทธ์ (Coefficient of Variation: %CV) เท่ากับ 1.78% แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพในการตอบสนองสูง เนื่องจากค่าที่ได้ในแต่ละครั้งมีความใกล้เคียงกันมากและมีการกระจายตัวต่ำ ผลการทดสอบนี้ยืนยันว่าระบบสามารถส่งและรับข้อมูลผ่านโมดูลไร้สาย NRF24L01 พร้อมทั้งส่งงานมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอเหมาะสมสำหรับการใช้งานในการควบคุมถังมือหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม การทดสอบใน

บทความวิจัย (Research Article)

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในระดับต้นแบบ (Prototype Testing) จึงกำหนดจำนวนรอบการทดลองจำนวน 10 ครั้งเพื่อประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของระบบ

4.3 การทดสอบการทำงานของกล่องควบคุมและถุงมือหุ่นยนต์

ผลการทดสอบพบว่า กล่องควบคุมซึ่งประกอบด้วยปุ่มกดควบคุมจำนวน 4 ปุ่ม สามารถส่งคำสั่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์ได้อย่างต่อเนื่องและถูกต้องครบทั้ง 30 ครั้งของการทดสอบ คิดเป็นร้อยละ 100 โดยส่วนใหญ่ระบบตอบสนองได้อย่างราบรื่น อย่างไรก็ตาม พบว่าเซอร์โวมอเตอร์มีการตอบสนองล่าช้ากว่าปกติจำนวน 2 ครั้ง จากการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 6.67 ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีการส่งคำสั่งต่อเนื่องหรือระบบอยู่ภายใต้ภาวะโหลดสูง ส่งผลให้การเคลื่อนไหวของเซอร์โวเกิดความหน่วงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบข้อผิดพลาดในการสื่อสารหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ นอกจากการประเมินความถูกต้องของการทำงานของกล่องควบคุมแล้ว ได้มีการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด เพื่อประเมินระยะเวลาตั้งแต่เริ่มกดปุ่มสั่งงานจนกระทั่งเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ T0 เป็นเวลาเริ่มต้นการกดปุ่ม T1 เป็นเวลาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับคำสั่ง และ T2 เป็นเวลาที่เซอร์โวมอเตอร์เริ่มทำงาน ทั้งนี้ เวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) โดยทำการทดลองจำนวน 10 รอบภายใต้สภาวะเดียวกัน เพื่อประเมินความเร็วและความสม่ำเสมอของการตอบสนองของระบบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
1	1000	1008	1044	44
2	1120	1129	1166	46
3	1240	1248	1284	44
4	1360	1369	1405	45
5	1480	1489	1527	47
6	1600	1608	1643	43
7	1720	1728	1764	44
8	1840	1849	1885	45
9	1960	1969	2006	46
10	2080	2089	2125	45
ค่าเฉลี่ย				44.9
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				1.20
ค่าต่ำสุด (Min)				43
ค่าสูงสุด (Max)				47
%CV				2.67%

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมด้วยปุ่มกด พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 43–47 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.9 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 1.20 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 2.67% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลในระดับต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากการควบคุมด้วยปุ่มกดเป็นการสั่งงานโดยตรงภายในระบบ จึงไม่มีความหน่วงจากการสื่อสารไร้สายหรือเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ส่งผลให้เซอร์โวมอเตอร์สามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง แม้ว่าจะพบการตอบสนองล่าช้าในบาง

บทความวิจัย (Research Article)

กรณีจำนวน 2 ครั้งจากการทดสอบการทำงานทั้งหมด 30 ครั้ง ซึ่งอาจเกิดจากการส่งคำสั่งต่อเนื่องหรือการทำงานภายใต้ภาวะโหลตสูง แต่ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบข้อผิดพลาดในการสื่อสารหรือการควบคุมอุปกรณ์ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากล่องควบคุมมีประสิทธิภาพในการสั่งงานและมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นช่องทางควบคุมของระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ

4.4 การทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

การทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อประเมินระยะเวลาตั้งแต่ผู้ใช้ส่งคำสั่งผ่านแอปพลิเคชันจนกระทั่งเซอร์โวมอเตอร์ของถุงมือหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ T0 เป็นเวลาเริ่มต้นการส่งคำสั่งจากแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต T1 เป็นเวลาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับข้อมูลคำสั่ง และ T2 เป็นเวลาที่เซอร์โวมอเตอร์เริ่มทำงาน ทั้งนี้เวลาตอบสนองรวมของระบบคำนวณจากผลต่างของเวลา (T2 – T0) โดยทำการทดลองจำนวน 10 รอบภายใต้สภาวะเดียวกันเพื่อประเมินความรวดเร็วและความสม่ำเสมอของการตอบสนองของระบบผลการทดลอง

จากผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 124–132 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 127.7 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 2.31 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 1.81% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ แม้ว่าการควบคุมผ่าน Blynk จะมีเวลาตอบสนองสูงกว่าการควบคุมด้วยปุ่มกดและการสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 เนื่องจากข้อมูลต้อง

ส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก่อนถึงอุปกรณ์ปลายทาง แต่ค่าการตอบสนองที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบถุงมือหุ่นยนต์ฟื้นฟูมือ และสามารถรองรับการควบคุมจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่าน Blynk

ครั้ง	T0 (ms)	T1 (ms)	T2 (ms)	เวลาตอบสนองรวม (T2 – T0) (ms)
1	1000	1032	1124	124
2	1120	1155	1246	126
3	1240	1273	1368	128
4	1360	1392	1486	126
5	1480	1515	1609	129
6	1600	1635	1728	128
7	1720	1753	1847	127
8	1840	1876	1972	132
9	1960	1994	2087	127
10	2080	2116	2210	130
ค่าเฉลี่ย				127.7
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)				2.31
ค่าต่ำสุด (Min)				124
ค่าสูงสุด (Max)				132
%CV				1.81

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบเวลาตอบสนองของการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าเวลาตอบสนองรวมของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 124–132 มิลลิวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 127.7 มิลลิวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 2.31 มิลลิวินาที คิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 1.81% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความ

บทความวิจัย (Research Article)

สม่ำเสมอในการตอบสนองและมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในระดับต่ำ แม้ว่าการควบคุมผ่าน Blynk จะมีเวลาตอบสนองสูงกว่าการควบคุมด้วยปุ่มกดและการสื่อสารผ่านโมดูล NRF24L01 เนื่องจากข้อมูลต้องส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก่อนถึงอุปกรณ์ปลายทาง แต่ค่าการตอบสนองที่ได้ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบถุงมือหุ่นยนต์พื้นพุ่มมือ และสามารถรองรับการควบคุมจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 การทดสอบความถูกต้องของการควบคุมแบบแยกนิ้ว

การทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของระบบในการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระ โดยให้ผู้ทดลองสวมถุงมือสะท้อนที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความโค้งงอ (Flex Sensor) บริเวณนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วโป้ง นิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง และนิ้วก้อย จากนั้นให้ผู้ทดลองทำการงอนิ้วทีละนิ้ว โดยกำหนดให้นิ้วอื่นอยู่ในตำแหน่งปกติ เพื่อส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ไปยังระบบถุงมือหุ่นยนต์พื้นพุ่มมือ จากนั้นตรวจสอบว่าถุงมือหุ่นยนต์สามารถตอบสนองการเคลื่อนไหวได้ตรงกับนิ้วที่สั่งงานหรือไม่ โดยถือว่าการตอบสนองถูกต้องเมื่อถุงมือหุ่นยนต์เคลื่อนไหวเฉพาะนิ้วเดียวกับที่ผู้ทดลองงอ และไม่มีการเคลื่อนไหวผิดพลาดในนิ้วอื่น ทำการทดสอบนิ้วละ 10 ครั้ง รวมทั้งหมด 50 ครั้ง ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน และบันทึกผลในรูปแบบจำนวนครั้งที่ควบคุมได้ถูกต้องและไม่ถูกต้องเพื่อนำมาคำนวณค่าความถูกต้องของระบบ (Accuracy) ผลการทดสอบ พบว่าระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแต่ละนิ้วได้อย่างถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96 โดยนิ้วโป้ง นิ้วกลาง และนิ้วก้อยมีความถูกต้องร้อยละ 100 ขณะที่นิ้วชี้และนิ้วนางมีความถูกต้องร้อยละ 90 เนื่องจากในบางกรณีค่าการตั้งของนิ้วมีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่งผลให้

เกิดความคลาดเคลื่อนในการจำแนกสัญญาณเล็กน้อย แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความถูกต้องของการควบคุมการเคลื่อนไหวแบบแยกนิ้วของถุงมือหุ่นยนต์

นิ้ว	จำนวนครั้ง	สำเร็จ	ไม่สำเร็จ	Accuracy
โป้ง	10	10	0	100%
ชี้	10	9	1	90%
กลาง	10	10	0	100%
นาง	10	9	1	90%
ก้อย	10	10	0	100%
รวม	50	48	2	96%

4.6 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ (User Satisfaction)

กลุ่มตัวอย่างในการประเมินความพึงพอใจจำนวน 30 คน ได้มาจากการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ภายในงานประกวดนวัตกรรมสายอุดมศึกษาประจำปี 2568 (EXPO2025) ที่จัดโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยมีทั้งคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เยี่ยมชมร่วมทดลองใช้งานระบบถุงมือหุ่นยนต์พื้นพุ่มมือ หลังการสาธิต ผู้ประเมินได้ตอบแบบสอบถามความพึงพอใจในประเด็นด้านการใช้งาน ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความน่าสนใจของนวัตกรรม

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจำนวน 30 คน พบว่า คะแนนเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 4.42 จากคะแนนเต็ม 5 อยู่ในระดับมาก โดยทุกด้านที่ประเมินมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากทั้งหมด และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) เท่ากับ 2.49% แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นของผู้ใช้งานมีความสอดคล้องกันในระดับสูงและมีการกระจายตัวของ

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลต่ำ อย่างไรก็ตาม การประเมินในครั้งนี้เป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมของงานแสดงนวัตกรรมและยังไม่ได้ดำเนินการทดสอบกับผู้ป่วยจริงในบริบททางคลินิก ดังนั้น ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการทดลองกับกลุ่มผู้ป่วยเป้าหมายโดยตรง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมืออย่างเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น สรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประเมินความพึงพอใจของผู้ทดสอบใช้หุ่นยนต์ฟื้นฟูมืออัจฉริยะ

ด้านที่ประเมิน	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ระดับความพึงพอใจ
1. ความสะดวกในการสวมใส่และใช้งาน	การใช้งานง่าย น้ำหนักเบา ใส่กระชับ	4.47	มาก
2. ความแม่นยำของการตอบสนอง	ความใกล้เคียงของการขยับนิ้วกับการทำงานของหุ่นยนต์	4.38	มาก
3. ความปลอดภัยในการใช้งาน	ระบบหยุดฉุกเฉินตอบสนองทันที ไม่มีความเสี่ยง	4.55	มาก
4. ความเสถียรของระบบ	ความต่อเนื่อง ความสั่นไหว และความนิ่งในการทำงาน	4.29	มาก
5. ความง่ายในการเรียนรู้การใช้งาน	ใช้เวลาเรียนรู้ไม่นาน ปุ่มคำสั่งชัดเจน	4.52	มาก
คะแนนเฉลี่ยรวม	สรุปความพึงพอใจโดยรวมจากทุกด้าน	4.42	มาก



รูปที่ 8 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

การวิจัยครั้งนี้มีการเก็บข้อมูลจากอาสาสมัครจำนวน 30 คน เพื่อประเมินการใช้งานต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือด้วยระบบควบคุมระยะไกลและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยก่อนดำเนินการวิจัย ผู้เข้าร่วมทุกคนได้รับการชี้แจงเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมถึงสิทธิในการถอนตัวจากการวิจัยได้ตลอดเวลาโดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การเข้าร่วมการวิจัยเป็นไปด้วยความสมัครใจ ทั้งนี้ งานวิจัยไม่มีการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลที่สามารถระบุตัวตนของผู้เข้าร่วมได้ และข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น

5. สรุปและอภิปรายผลการการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบและพัฒนาต้นแบบถุงมือหุ่นยนต์เพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพมือโดยใช้ระบบ IoT ซึ่งสามารถช่วยฟื้นฟูการเคลื่อนไหวของนิ้วมือผ่านระบบควบคุมอัตโนมัติและการสั่งงานจากระยะไกล โดยระบบประกอบด้วยถุงมือหุ่นยนต์ที่ใช้กลไกขับเคลื่อนแบบนิวแมติก (Pneumatic System) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และระบบควบคุมผ่านแพลตฟอร์ม Blynk ซึ่งรองรับการควบคุมการกำแบมือได้ทั้งแบบรวมและแบบแยกนิ้วอิสระ

ผลการทดสอบเชิงวิศวกรรมพบว่า ระบบสามารถตรวจจับและถ่ายทอดการเคลื่อนไหวของนิ้ว

บทความวิจัย (Research Article)

มือได้อย่างถูกต้อง โดยมีเวลาในการตอบสนองเฉลี่ย 59 มิลลิวินาที ระยะเวลาดังกล่าวอยู่ในช่วงที่มนุษย์สามารถรับรู้การตอบสนองของระบบได้อย่างต่อเนื่องและใกล้เคียงเวลาจริง (Real-Time Interaction) จึงเหมาะสมต่อการใช้งานด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่ต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนไหวและการตอบสนองของอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ค่าการตอบสนองดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าช่วงเวลาที่โดยทั่วไปยอมรับได้สำหรับงานด้าน Rehabilitation Robotics ซึ่งมักอยู่ในช่วงต่ำกว่า 100–200 มิลลิวินาที แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้รวดเร็วเพียงพอสำหรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ค่าความแปรปรวนของเวลาตอบสนองอยู่ในระดับต่ำ สะท้อนถึงความเสถียรของระบบสื่อสารไร้สายและการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น Polygerinos et al. [11] และ Lim et al. [7] พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาโครงสร้างและกลไกของถุงมือหุ่นยนต์เป็นหลัก ขณะที่งานวิจัยนี้ได้บูรณาการระบบควบคุมแบบไร้สายและการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเข้ามาเพิ่มเติม ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในลักษณะการฟื้นฟูที่บ้าน (Home-Based Rehabilitation) และรองรับการติดตามผลจากระยะไกลได้ จุดสำคัญของระบบที่พัฒนาขึ้น คือ การรองรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของนิ้วมือแบบแยกอิสระผ่านถุงมือสะท้อนร่วมกับ Flex Sensor ในแต่ละนิ้ว ซึ่งช่วยให้สามารถฝึกการเคลื่อนไหวของนิ้วมือเฉพาะส่วนได้ นอกจากนี้ยังเลือกใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ง่ายภายในประเทศ จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่บ้านในอนาคต

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบพบว่าระบบยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การเกิดความหน่วงของเซอร์โวมอเตอร์ในสถานะที่มีโหลดสูง และความไม่

เสถียรของแรงดันไฟเลี้ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อเนื่องของการทำงาน นอกจากนี้ การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดสอบในระดับต้นแบบ โดยมีจำนวนรอบการทดลองและกลุ่มตัวอย่างที่จำกัด และยังไม่ได้ดำเนินการทดสอบกับผู้ป่วยจริง รวมถึงยังไม่มีมีการประเมินตามมาตรฐานความปลอดภัยทางการแพทย์ เช่น ISO 13482 สำหรับหุ่นยนต์ช่วยเหลือบุคคล (Personal Care Robots) [14] หรือ IEC 60601 สำหรับความปลอดภัยของอุปกรณ์ไฟฟ้าทางการแพทย์ [15] จึงไม่สามารถสรุปผลในเชิงคลินิกได้อย่างสมบูรณ์ ในด้านคุณค่าทางวิชาการ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการบูรณาการเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบนิวแมติก เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ฟื้นฟูสมรรถภาพมือที่มีต้นทุนต่ำและสามารถเข้าถึงได้ง่าย ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบสาธารณสุข โดยเฉพาะในบริบทของการฟื้นฟูที่บ้าน

สำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต ควรมีการเพิ่มจำนวนรอบการทดสอบในสภาวะที่หลากหลาย การทดลองกับกลุ่มผู้ป่วยจริงในระดับคลินิก การพัฒนาระบบให้สามารถประเมินผลการฟื้นฟูได้แบบอัตโนมัติ และการปรับปรุงความเสถียรของระบบควบคุมและแหล่งจ่ายไฟ รวมถึงการออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อรองรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์และการใช้งานจริงในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

บทความวิจัย (Research Article)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองยุทธศาสตร์และแผนงาน, *สถิติสาธารณสุข พ.ศ. 2566*, กรุงเทพฯ: กองยุทธศาสตร์และแผนงาน สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2566.
- [2] GBD 2021 Stroke Collaborators, “Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021,” *The Lancet Neurology*, vol. 23, no. 10, pp. 973–1003, 2024, doi: 10.1016/S1474-4422(24)00369-7.
- [3] คณันท์ งามเด่นเจริญศรี, “การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ช่วยใช้งานมือสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีแรงมือและแขนบางส่วนร่วมกับอาการเกร็งของนิ้วมือ,” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมทางการแพทย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 2563.
- [4] ตรีนุช อมรภิญโญเกียรติ, “บทบาทของการใช้หุ่นยนต์ฟื้นฟูผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในโรงพยาบาลตากสิน,” *วารสารสาธารณสุขและวิทยาศาสตร์สุขภาพ*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 160–171, 2565.
- [5] ศิวะพร ขาวอิน, พรสวรรค์ โพธิ์สว่าง, และ กฤติกานต์ พลงาม, “การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ Robotic Assisted Therapy ร่วมกับการฟื้นฟูทางกิจกรรมบำบัดแบบดั้งเดิมในการเพิ่มความสามารถการควบคุมการเคลื่อนไหวรยางค์ส่วนบนของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีภาวะอัมพาตครึ่งซีก,” *วารสารการแพทย์*, ปีที่ 43, ฉบับที่ 4, หน้า 54–60, 2561.
- [6] สุวรรณ วุฒิธรรณพธิ์, กนกวรรณ ศิลปกรรม พิเศษ, และ กฤษณา อุไรศรีพงศ์, “การพัฒนาอุปกรณ์ช่วยฟื้นฟูการเดินสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีภาวะขาอ่อนแรง,” *วารสารวิจัยสุขภาพและการพยาบาล*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 3, หน้า 194–204, 2566.
- [7] D. Y.-L. Lim, H.-S. Lai, and R. C.-H. Yeow, “A bidirectional fabric-based soft robotic glove for hand function assistance in patients with chronic stroke,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 20, Art. no. 120, 2023, doi: 10.1186/s12984-023-01250-4.
- [8] T. Bazina, M. Kladarić, E. Kamenar, and G. Gregov, “Development of rehabilitation glove: Soft robot approach,” *Actuators*, vol. 13, no. 12, Art. no. 472, 2024, doi: 10.3390/act13120472.
- [9] Y. Lee and H. Park, “Design optimization of a soft robotic rehabilitation glove based on finger workspace analysis,” *Biomimetics*, vol. 9, no. 3, Art. no. 172, 2024, doi: 10.3390/biomimetics9030172.
- [10] J. J. Daly and J. R. Wolpaw, “Brain–computer interfaces in neurological rehabilitation,” *The Lancet Neurology*, vol. 7, no. 11, pp. 1032–1043, 2008, doi: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0.
- [11] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, “Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, pp. 135–

บทความวิจัย (Research Article)

- 143, Nov. 2015, doi:
10.1016/j.robot.2014.08.014.
- [12] H. In, B. B. Kang, M. Sin, and K.-J. Cho,
“Exo-Glove: A wearable robot for the
hand with a soft tendon routing
system,” *IEEE Robotics & Automation
Magazine*, vol. 22, no. 1, pp. 97–105,
Mar. 2015, doi:
10.1109/MRA.2014.2362863.
- [13] S.-H. Yang *et al.*, “An instrumented
glove-controlled portable hand-
exoskeleton for bilateral hand
rehabilitation,” *Biosensors*, vol. 11, no.
12, Art. no. 495, 2021, doi:
10.3390/bios11120495.
- [14] Robots and Robotic Devices—Safety
Requirements for Personal Care Robots,
ISO 13482:2014, 2014.
- [15] Medical Electrical Equipment—Part 1:
General Requirements for Basic Safety
and Essential Performance, Edition 3.2,
IEC 60601-
1:2005+AMD1:2012+AMD2:2020 CSV,
Aug. 2020.

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริม แบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก ด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

ศราวิน ราชานิกรณ์¹, พรศักดิ์ ปริเลขา^{1,*}, พรรณเชษฐ ญ ลำพูน¹, ปิยะวัฒน์ จิระพงษ์สุวรรณ²,
รัฐวิทย์ ญ ลำพูน³ และ ศุภณัฏฐ์ งามประภาวัฒน์⁴

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัลและสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

² ผู้บริหารประจำสำนัก สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

³ บริษัท อินเด็กซ์ อินเตอร์เนชั่นแนล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)

⁴ วิทยาลัยนานาชาติจีน สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: pornsakpree@pim.ac.th โทรศัพท์: 02-855-0340

(รับบทความ: 11 พฤษภาคม 2569; แก้ไขบทความ: 1 กรกฎาคม 2569; ตอรับบทความ: 14 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยใช้ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ร่วมกับแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแนวทางที่ต้องใช้อุปกรณ์สวมใส่ และสนับสนุนการติดตามผลการบำบัดอย่างต่อเนื่องที่บ้าน ระบบใช้มีเดียไปป์ (MediaPipe) สำหรับการติดตามจุดสังเกตของมือจำนวน 21 จุด แบบเรียลไทม์จากกล้องเว็บแคมมาตรฐาน โดยป้อนข้อมูลเข้าสู่สถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน (Hybrid AI) ที่ผสานปัญญาประดิษฐ์แบบใช้กฎเกณฑ์ (Rule-Based AI) กับโมเดลภาษาขนาดใหญ่เพื่อสร้างข้อเสนอแนะและสรุปรายงานทางคลินิก ภายใต้กรอบกรอบแนวคิดและเครื่องมือในการประเมินการออกแบบซีเรียสเกม (Serious Game Design Assessment) และแนวคิดความยืดหยุ่นของระบบประสาท เปรียบวิธีวิจัยประกอบด้วยการเล่นเชิงวิศวกรรม การทดสอบด้วยชุดข้อมูลจำลอง 100 กรณีศึกษา และการทวนสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ 9 ท่าน ผลการประเมินในสภาพแวดล้อมจำลองพบว่า ระบบมีอัตราการสูญเสียเฟรมเฉลี่ยร้อยละ 5.36 ความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ 10.51 พิกเซล อัตราเฟรม 49.6–58.4 FPS และความหน่วง 45.2–68.7 มิลลิวินาที ส่วนการประเมินแดชบอร์ดปัญญาประดิษฐ์ ด้วยข้อมูลจำลอง 100 กรณีศึกษาพบว่าความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 92.00 และความสามารถในการตรวจจับ เท่ากับร้อยละ 89.36 ขณะที่ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมและความสอดคล้องเชิงหน้าที่อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.59–4.75) จุดเด่นของการศึกษานี้คือการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดคลินิกในระบบต้นแบบเดียว อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ในบทความนี้เป็นการประเมินต้นแบบในสภาพแวดล้อมจำลอง และการรับรองโดยผู้เชี่ยวชาญ จึงควรมีการศึกษาทางคลินิกเพิ่มเติมก่อนการนำไปใช้จริงในวงกว้าง

คำสำคัญ: ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน การฟื้นฟูสมรรถภาพโรคหลอดเลือดสมอง แดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก ซีเรียสเกมทางสุขภาพ

การอ้างอิงบทความ: ศราวิน ราชานิกรณ์, พรศักดิ์ ปริเลขา, พรรณเชษฐ ญ ลำพูน, ปิยะวัฒน์ จิระพงษ์สุวรรณ, รัฐวิทย์ ญ ลำพูน และ ศุภณัฏฐ์ งามประภาวัฒน์, "การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน", "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์", ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 95-109, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Development of a Stroke Tele-Rehabilitation System Using Markerless Augmented Reality and a Hybrid AI-Based Clinical Decision Support Dashboard

Sarawin Rachanikorn¹, Pornsak Preelekha^{1,*}, Phannachet Na Lamphun¹, Piyawat Jirapongsuwan²,
Rathawit Na Lamphun³ and Supanut Ngamprapawat⁴

¹Department of Digital Technology and Information, Faculty of Engineering and Technology,
Panyapiwat Institute of Management

²Executive Officer for Academic Affairs, Panyapiwat Institute of Management

³Index International Group Public Company Limited

⁴International Chinese College, Panyapiwat Institute of Management

*Corresponding Author: pornsakpree@pim.ac.th, Tel: 02-855-0340

(Received: May 11, 2026; Revised: July 1, 2026; Accepted: July 14, 2026)

Abstract

This study aimed to develop a stroke tele-rehabilitation prototype integrating markerless augmented reality with a hybrid AI-based clinical decision support dashboard, in order to reduce the limitations of wearable-device-dependent rehabilitation and to support continuous home-based monitoring. The system employed MediaPipe for real-time tracking of 21 hand landmarks from a standard webcam and transmitted the extracted features to a Hybrid AI architecture that combines a rule-based engine with a large language model to generate feedback and clinical summaries under the Serious Game Design Assessment framework and the concept of neuroplasticity. The methodology consisted of engineering evaluation, simulated-data testing using 100 clinical cases, and expert validation by nine specialists. Evaluation in a simulated environment showed a frame drop rate of 5.36%, a spatial error of 10.51 pixels, a frame rate of 49.6–58.4 FPS, and a latency of 45.2–68.7 ms. For AI performance, the dashboard achieved 92.00% accuracy and 89.36% recall on 100 simulated clinical cases, while expert evaluation rated the system architecture and functional appropriateness at the highest level (mean = 4.59–4.75). The key contribution of this work lies in the integration of Markerless AR, Hybrid AI, and a clinical dashboard into a single prototype. However, the findings are limited to prototype evaluation in a simulated environment and expert-based validation; therefore, further clinical studies are required before real-world deployment.

Keywords: Markerless Augmented Reality, Hybrid Artificial Intelligence, Stroke Rehabilitation, Clinical Decision Support Dashboard, Healthcare Serious Games

Please cite this article as: S. Rachanikorn, P. Preelekha, P. Na Lamphun, P. Jirapongsuwan, R. Na Lamphun and S. Ngamprapawat, "Development of a Stroke Tele-Rehabilitation System Using Markerless Augmented Reality and a Hybrid AI-Based Clinical Decision Support Dashboard," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 95-109, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โรคหลอดเลือดสมองและภาวะสมองเสื่อมเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำกิจกรรมประจำวัน และคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ การฟื้นฟูสมรรถภาพทางกาย และปรีชาอย่างต่อเนืองจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการช่วยให้ผู้ป่วยกลับมาพึ่งพาตนเองได้ อย่างไรก็ตามการกายภาพบำบัดแบบดั้งเดิมยังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น การขาดแรงจูงใจของผู้ป่วย และปัญหาด้านการเดินทาง เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้การรักษาขาดความต่อเนื่อง [1] ด้วยเหตุนี้แนวคิดการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกล (Tele-Rehabilitation) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากช่วยให้ผู้ป่วยสามารถฝึกฝนตนเองที่บ้านได้สะดวกและต่อเนื่อง แม้ที่ผ่านมาจะมีการนำเทคโนโลยีโลกเสมือนจริง และอุปกรณ์สวมใส่มาใช้งานฟื้นฟู แต่เทคโนโลยีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ต้นทุนฮาร์ดแวร์สูง ความซับซ้อนในการติดตั้ง และความไม่สะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะในผู้สูงอายุ นอกจากนี้การติดตามและประเมินผลยังมักอาศัยการสังเกตของนักกายภาพบำบัดเป็นหลัก ทำให้เกิดภาระงานสูงและขาดความต่อเนื่องของข้อมูลระยะยาว [1]

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพที่เข้าถึงได้ง่ายผ่านอุปกรณ์พื้นฐาน และสามารถบูรณาการการรักษาเข้ากับการประเมินผลได้อย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงมุ่งประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ร่วมกับความจริงเสมือน เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถโต้ตอบกับระบบผ่านกล้องเว็บแคมมาตรฐานโดยไม่ต้องสวมอุปกรณ์บนร่างกาย พร้อมทั้งนำแนวคิดปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกมาใช้ในการติดตาม วิเคราะห์ และสรุปผลการฟื้นฟูอย่างเป็นระบบ [2-6]

อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรม และข้อจำกัดของแนวทางเดิม ยังขาดระบบต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่บูรณาการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ การวิเคราะห์ผลด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกไว้ในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบ จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลสำคัญของการพัฒนางานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยบูรณาการเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ความแม่นยำของการวิเคราะห์ และความเหมาะสมของระบบในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ

2. ทบทวนวรรณกรรม

การฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการฟื้นคืนความสามารถในการทำกิจกรรมประจำวันและคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย โดยกรอบแนวคิดในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของร่างกาย การทำกิจกรรม และการมีส่วนร่วม [5] ในเชิงทฤษฎี กระบวนการฟื้นฟูอาศัยหลักการสำคัญของทฤษฎีความยืดหยุ่นของระบบประสาท ซึ่งอธิบายว่าสมองสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างและหน้าที่ของตนเองได้จากประสบการณ์และการฝึกซ้ำ [7] ควบคู่กับทฤษฎีการเรียนรู้การเคลื่อนไหวที่เน้นการฝึกอย่างเฉพาะเจาะจงและต่อเนื่องเพื่อให้เกิดการฟื้นตัวของทักษะการเคลื่อนไหว [8] ขณะเดียวกัน ทักษะการจัดการขั้นสูงของสมองยังมีบทบาทต่อการฟื้นฟูทางกายและปรีชาในผู้ป่วยที่ต้องกลับไปใช้ชีวิตประจำวัน [9] ในช่วง

บทความวิจัย (Research Article)

หลายปีที่ผ่านมา แนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากช่วยลดข้อจำกัดด้านการเดินทางและเพิ่มโอกาสในการฝึกอย่างต่อเนื่องที่บ้าน งานวิจัยของ Moldoveanu et al. [1] ชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยีเกมและโลกเสมือนจริงสามารถช่วยเพิ่มแรงจูงใจ และการมีส่วนร่วมของผู้ป่วยหลังโรคหลอดเลือดสมองได้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งานจริง ความต่อเนื่องของการรักษา และต้นทุนอุปกรณ์ขณะเดียวกันงานของ Weissbluth and Nissim [10] ยังสะท้อนว่าเทคโนโลยีโลกเสมือนจริงอาจก่อให้เกิดความไม่สบายตัวหรือข้อจำกัดด้านประสบการณ์การใช้งานในผู้ใช้บางกลุ่ม จึงเห็นได้ว่าแม้แนวทางเทคโนโลยีเสมือนจริงและอุปกรณ์สวมใส่จะมีศักยภาพในเชิงฟื้นฟู แต่ความซับซ้อนของอุปกรณ์และความสะดวกในการใช้งานยังเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้จริงในวงกว้าง ภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว เทคโนโลยีการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เพราะช่วยลดภาระจากการใช้อุปกรณ์สวมใส่และเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ผ่านฮาร์ดแวร์พื้นฐาน เช่น กล้องเว็บแคม มีเดียไปป์เป็นหนึ่งในเฟรมเวิร์กสำคัญที่รองรับ กระบวนการประมวลผลข้อมูลประสาทสัมผัสแบบต่อเนื่อง [2] และต่อยอดสู่การตรวจจับแบบเรียลไทม์ผ่านระบบตรวจจับมือ [11] ในมุมมองของการประยุกต์ใช้การฟื้นฟูของ Rasetto et al. [3] และ Karthik et al. [12] แสดงให้เห็นว่าระบบติดตามมือแบบไม่ใช้มาร์กเกอร์สามารถสนับสนุนการฝึกฟื้นฟูมือ และการรู้จำท่าทางได้ในระดับที่น่าสนใจ ขณะที่งานวิจัยของ Faux-Nightingale et al. [13] และ Hsu et al. [14] ยืนยันว่าเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน และระบบจับการเคลื่อนไหวแบบไม่ใช้มาร์กเกอร์ มีศักยภาพต่อการเพิ่มการเข้าถึงบริการฟื้นฟู แม้หลักฐานเชิงประสิทธิผลทางคลินิกยังต้องการการศึกษาที่เป็นระบบมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยเดิมจึงชี้ให้เห็นทั้งโอกาสและข้อจำกัดกล่าวคือ เทคโนโลยีช่วยลดข้อจำกัดของการฟื้นฟูแบบ

ใช้อุปกรณ์สวมใส่ได้ แต่ยังขาดการบูรณาการเข้าสู่ระบบทางคลินิกที่ครบวงจร เพื่อเพิ่มแรงจูงใจและความต่อเนื่องของการฝึก แนวคิดเกมบำบัด และซีเรียสเกมจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับการออกแบบระบบฟื้นฟูอย่างกว้างขวางโดยกรอบซีเรียสเกมของ Mitgutsch and Alvarado [15] ช่วยอธิบายว่าเกมสามารถสนับสนุนเป้าหมายได้อย่างไร ขณะที่ทฤษฎีการกำหนดตนเอง ภาวะสิ้นไหว และการเสริมแรงบวก [16-18] ช่วยอธิบายกลไกที่ทำให้ผู้ใช้เกิดแรงจูงใจและฝึกซ้ำอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาร่วมกับงานวิจัยด้านเกมเพื่อการฟื้นฟู [1] จะเห็นได้ว่าเกมมีบทบาทสำคัญต่อการลดปัญหาการไม่ปฏิบัติตามแผนการรักษา แต่ในหลายงานที่ผ่านมา เกมยังถูกใช้เพื่อเพิ่มแรงจูงใจเป็นหลัก มากกว่าการเชื่อมโยงกับระบบประเมินผลและการตัดสินใจทางคลินิก

ในอีกด้านหนึ่งปัญญาประดิษฐ์ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นอย่างชัดเจนในระบบสุขภาพ งานของ Jiang et al. [4] อธิบายภาพรวมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทสุขภาพ ส่วน Shortliffe [19] แสดงให้เห็นจุดแข็งของระบบอิงกฎในด้านความโปร่งใสและการตรวจสอบย้อนกลับได้ ขณะเดียวกัน งานล่าสุดในช่วงปี 2023–2024 ชี้ให้เห็นว่าโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model : LLMs) มีศักยภาพในการสังเคราะห์ข้อมูล การร่างเอกสาร และการช่วยงานเชิงความรู้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความน่าเชื่อถือและบริบทการใช้งาน เมื่อนำจุดเด่นของระบบอิงกฎ และโมเดลภาษาขนาดใหญ่ มาพิจารณาร่วมกัน จึงเกิดความเหมาะสมของแนวคิดปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งนำความสามารถด้านการตรวจสอบย้อนกลับของชุดเงื่อนไข และเหตุผลเข้ากับความรู้ด้านด้านการสังเคราะห์ภาษาธรรมชาติของโมเดลภาษาขนาดใหญ่ เพื่อให้เหมาะกับบริบทการใช้งานทางคลินิก [20-22] นอกจากการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว การนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบที่ใช้งานได้จริงสำหรับบุคลากรทาง

บทความวิจัย (Research Article)

การแพทย์ก็เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก (Clinical Decision Support: CDS) งานของ Zou et al. [6] สนับสนุนบทบาทของแดชบอร์ดในการรวบรวมข้อมูลหลายมิติและสรุปผลเพื่อช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานด้านสุขภาพตีความข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น ขณะที่ Bischof et al. [23], Hekman et al. [24] และ Dullabh et al. [25] แสดงให้เห็นว่าแดชบอร์ดสามารถสรุปข้อมูลเชิงคลินิกที่ดีช่วยเชื่อมข้อมูล การตีความ และกระบวนการทำงาน การตัดสินใจทางคลินิก ซึ่งไม่ใช่เพียงแสดงค่าทางสถิติเท่านั้น และยังมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ

จากการสังเคราะห์วรรณกรรมทั้งหมดพบข้อจำกัด 3 ประการ ได้แก่ 1) งานวิจัยศึกษาองค์ประกอบแต่ละด้านแยกส่วน เช่น มุ่งเฉพาะเกมฟื้นฟู การติดตามการเคลื่อนไหว หรือแดชบอร์ดเพียง

ด้านใดด้านหนึ่ง 2) การบูรณาปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานเพื่อสนับสนุนการฟื้นฟูและการติดตามผลเชิงคลินิกในแพลตฟอร์มเดียวมีจำนวนจำกัด และ 3) ยังขาดการเชื่อมโยงระหว่างผลการฝึกของผู้ป่วยกับเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจของบุคลากรทางการแพทย์อย่างเป็นระบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนานวัตกรรมต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ซีเรียสเกม ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกเข้าด้วยกันเพื่อปิดจำกัดดังกล่าว และยกระดับศักยภาพของการฟื้นฟูทางไกลอย่างยั่งยืน

ดังนั้นผู้วิจัยได้สังเคราะห์และเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเชิงเทคโนโลยี ข้อจำกัด และช่องว่างของงานเดิม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปการสังเคราะห์และเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มงานวิจัย	เทคโนโลยีหลัก	ข้อจำกัดของงานเดิม	ช่องว่างที่งานวิจัยนี้เติมเต็ม
เกม/เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน เพื่อการฟื้นฟู	VR, Gamified Rehabilitation	ใช้งานจริงยากและอุปกรณ์ซับซ้อน	ใช้ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ที่เข้าถึงง่ายกว่า
Markerless Motion Capture / Hand Tracking	MediaPipe, Hand Tracking	เน้นติดตามท่าทาง แต่ยังไม่เชื่อมระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก	เชื่อมการติดตามเข้ากับปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ด
AI / LLMs in Medicine	Rule-based AI, LLMs	ใช้รายส่วน ขาดบริบทฟื้นฟูครบวงจร	ใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน เพื่อสรุปผลในงานฟื้นฟู
Clinical Dashboard / CDS	Narrative Dashboard, ML-CDS Dashboard	เน้นข้อมูลเชิงระบบ แต่ยังไม่เฉพาะ โรค Stroke Tele-rehabilitation	ออกแบบแดชบอร์ดสำหรับติดตามผลฟื้นฟูทางไกล

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 1 พบว่างานวิจัยเดิมยังขาดการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกไว้ในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเพิ่มเติมปรับปรุงข้อจำกัดของระบบเดิม

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนาเชิงวิศวกรรมระบบเพื่อพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบแบบเอจิล (Agile) เพื่อให้สามารถปรับปรุงต้นแบบได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การประเมินต้นแบบในงานวิจัยฉบับนี้ ประกอบด้วยการทดสอบเชิงวิศวกรรม

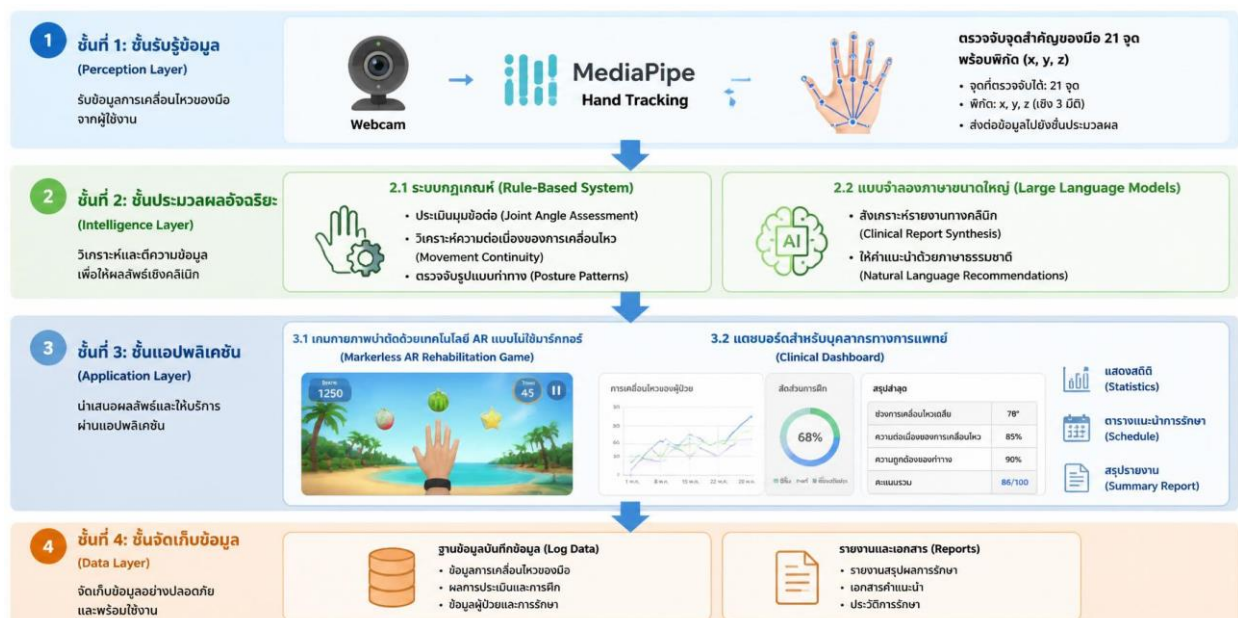
การทดสอบด้วยข้อมูลจำลองและการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยยังไม่ครอบคลุมการทดลองกับผู้ป่วยจริง

3.1 รูปแบบการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ การวิเคราะห์และออกแบบสถาปัตยกรรม การพัฒนาระบบ และการทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบแสดงดังรูปที่ 1

3.1.1 ในระยะที่ 1

ผู้วิจัยออกแบบสถาปัตยกรรมระบบโดยบูรณาการ 4 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นการรับรู้ ชั้นประมวลผลอัจฉริยะ ชั้นแอปพลิเคชัน และชั้นข้อมูล โดยในชั้นการรับรู้ระบบรับสัญญาณภาพจากกล้องเว็บแคมเข้าสู่มีเดียไปป์ เพื่อสกัดจุดพิคตบนมือจำนวน 21 จุด ซึ่งเป็นจุดสังเกตเฉพาะของมือและนิ้วมือ ไม่ได้ครอบคลุมข้อต่อของร่างกายส่วนอื่น



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมระบบและการไหลของข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ศรวิน ราชานิกรณ และคณะ, การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปพิกัด x, y และ z เชิงสัมพันธ์ และนำไปใช้คำนวณองศาข้อต่อและรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบสัมพันธ์ แทนการวัดระยะทางเชิงกายภาพแบบสมบูรณ์ เพื่อช่วยลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของระยะระหว่างผู้ใช้กับกล้อง 2 มิติ พร้อมทั้งมีการปรับเทียบตำแหน่งเริ่มต้นก่อนใช้งานแต่ละรอบ เพื่อให้ระบบตอบสนองได้เสถียรมากขึ้นแม้ระยะห่างจากกล้องเปลี่ยนแปลงไป ในชั้นประมวลผลของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานทำงานเป็นลำดับขั้นดังนี้

1) ข้อมูลจุดพิกัดบนมือจากมีเดียไปป์ถูกส่งเข้าสู่ระบบที่ขับเคลื่อนด้วยกฎเพื่อประเมินเงื่อนไขเชิงวิศวกรรมศาสตร์ เช่น องศาการงอข้อนิ้ว ความต่อเนื่องของการเคลื่อนไหว และรูปแบบท่าทางที่ควรเฝ้าระวัง

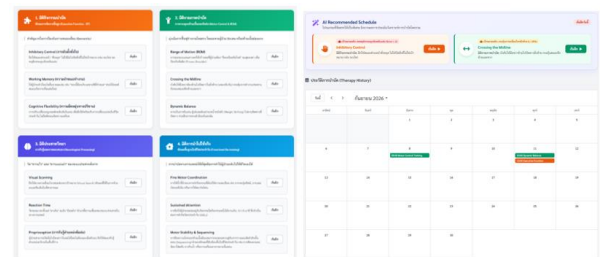
2) ผลลัพธ์เชิงปริมาณและผลการตีความเบื้องต้นจะถูกส่งต่อไปยังโมเดลภาษาขนาดใหญ่เพื่อสังเคราะห์เป็นข้อความสรุป รายงานทางคลินิก และข้อเสนอแนะเชิงภาษาธรรมชาติ

3) ผลลัพธ์สุดท้ายถูกส่งไปยังชั้นแอปพลิเคชันเพื่อแสดงผลในรูปแบบเกมฟื้นฟู และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก พร้อมบันทึกข้อมูลลงชั้นข้อมูล ในรูปแบบข้อมูลบันทึกประวัติการทำงาน และรายงานผลเพื่อใช้ติดตามย้อนหลังในภายหลัง การออกแบบดังกล่าวช่วยให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ไม่ได้ทำหน้าที่ตัดสินใจโดยลำพัง แต่ทำหน้าที่สังเคราะห์ผลบนพื้นฐานข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบจากระบบอิงกฎแล้ว จึงเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ และลดความเสี่ยงจากการสังเคราะห์ข้อมูลที่เผลอคล้อยกับบริบททางคลินิก

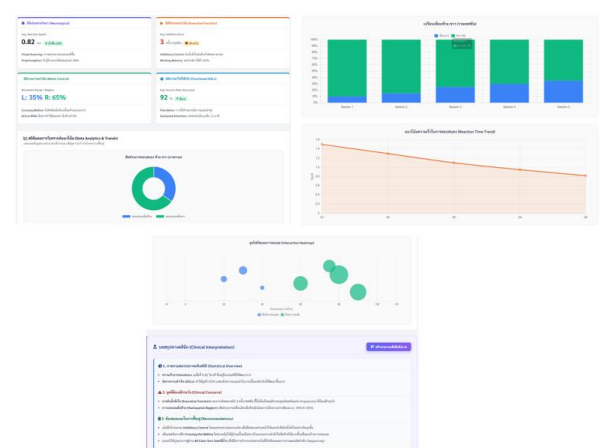
3.1.2 ในระยะที่ 2

ผู้วิจัยพัฒนาสภาพแวดล้อม ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์สำหรับกิจกรรมฟื้นฟู และพัฒนาแดชบอร์ดคลินิกภายใต้หลักการออกแบบที่เน้นผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง โดยมุ่งให้การแสดงผลสถิติ ตารางแนะนำ

การบำบัด และรายงานสรุปทางคลินิกมีความเข้าใจง่ายต่อผู้เชี่ยวชาญทางการแพทย์และเอื้อต่อการตัดสินใจใช้งานจริง ทั้งนี้ต้นแบบแดชบอร์ดได้รับการประเมินความเหมาะสม และการยอมรับในการใช้งานเบื้องต้นร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู และสาขาที่เกี่ยวข้องในรูปแบบการทดสอบการยอมรับโดยผู้ใช้หรือการประเมินแบบฮิวริสติก (Heuristic Evaluation) เพื่อพิจารณาประโยชน์ของข้อมูลที่แสดงและความเหมาะสมของส่วนติดต่อผู้ใช้ก่อนนำไปทดสอบในระยะประเมินผล แสดงดังรูปที่ 2-4



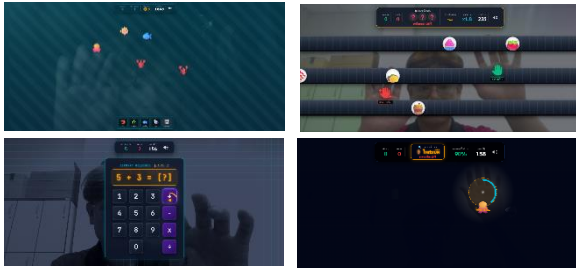
รูปที่ 2 โปรแกรมเกมเพื่อการบำบัด และระบบ AI แนะนำตารางการบำบัดเฉพาะบุคคล



รูปที่ 3 แดชบอร์ดแสดงผลการวิเคราะห์ และรายงานบทสรุปทางคลินิกที่วิเคราะห์

ศรวิน ราชานิกรณ และคณะ, การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของ
ซีเรียสเกมบำบัดด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้

3.1.3 ในระยะที่ 3

ผู้วิจัยทดสอบและประเมินประสิทธิภาพต้นแบบ
โดยครอบคลุมสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ความน่าเชื่อถือ
ของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และความ
เหมาะสมของแดชบอร์ดจากมุมมองผู้เชี่ยวชาญ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

เครื่องมือหลักของระบบประกอบด้วย มีเดียไปป์
และไลบรารีสำหรับการประมวลผลภาพ และติดตาม
การเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ สถาปัตยกรรม
ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานที่ใช้กฎเกณฑ์ ตรรกะ
การตัดสินใจเชิงเงื่อนไขร่วมกับโมเดลภาษาขนาดใหญ่
และเว็บเฟรมเวิร์ก สำหรับพัฒนาเกมฟื้นฟูและแดช
บอร์ดเชิงโต้ตอบ โดยเครื่องมือทั้งหมดถูกออกแบบให้
รองรับการใช้งานผ่านอุปกรณ์พื้นฐานและเว็บแคม
มาตรฐาน เพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้
ในบริบทการฟื้นฟูทางไกล

3.3 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และแหล่งข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินระบบแบ่งออกเป็น 2
ส่วน ได้แก่ 1) ชุดข้อมูลจำลองสำหรับทดสอบระบบ

ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และ 2) กลุ่ม
ผู้เชี่ยวชาญ

1) ชุดข้อมูลจำลองสำหรับทดสอบใช้ชุดข้อมูล
ทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษา เพื่อทดสอบ
การวิเคราะห์ของแดชบอร์ดระบบปัญญาประดิษฐ์
แบบผสมผสาน โดยกำหนดการกระจายของคลาส
อย่างสมดุล ได้แก่ กลุ่มการเคลื่อนไหวปกติ 50 กรณี
และกลุ่มการเคลื่อนไหวผิดปกติที่ต้องเฝ้าระวัง
50 กรณี ข้อมูลแต่ละกรณีศึกษาประกอบด้วยตัวแปร
ด้านการเคลื่อนไหว เช่น รูปแบบการใช้งานมือ ความ
สมมาตรของการเคลื่อนไหว เวลาในการตอบสนอง
และค่าคะแนนจากกิจกรรมภายในระบบ ในการศึกษา
นี้ ใช้การจำแนกประเภทข้อมูลกรณีที่มีลักษณะความ
ผิดปกติ หรือความเสี่ยงที่ควรได้รับการแจ้งเตือน ส่วน
ความผิดพลาดแบบไม่แจ้งเตือน (False Negative)
กับกรณีที่ระบบพลาดการตรวจจับการจำแนก
ประเภทข้อมูล และรายงานออกมาว่าเป็นปกติ ซึ่งถือ
เป็นความคลาดเคลื่อนที่มีนัยสำคัญต่อความปลอดภัย
ของระบบ

2) กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ใช้วิธีเลือกแบบเจาะจง
จำนวน 9 ท่าน จาก 3 สาขา ได้แก่ ด้านเทคโนโลยี
สารสนเทศ ด้านสื่อประสม และด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู
หรือด้านกิจกรรมบำบัด เพื่อประเมินสถาปัตยกรรม
ระบบ ความเหมาะสมของกิจกรรมบำบัด ความเข้าใจ
ได้ของแดชบอร์ด และประโยชน์เชิงคลินิกของต้นแบบ

3.4 กระบวนการทดสอบและเครื่องมือประเมินผล

การประเมินระบบประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

1) การทดสอบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์ก
เกอร์ ใช้ประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบ
ติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ โดย
บันทึกอัตราการสูญเสียเฟรม (Frame Drop Rate)
ความแม่นยำเชิงพื้นที่ (Spatial Accuracy) ความหน่วง

บทความวิจัย (Research Article)

ของการตอบสนอง (Latency) และอัตราเฟรม (Frame Rate) เพื่อพิจารณาความต่อเนื่องของการแสดงผล และความเหมาะสมของการโต้ตอบแบบเรียลไทม์

2) การตรวจสอบความถูกต้องของเกมเชิงโต้ตอบ เป็นการประเมินความสอดคล้องของกลไกการโต้ตอบในเกมกับหลักการฟื้นฟูเชิงหน้าที่ ผ่านการทดลองใช้งานระบบในสถานการณ์จำลองและการรับรองโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟูและกิจกรรมบำบัด

3) การทดสอบความน่าเชื่อถือของปัญญาประดิษฐ์ ใช้ชุดข้อมูลจำลอง 100 กรณีเพื่อสร้างตารางความสับสน (Confusion Matrix) และประเมินค่าความแม่นยำ ความเที่ยง ความไว และอัตราการพลาดตรวจจับในกลุ่มการจำแนกประเภทข้อมูลโดยให้ความสำคัญกับการลดความผิดพลาดแบบไม่แจ้งเตือน

4) การประเมินระบบแบบฮิวริสติก เป็นการประเมินการใช้งานระบบโดยรวมผ่านการสาธิตระบบ การสัมภาษณ์เชิงลึก และแบบประเมินจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อรวบรวมข้อเสนอแนะด้านการออกแบบ การใช้งาน และประโยชน์ต่อการติดตามและตัดสินใจในทางคลินิก

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลเชิงปริมาณ ใช้สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบและความสามารถของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานโดยรายงานค่าจากอัตราการสูญเสียเฟรม ความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ อัตราเฟรม ความหน่วงของการตอบสนอง และตารางความสับสน ได้แก่ ความเชื่อมั่น ความถูกต้อง ความไว และ F1-Score รวมทั้งช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตัวชี้วัดหลัก และวิเคราะห์ข้อมูลประเมินการใช้งานต้นแบบด้วยสถิติเชิงพรรณนา เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2) ข้อมูลเชิงคุณภาพ ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เนื้อหาตาม 4 ขั้นตอน ได้แก่ การถอดความ การลงรหัส การจัดกลุ่มประเด็น และการสรุปผลเชิงตารางตามรูปแบบที่กำหนดใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบสามเส้า (Investigator Triangulation) และกำหนดให้ค่าความสอดคล้องของผู้ลงรหัสไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ก่อนสรุปผลร่วมกัน

4. ผลการดำเนินการศึกษา

การประเมินประสิทธิภาพของระบบฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน ได้ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาของเครื่องมือวิจัย (IOC = 0.67–1.00) โดยผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ 3 มิติหลัก ได้แก่ สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบ ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ความแม่นยำของสถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และการประเมินความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

4.1 สมรรถนะเชิงวิศวกรรมเทคโนโลยีความจริงเสริม

ผลการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามการเคลื่อนไหวในสภาพแวดล้อมจำลอง 3 รูปแบบ พบว่าระบบมีความเสถียรในระดับดี โดยมีอัตราการสูญเสียเฟรม เฉลี่ยร้อยละ 5.36 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 4.8–5.9) และมีความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ เท่ากับ 10.51 พิกเซล (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 9.8–11.2 พิกเซล) แม้ในสถานะที่มีการบดบังหรือแสงน้อย ระบบยังสามารถรักษาอัตราเฟรมในการแสดงผลได้ที่ 49.6–58.4 FPS และมี

บทความวิจัย (Research Article)

ความหน่วงของระบบอยู่ที่ 45.2–68.7 มิลลิวินาที (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 42.1–70.3 มิลลิวินาที) เมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบกับแนวทางที่ใช้อุปกรณ์สวมใส่ ระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ มีข้อได้เปรียบด้านความสะดวกสบาย และลดการสวมใส่อุปกรณ์ขณะที่สมรรถนะด้านการตอบสนองยังอยู่ในระดับที่สนับสนุนการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ได้ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบนี้ยังเป็นการเปรียบเทียบเชิงอ้างอิงจากวรรณกรรม และยังไม่ได้เป็นการทดสอบแบบคู่ขนานกับอุปกรณ์มาตรฐานภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ดังนั้นจึงควรตีความว่าเป็นข้อมูลเชิงศักยภาพ มากกว่าข้อสรุปเชิงยืนยันว่าระบบสามารถทดแทนอุปกรณ์สวมใส่ได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้แดชบอร์ดยังสามารถประมวลผลและสังเคราะห์รายงานทางคลินิกได้ภายใน 1.85 วินาที ซึ่งสะท้อนว่าระบบมีศักยภาพในการประมวลผลข้อมูลและส่งกลับผลลัพธ์ในเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบโต้ตอบ

4.2 ความแม่นยำของสถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

ผลการทดสอบแดชบอร์ด ด้วยชุดข้อมูลทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษาพบว่าสถาปัตยกรรมแบบผสมผสานระหว่างระบบอิงกฎและโมเดลภาษาขนาดใหญ่ มีค่าความแม่นยำ ร้อยละ 92.00 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 88.5–95.5) ค่าความเที่ยง ร้อยละ 93.33 ค่าความไว ร้อยละ 89.36 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 84.2–94.5) และค่า F1-Score ร้อยละ 91.30

ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานสามารถจำแนกกรณีที่มีความผิดปกติได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะค่าความไวที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบมีแนวโน้มการตรวจจับกรณีที่ต้องเฝ้าระวังในสัดส่วนที่ผิดพลาดค่อนข้างต่ำ

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ในส่วนนี้มาจากข้อมูลจำลอง ไม่ใช่ข้อมูลจากผู้ป่วยจริง ดังนั้นจึงยังไม่ควรสรุปโดยตรงถึงประสิทธิภาพเชิงคลินิกในสถานการณ์ใช้งานจริง แต่สามารถใช้เป็นหลักฐานเชิงต้นแบบที่สนับสนุนศักยภาพการใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานในการเฝ้าระวัง และสรุปผลข้อมูลเบื้องต้นได้

4.3 การประเมินและการรับรองระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

การประเมินจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญแบบ สหวิทยาการ 9 ท่าน ได้แก่ ด้านวิศวกรรมซอฟต์แวร์และปัญญาประดิษฐ์ ด้านเทคโนโลยีเกมสื่อประสม และด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู ให้ผลลัพธ์เชิงบวกในระดับสูง โดยด้านสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ มีความเหมาะสมระดับมากที่สุด (Mean = 4.75, S.D. = 0.46) และด้านความสอดคล้องเชิงหน้าที่ของเกมมีความเหมาะสมระดับมากที่สุด (Mean = 4.59, S.D. = 0.49)

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าแนวคิดการใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในแง่ของการลดความเสี่ยงจากการให้คำตอบที่ผิดของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และทำให้โครงสร้างการรายงานผลสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้มากขึ้น ขณะเดียวกันกลไกของซีเรียสเกมและรูปแบบการโต้ตอบในระบบยังมีความสอดคล้องกับการเคลื่อนไหวเชิงหน้าที่ของผู้ใช้ในระดับที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบริบทฟื้นฟู

แม้ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญจะสนับสนุนศักยภาพของระบบอย่างชัดเจน แต่ข้อสรุปในฐานะการประเมินเชิงความเหมาะสมของต้นแบบ ไม่ใช่ข้อมูลการยืนยันผลลัพธ์ทางคลินิกโดยตรง ทั้งนี้ผู้เชี่ยวชาญยังเสนอว่าควรมีการปรับปรุงการจัดการระบบเบื้องหลัง และการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ให้เหมาะสมยิ่งขึ้นกับบริบทของผู้สูงอายุในระยะต่อไป

บทความวิจัย (Research Article)

ซึ่งสามารถสรุปภาพรวมผลสัมฤทธิ์ของระบบและตัวชี้วัดทางสถิติที่พัฒนาขึ้นเพื่อการศึกษาวิจัย

เมื่อพิจารณาผลการประเมินโดยรวม พบว่าเครื่องมือวิจัยมีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 แสดงว่าเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในด้านสมรรถนะของระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์มีเสถียรภาพในระดับที่ดี โดยมีอัตราการสูญเสียเฟรมเฉลี่ยร้อยละ 5.36 และมีความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่เท่ากับ 10.51 พิกเซล ขณะที่อัตราเฟรมต่อวินาทีอยู่ในช่วง 49.6–58.4 และความหน่วงของระบบอยู่ในช่วง 45.2–68.7 มิลลิวินาที ซึ่งสะท้อนว่าระบบสามารถตอบสนองได้ในระดับที่เหมาะสมต่อการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ สำหรับความแม่นยำของสถาปัตยกรรม พบว่าระบบมีค่าความแม่นยำ ร้อยละ 92.00 ซึ่งสะท้อนความถูกต้องโดยรวมของการจำแนกผลลัพธ์ ค่าความเที่ยงตรง ร้อยละ 93.33 แสดงว่าการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบมีความถูกต้องสูง ขณะที่ค่าความไวร้อยละ 89.36 สะท้อนว่าระบบสามารถตรวจจับกรณีที่เกิดผิดปกติจริงได้ในสัดส่วนสูง และค่า F1-Score ร้อยละ 91.30 บ่งชี้ว่าระบบมีความสมดุลที่ดีระหว่างความถูกต้องของการแจ้งเตือนและความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ

ในด้านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าด้านสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์และปัญญาประดิษฐ์มีค่าเฉลี่ย 4.75 และด้านความสอดคล้องทางการแพทย์และซีเรียสเกมมีค่าเฉลี่ย 4.59 ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุดทั้งสองด้าน แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญมองว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงการประยุกต์ใช้ในบริบทการฟื้นฟูสมรรถภาพ

โดยสรุประบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นใน 3 ด้าน ได้แก่ 1) สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์อยู่ในระดับที่รองรับการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ 2) ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานให้ผลการจำแนกข้อมูลจำลองในระดับที่น่าพอใจ และมีความไวสูงซึ่งเหมาะต่อบทบาทการเฝ้าระวัง และ 3) ผู้เชี่ยวชาญประเมินว่าระบบมีความเหมาะสมในระดับสูงทั้งด้านโครงสร้างระบบและความสอดคล้องเชิงฟังก์ชัน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ทั้งหมดนี้ยังอยู่ภายใต้ขอบเขตของการประเมินต้นแบบในสภาพแวดล้อมจำลองและการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจึงควรมีการศึกษาต่อผู้ป่วยจริงในอนาคต

5. สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง แสดงให้เห็นศักยภาพของการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแนวคิดซีเรียสเกมในระบบต้นแบบเดียว โดยผลการประเมินชี้ว่าระบบสามารถรองรับการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ในระดับที่น่าพอใจ และมีคุณสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานผ่านอุปกรณ์พื้นฐาน

ในด้านสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ระบบสามารถรักษาอัตราเฟรม และความหน่วงได้ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบโต้ตอบ ซึ่งสะท้อนว่าการใช้มีเดียไปป์ และโครงสร้างประมวลผลที่ค่อนข้างเบาช่วยให้ระบบสามารถทำงานผ่านกล้องเว็บแคมทั่วไปได้โดยไม่เกิดความหน่วงมากเกินไป เมื่อพิจารณาในเชิงการประยุกต์ใช้ จุดเด่นของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ คือ การลดภาระการสวมใส่อุปกรณ์และความยุ่งยากในการติดตั้ง อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปว่าระบบสามารถทดแทนอุปกรณ์สวมใส่อุปกรณ์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากยังไม่มีทดสอบเปรียบเทียบแบบคู่ขนาน

บทความวิจัย (Research Article)

ในด้านการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ให้ผลลัพธ์ในระดับที่น่าพอใจจากชุดข้อมูลจำลอง โดยค่าความไวที่อยู่ในระดับสูงสนับสนุนว่าระบบมีศักยภาพต่อการลดการพลาดตรวจจับกรณีที่ควรเฝ้าระวัง เหตุผลสำคัญคือการใช้ชุดกฎเกณฑ์ และตรรกะเป็นกลไกคัดกรองเชิงตรรกะก่อนส่งต่อให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ สังเคราะห์ผล ช่วยลดความเสี่ยงจากการให้คำอธิบายที่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลเชิงตัวเลข และทำให้ผลลัพธ์สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้มากกว่าการใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว

ในด้านการออกแบบเชิงฟังก์ชัน การประเมินจากผู้เชี่ยวชาญสะท้อนว่าระบบมีความเหมาะสมทั้งในส่วนของการสร้างซอฟต์แวร์ และการออกแบบกลไกเกมพื้นฟูภายใต้กรอบการออกแบบซีเรียสเกมร่วมกับการตอบสนองเชิงโต้ตอบ สามารถช่วยเพิ่มแรงจูงใจ และส่งเสริมการฝึกซ้ำได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบความถูกต้องโดยผู้เชี่ยวชาญยังไม่ใช้ข้อมูลเชิงผลลัพธ์จากผู้ป่วยจริง

จุดเด่นของการพัฒนาระบบเน้นการบูรณาการซึ่งเชื่อมการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ การวิเคราะห์ด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และการนำเสนอผ่านแดชบอร์ดไว้ในแพลตฟอร์มเดียว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยทางคลินิกในระยะยาว

5.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

สำหรับการพัฒนาระบบในครั้งนี้พบว่า ค่าความแม่นยำและค่าความเร็วของแดชบอร์ด ได้มาจากการทดสอบด้วยข้อมูลทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษา แม้ระบบจะสามารถแยกแยะความผิดปกติได้ดี แต่ยังไม่ได้ถูกนำไปประเมินผลเชิงปริมาณกับพฤติกรรมเคลื่อนไหวที่ซับซ้อนของผู้ป่วยจริง ซึ่งประสิทธิภาพของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของกล้องเว็บแคม และสภาพแวดล้อมของผู้ใช้งาน หากใช้งานในห้องที่มีแสง

สว่างไม่เพียงพอ ย้อนแสง หรือมีสิ่งของบดบังบริเวณฉากหลัง อาจทำให้อัตราการสูญเสียเฟรมเพิ่มขึ้นและความแม่นยำลดลง

งานวิจัยนี้ยังขาดการทดสอบเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกับอุปกรณ์มาตรฐาน เช่น การจับการเคลื่อนไหว หรือเซนเซอร์แบบสวมใส่ จึงยังไม่สามารถสรุปเชิงยืนยันได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพเทียบเท่าอุปกรณ์มาตรฐาน

ผลการประเมินในบทความนี้อยู่ในระดับต้นแบบ โดยอาศัยข้อมูลจำลอง และการรับรองจากผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก ดังนั้นจึงยังไม่ควรสรุปถึงประสิทธิภาพเชิงคลินิกโดยตรง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ควรนำระบบไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยจริงในระยะเวลานานขึ้น และใช้รูปแบบการวิจัยที่มีเครื่องมือประเมินมาตรฐานทางคลินิก เช่น แบบประเมินความบกพร่องของระบบประสาท (Fugl-Meyer Assessment) และแบบประเมินการทรงตัวขณะทำกิจกรรม (Berg Balance Scale) เพื่อยืนยันผลลัพธ์อย่างเป็นระบบควรทดสอบเปรียบเทียบกับแนวทางมาตรฐาน เช่น เซนเซอร์แบบสวมใส่ หรือการตรวจจับการเคลื่อนไหว เพื่อยืนยันข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

ดังนั้นควรต่อยอดกลไกซีเรียสเกมและแดชบอร์ดให้รองรับกลุ่มผู้ป่วยทางระบบประสาทอื่น เช่น โรคพาร์กินสัน หรือภาวะสมองเสื่อม รวมถึงพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของบุคลากรทางการแพทย์

บทความวิจัย (Research Article)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Moldoveanu et al., “Gamified virtual reality in post-stroke neurorehabilitation: A systematic review,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 7, Art. no. 1737482, 2026, doi: 10.3389/frvir.2026.1737482.
- [2] C. Lugaresi et al., “MediaPipe: A framework for building perception pipelines,” *arXiv preprint arXiv:1906.08172*, 2019, doi: 10.48550/arXiv.1906.08172.
- [3] S. Rasetto et al., “ReHAb Playground: A DL-based framework for game-based hand rehabilitation,” *Future Internet*, vol. 17, no. 11, Art. no. 522, 2025, doi: 10.3390/fi17110522.
- [4] F. Jiang et al., “Artificial intelligence in healthcare: Past, present and future,” *Stroke and Vascular Neurology*, vol. 2, no. 4, pp. 230-243, 2017, doi: 10.1136/svn-2017-000101.
- [5] World Health Organization, *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2001.
- [6] R. Zou et al., “MIND: Empowering mental health clinicians with multimodal data insights through a narrative dashboard,” in *Proc. CHI Conf. Human Factors in Computing Systems (CHI)*, 2026, doi: 10.1145/3772318.3790529.
- [7] J. A. Kleim and T. A. Jones, “Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage,” *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, vol. 51, no. 1, pp. 225-239, 2008, doi: 10.1044/1092-4388(2008/018).
- [8] C. M. Meira Jr. and M. Massa, “Genetic and environmental influences on perceptual-motor abilities,” *Psychology*, vol. 8, pp. 1669-1678, 2017, doi: 10.4236/psych.2017.811110.
- [9] A. Diamond, “Executive functions,” *Annual Review of Psychology*, vol. 64, pp. 135-168, 2013, doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750.
- [10] E. Weissblueth and Y. Nissim, “The contribution of virtual reality to social and emotional learning in pre-service teachers,” *Creative Education*, vol. 9, pp. 1551-1564, 2018, doi:10.4236/ce.2018.910114.
- [11] F. Zhang et al., “MediaPipe Hands: On-device real-time hand tracking,” *arXiv preprint arXiv:2006.10214*, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2006.10214.
- [12] S. Karthik, S. Bhaggiaraj, E. S. Soji, L. S. Deve, S. S. Priscila, and S. S. Rajest, “Real-time hand gesture recognition for stroke rehabilitation using deep learning approach,” *AVE Trends in Intelligent Computing Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 157-172, 2024.
- [13] A. Faux-Nightingale et al., “Exploring stroke survivors’ and physiotherapists’

บทความวิจัย (Research Article)

- perspectives of the potential for markerless motion capture technology in community rehabilitation,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 21, Art. no. 168, 2024, doi: 10.1186/s12984-024-01467-x.
- [14] P. Y. Hsu et al., “The evolution of augmented reality to augment physical therapy: A scoping review,” *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, vol. 11, Art. no. 20556683241252092, 2024, doi: 10.1177/20556683241252092.
- [15] K. Mitgutsch and N. Alvarado, “Purposeful by design?: A serious game design assessment framework,” in *Proc. International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG)*, 2012, pp. 121–128, doi: 10.1145/2282338.2282364.
- [16] E. L. Deci and R. M. Ryan, “The ‘what’ and ‘why’ of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior,” *Psychological Inquiry*, vol. 11, no. 4, pp. 227–268, 2000, doi: 10.1207/S15327965PLI1104_01.
- [17] K. Hayase, “Concerns involving the self: What is the real target of anxiety, regret, or worry, when things do not go right for you? More evidence from Sweden and the United States,” *Psychology*, vol. 9, pp. 1475–1515, 2018, doi: 10.4236/psych.2018.96090.
- [18] B. F. Skinner, *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. New York, NY, USA: Appleton-Century, 1938.
- [19] E. H. Shortliffe, *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*. New York, NY, USA: Elsevier, 1976.
- [20] A. J. Thirunavukarasu et al., “Large language models in medicine,” *Nature Medicine*, vol. 29, no. 8, pp. 1930–1940, 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02448-8.
- [21] X. Meng et al., “The application of large language models in medicine: A scoping review,” *iScience*, vol. 27, Art. no. 109713, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.109713.
- [22] J. Long, “Large language model guided tree-of-thought,” *arXiv preprint arXiv:2305.08291*, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2305.08291.
- [23] A. Y. Bischof et al., “A collection of components to design clinical dashboards incorporating patient-reported outcome measures: Qualitative study,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 26, Art. no. e55267, 2024, doi: 10.2196/55267.
- [24] D. J. Hekman et al., “Dashboarding to monitor machine-learning-based clinical decision support interventions,” *Applied Clinical Informatics*, vol. 15, pp. 164–169, 2024, doi: 10.1055/a-2219-5175.
- [25] P. Dullabh et al., “Advancing patient-centered clinical decision support in

บทความวิจัย (Research Article)

today's health care ecosystem: Key
themes from the Clinical Decision
Support Innovation Collaborative's 2023
Annual Meeting," *JAMIA Open*, vol. 7, no.
4, Art. no. ooae109, 2024, doi:
10.1093/jamiaopen/ooae109.

บทความวิจัย (Research Article)

รูปแบบการเขียนบทความวิจัยในวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ชื่อ นามสกุล^{1,*}, ชื่อ นามสกุล² และ ชื่อ นามสกุล³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

³ สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: narong.wi@ksu.ac.th โทรศัพท์: 085-002xxxx

(รับบทความ: 23 กุมภาพันธ์ 2568; แก้ไขบทความ: 2 พฤษภาคม 2568; ตอรับบทความ: 26 พฤษภาคม 2568)

บทคัดย่อ

คำแนะนำที่แสดงในเอกสารฉบับนี้สำหรับผู้ที่มีความประสงค์ส่งบทความฉบับเต็ม (Full Paper) โดยคณะกรรมการฯ ได้กำหนดรูปแบบและหลักเกณฑ์ในการพิมพ์บทความให้แก่ผู้เขียนได้ปฏิบัติตาม ทั้งนี้เพื่อให้ทุกบทความที่จะตีพิมพ์ในวารสารอยู่ในรูปแบบมาตรฐานเดียวกัน และในการพิมพ์บทความสามารถใช้เอกสารฉบับนี้ในลักษณะของ Template ได้ทันที แต่หากผู้เขียนใช้โปรแกรมอื่นโปรดปฏิบัติตามรายละเอียดที่แนะนำในเอกสาร สำหรับบทคัดย่อจำกัดคำไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: ระบุคำหลัก 3 – 5 คำ เพื่อใช้สำหรับการทำดัชนีบทความ เช่น คำสำคัญแรก คำสำคัญที่สอง คำสำคัญที่สาม คำสำคัญที่สี่ คำสำคัญที่ห้า

บทความวิจัย (Research Article)

Written Form, the Research Article in the Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

Full Name^{1,*}, Full Name² and Full Name³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

³ Department of Logistics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: narong.wi@ksu.ac.th, Tel: 085-002xxxx

(Received: February 23, 2025; Revised: May 2, 2025; Accepted: May 6, 2025)

Abstract

The instructions below are specially directed at the author(s) who wish to submit a manuscript to the JEIT journal. The manuscript must be clear, and its format must be consistent with the other papers included in the journal. Use this document as a template if you are using Microsoft Word. Otherwise, use this document as an instruction set. Thank you for your contribution. We are looking forward to receiving your papers. The abstract is limited, not exceeding 300 words.

Keywords: Keywords should be between three and five words, separated by commas.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นคู่มือในการเขียนบทความฉบับเต็มสำหรับผู้ที่มีความประสงค์ในการส่งบทความตีพิมพ์ในวารสารฯ โดยจะกำหนดทั้งรูปแบบและแนวทางในการพิมพ์บทความ โดยภายหลังจากที่บทความได้รับการพิจารณาจากกรรมการพิจารณาบทความให้ตีพิมพ์ในวารสารฯ ดังกล่าวผู้ส่งบทความจะต้องจัดเตรียมและส่งความฉบับสมบูรณ์ในลักษณะของ “Camera – ready” ซึ่งคณะกรรมการฯ จะไม่มีการดำเนินการแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น

ดังนั้น เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพและเพื่อให้การจัดทำเอกสารเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผู้ที่ส่งบทความควรพิมพ์บทความตามรูปแบบและแนวทางที่กำหนดจากทางวารสารอย่างเคร่งครัด

2. รูปแบบของบทความฉบับเต็ม

บทความฉบับเต็มควรประกอบด้วย ชื่อบทความ ชื่อและที่อยู่ของผู้เขียนบทความ บทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ คำสำคัญทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เนื้อหาโดยสมบูรณ์ของบทความ (บทนำ ทบทวนวรรณกรรม วิธีการวิจัย ผลการวิจัย และสรุปผลการการวิจัย) กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง โดยในส่วนของเนื้อหาของความสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลัก หัวข้อย่อย และอาจแบ่งถึงหัวข้อย่อยลงมา ทั้งนี้ **ตัวอักษรใช้อักษรแบบ TH SarabunPSK ขนาด 16pt** และแต่ละหน้าไม่ต้องการเติมหมายเลขหน้า

2.1 ขนาดและการตั้งค่าหน้ากระดาษ

ขนาดของกระดาษที่ใช้ในการพิมพ์กำหนดให้มีขนาดมาตรฐาน A4 (8¼ × 11¼ นิ้ว) โดยส่วนที่นอกเหนือจากส่วนของชื่อบทความ ชื่อและที่อยู่ของผู้เขียนบทความ บทคัดย่อ และคำสำคัญ ให้พิมพ์แบบ 2. คอลัมน์ (Column) โดยกำหนดการตั้งค่าหน้ากระดาษดังนี้

ริมขอบกระดาษด้านบน	30 มม.
ริมขอบกระดาษด้านล่าง	20 มม.

ริมขอบกระดาษด้านซ้าย	25 มม.
ริมขอบกระดาษด้านขวา	20 มม.
ความกว้างของคอลัมน์	78 มม.
ระยะห่างระหว่างคอลัมน์	9 มม.

ความยาวโดยรวมของบทความควรอยู่ในช่วง 7-12 หน้ากระดาษ แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ

2.2. ชื่อบทความและรายละเอียดของผู้เขียน

ในการพิมพ์ **ชื่อบทความ** ให้พิมพ์ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรตัวหนาขนาด 18pt โดยแต่ละคำในชื่อภาษาอังกฤษให้พิมพ์อักษรตัวแรกเป็นตัวพิมพ์ใหญ่ (ยกเว้น คำนำหน้านาม: articles, คำสันธาน: coordinate conjunctions และ คำบุพบท: prepositions นอกจากคำเหล่านี้จะถูกใช้นำชื่อเรื่อง)

สำหรับชื่อ **ผู้เขียนบทความ** ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 15pt ในขณะที่ส่วนของ **ที่อยู่** ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 12pt โดยที่อยู่ควรประกอบไปด้วยชื่อของหน่วยงาน เลขที่อยู่ เขต/ตำบล แขวง/อำเภอ จังหวัด และรหัสไปรษณีย์ ซึ่งสามารถระบุที่อยู่ของผู้เขียนแต่ละคนโดยอาศัยตัวเลขที่พิมพ์แบบยกสูง (Superscript) ไว้หลังชื่อของผู้เขียนนั้น นอกจากนั้นควรมีการระบุชื่อผู้ติดต่อ (Corresponding author) โดยการพิมพ์เครื่องหมายดอกจันทน์ (*) ไว้หลังชื่อ และสำหรับบรรทัดสุดท้ายของรายละเอียดผู้เขียนบทความให้ระบุ e-mail, เบอร์โทรศัพท์ และเบอร์โทรสารของผู้ติดต่อ ทั้งชื่อบทความและรายละเอียดของผู้เขียนให้พิมพ์ไว้กลางหน้ากระดาษ

2.3 กรณียกบทความภาษาอังกฤษ

ผู้เขียนบทความเป็นภาษาอังกฤษ จะใช้รูปแบบและขนาดของตัวอักษร และรูปแบบของบทความแบบเดียวกันกับบทความที่เขียนเป็นภาษาไทย แต่ไม่ให้มีภาษาไทยแทรกอยู่ในบทความนั้นๆ ยกเว้นชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และบทคัดย่อ

บทความวิจัย (Research Article)

3. บทคัดย่อและคำสำคัญ

การพิมพ์บทคัดย่อและคำสำคัญให้พิมพ์ตัวอักษรทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้อักษรแบบ TH SarabunPSK ขนาด 15pt และจัดรูปแบบให้ชิดขอบทั้ง 2 ด้าน (Justified) โดยให้พิมพ์ชื่อหัวข้อ “บทคัดย่อ” และ “Abstract” เป็นแบบตัวหนาและตัวเอียง

4. เนื้อหาของบทความ

ส่วนของเนื้อหาบทความต้องพิมพ์ในลักษณะแบบ 2 คอลัมน์ตามขนาดและระยะห่างที่กำหนด ตัวอักษรที่ใช้ในเนื้อหาให้มีขนาด 16pt และมีการจัดรูปแบบการพิมพ์ให้ชิดขอบทั้ง 2 ด้าน (Justified) รวมถึงไม่ต้องมีการเว้นบรรทัดระหว่างย่อหน้า (ไม่ต้องเคาะบรรทัดเมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่) สำหรับรูปแบบตัวอักษรที่ใช้ในการพิมพ์หัวข้อกำหนดดังนี้

4.1 หัวข้อหลัก

กำหนดให้ใช้ตัวอักษรตัวหนาขนาด 16pt ในการพิมพ์หัวข้อหลัก และให้พิมพ์ชิดริมซ้ายของคอลัมน์ หัวข้อหลักควรประกอบด้วย บทนำ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย หรือผลการทดลอง อภิปรายและสรุปผล กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง

4.2 หัวข้อย่อยและหัวข้อย่อยรองลงมา

กำหนดให้ใช้ตัวอักษรตัวหนาขนาด 16pt ในการพิมพ์หัวข้อย่อยและหัวข้อย่อยรองลงมา และให้พิมพ์ชิดริมซ้ายของคอลัมน์

4.3 หลักเกณฑ์ในการเขียนหน่วยในบทความ

เพื่อให้บทความวิชาการมีความชัดเจนและเป็นมาตรฐาน ควรปฏิบัติตามหลักเกณฑ์การเขียนหน่วยดังนี้:

4.3.1. การเขียนหน่วยเต็มและสัญลักษณ์ในครั้งแรก

- ในครั้งแรกที่ใช้หน่วย ให้เขียนชื่อหน่วยเต็มพร้อมกับสัญลักษณ์ในวงเล็บ

- ตัวอย่าง: "วัตถุที่มีความเร่งเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)"

4.3.2. การใช้สัญลักษณ์ในครั้งต่อไป

- หลังจากที่ได้อธิบายหน่วยเต็มในครั้งแรกแล้วสามารถใช้เฉพาะสัญลักษณ์ในครั้งต่อไป

- ตัวอย่าง: "ในกรณีถัดไป ความเร่งที่วัดได้คือ $10 m/s^2$ "

4.3.3. การเขียนหน่วยที่มีการยกกำลัง

- ใช้สัญลักษณ์มาตรฐานของหน่วยนั้น ๆ และเขียนการยกกำลังในรูปแบบที่ถูกต้อง

- ตัวอย่าง: ตารางเมตร (m^2), ลูกบาศก์เมตร (m^3), เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)

4.3.4. การจัดทำตารางสัญลักษณ์

- ถ้าหน่วยที่ใช้มีจำนวนมากหรือซับซ้อน สามารถจัดทำตารางอธิบายสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทความในส่วนภาคผนวกหรือในบทนำ

- ตัวอย่าง:

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
m^2	ตารางเมตร
m^3	ลูกบาศก์เมตร
m/s^2	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
J	จูล (หน่วยของพลังงาน)

4.3.5. การรักษาความสม่ำเสมอ

- ใช้สัญลักษณ์ที่ได้อธิบายไว้ในบทความให้สม่ำเสมอ ไม่ควรเปลี่ยนรูปแบบการเขียนในส่วนต่างๆ ของบทความ

5. รูปภาพ ตาราง และสมการ

5.1 รูปภาพและตาราง

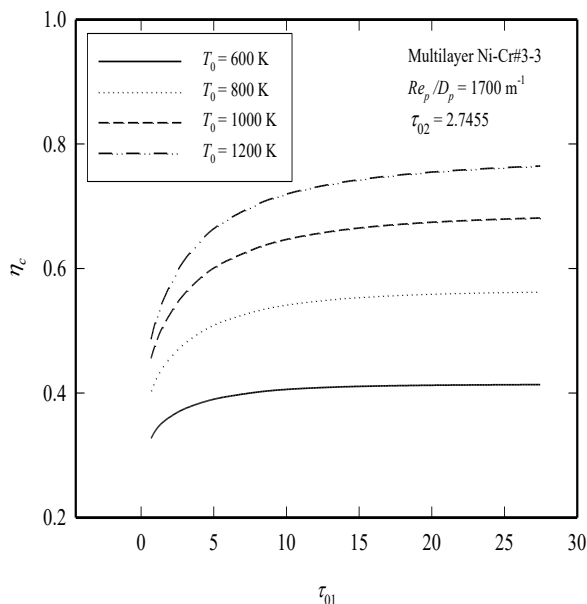
การนำเสนอรูปภาพและตารางสามารถนำเสนอต่อจากข้อความที่กล่าวถึงหรืออาจนำเสนอภายหลังจากจบหัวข้อหรือนำเสนอในหน้าใหม่ ขนาดของรูปภาพและตารางไม่ควรเกินกรอบของคอลัมน์ แต่หากรูปภาพและตารางมีขนาดใหญ่สามารถวางรูป

บทความวิจัย (Research Article)

และตารางให้ครอบคลุมพื้นที่ของทั้ง 2 คอลัมน์ได้ แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกินกรอบของการตั้งค่าน้ำกระดาษที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.1

ทั้งรูปภาพและตารางจะต้องมีคำอธิบายโดยคำอธิบายของรูปภาพให้พิมพ์ไว้ใต้รูปภาพและอยู่กึ่งกลางคอลัมน์หรือกึ่งกลางหน้ากระดาษ หากรูปภาพใดถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนให้มีการระบุคำอธิบายของแต่ละส่วนโดยอาศัยตัวอักษรภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษในวงเล็บเรียงตามลำดับเช่น (ก) และ (ข) หรือ (a) และ (b) ส่วนคำอธิบายตารางให้พิมพ์ไว้เหนือตารางและชิดริมซ้ายของคอลัมน์หรือชิดริมซ้ายของกระดาษ โดยการเรียงลำดับรูปภาพและตารางให้แยกการเรียงลำดับออกจากกัน

การระบุหมายเลขลำดับรูปภาพและตารางในบทความให้ระบุเป็นรูปที่ และตารางที่ เช่น รูปที่ 1, รูปที่ 1 – 3, ตารางที่ 1, ตารางที่ 1 – 3 เป็นต้น



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการแปลงรังสีความร้อนกับความหนาเชิงแสงของชั้นวัสดุพูน

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำมันปิโตรเลียมในแต่ละภาคเศรษฐกิจ ๆ ของประเทศไทย (หน่วย: ล้านลิตร)

ภาคเศรษฐกิจ	ปี	
	2545	2546
1. เกษตรกรรม	3,509	3,827
2. เหมืองแร่	19	26
3. อุตสาหกรรม	4,821	4,937
4. ไฟฟ้า	703	757
5. การก่อสร้าง	169	172
6. ที่พักอาศัยและการพาณิชย์	2,729	2,792
7. คมนาคมขนส่ง	23,980	25,475
Total	35,930	37,986

5.2 สมการ

การเขียนสมการ มีหลักการใช้ font ดังนี้

ตัวแปร ใช้ตัวอักษรเอียง (p, β, v)

ข้อความ ใช้ตัวอักษรตรง (Constant)

ตัวเลข ใช้ตัวอักษรตรง (12345)

สมการให้เขียนไว้กึ่งกลางคอลัมน์และมีการระบุลำดับของสมการโดยใช้ตัวเลขที่พิมพ์อยู่ในวงเล็บ เช่น (1), (2) เป็นต้น

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{Constant} \quad (2)$$

เมื่อ p คือ ความดัน, N/m²

v คือ ความเร็ว, m/s

z คือ ระดับความสูง, m

6. กิตติกรรมประกาศ

หากต้องการเขียนกิตติกรรมประกาศเพื่อขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเขียนได้ โดยให้อยู่หลังเนื้อหาหลักของบทความและก่อนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย (Research Article)

7. การเขียนเอกสารอ้างอิง

ให้รวบรวมรายชื่อสิ่งพิมพ์และวัสดุความรู้ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นหลักฐานหรือเอกสารอ้างอิงในการศึกษาไว้ท้ายบทความ โดยการอ้างอิงในบทความให้อ้างอิงโดยใช้รูปแบบ IEEE โดยการอ้างอิงอาศัยตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม เช่น [1], [1,2] หรือ [1-3] เป็นต้น เรียงลำดับตามการอ้างอิงก่อนหลัง โดยสำหรับรูปแบบการพิมพ์รายชื่อเอกสารอ้างอิงจากแหล่งต่างๆ กำหนดให้มีรูปแบบดังต่อไปนี้

การเขียนชื่อผู้แต่ง

ภาษาไทย

- ชื่อผู้แต่งจะเขียนชื่อเต็มตามด้วยนามสกุล เช่น ปรียญา อภัยภักดิ์
- หากมีผู้แต่งหลายคนให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) เพื่อคั่นระหว่างชื่อผู้แต่งแต่ละคน และใช้คำว่า "และ" ก่อนชื่อผู้แต่งคนสุดท้าย
- **หากมีผู้แต่งเกิน 3 คน ให้เขียนชื่อผู้แต่งคนแรกตามด้วย “และคณะ”**

ภาษาอังกฤษ

- ชื่อผู้แต่งจะเขียนชื่อย่อของชื่อแรก (First Initial) ตามด้วยนามสกุล (Last Name) เช่น W. K. Chen
- หากมีผู้แต่งหลายคนให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) เพื่อคั่นระหว่างชื่อผู้แต่งแต่ละคน และใช้คำว่า "and" ก่อนชื่อผู้แต่งคนสุดท้าย
- หากมีผู้แต่งเกิน 3 คน ให้เขียนชื่อผู้แต่งคนแรกตามด้วย “et al.”

การอ้างอิงหนังสือ (Book)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [1] เกียรติขจร โฆมานะสิน, *LEAN: วิธีแห่งการสร้างคุณค่าสู่องค์กรที่เป็นเลิศ*, กรุงเทพฯ: สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, 2550.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [2] W. K. Chen, *Linear Networks and Systems*, 2nd ed., Belmont, CA: Wadsworth, 1993.

การอ้างอิงหนังสือที่มีบรรณาธิการ (Edited Book)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อ, บรรณาธิการ, *ชื่อหนังสือ*, ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [3] ธเนศ วงศ์ศรี, บรรณาธิการ, *การพัฒนาเทคโนโลยีในยุคดิจิทัล*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์, 2563.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อบรรณาธิการ, ed., *ชื่อหนังสือ*, ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [4] J. Smith, ed., *Advances in Digital Technology*, 2nd ed., New York, NY: Tech Press, 2020.

การอ้างอิงบทจากหนังสือที่มีบรรณาธิการ (Chapter from an Edited Book)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบท," ใน *ชื่อหนังสือ*, ชื่อบรรณาธิการ, บรรณาธิการ, ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์, หน้า เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

- [5] วิชาญ บุญมา, "การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในธุรกิจ," ใน *การพัฒนาเทคโนโลยีในยุคดิจิทัล*,

บทความวิจัย (Research Article)

ธนศ วงศ์ศรี, บรรณาธิการ, กรุงเทพฯ:
สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์, 2563, หน้า 45-67.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบท," in *ชื่อหนังสือ*,
ชื่อบรรณาธิการ, ed., ฉบับที่พิมพ์, สถานที่พิมพ์:
สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์, pp. เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

- [6] W. Brown, "Information Technology in Business," in *Advances in Digital Technology*, J. Smith, ed., New York, NY: Tech Press, 2020, pp. 45-67.

การอ้างอิงหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-book)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, [ออนไลน์].
Available: URL. [เข้าถึงเมื่อ: วันที่ เดือน ปี].

ตัวอย่าง:

- [7] สมชาย แสงทอง, *การพัฒนาซอฟต์แวร์*, [ออนไลน์]. Available: <https://www.example.com/ebook>. [เข้าถึงเมื่อ: 5 มีนาคม 2567].

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, [online].
Available: URL. [Accessed: วันที่ เดือน ปี].

ตัวอย่าง:

- [8] J. Doe, *Software Development*, [online]. Available: <https://www.example.com/ebook>. [Accessed: 5 March 2024].

การอ้างอิงบทความในวารสาร (Journal Article)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบทความ," *ชื่อวารสาร*,
ปีที่, ฉบับที่, หน้า เลขหน้า, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [9] วรชมล ลีลาพิทักษ์, "การศึกษาการจัดการระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศจากขยะมูลฝอยชุมชนแบบเปียกและแห้ง: กรณีศึกษาเทศบาลนครราชสีรา และเทศบาลตำบลสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ศรีวิชัย*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 15-23, ม.ค. – มิ.ย. 2560.

- [10] อธิพงศ์ วรพล, สมชาย พัฒนพงศ์, และกาญจนา ศรีสวัสดิ์, "การศึกษาการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในโรงเรียน," *วารสารวิทยาการ* *จัดการ*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 45-59, 2564.

- [11] ธนพล ศรีสุข และคณะ, "การพัฒนาโมเดลการทำนายความต้องการสินค้า," *วารสารการจัดการโลจิสติกส์*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, หน้า 89-102, 2565.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบทความ," *ชื่อวารสาร*,
เล่มที่, ฉบับที่, pp. เลขหน้า, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

- [12] J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-11, no. 1, pp. 34-39, Jan. 1959.

- [13] L. Brown, K. Williams, and M. Davis, "Innovations in renewable energy technologies," *Journal of Energy Research*, vol. 8, no. 4, pp. 200-215, 2021.

- [14] M. Johnson, et al., "Data mining techniques in financial forecasting," *Journal of Financial Analysis*, vol. 7, no. 4, pp. 143-158, 2022.

การอ้างอิงเอกสารในงานประชุม (Conference Paper)

ภาษาไทย

บทความวิจัย (Research Article)

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบทความ," ใน *ชื่อการประชุม*, สถานที่จัดงาน, ปีที่จัดงาน, หน้า เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

[15] ปองพล รูปทอง และ แก้วใจ อาภรณ์พิศาล, "ระบบจัดการข้อมูลซื้อขายอุปกรณ์ทางการเกษตร กรณีศึกษาร้านยางเจริญการค้า," ใน *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิชาการระดับชาติ UTCC Academic Day ครั้งที่ 2*, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2561, หน้า 1796-1809.

[16] จิรพงษ์ แซ่ลิ้ม และคณะ, "การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่," ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 10*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2564, หน้า 101-109.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อบทความ," in *ชื่อการประชุม*, สถานที่จัดงาน, ปีที่จัดงาน, หน้า.

ตัวอย่าง:

[17] W.-K. Chen, "A mixed-signal approach for improving the accuracy of an RF power amplifier," in *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Orlando, FL, 1999, pp. 353-356.

[18] A. Thompson, et al., "Smart health monitoring systems using IoT," in *Proceedings of the 2023 International Conference on Smart Health (ICSH)*, Boston, MA, 2023, pp. 89-97

การอ้างอิงวิทยานิพนธ์ (Thesis/Dissertation)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อวิทยานิพนธ์," ระดับวิทยานิพนธ์, ภาควิชา, มหาวิทยาลัย, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

[19] ปริญญ์ อภัยภักดิ์ และ ณัฐพล เสาวพงษ์, "ระบบบริหารจัดการร้านอาหาร," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยสยาม, 2562.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อวิทยานิพนธ์," ระดับวิทยานิพนธ์, ภาควิชา, มหาวิทยาลัย, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

[20] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.

การอ้างอิงรายงานทางเทคนิค (Technical Report)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อรายงาน," ชื่อรายงาน, หมายเลขรายงาน, ชื่อองค์กร, สถานที่, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

[21] วราภรณ์ สุขใจ, "การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการบริหารจัดการองค์กร," *รายงานการศึกษา*, หมายเลขรายงาน 5678, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ขอนแก่น, 2563.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้แต่ง, "ชื่อรายงาน," ชื่อรายงาน, หมายเลขรายงาน, ชื่อองค์กร, สถานที่, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

[22] Jane Doe, "Application of Information Technology in Organizational Management," *Study Report*, Report No. 5678, Rajamangala University of Technology, Khon Kaen, 2020.

การอ้างอิงมาตรฐาน (Standard)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อมาตรฐาน, หมายเลขมาตรฐาน, ปีที่พิมพ์.

บทความวิจัย (Research Article)

ตัวอย่าง:

[23] สมาคมวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย, มาตรฐานไฟฟ้ากำลัง, 2563.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อมาตรฐาน, หมายเลขมาตรฐาน, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

[24] IEEE Criteria for Class IE Electric Systems, IEEE Standard 308, 1969.

การอ้างอิงเว็บไซต์ (Website)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้เขียน/ชื่อองค์กร, "ชื่อเรื่อง," [ออนไลน์]. Available: URL. [เข้าถึงเมื่อ: วันที่ เดือน ปี].

ตัวอย่าง:

[25] ทวีรัตน์ นวลช่วย, "ระบบฐานข้อมูล (Database System)," [ออนไลน์]. Available: <https://sites.google.com/site/thaidatabas e2/>. [เข้าถึงเมื่อ: 2 กุมภาพันธ์ 2566].

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อผู้เขียน/ชื่อองค์กร, "ชื่อเรื่อง," [online]. Available: URL. [Accessed: วันที่ เดือน ปี].

ตัวอย่าง:

[26] The Editors of Encyclopaedia Britannica, "Wavelength," [online]. Available: <https://www.britannica.com/science/wavelength>. [Accessed: 30 August 2023].

การใส่เลข DOI (Digital Object Identifier)

หากมีการใส่เลข DOI ในบทความสามารถทำได้ โดยเพิ่ม DOI ที่ส่วนท้ายของการอ้างอิงบทความ

รูปแบบ: ส่วนท้ายการอ้างอิงบทความตามด้วย DOI: หมายเลข DOI.

ตัวอย่าง:

[27] J. U. Duncombe, et al., "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-11, no. 1, pp. 34-39, Jan. 1959. DOI: 10.1109/TED.1959.15368.

[28] T. Harris, J. Kim, and L. Nguyen, "An evaluation of IoT security protocols," in *Proceedings of the 2022 International Conference on Internet of Things (ICIoT)*, New York, NY, 2022, pp. 123-130. DOI: 10.1109/ICIoT.2022.12345.

8. การตรวจสอบก่อนการส่งบทความ

ผู้ที่ส่งบทความต้องส่งทั้งในรูปแบบของ MS Word และ PDF ขอความกรุณาผู้เขียนบทความทำการทดสอบ พิมพ์บทความจากไฟล์ที่ท่านจะทำการจัดส่งพร้อมตรวจเช็คความสมบูรณ์ของไฟล์ ความสมบูรณ์ของเนื้อหา รวมถึงความชัดเจนของตัวหนังสือ รูปภาพ ตาราง และสมการก่อนที่จะส่งไฟล์ให้กับผู้จัดงาน ทั้งนี้จะถือว่าความสมบูรณ์ของบทความเป็นความรับผิดชอบโดยตรงของผู้เขียนบทความและกรรมการขอสงวนสิทธิ์ในการไม่ตอบรับบทความที่ไม่สมบูรณ์

บทความวิจัย (Research Article)

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
(Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University)

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

(กรุณาส่งมาพร้อมกับบทความ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

1. ข้อมูลทั่วไป

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....ตำแหน่งทางวิชาการ (ถ้ามี)
ที่อยู่ติดต่อ เลขที่.....หมู่ที่.....ซอย.....ถนน.....แขวง/ตำบล.....
เขต/อำเภอ..... จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....
โทรศัพท์มือถือ..... email.....

2. ข้อมูลบทความต้นฉบับ

2.1 ประเภทของบทความ

☐ บทความวิชาการ (Academic Article) ☐ บทความวิจัย (Research Article)

2.2 ภาษาของบทความ

☐ ภาษาไทย (Thai Language) ☐ ภาษาอังกฤษ (English Language)

2.3 ชื่อบทความ

ชื่อบทความภาษาไทย

Title (in English)

.....
.....
.....
.....

บทความวิจัย (Research Article)

2.4 รายชื่อและที่อยู่ของเจ้าของบทความ

ตำแหน่งทางวิชาการ	ชื่อสกุลภาษาไทย	ชื่อสกุลภาษาอังกฤษ	หน่วยงาน	เบอร์ติดต่อ	อีเมล

(สามารถเพิ่มได้ตามจำนวนของผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัย)

3. คำรับรอง

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า:

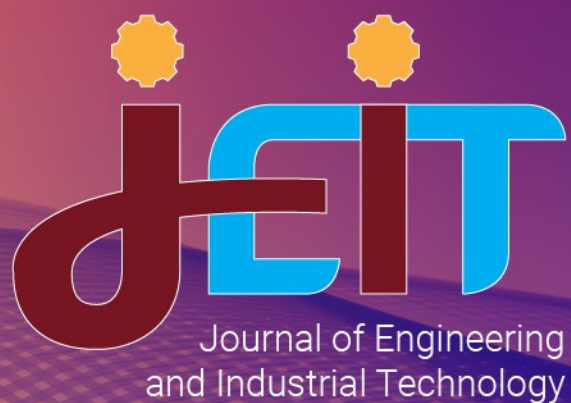
- บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง
- บทความนี้ไม่เคยลงพิมพ์ที่ไหนมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น หรือในงานประชุมวิชาการ ไม่ว่าจะเป็นบทคัดย่อ หรือฉบับเต็ม
- ในกรณีที่บทความนี้เป็นวิทยานิพนธ์/การค้นคว้าอิสระ หรือผลงานระดับบัณฑิตศึกษา ได้รับการอนุญาตจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
- ข้าพเจ้าได้รับทราบและจะดำเนินงานตามกรอบจริยธรรมการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการ (Publication Ethics) อย่างเคร่งครัด การละเมิดลิขสิทธิ์เป็นความรับผิดชอบของข้าพเจ้า และข้าพเจ้ายอมรับ ข้อกำหนดและนโยบายการพิจารณาตีพิมพ์บทความของวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์เรียบร้อยแล้ว

ลงนาม.....

(.....)

...../...../.....

ผู้ส่งบทความ



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร

"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

โทร: 088-574-2199 Email: jeit@ksu.ac.th