

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

ISSN 3027-6519 (Print) ISSN 3027-6527 (Online)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2569

Vol.16 No.1 January-April 2026

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา ผลงานวิชาการ ตลอดจนองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ของอาจารย์ นักวิชาการอิสระ และวิศวกรทั่วไป และเป็นสื่อกลางระหว่างมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตกับสังคมภายนอกในการเผยแพร่ความรู้ต่างๆ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เป็นฐานความรู้จะนำไปสู่การพัฒนาด้านวิศวกรรมต่อไป โดยมีกำหนดตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

วัตถุประสงค์

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจะเน้นเป็นบทความวิจัย (Research Article) หรืออาจจะเป็นบทความวิชาการ (Academic Article) ได้ เช่น บทความปริทัศน์ (Review Article) บทความทางเทคนิค (Technical Article) บทความเชิงปฏิบัติในวิชาชีพ (Professional Practice) เป็นต้น หรือในบางครั้งจะเป็นบทความรับเชิญ (Invited Article) หรือบทความอื่นๆ (Other Article) ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการ โดยทุกบทความควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- การยอมรับการตีพิมพ์หรือปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการจะไม่รับผิดชอบในเนื้อหาหรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง ความถูกต้องของเนื้อหา การใช้ภาษาและรูปแบบการเขียนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่จะเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

บรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-----------------	---

ผู้ช่วยบรรณาธิการ:

อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคตารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรณัฐ เสี่ยงมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ รศ.ศันสนีย์ สุภาภา ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรภูมิ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี อ.จิรวัฒน์ ปลั่งไหม	สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ชัยพล ผ่องพลีศาล อ.ปัญญา บุรพัฒน์ศิริ	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ปิยพัชร เพ็ชรจันทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัย
เกษมบัณฑิต

อ.สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร

คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช

บทบรรณาธิการ

เริ่มต้นปี พ.ศ. 2569 นี้ เป็นช่วงที่งานวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ทั่วโลกก้าวเข้าสู่ระยะของการบูรณาการเทคโนโลยีอัจฉริยะเข้ากับระบบวิศวกรรมอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในงานออกแบบและควบคุมระบบ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอัจฉริยะเพื่อรองรับสังคมยุคใหม่ ตลอดจนการพัฒนาาระบบพลังงานสะอาด และเทคโนโลยีลดคาร์บอน เพื่อสนับสนุนเป้าหมายความยั่งยืนของประเทศ ภายใต้บริบทดังกล่าว งานวิจัยทางวิศวกรรมปัจจุบันมิได้มุ่งเน้นเพียงประสิทธิภาพเชิงเทคนิคเท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับความมั่นคงปลอดภัย ความยืดหยุ่นของระบบ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21

วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ยังคงมุ่งมั่นในการเป็นเวทีเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมที่มีคุณภาพ และส่งเสริมให้นักวิจัยไทยสามารถพัฒนาผลงานสู่ระดับชาติได้อย่างต่อเนื่อง กองบรรณาธิการให้ความสำคัญกับการยกระดับมาตรฐานการพิจารณาบทความ ความทันสมัยของประเด็นวิจัย และการเชื่อมโยงผลงานวิชาการสู่การใช้ประโยชน์จริงในภาคอุตสาหกรรมและสังคม ในนามของกองบรรณาธิการ ขอขอบคุณผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนวารสารอย่างเข้มแข็ง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นอีกหนึ่งกลไกสำคัญในการผลักดันงานวิจัยด้านวิศวกรรมของประเทศให้ก้าวทันต่อการเปลี่ยนแปลงของโลกในอนาคต

รองศาสตราจารย์ วิทยุญ แสงสินกสิกิจ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-RIB ANGLE: กรณีศึกษาบริษัทผลิตอุปกรณ์เครื่องมือทางการเกษตร A

THE PROCESS IMPROVEMENT OF U-RIB ANGLE PARTS: A CASE STUDY OF AGRICULTURAL EQUIPMENT MANUFACTURING COMPANY A

1

ชยันต์ คำบรรลือ ไกรสร วงษ์ปู้ กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาฬ อุกฤษฏี ธนทรัพย์ทวี และ
ธัญญ์นรี พรไพโรเพชร

การอบแห้งขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ-สุญญากาศ: ผลของกำลังไมโครเวฟและความดันที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

MICROWAVE-VACUUM DRYING OF TURMERIC (*Curcuma longa* L.): EFFECTS OF MICROWAVE POWER AND PRESSURE ON DRYING KINETICS

17

ณัฐภัค อิ่มเอิบ จิรวัดณ์ สิตรานนท์ และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตติ์

ปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในงานก่อสร้างภาคเอกชน: กรณีศึกษาแรงงานพม่าและกัมพูชา

FACTORS DETERMINING CONTRACTORS' DECISIONS TO EMPLOY MIGRANT WORKERS IN THE PRIVATE CONSTRUCTION SECTOR: A CASE OF MYANMAR AND CAMBODIAN LABOR

41

เทวกุล จันท์ขามป้อม และ วรธนะ ประภาภรณ์

การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อลดเวลาในกระบวนการกัดยางกันกระแทกคัปปลิง
DEVELOPMENT OF JIG AND FIXTURE TO REDUCE TIME IN RUBBER COUPLING MILLING

60

ณัฐภัทร กาญจนเรืองรอง และ ศรีนยา ประทีปชนะชัย

THERMAL PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC-THERMAL SOLAR DRYER INTEGRATED WITH HIGH-POROSITY STEEL MESH

83

Eakpoom Boonthum, Prapanphong Somsila, Athiwut Sanpoka, Apinunt Namkhet and Umphisak Teeboonma

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

อิทธิพลของความแข็งแรงเดิมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและระดับการทดแทนต่อ
กำลังอัด การต้านทานการซัดสี และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

INFLUENCE OF PARENT CONCRETE STRENGTH AND REPLACEMENT
LEVELS OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE ON COMPRESSIVE 104
STRENGTH, ABRASION RESISTANCE, AND CHLORIDE ION PENETRATION
OF CONCRETE

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ นันทชัย ชูศิลป์ จุฑามาศ ลักษณะกิจ และ เปรมณัช ชุมพร้อม

REPRESENTATIVE-DAY DISCRETE-EVENT SIMULATION TO REDUCE
OVERTIME IN OUTBOUND WAREHOUSE DOCKING 129

Pachira Na nan, Thammawit Prasert and Peerapong Pakawanich

**การปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-RIB ANGLE:
กรณีศึกษาบริษัทผลิตอุปกรณ์เครื่องมือทางการเกษตร A
THE PROCESS IMPROVEMENT OF U-RIB ANGLE PARTS: A CASE
STUDY OF AGRICULTURAL EQUIPMENT MANUFACTURING COMPANY A**

ชยันต์ คำบรรลือ¹ ไกรสร วงษ์ปู้^{2*} กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล³ อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี⁴
และ ธันยน์รี พรไพเราะพร⁵
^{1,2*,3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองจังหวัดตาก 63000,
¹Chayaii1976@gmail.com, ^{2*}Wongpoo.k@gmail.com, ³Kibuya@gmail.com,
⁴t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
⁵อาจารย์, สาขาสังคมและมนุษย์ คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองจังหวัดตาก 63000,
Pordee28@windowslive.com

Chayan Khambunlue¹, Kraisorn Wongpoo^{2*}, Kitti Wirotrarranaphaphisan³,
Ukrit Thanasuptawee⁴ and Thannari Pronpriech⁵
^{1,2*,3,4}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology
Lanna Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak,
Thailand 63000,
¹Chayaii1976@gmail.com, ^{2*}Wongpoo.k@gmail.com, ³Kibuya@gmail.com,
⁴t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
⁵Lecturer, Department of Society and Humanities, Rajamangala University of Technology
Lanna Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak,
Thailand 63000, Pordee28@windowslive.com

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน โดย
ประยุกต์ใช้หลักการศึกษางาน (Work Study) แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause Effect Diagram)
ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหา จากการศึกษาขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle

มีขั้นตอน คือ 1) นำเหล็กแผ่นตัดขึ้นรูปเบื้องต้นด้วยการตัดด้วยเลเซอร์ (Laser cutting) 2) ทำการตัดขึ้นรูปเป็นรูปตัว U bend 3) เขียนร่างแบบชิ้นงานโดยใช้ fixture layout 4) ทำการตัดเศษส่วนเกินตามแบบที่ร่างแบบด้วย fixture layout และ 5) นำไปเชื่อมประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ซึ่งจากขั้นตอนกระบวนการผลิตมีขั้นตอนการผลิตมากเกินไป คือ กระบวนการ ร่างแบบ ชิ้นงานด้วย fixture layout และการตัดเศษส่วนเกิน ซึ่งมีผลจากกระบวนการตัดขึ้นงานด้วยเลเซอร์ มีขนาดไม่ถูกต้อง ร่วมกับกระบวนการตัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีคุณภาพ จากปัญหาดังกล่าวหลักการ ECRS จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นออก ด้วยหลักการเขียนแบบแผ่นคลี่หาขนาดชิ้นงาน (Blank shape) ก่อนการตัดขึ้นงานด้วยเลเซอร์ที่ถูกต้อง และการปรับปรุงกระบวนการตัดขึ้นรูป ด้วยการออกแบบพิมพ์ตัดขึ้นรูป Rolla V Die ผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตสามารถลดขั้นตอนผลิต จากเดิม 13 ขั้นตอน ลดลงเหลือ 8 ขั้นตอน และสามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตลงจากเดิม 7 นาที 11 วินาที ลดลงเหลือ 5 นาที 35 วินาที ลดลง 1 นาที 36 วินาที คิดเป็นเวลาในกระบวนการผลิตที่ลดลงร้อยละ 22.25 และสามารถลดการสูญเสียเศษวัสดุลง 0.23 กิโลกรัมต่อชิ้น คิดเป็นการสูญเสียที่ลดลงร้อยละ 5.64 คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเศษวัสดุที่ลดลง 1,380 บาทต่อเดือน (กำลังการผลิต 200 ชิ้นต่อเดือน)

คำสำคัญ: แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปโลหะ, ผานพรวน, การปรับปรุงกระบวนการผลิต

ABSTRACT

The research aims to improve the production process of U-Rib angle parts of hallow discs by applied the principles of work-study, Cause and Effect Diagram in data collection, and problem analysis. From the study production process of U-Rib angle parts, the steps are: 1) cutting steel sheets and forming them initially with laser cutting, 2) bending them into a U shape, 3) drafting the workpiece design using a fixture layout, 4) cutting excess materials according to the layout using the fixture layout, and 5) welding assembly them with other parts. From these production steps, there are excessive processes, namely the workpiece layout with the fixture layout and cutting excess materials, which results from the incorrect size by the laser cutting process along with low-quality bending. Addressing these issues, the ECRS principle was applied to eliminate unnecessary work steps. This was achieved by first utilizing sheet metal drawing principles to determine the correct blank size prior to laser cutting, and subsequently by improving the bending process through the design and implementation of a Rolla V Die. As a result of improving the production process, the number of production steps was reduced from 13 steps to 8 steps, and the production time decreased from 7 minutes 11 seconds to 5 minutes 35 seconds, a reduction of 1 minute 36

seconds. This represents a 22.25% reduction in production process time and a reduction in scrap materials loss by 0.23 kg/piece or 5.64 percent loss reduction, Costing around 1,380 bath/month at a capacity of 200 pieces/month.

KEYWORDS: Bending Die, Hallow disc, Production process improvement

1. บทนำ

บริษัทผลิตอุปกรณ์ เครื่องมือทางการเกษตร A เป็นผู้ผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น ผานพรวน ผานบุก ผานไถ และเครื่องตัดหญ้า จำหน่ายให้กับเกษตรกรและบริษัท คูโบต้า บริษัท ยันมาร์ จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นในสถานประกอบการพบว่า ในการผลิตผานพรวนนั้น การผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ก่อนที่จะนำไปประกอบกับชุดผานพรวนนั้น มีขั้นตอนการผลิตโดย 1) นำเหล็กแผ่นตัดขึ้นรูปเบื้องต้นด้วยการตัดด้วยเลเซอร์ (Laser cutting) 2) ทำการตัดขึ้นรูปเป็นรูปตัว U bend 3) เขียนร่างแบบชิ้นงานโดยใช้ fixture layout 4) ทำการตัดเศษส่วนเกินตามแบบที่ร่างแบบด้วย fixture layout และ 5) นำไปเชื่อมประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ต่อไปจากขั้นตอนการผลิตดังกล่าวมีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอนเกินความจำเป็น กระบวนการตัดขึ้นรูปชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ เนื่องจากแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปไม่ได้มาตรฐาน ชิ้นงานเกิดการดีดกลับ (Spring back) ขนาดชิ้นงานที่ได้ไม่ได้ขนาดมุมที่ต้องการ (ขั้นตอนที่ 2) อีกทั้งยังเกิดการสูญเสียจากการตัดเศษวัสดุส่วนเกิน (ขั้นตอนที่ 4) ซึ่งมีผลจากขั้นตอนที่ 1 การตัดขึ้นงานด้วยเลเซอร์ ตามแบบชิ้นงานที่ตัดมีการเผื่อขนาด ไม่มีการหาขนาด blank size และตัดขนาดชิ้นงานที่ต้องการ (ขั้นตอนที่ 1) ก่อนการนำไปตัดขึ้นรูป ส่งผลให้ใช้เวลาในการผลิตสูงเกินความจำเป็น



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ก) ผานพรวน และ ข) ชิ้นส่วน U-Rib Angle

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์หลักการทางวิศวกรรม หลักการศึกษา งาน (Work study) หลักการ ECRS และออกแบบแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูป U bend เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดเวลา และลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle

2. วัตถุประสงค์

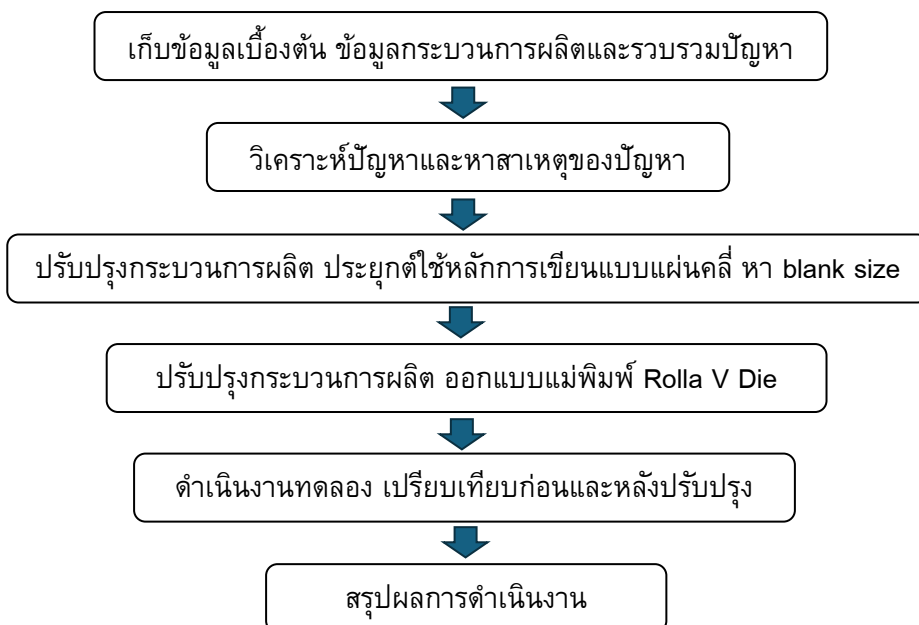
- 2.1 เพื่อปรับปรุงและลดเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน
- 2.2 เพื่อลดต้นทุนการสูญเสียวัสดุในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 เก็บข้อมูลกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน บริษัทผลิตอุปกรณ์เครื่องมือทางการเกษตร A
- 3.2 ปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle เพื่อลดเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิต

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

4.1 เก็บข้อมูลและรวบรวมปัญหา

4.1.1 ข้อมูลเบื้องต้น

บริษัท A เป็นบริษัทผลิตอุปกรณ์ ชิ้นส่วนเครื่องมือทางการเกษตร เช่น ผานพรวน ผานไถ รถตัดหญ้า และอื่น ๆ ซึ่งผานพรวนเป็นอุปกรณ์การเกษตรตัวหนึ่ง ซึ่งมียอดกำลังการผลิตประมาณ 200 ตัวต่อเดือน ซึ่งจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ชิ้นส่วน U-Rib angle หมายเลข 1 เป็นอีกชิ้นส่วนหนึ่งซึ่งเกิดการสูญเสียในกระบวนการผลิต มีขั้นตอนการผลิตมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น



รูปที่ 3 ผานพรวน และชิ้นส่วน U-Rib angle หมายเลข 1

4.1.2 ศึกษาเก็บข้อมูลกระบวนการผลิต

ในการเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผู้วิจัยประยุกต์ใช้หลักการศึกษางาน (Work study) และแผนภูมิการไหล (Flow Process Chart) [1] ดังเช่น Manowong and Klomjit [2] ใช้แผนภูมิ flow process chart ในการเก็บข้อมูลเพื่อปรับปรุงขั้นตอนการป้อนข้อมูลและควบคุมการผลิตแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ สามารถขั้นตอนลดจำนวนรายการบรรจุภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ จาก 40 รายการลดลงเหลือ 2 รายการ เช่นเดียวกับ Liewtrakul and Iniam [3] ประยุกต์ใช้แผนภูมิการไหล flow process chart พัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิตขวดน้ำปาลาไรเซิล เพิ่มอัตราผลิตภาพรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 36 ซึ่งผู้วิจัยเก็บข้อมูลเวลาในกระบวนการผลิต ขั้นตอนกระบวนการผลิต และเครื่องมือ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต เพื่อให้ทราบถึงเวลาในการผลิตและขั้นตอนการผลิต ชิ้นส่วน U-Rib angle ดังรายละเอียด ดังตารางที่ 1 และแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์เพื่อลดปรับเปลี่ยน หรือรวมขั้นตอนกระบวนการผลิตที่ไม่จำเป็นต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle

แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U Rib angle ผานพรวน (Operation Flow Chart)									
Process :		Summary							
ก่อนปรับปรุง		Activity			Present		Purposed		Saving
Chart Topic :		Operation				6			
กระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุด U Rib angle		Transport				5			
Location :		Delay				0			
		Inspection				0			
Charted by :		Storage				2			
นายชยันต์ คำบรรลือ		Time (min)			7.19				
	Description	Time	Distance	Symbol					Remarks
	Before Improve	(min)	(m)						
1	ห้องเก็บวัสดุ								
2	นำวัสดุส่งไปยังเครื่องตัด	0.23	5						
3	เครื่องตัดตัดชิ้นงาน	1.4							
4	ส่งไปยังเครื่องปั๊มตัดขึ้นรูป	0.25	5						
5	เครื่องทำการตัดขึ้นรูป step 1	0.32							
6	เครื่องปั๊มทำการตัดขึ้นรูป step 2	0.26							
7	ส่งไป แผนก layout ตัด	0.2	5						
8	ทำการ lay out	0.12							
9	ทำการตัดชิ้นงานเกินออก	1.02							
10	ส่งไปแผนกประกอบ	0.18	3.2						
11	ทำการเชื่อมประกอบชุด U Rib angle	3							
12	ส่งไปจัดเก็บ	0.21	4.8						
13	จัดเก็บประกอบผานพรวน								
Total		7.19	23						0



1) การตัดชิ้นงานด้วยเลเซอร์



2) ทำการตัดขึ้นรูป



3) ใช้ Fixture lay out เพื่อตัดส่วนเกิน

รูปที่ 4 ขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle



4) ใช้แก๊สตัดส่วนเกินออก

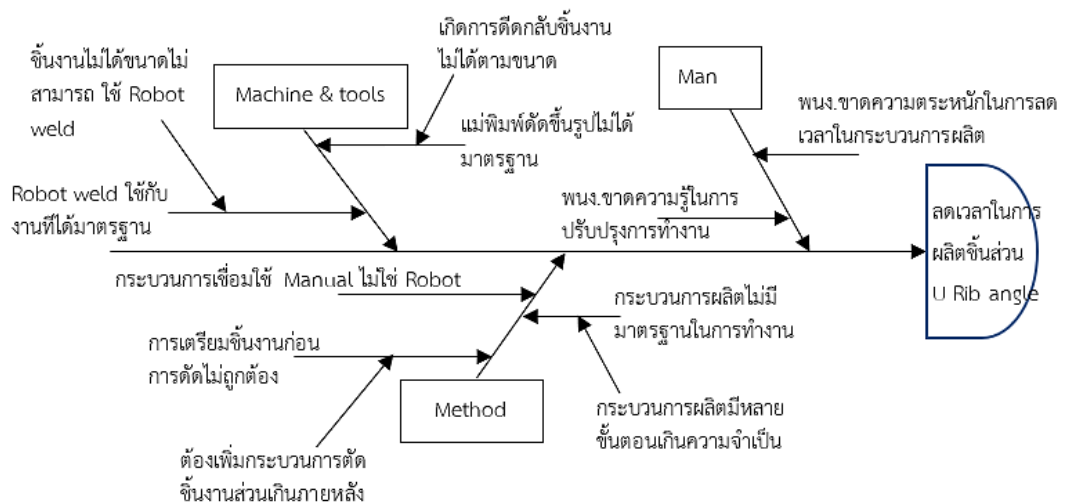


5) นำไปเชื่อมประกอบ

รูปที่ 4 ขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle (ต่อ)

4.2 วิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุของปัญหาโดยประยุกต์ใช้เครื่องมือ QC 7tools โดยใช้แผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram) [4] ดังเช่น Sirirak et al [5] ประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อปรับปรุงกระบวนการบรรจุน้ำผึ้ง โดยสามารถลดขั้นตอนการบรรจุเหลือเพียง 3 ขั้นตอน และลดเวลามาตรฐานในการบรรจุขวด คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 58.03% เช่นเดียวกับผู้วิจัยระดมสมองร่วมกับสถานประกอบการ วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและหาแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต ลดขั้นตอน ปรับเปลี่ยนขั้นตอน รวมขั้นตอนการผลิตเพื่อลดเวลาในกระบวนการผลิต



รูปที่ 5 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์วิธีการแก้ปัญหา

ปัญหา	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ปัญหา
1. คน (Man)	1. พนักงานปฏิบัติงานด้วยความเคยชิน ขาดความตระหนักในการปรับปรุงกระบวนการผลิต 2. พนักงานขาดความรู้ในการปรับปรุงการทำงาน	1. ให้ความรู้ แนะนำให้เห็นถึงความสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการผลิต
2. วิธีการทำงาน (Method)	1. กระบวนการผลิตไม่มีมาตรฐานในการทำงาน 2. การเตรียมชิ้นงานก่อนการตัดไม้ถูกต้อง 3. กระบวนการเชื่อมด้วยมือ (Manual welding) ไม่ใช้การเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ (Robot welding)	1. ปรับปรุงขั้นตอนการผลิต โดยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS (E: Eliminate) กำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น คือ ขั้นตอนการร่างแบบด้วย Fixture layout และขั้นตอนการตัดชิ้นงานเศษส่วนเกินออก 2. ประยุกต์ใช้หลักการเขียนแบบแผ่นคลี่ เพื่อตัดชิ้นงาน ด้วยเลเซอร์ตามขนาดที่ถูกต้อง กำจัดขั้นตอนการตัดชิ้นงานส่วนเกิน 3. ออกแบบ จัดสร้างแม่พิมพ์แบบ Rolla V Die ตัดชิ้นรูปที่มีคุณภาพ
3. อุปกรณ์และเครื่องจักร (Equipment and Machine)	1. การเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดได้มาตรฐาน 2. แม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปไม่ได้มาตรฐาน	1. ออกแบบ จัดสร้างแม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปแบบ Rolla V Die เพื่อให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง

4.3 การปรับปรุงกระบวนการผลิต

จากวิเคราะห์ปัญหาและหาแนวทางการแก้ไขปัญหา ผู้วิจัยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ดังเช่น Woarawichai et al [6] ใช้หลักการ ECRS ปรับปรุงกระบวนการทำงานการตอกก่อนอินเสิร์ตสำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์: กรณีศึกษาในบริษัทฉีดขึ้นรูปอลูมิเนียม โดยใช้ S (Simplify) ปรับปรุงกระบวนการตอกชิ้นงานให้ง่ายขึ้น ซึ่งสามารถลดเวลาในการผลิตลง คิดเป็น 14.75% ต่อชิ้น เช่นเดียวกับ Suwan and Ruankum [7] ใช้หลักการ ECRS ปรับปรุงกระบวนการเป่าแห้งในการผลิตกำไล สามารถลดของเสียในกระบวนการผลิตและลดเวลาในการผลิตลงร้อยละ 7.07 ซึ่ง

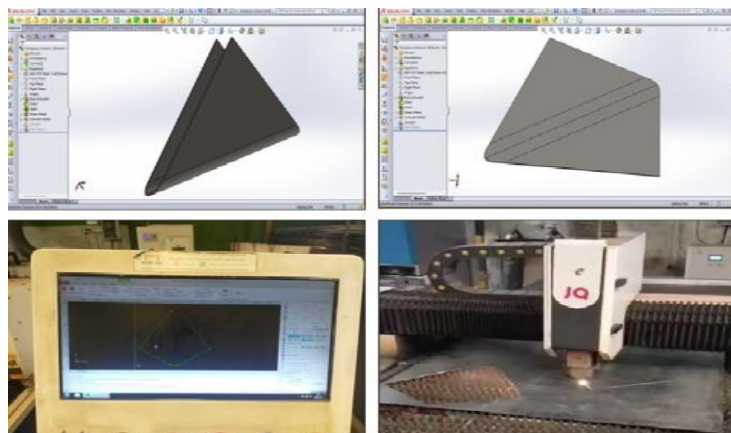
ผู้วิจัยใช้ E (Eliminate) กำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่เหมาะสมและไม่จำเป็นออก คือ ขั้นตอนการใช้ Fixture layout และตัดเศษส่วนเกินออก โดยประยุกต์ใช้หลักการเขียนแบบวิศวกรรม การเขียนแบบแผ่นคลี่หาขนาด Blank shape เพื่อหาขนาดชิ้นงานก่อนการตัดขึ้นรูปที่ถูกต้อง กำจัดขั้นตอนการร่างแบบด้วย Fixture layout และขั้นตอนการตัดเศษส่วนเกินออก และประยุกต์ใช้หลักการออกแบบแม่พิมพ์ Rolla V Die ในการขึ้นรูป U bend ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลแนวทางการแก้ไขปัญหา แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการแบบเดิมและแนวทางการแก้ไขปัญห

4.3.1 ประยุกต์ใช้หลักการเขียนแบบวิศวกรรม

การเขียนแบบแผ่นคลี่ เพื่อหาขนาดชิ้นงานก่อนการตัดที่ถูกต้อง (Blank shape) และ จัดทำ CAD file สำหรับกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์



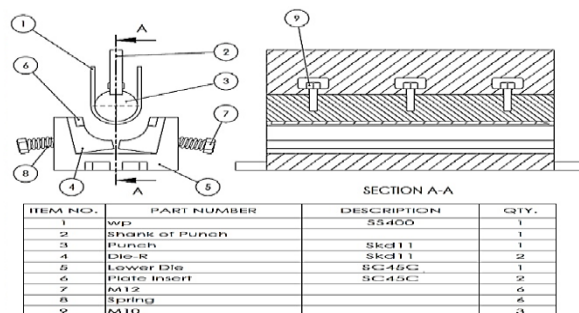
รูปที่ 7 การประยุกต์ใช้หลักการเขียนแบบวิศวกรรม การเขียนแบบแผ่นคลี่และจัดทำ CAD file สำหรับกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์

4.3.2 ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูป Rolla V Die

ในการปรับปรุงออกแบบแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปชิ้นส่วน U Rib angle นั้น ผู้วิจัยทำการปรับปรุงแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปเดิม แสดงในรูปที่ 8 (ก) ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้นด้วยกระบวนการเชื่อมประกอบ ไม่มีการออกแบบเผื่อค่าการดีดกลับ ส่งผลให้การตัดขึ้นรูปชิ้นงานเกิดการดีดกลับ มีขนาดมุมไม่เที่ยงตรง ต้องทำการตัดซ้ำหลายครั้ง และชิ้นงานที่ได้มีมุมตัดที่ได้ไม่เท่ากันทุกชิ้น ซึ่งผู้วิจัยปรับปรุงออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูป แบบ Rolla V Die แสดงในรูปที่ 8 (ข) ซึ่งสามารถตัดขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำและไม่เกิดการเสียรูป [8] อีกทั้งการออกแบบแม่พิมพ์แบบ Rolla V Die เหมาะสำหรับการตัดขึ้นรูปทรงลึก (U Deep) [9] เหมาะสำหรับการตัดขึ้นรูปชิ้นส่วน U-Rib angle เพื่อให้สามารถตัดขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างเที่ยงตรง



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ก) แบบแม่พิมพ์เดิม ข) แบบแม่พิมพ์ Rolla V Die ตัดขึ้นรูปชิ้นส่วน U-Rib angle

5. การดำเนินงาน

จากการปรับปรุงประยุกต์ใช้แม่พิมพ์ตัดขึ้นรูป แบบ Rolla V Die ทำการทดลองการตัดขึ้นรูป และทำการหาจำนวนรอบในการจัดเวลาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเก็บข้อมูลการตัดขึ้นรูปของแม่พิมพ์ตัดขึ้นรูปแบบ Rolla V Die โดยใช้ชิ้นงาน จำนวน 10 ชิ้น

ครั้งที่	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน		เวลาในการตัดขึ้นรูป X (วินาที)	X ²
	บิด เอียง เอียง	ไม่บิด เอียง เอียง		
1	-	✓	34	1156
2	-	✓	32	1024
3	-	✓	35	1225

ตารางที่ 3 ผลการเก็บข้อมูลการตัดชิ้นรูปของแม่พิมพ์ตัดชิ้นรูปแบบ Rolla V Die โดยใช้ชิ้นงาน จำนวน 10 ชิ้น (ต่อ)

ครั้งที่	การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน		เวลาในการตัดชิ้นรูป x (วินาที)	x ²
	บิต เอียง เอียง	ไม่บิต เอียง เอียง		
4	-	✓	33	1089
5	-	✓	31	961
6	-	✓	34	1156
7	-	✓	33	1089
8	-	✓	31	961
9	-	✓	29	841
10	-	✓	30	900
รวม			$\sum x = 322$	$\sum x^2 = 10402$
เวลาในการตัดชิ้นรูปเฉลี่ย			32.2	

จากสมการที่ 1 เป็นการหาค่าจำนวนรอบในการจับเวลา [10]

$$N = \left[\frac{40n}{\sum x} \sqrt{\frac{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n}{n-1}} \right]^2 \quad (1)$$

กำหนดให้ x คือ ค่าที่อ่านได้ n คือ จำนวนครั้งที่ทดลองจับเวลาเบื้องต้น และ N คือ จำนวนครั้งที่ต้องจับเวลา หรือขนาดตัวอย่าง

แทนค่าในสมการที่ 1

$$N = \left[\frac{40(10)}{322} \sqrt{\frac{10402 - (322)^2 / 10}{10-1}} \right]^2 = 5.76 \approx 6 \text{ ครั้ง}$$

จากผลการคำนวณ หาจำนวนตัวอย่างในการทดลองได้ประมาณเท่ากับ 6 ครั้ง แต่จากการทดลองได้ทำการจับเวลาเก็บข้อมูลการทดลองแล้ว 10 ครั้ง ทำให้ไม่ต้องทดลองจับเวลาเก็บข้อมูลเพิ่ม เนื่องจากข้อมูลเพียงพอตามเงื่อนไขที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$

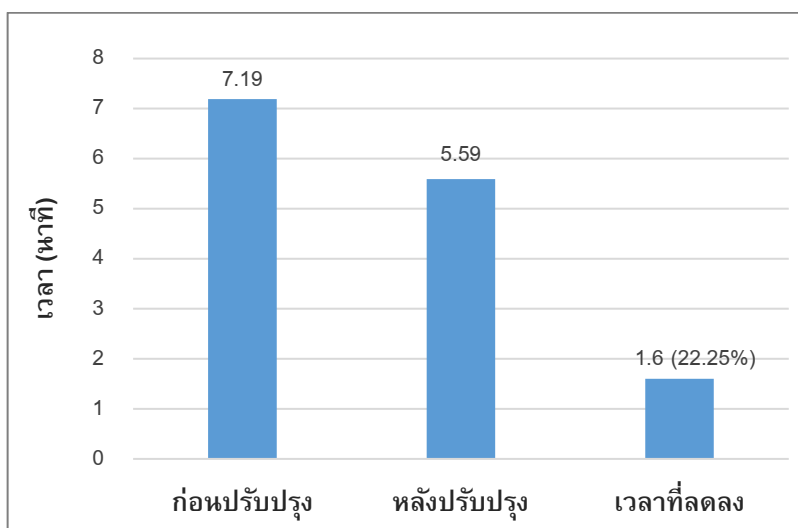
6. ผลการดำเนินงาน

จากผลการดำเนินงาน ผู้วิจัยร่วมกับบริษัทผลิตเครื่องมือ อุปกรณ์ทางการเกษตร A ปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน สามารถขั้นตอนในการผลิตจากเดิม 13 ขั้นตอน หลังปรับปรุงขั้นตอนการผลิตลดลงเหลือ 8 ขั้นตอน และสามารถลดระยะทางในการเคลื่อนที่จากเดิม 23 เมตร ลดลงเหลือ 13 เมตร และสามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตจากเดิม 7 นาที 11 วินาที ลดลงเหลือ 5 นาที 35 วินาที ลดลง 1 นาที 36 วินาที ดังแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4 และแสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 แผนภูมิกระบวนการไหลของชิ้นส่วน U-Rib angle ก่อนและหลังปรับปรุง

แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U Rib angle ผ่านพรวน (Operation Flow Chart)									
Process :		Summary							
ก่อนปรับปรุง - หลังปรับปรุง		Activity		Present		Purposed		Saving	
Chart Topic :		Operation		6		3		3	
กระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุด U Rib angle		Transport		5		4		1	
Location :		Delay		0		0		0	
		Inspection		0		0		0	
Charted by :		Storage		2		2		0	
นายชยันต์ คำบรรลือ		Time (min)		7.19		5.59		1.6	
	Description Before Improve	Time (min)	Distance (m)	Symbol			Time (min)	Distance (m)	Description Before Improve
1	ห้องเก็บวัสดุ			●	→	●			ห้องเก็บวัสดุ
2	นำวัสดุส่งไปยังเครื่องตัด	0.23	5	●	→	●	0.23	5	นำวัสดุส่งไปยังเครื่องตัด
3	เครื่องตัดตัดชิ้นงาน	1.4		●	→	●	1.4		เครื่องตัดตัดชิ้นงาน
4	ส่งไปยังเครื่องปั๊มตัดขึ้นรูป	0.25	5	●	→	●	0.25	5	ส่งไปยังเครื่องปั๊มตัดขึ้นรูป
5	เครื่องทำการตัดขึ้นรูป step 1	0.32		●	→	●	0.32		เครื่องทำการตัดขึ้นรูป
6	เครื่องปั๊มทำการตัดขึ้นรูป step 2	0.26		●	→	●	0.18	3.2	ส่งไปแผนกประกอบ
7	ส่งไป แผนก layout ตัด	0.2	5	●	→	●	3		ทำการเชื่อมประกอบ U Rib angle
8	ทำการ lay out	0.12		●	→	●	0.21	4.8	ส่งไปจัดเก็บ
9	ทำการตัดชิ้นงานเก็บออก	1.02		●	→	●			จัดเก็บประกอบผ่านพรวน
10	ส่งไปแผนกประกอบ	0.18	3.2	●	→	●			
11	ทำการเชื่อมประกอบชุด U Rib angle	3		●	→	●			
12	ส่งไปจัดเก็บ	0.21	4.8	●	→	●			
13	จัดเก็บประกอบผ่านพรวน			●	→	●			
Total		7.19	23				5.59	18	

— Before Improve - - - - After Improve



รูปที่ 9 แผนภูมิ เปรียบเทียบ เวลาในกระบวนการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

จากผลการปรับปรุงกระบวนการผลิต สามารถลดการสูญเสียจากการตัดเศษวัสดุส่วนเกินด้วยเลเซอร์ ก่อนการตัดขึ้นรูป โดยการปรับปรุงลดขั้นตอนกระบวนการใช้ Fixture layout และการตัดด้วยแก๊ส ปรับเปลี่ยนขั้นตอนการผลิตโดยประยุกต์ใช้หลักการเขียนแบบวิศวกรรม เขียนแบบแผ่นคลี่เพื่อหาขนาดชิ้นงานก่อนการตัดที่ถูกต้อง โดยไม่ต้องทำการเผื่อขนาดชิ้นงานและทำการตัดด้วยแก๊สภายหลัง ซึ่งสามารถลดการสูญเสียเศษวัสดุลง 0.23 กิโลกรัมต่อชิ้น คิดเป็นการสูญเสียที่ลดลงร้อยละ 5.65 และคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเศษวัสดุที่ลดลง 1,380 บาทต่อเดือน (กำลังการผลิต 200 ชิ้นต่อเดือน) ดังผลการวิจัย แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการผลิต

การลดการสูญเสียเศษวัสดุในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle	
น้ำหนักชิ้นงานก่อนการปรับปรุง (ชิ้นงานก่อนการตัดขึ้นรูป)	4.08 กิโลกรัม
น้ำหนักชิ้นงานหลังการปรับปรุง (ชิ้นงานก่อนการตัดขึ้นรูป)	3.85 กิโลกรัม
น้ำหนักที่ลดลง	0.23 กิโลกรัมต่อชิ้น
% การสูญเสียที่ลดลง	5.64%
ต้นทุนเศษวัสดุเหลือ ที่ลดลงต่อชิ้น (ต้นทุนวัสดุ 30 บาท/กก.)	6.9 บาทต่อชิ้น
ต้นทุนที่ลดลงต่อเดือน (กำลังการผลิต 200 ชิ้น/เดือน)	1,380 บาทต่อเดือน

7. สรุปผล

จากผลการดำเนินงานการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วน U-Rib angle ผ่านพรวน โดยประยุกต์ใช้หลักการทางวิศวกรรม สามารถลดขั้นตอนการทำงาน จากเดิม 13 ขั้นตอน ลดลงเหลือ 8 ขั้นตอน สามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตจากเดิม 7 นาที 11 วินาที ลดลงเหลือ 5 นาที 35 วินาที เวลาลดลง 1 นาที 36 วินาที คิดเป็นเวลาที่ลดลงร้อยละ 22.25

ผลการปรับปรุงขนาดชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด สามารถลดการสูญเสียจากขั้นตอนการตัดเศษส่วนเกิน ลดลง 0.23 กิโลกรัมต่อชิ้น หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 5.64 คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียที่ลดลง 1,380 บาทต่อเดือน (กำลังการผลิต 200 ชิ้นต่อเดือน) ส่งผลให้สถานประกอบการสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตได้เพิ่มขึ้น และสามารถลดต้นทุนการผลิตลดลง

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิต ลดการสูญเสียให้กับสถานประกอบการ และนำไปสู่การขยายผลในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอุปกรณ์เครื่องมือการเกษตรชิ้นส่วนอื่น ๆ ในสถานประกอบการต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภายใต้โครงการแพลตฟอร์มบริหารจัดการทรัพยากรผู้มีศักยภาพของกลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เพื่อปฏิรูปการพัฒนากำลังคนของประเทศ (บพค.2566) ประจำปีงบประมาณ 2566 และหน่วยงานวิจัยวัสดุขั้นสูง และการผลิตสมัยใหม่เพื่ออุตสาหกรรมผลิต การแพทย์และการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนเครื่องมือต่าง ๆ

References

- [1] Kanjanapanyakorn R. Industrial work study. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2009. (In Thai)
- [2] Manowong A, Klomjit P. Improving data collection and production control of packaging using the internet of things (IOT) in line with total productive maintenance (TPM) principles. Kasem Bundit Engineering Journal 2024;14(3):19-34. (In Thai).

- [3] Liewtrakul P, Iniam C. The development of the production process to increase productivity: A case study of recycled fish sauce bottles. Kasem Bundit Engineering Journal 2023;13(2):1-20. (In Thai)
- [4] Pipatpanyanugul K. Statistical quality control. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2014. (In Thai)
- [5] Sirirak W, Jaikhom N, Pinchaimoon A, Klongdee T, Sirisean S. ECRS technique using for honey filling process improvement. The Journal of Manufacturing and Management Technology 2022;1(2):11-20. (In Thai)
- [6] Woarawichai C, Jaichomphu P, Chailungkarn T, Kanchanaruangrong N. Work method improvement in plastic part packaging: a case study of motorcycle part production company. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(2):148-64. (In Thai)
- [7] Suwan S, Ruankum D. Defect reduction of bracelet in the production process using ECRS. Journal of Science and Technology Association of Private Higher Education Institutions of Thailand 2024;13(2):12-21. (In Thai)
- [8] Ameritex machine and fabrication. The advantages of Rolla V dies for sheet metal bending [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 18]. Available from: <https://ameritexllc.com/2023/07/27/the-advantages-of-rolla-v-dies-for-sheet-metal-bending>.
- [9] Metalfab papers. Rolla-V dies [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 18]. Available from: <https://www.metalfabpapers.com/rolla-v-dies-1>.
- [10] Barnes RM. Motion and time study: design and measurement of work. 7th ed. New York: John Wiley & Sons; 1980.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชยันต์ คำบรรลือ อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 Email: Chayaii1976@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement, Tools and Dies Design



ผศ.ไกรสร วงษ์ปู้ อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 Email: Wongpoo.k@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Preventive Maintenance



ผศ.กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 Email: Kibuya@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Design of Experiments



อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 Email: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Design of Experiments



ธัญญ์นรี พรไพโรเพชร อาจารย์ประจำหลักสูตรบริหารธุรกิจและ ศิลปศาสตร์ สาขาสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 Email: Pordee28@windowslive.com
งานวิจัยที่สนใจ: Cost Budget and Products Designed

Article History:

Received: April 18, 2025

Revised: December 25, 2025

Accepted: January 6, 2026

**การอบแห้งขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ-สุญญากาศ:
ผลของกำลังไมโครเวฟและความดันที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง
MICROWAVE-VACUUM DRYING OF TURMERIC (*Curcuma longa* L.):
EFFECTS OF MICROWAVE POWER AND PRESSURE ON DRYING
KINETICS**

ณัฐภัก อิมเอิบ¹ จิรวัดน์ สิตรานนท์² และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์^{3*}

¹นักศึกษา, หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีพลังงาน)

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, natthapak_im@rmutto.ac.th

^{2,3*}อาจารย์, สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม. 6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110,

²jirawat_si@rmutto.ac.th, ^{3*}kittisak_wi@rmutto.ac.th

Natthapak Im-Erb¹, Jirawat Sitranon² and Kittisak Witinantakit^{3*}

¹Student, Doctor of Philosophy (Energy Technology Management)

School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand,

natthapak_im@rmutto.ac.th

^{2,3*}Lecturer, Department of Energy Technology Management, School of Engineering and
Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand,

²jirawat_si@rmutto.ac.th, ^{3*}kittisak_wi@rmutto.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ประเด็นสำคัญที่ศึกษาได้แก่ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง อัตราการอบแห้ง สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ การเปลี่ยนสี และแบบจำลองเอมพิริคัล กระบวนการอบแห้งใช้กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์

โดยรักษาความดันสัมบูรณ์ไว้ที่ 20 และ 30 กิโลปาสกาล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดความดันสัมบูรณ์ มีผลทำให้อัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ การลดความดันสัมบูรณ์ยังมีผลทำให้ความแตกต่างโดยรวมของสีมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Mildilli สามารถทำนายการอบแห้งขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด (0.99995) และค่า RMSE ต่ำที่สุด (0.00323)

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ขมิ้นชัน, เทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ, แบบจำลองเอมพิริคัล

ABSTRACT

This research studies the drying of turmeric (*Curcuma longa* L.) using microwave-vacuum drying techniques. Key aspects investigated include drying kinetics, drying rate, effective moisture diffusion coefficient, specific energy consumption, color change, and empirical modeling. Drying processes were performed using 800 W microwave power at atmospheric pressure, and at microwave power of 600, 700, and 800 W at absolute pressures is 20 and 30 kPa. Experimental results showed that increasing microwave power and decreasing absolute pressure resulted in higher drying rates and effective moisture diffusion coefficients with reduced specific energy consumption. Decreasing absolute pressure also resulted in lower overall color difference compared to drying under atmospheric pressure. Furthermore, the Mildilli empirical model provided the best prediction for turmeric drying, exhibiting the highest R^2 value (0.99995) and the lowest RMSE value (0.00323).

KEYWORDS: drying, turmeric, microwave vacuum technique, empirical model

1. บทนำ

ขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) เป็นพืชในตระกูลขิง (Zingiberaceae) ที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องเทศโดยเฉพาะในอาหารเอเชีย สำหรับแหล่งเพาะปลูกขมิ้นชันพบมากในเปรู ออสเตรเลีย รวมถึงประเทศในเขตกึ่งร้อนชื้น เช่น จีน ไต้หวัน อินเดีย ศรีลังกา รวมทั้งประเทศไทย [1] จากคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ทำให้ขมิ้นชันมีบทบาทในการช่วยลดความเสี่ยงของโรคต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ และโรคหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งคุณสมบัติทางยาของขมิ้นชันส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการออกฤทธิ์ทางชีวภาพสีเหลืองส้มที่เรียกว่าเคอร์คูมินอยด์ ที่พบในเหง้าของขมิ้นชัน [2] โดยขมิ้นชันสามารถนำมาบริโภคได้ทั้งรูปแบบเหง้าสดและนำไปแปรรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น

นำไปสกัดสารออกฤทธิ์ สกัดน้ำมันหอมระเหย และนำไปอบแห้งซึ่งเป็นวิธีการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ [3] ช่วยให้สามารถเก็บไว้บริโภคได้นาน

การอบแห้งในปัจจุบันมีหลายวิธีการ เช่น การตากแดด การอบแห้งด้วยลมร้อน [4] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน [5] การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด [6] เป็นต้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีการอบแห้งที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและช่วยประหยัดพลังงาน [7] โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความร้อนจากภายในวัสดุ เนื่องจากวัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟตามคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ สนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟทำให้อนุภาคไอออนและโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุเกิดการหมุนและการสั่น ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัววัสดุ [8] สำหรับการอบแห้งด้วยสุญญากาศสามารถดำเนินการได้ภายใต้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีคุณภาพที่ดี จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน [9] เมื่อนำข้อดีของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยสุญญากาศมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน การอบแห้งแบบผสมผสานนี้จึงเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พร้อมทั้งคงไว้ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [10] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hirun et al [2] ที่ได้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศพบว่า มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพของขมิ้นชันอบแห้ง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร และ Nathakaranakule et al [11] ได้ศึกษาเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศในการอบแห้งทุเรียนพบว่า ไมโครเวฟและความดันสุญญากาศส่งผลต่อการอบแห้ง โดยเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดความดันสุญญากาศ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของทุเรียนแผ่นอบลดลง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) มีค่าลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีคุณภาพที่ดี อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นการศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ โดยเน้นการศึกษาการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพควบคู่ไปกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ได้แก่ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในวิจัย

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยติดตั้งระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ รุ่น LG MS2448BKW ที่มีกำลังไฟฟ้าในช่วง

0 ถึง 1000 วัตต์ ควบคุมด้วยชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง รุ่น LCEL01D สัญญากาตภายในห้องอบแห้งถูกสร้างขึ้นด้วยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.746 กิโลวัตต์ (1 แรงม้า) ซึ่งสามารถทำความดันสัมบูรณ์ได้ต่ำสุด 2 กิโลปาสคาล ความดันภายในห้องอบถูกตรวจวัดด้วยเครื่องส่งสัญญาณความดันรุ่น Zega PT9200W ซึ่งมีช่วงการวัด -100 ถึง 100 กิโลปาสคาล และมีความแม่นยำ $\pm 0.5\%$ เครื่องส่งสัญญาณดังกล่าวทำงานร่วมกับชุดควบคุมความดันรุ่น Delta DT320 ซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดปั๊มสุญญากาศด้วยความละเอียด 0.1 กิโลปาสคาล ทั้งนี้มีการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิด PID เพื่อรักษาระดับความดันให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยมีความแม่นยำในการควบคุมไม่เกิน ± 0.2 กิโลปาสคาล น้ำหนักของวัสดุขณะอบแห้งถูกวัดด้วยโหลดเซลล์รุ่น TedeA Huntleigh 1022 ซึ่งมีพิสัยรับน้ำหนัก 2 กิโลกรัม และมีสัญญาณเอาต์พุต 2 มิลลิโวลต์/โวลต์ โหลดเซลล์เชื่อมต่อกับเครื่องแสดงผลน้ำหนักรุ่น Eyecon EICMC-1AB ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม และมีความแม่นยำ $\pm 0.01\%$ สัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-10 โวลต์กระแสตรง เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi Logger รุ่น GL840 เพื่อบันทึกค่าน้ำหนัก ถาดสำหรับวางตัวอย่างถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของโหลดเซลล์ และขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง สำหรับการวัดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ใช้มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าดิจิทัลรุ่น Schneider PM2200 โดยกระแสไฟฟ้าวัดด้วยหม้อแปลงกระแสรุ่น Qubix MSQ-30 พิภัก 30/5A Class 1.0 ระบบทั้งหมดถูกควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) รุ่น Siemens LOGO!



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

2.2 วิธีการอบแห้ง

นำมันชันกลุ่มขมมันทองที่ซื้อจากตลาดในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี มาล้างทำความสะอาด จากนั้นซับด้วยกระดาษอเนกประสงค์ ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2(ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) ขมิ้นชันที่ล้างทำความสะอาดและตัดแต่งก่อนอบแห้ง (ข) ขมิ้นชันในหีบอบแห้ง

จากนั้นตัดแต่งและหั่นขมิ้นชันตามแนวขวางให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร ทำการชั่งน้ำหนักของขมิ้นชันก่อนอบแห้งประมาณ 150 กรัม จากนั้นนำขมิ้นชันที่เข้าเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 2(ข) เพื่ออบแห้งตามเงื่อนไขการทดลองดังนี้

(1) ระดับกำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศตลอดระยะเวลาอบแห้ง

(2) ระดับกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล

สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การสลับเปิด-ปิดไมโครเวฟเป็นระยะช่วยลดการไหม้เกรียมของวัสดุ [12] เมื่อตั้งค่าอุปกรณ์การทดลองเรียบร้อยแล้ว ทำการอบแห้งขมิ้นชันจนกระทั่งมีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันอบแห้งประมาณร้อยละ 13.6 มาตรฐานแห้ง [13] ในระหว่างอบแห้งทำการบันทึกค่าน้ำหนักของขมิ้นชันภายในห้องอบแห้งทุก ๆ 5 นาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi Logger รุ่น GL840 จนสิ้นสุดการอบแห้ง หลังจากสิ้นสุดการอบแห้งทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า เพื่อคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ นำขมิ้นชันบางส่วนไปหาปริมาณความชื้นหลังการอบแห้งตามมาตรฐาน AOAC และนำขมิ้นชันส่วนที่เหลือวิเคราะห์คุณภาพของขมิ้นชันหลังอบแห้ง ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) สี วิเคราะห์จุลชีวพลศาสตร์การอบแห้ง และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายกระบวนการอบแห้ง ทำการทดลองอบแห้งทั้งหมด 3 ซ้ำ การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน 7 เงื่อนไขการทดลอง ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี The Scheffe's Post Hoc Comparison ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ

2.3 การหาความชื้นขมิ้นชัน

หาความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content, M_d) ของขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้งตามมาตรฐาน AOAC [14] โดยการชั่งน้ำหนักขมิ้นชันที่ต้องการหาความชื้น จากนั้นนำขมิ้นชันไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อทราบน้ำหนักแห้งของขมิ้นชัน นำค่าน้ำหนักมาคำนวณ ตามสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ร้อยละความชื้นมาตรฐานแห้ง , w คือ น้ำหนักของขมิ้นชันเริ่มต้น (กรัม) และ d คือน้ำหนักของขมิ้นชันแห้ง (กรัม)

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน หาได้จากการนำค่าน้ำหนักขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้งและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม มาคำนวณดังสมการที่ 2 [15]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกกะจูล/กรัมน้ำระเหย) E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) และ m_i และ m_f คือ น้ำหนักของขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้ง (กรัม) ตามลำดับ

2.5 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของขมิ้นชันในห้องอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยเวลา วิเคราะห์อัตราการอบแห้งได้จากการคำนวณได้ดังสมการที่ 3 [16]

$$DR = \frac{M_o - M_t}{t} \quad (3)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง} นาที่), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง}), M_t คือ ความชื้นเวลาใดๆ (กรัม_{น้ำ}/กรัม_{ของแข็ง}), t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที่)

2.6 การวัดค่าสีไขมันชั้น

ทำการทดสอบคุณภาพด้านสีของไขมันชั้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ ใช้แสงสว่างที่ 6500 K ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 (ΔE^*_{ab}) โดยค่า L^* คือ ค่าความสว่างมีค่าระหว่าง 0-100 หรือสีดำถึงสีขาว ค่า a^* แสดงค่า (+) สีแดง หรือ (-) สีเขียว และค่า b^* แสดงค่า (+) สีเหลือง หรือ (-) สีนํ้าเงิน ทำการวัดค่าสีของไขมันชั้นของแต่ละเงื่อนไข 15 ซ้ำ นำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างของไขมันชั้นก่อนและหลังอบแห้ง ดังสมการที่ 4 [4]

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ความแตกต่างโดยรวมของสีระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

ΔL^* คือ ความแตกต่างของความสว่างระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

Δa^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียวระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

Δb^* คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีนํ้าเงินระหว่างไขมันชั้นสดและไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

2.7 ค่าปริมาณน้ำอิสระ

นำตัวอย่างไขมันชั้นที่ได้จากการอบแห้งมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ AquaLab 3TE ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล เป็นสมการที่นิยมใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้ง เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งสมการเอมพิริคัลจะแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) [17] โดยที่อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (5)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (มาตรฐานแห้ง), M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (มาตรฐานแห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง) แต่ในการทดลองนี้ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก จึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ 6

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (6)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root meansquare error, RMSE) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่า R^2 สูงที่สุด และให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่า R^2 และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ [18]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (8)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$, $MR_{exp,ave}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง และอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล ตามลำดับ และ N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 6 สมการ ได้แก่ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Midilli ดังตารางที่ 1 [19]

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

ลำดับที่	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

หมายเหตุ: a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) เป็นสมบัติของวัตถุที่อธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งแสดงถึงปรากฏการณ์การแพร่ตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion) ซึ่งการทดลองอบแห้งในครั้งนี้ตั้งสมมติฐานว่า ขมิ้นชันขณะอบแห้งเกิดการหดตัวน้อยมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบาง และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ 9 [20]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \right] \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (9)$$

สำหรับการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานและเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแทนค่า $n=0$ ในสมการที่ (9) เพียงเทอมเดียว ซึ่งจะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (10)

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (10)$$

โดยที่ D_{eff} คือ ค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นวัสดุ (เมตร), t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วินาที) และเมื่อพล็อตกราฟของ $\ln MR$ เทียบกับเวลา t จะได้ค่า Slope จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า D_{eff} โดยใช้สมการที่ (11) [4]

$$D_{\text{eff}} = (\text{Slop}) \left(\frac{-4(L)^2}{\pi^2} \right) \quad (11)$$

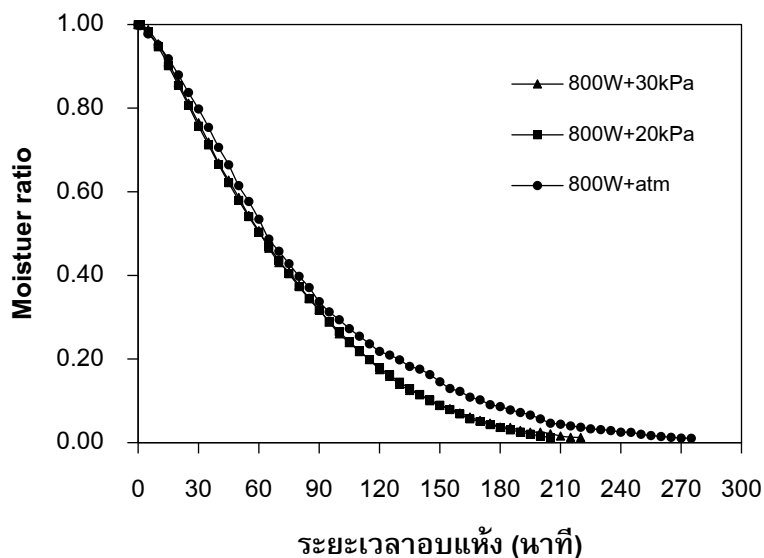
3. ผลการวิจัย

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน

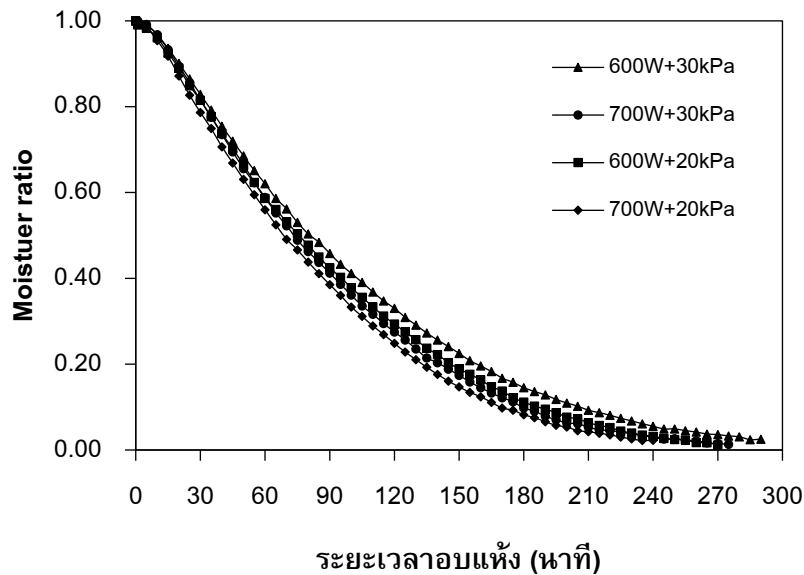
ขมิ้นชันมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 898.00 มาตรฐานแห้ง ทำการอบแห้งจนกระทั่งขมิ้นชันมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13.63 มาตรฐานแห้ง (ร้อยละ 12 มาตรฐานเปียก) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันอบแห้ง โดยอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ (ปิด:เปิด = 10:10 วินาที) ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 20 และ 30 กิโลปาสกาล

ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศพบว่า การลดความดันสัมบูรณ์ให้ต่ำลงและการเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้สูงขึ้น ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันจากผลการทดลองในรูปที่ 3 พบว่าระยะเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ (275 นาที) ใช้ระยะเวลานานกว่าการอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล (205 และ 220 นาที ตามลำดับ) จากรูปที่ 4 พบว่าที่ระดับความดันสุญญากาศเดียวกัน การเพิ่มกำลังไมโครเวฟส่งผลให้ความชื้นลดลงได้เร็วขึ้นและระยะเวลาอบแห้งสั้นลง โดยที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 30 กิโลปาสกาล กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 290 และ 275 นาที ตามลำดับ และที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 20 กิโลปาสกาล กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ ใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 270 และ 240 นาที ตามลำดับ อิทธิพลของความดันสุญญากาศมีผลทำให้อัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากภายใต้สภาวะสุญญากาศจุดเดือดของน้ำมีค่าลงต่ำลง (จุดเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 30 และ 20 กิโลปาสกาล ประมาณ 100.69 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) [21] ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมีผลทำให้โมเลกุลของน้ำในขมิ้นชันถูกกระตุ้นและสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความดันไอน้ำในขมิ้นชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำมากขึ้นช่วยให้ความชื้นเคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวของขมิ้นชันได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น [22] การเพิ่มกำลังไมโครเวฟร่วมกับการลดความดันสัมบูรณ์ ในการอบแห้งขมิ้นชันจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 5 อัตราการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล มีอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงที่สุดและใช้ความดันสัมบูรณ์ต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาล มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุด นอกจากนี้พบว่า

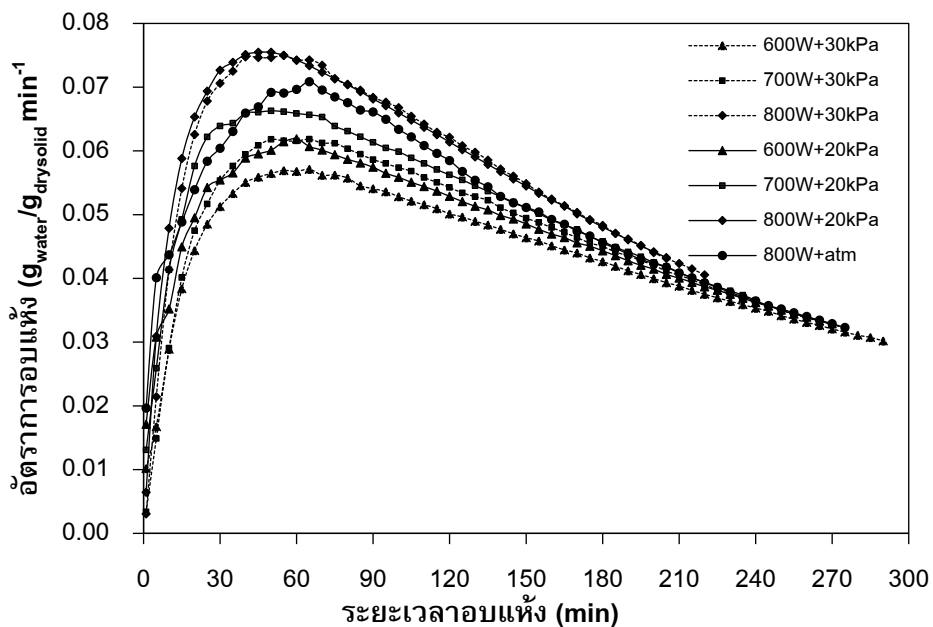
การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่าความดันสัมบูรณ์ 30 และ 20 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นผลมาจากความดันที่ต่ำลงช่วยเร่งการอบแห้ง โดยผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการวิจัยของ Borah et al [23] ที่อบแห้งลูกพลับพบว่า เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟจาก 200 วัตต์ เป็น 500 วัตต์ สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ร้อยละ 42 และจากงานวิจัยของ Khatun et al [24] ในการอบแห้งแก้วมังกรด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟ จาก 400 วัตต์ เป็น 800 วัตต์ ส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง จาก 91 นาที เหลือเพียง 63 นาที (ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ร้อยละ 30) นอกจากนี้ในงานวิจัยการอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศของ Pakseepaeng et al [8] พบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ลดลงจาก 20 กิโลปาสกาล เป็น 5 กิโลปาสกาล สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ประมาณร้อยละ 23



รูปที่ 3 การลดลงของอัตราส่วนความชื้นของขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4 การลดลงของอัตราส่วนความชื้นของไขมันชั้นที่กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล



รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งไขมันชั้นที่กำลังไมโครเวฟและความดันสัมบูรณ์แตกต่างกัน

3.2 คุณภาพของไขมันชั้นหลังอบแห้ง

ไขมันชั้นที่อบแห้งในทุกเงื่อนไขการทดลองมีความชื้นอยู่เกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ไขมันชั้นอบแห้ง โดยมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13.6 มาตรฐานแห้ง และมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งโดยมีค่าต่ำกว่า 0.6 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาอบแห้ง ปริมาณความชื้น และค่าปริมาณน้ำอิสระ ของไขมันชั้นหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขการอบแห้ง	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้น (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	a_w
ไขมันชั้นสด	-	899.39	-
800 W+atm	275	12.37±1.48 ^a	0.59±0.01 ^b
600 W+20 kPa	270	11.71±2.17 ^a	0.58±0.03 ^b
700 W+20 kPa	240	10.16±1.06 ^a	0.43±0.03 ^a
800 W+20 kPa	205	10.44±0.57 ^a	0.55±0.06 ^b
600 W+30 kPa	290	12.95±0.82 ^a	0.58±0.02 ^b
700 W+30 kPa	275	10.74±2.46 ^a	0.59±0.00 ^b
800 W+30 kPa	220	12.37±1.48 ^a	0.57±0.01 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

สำหรับค่าสีของไขมันชั้นหลังอบแห้ง ดังตารางที่ 3 พบว่าค่า L^* a^* และ b^* มีค่าอยู่ระหว่าง 19.24-32.53, 14.81-27.14 และ 17.01-26.16 ตามลำดับ การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล ให้ค่าความสว่าง L^* สูงกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาล และความดันบรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าการอบแห้งที่ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศมีค่าความสว่างต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญกับเงื่อนไขอื่น ๆ ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัยของ Junlakan [25] ที่ศึกษาการอบแห้งมะม่วงเบาด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยสุญญากาศพบว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศมีค่า L^* ที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากในระหว่างการอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ มีออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้การอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสกาล ที่จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง [21] ความร้อนที่ไขมันชั้นได้รับจากไมโครเวฟจะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อวัสดุ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 3 คุณภาพด้านสีของขมิ้นชันก่อนและหลังการอบแห้ง

เงื่อนไขการอบแห้ง	ค่าสี			
	L*	a*	b*	ΔE^*
ขมิ้นชันสด	28.84±0.99 ^d	16.15±1.30 ^a	14.84±1.57 ^a	-
800 W+atm	19.24±1.90 ^a	27.14±1.38 ^b	19.78±3.39 ^b	15.07±3.71 ^c
600 W+20 kPa	32.53±1.61 ^e	16.48±1.18 ^a	21.18±1.78 ^c	7.49±3.04 ^b
700 W+20 kPa	30.83±1.25 ^{de}	15.55±1.42 ^a	17.01±1.09 ^a	3.59±1.50 ^a
800 W+20 kPa	31.73±2.08 ^e	14.81±1.32 ^a	17.42±2.27 ^{ab}	5.11±2.51 ^{ab}
600 W+30 kPa	21.42±1.41 ^{ab}	25.26±1.53 ^b	23.34±1.92 ^{de}	14.86±1.81 ^c
700 W+30 kPa	23.88±1.88 ^c	25.46±1.82 ^b	26.16±2.81 ^e	15.80±2.60 ^c
800 W+30 kPa	21.96±1.87 ^{bc}	25.17±1.23 ^b	23.68±1.28 ^{de}	14.69±1.68 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

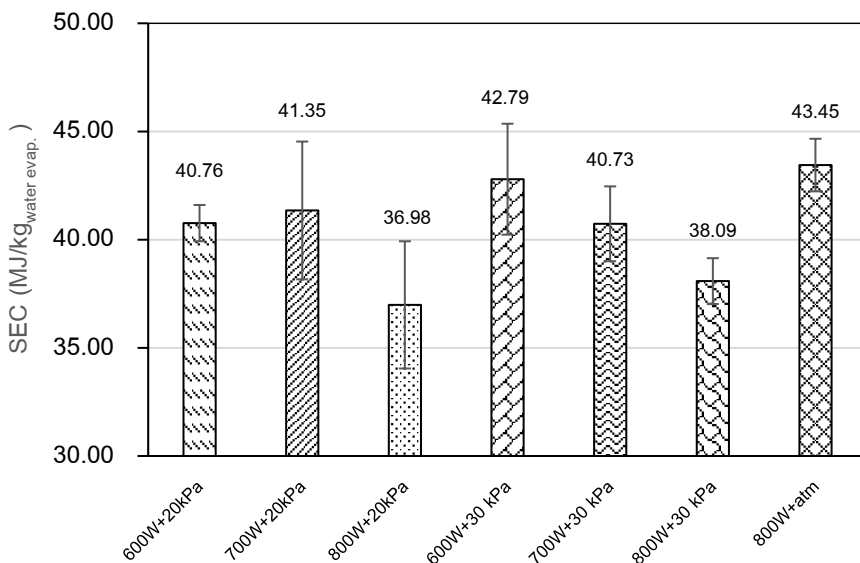
ผลของกำลังไมโครเวฟพบว่า การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมีผลต่อค่าความสว่าง (L*) น้อยกว่า การลดลงของความดันสัมบูรณ์ โดยที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล สามารถทำให้ค่าความสว่างให้สูงกว่าขมิ้นสด และการเพิ่มกำลังไมโครเวฟไม่มีผลต่อค่าความสว่าง ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และที่ความดันบรรยากาศ มีค่าความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล แสดงให้เห็นว่า สภาวะสุญญากาศที่เหมาะสมช่วยลดผลกระทบจากความร้อนของไมโครเวฟที่มีต่อค่าสีได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Hirun et al [2] พบว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ใช้กำลังไมโครเวฟสูงและระยะเวลาอบแห้งนาน (ในช่วง 3,500-4,000 วัตต์ และ 27-30 นาที) สามารถช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากเอนไซม์ polyphenol oxidase ซึ่งช่วยในการรักษาค่าความสว่างของขมิ้นชันได้ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ค่า a* และ b* พบว่ามีค่าเป็นบวก แสดงถึงค่าสีแดงและสีเหลืองตามลำดับ การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และที่ความดันบรรยากาศ มีค่า a* และ b* สูงกว่าการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล เนื่องจากการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล ซึ่งมีจุดเดือดของน้ำประมาณ 60 องศาเซลเซียส [21] อุณหภูมิที่ผิวหน้าวัสดุในขณะนี้น้ำระเหยออกยังไม่สูงมากจนเกินไป ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล และความดันบรรยากาศมีจุดเดือดของน้ำที่สูงกว่า อาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนสูงเฉพาะจุด (Hot spots) ซึ่งนำไปสู่การไหม้ของขมิ้นชัน [26] ซึ่งสีของการไหม้ส่งผลต่อค่าสีแดงและสีเหลืองของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง

ในด้านของค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ของขมิ้นชันที่อบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับขมิ้นชันก่อนอบแห้งที่มีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 28.84 16.15 และ 14.84 ตามลำดับ พบว่าค่า ΔE^* มีค่าอยู่ระหว่าง 3.59-15.80 การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ และ 800 วัตต์ ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล มีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด โดยมีค่า 3.59 และ 5.11 ตามลำดับ ทั้งสองเงื่อนไขไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาลในทุกกำลังไมโครเวฟ และการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศพบว่าค่า ΔE^* มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถรับรู้ความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจนเมื่อค่า ΔE^* มีค่ามากกว่า 5 [27] โดยสรุปแล้วการอบแห้งขมิ้นชันภายใต้เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ ที่ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาคุณภาพด้านสีของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่เงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน จากนั้นนำน้ำหนักขมิ้นชันก่อนและหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้ง มาทำการคำนวณหา ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ดังในรูปที่ 6 พบว่าในทุกเงื่อนไขการทดลอง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ ร่วมกับ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด โดยมีค่า 36.98 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} รองลงมาได้แก่ที่ 800 วัตต์ ร่วมกับ ความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสกาล มีค่า 38.09 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานสูงที่สุด 43.45 เมกกะจูล/กรัม_{น้ำระเหย} การอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสกาล เป็นเงื่อนไขที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด จึงส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไมโครเวฟและสูญญากาศน้อยลงไปด้วย ในขณะที่เดียวกันที่กำลังไมโครเวฟที่เท่ากันเมื่อลดความดันสัมบูรณ์พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดต่ำลง ผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัยของ Manangan and Witinantakit [15] ที่อบแห้งดอกบัวภายใต้ความดันสัมบูรณ์ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์ลงมีผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง และ Zhang et al [28] ที่อบแห้งเมล็ดชาพบว่าเมื่อลดความดันภายในห้องอบแห้งให้ต่ำลงส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งและการใช้พลังงานในการอบแห้งลดลง แต่ที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 20 กิโลปาสกาล สูงกว่าที่ 30 กิโลปาสกาล อาจเกิดจากการใช้พลังงานในการสร้างความดัน

สูญญากาศมากกว่าเพื่อให้ได้ความดันที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยไม่มีระบบสูญญากาศร่วม ส่งผลให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง



รูปที่ 6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชัน

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจะทำการวิเคราะห์หาสมการแทนความสัมพันธ์ของเส้นโค้งการอบแห้ง [19] จากอัตราส่วนความชื้นของการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 20 และ 30 กิโลปาสกาล และกำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ และที่ความดันบรรยากาศ กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัล ผลการวิเคราะห์ได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการดังตารางที่ 4 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเฉลี่ย (R^2) อยู่ในช่วง 0.98685-0.99995 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.00323-0.05230 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2 = 0.99995$) และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE = 0.00323) สอดคล้องกับกราฟเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการของ Midilli ที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ดังรูปที่ 7 และกำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์ดังรูปที่ 8

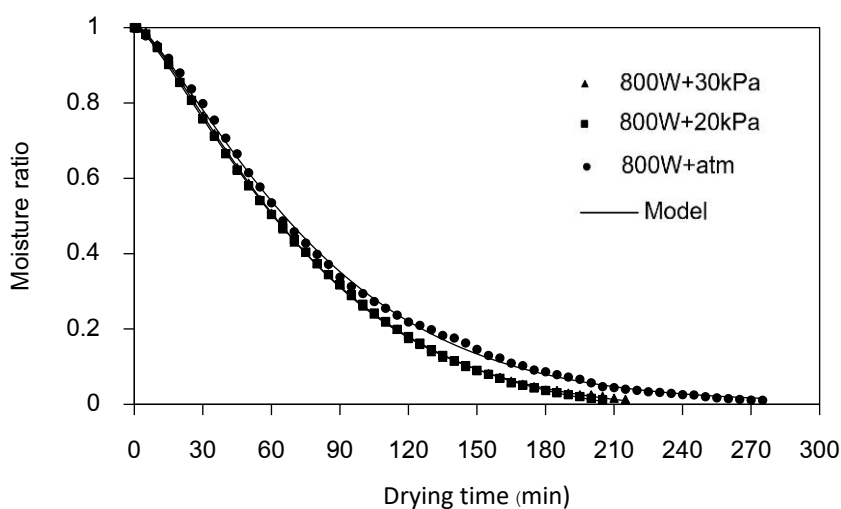
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

Model	MV (W)	P (kPa)	Constant	R ²	RMSE
Newton	800	atm	k=0.01184	0.99080	0.04227
	800	20	k=0.01031	0.98895	0.04654
	800	30	k=0.01128	0.98922	0.04604
	700	20	k=0.01302	0.98721	0.05115
	700	30	k=0.00949	0.99046	0.04269
	600	20	k=0.01066	0.98801	0.04910
	600	30	k=0.01304	0.98685	0.05230
			Average	0.98879	0.04716
Page	800	atm	k=0.00305 n=1.29504	0.99954	0.00944
	800	20	k=0.00227 n=1.32009	0.99968	0.00796
	800	30	k=0.00263 n=1.31477	0.99978	0.00656
	700	20	k=0.00267 n=1.35312	0.99968	0.00809
	700	30	k=0.00235 n=1.29109	0.99984	0.00556
	600	20	k=0.00209 n=1.34716	0.99983	0.00591
	600	30	k=0.00246 n=1.37154	0.99982	0.00610
			Average	0.99974	0.00709
Henderson & Pabis	800	atm	k=0.01289 a=1.09272	0.99525	0.03054
	800	20	k=0.01120 a=1.08974	0.99354	0.03562
	800	30	k=0.01225 a=1.08830	0.99384	0.03485
	700	20	k=0.01419 a=1.09290	0.99237	0.03957
	700	30	k=0.01031 a=1.08910	0.99504	0.03082
	600	20	k=0.01169 a=1.10135	0.99351	0.03619
	600	30	k=0.01426 a=1.09981	0.99237	0.03985
			Average	0.99370	0.03535
Logarithmic	800	atm	k=0.01094 a= 1.13330 c=-0.06572	0.99757	0.02184
	800	20	k=0.00864 a=1.17848 c=-0.121432	0.99861	0.01654
	800	30	k=0.00947 a=1.17913 c=-0.121969	0.99862	0.01654

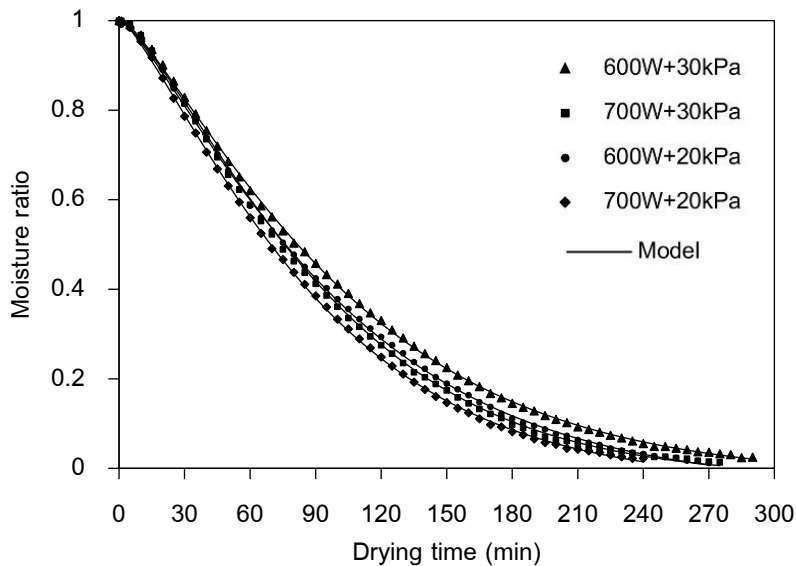
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล (ต่อ)

Model	MV (W)	P (kPa)	Constant	R ²	RMSE
Logarithmic (cont.)	700	20	k=0.01051 a=1.20690 c=-0.148411	0.99851	0.01751
	700	30	k=0.00832 a=1.15990 c=-0.098608	0.99867	0.01596
	600	20	k=0.00931 a=1.17363 c=-0.102577	0.99799	0.02016
	600	30	k=0.01088 a=1.19523 c=-0.128321	0.99786	0.02111
			Average	0.99826	0.01852
Midilli	800	atm	k=0.00329 n=1.28298 a=1.01173 b=0.00001	0.99955	0.00855
	800	20	k=0.00309 n=1.24580 a=1.00659 b=0.00011	0.99989	0.00436
	800	30	k=0.00337 n=1.25361 a=1.00740 b=0.00010	0.99992	0.00368
	700	20	k=0.00367 n=1.27189 a=1.00835 b=0.00016	0.99995	0.00323
	700	30	k=0.00290 n=1.24434 a=1.00959 b=0.00005	0.99991	0.00397
	600	20	k=0.00217 n=1.33002 a=1.00079 b=0.00006	0.99974	0.00684
	600	30	k=0.00299 n=1.32388 a=1.00744 b=0.00008	0.99991	0.00422
			Average	0.99984	0.00498

หมายเหตุ: MV คือ กำลังไมโครเวฟ (วัตต์), P คือความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสกาล)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลอง Midilli ในการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลอง Midilli ในการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 600 และ 700 วัตต์

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และกำลังไมโครเวฟที่ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล ดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งขมิ้นชัน

เงื่อนไขการอบแห้ง		D_{eff} (ตารางเมตรต่อวินาที)
กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)	
800	atm	9.747×10^{-11}
600	20	6.626×10^{-11}
700	20	7.762×10^{-11}
800	20	10.111×10^{-11}
600	30	6.457×10^{-11}
700	30	6.962×10^{-11}
800	30	9.938×10^{-11}

จากตารางที่ 5 พบว่า การใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงและการลดความดันสัมบูรณ์ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยที่เงื่อนไขการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด (10.111×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที) และกำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 30 กิโลปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลต่ำที่สุด (6.457×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที) สอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่พบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นและการลดความดันสัมบูรณ์ลงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

4. สรุป

การอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ และการอบแห้งขมิ้นชันที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 และ 30 กิโลปาสคาล ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มกำลังไมโครเวฟและการลดความดันสัมบูรณ์ ส่งผลให้การลดลงของอัตราส่วนความชื้นเร็วขึ้น โดยที่ กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้ดีที่สุด มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ใช้ระยะเวลา น้อยที่สุด มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด สำหรับคุณภาพขมิ้นชันหลังอบแห้งพบว่า ในทุกเงื่อนไขการอบแห้งสามารถอบแห้งขมิ้นชันให้มีความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนคุณภาพด้านสี พบว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 700 วัตต์ ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ 20 กิโลปาสคาล เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE^*) ต่ำที่สุด (3.59 ± 1.50) นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ทำนายการอบแห้งขมิ้นชัน คือแบบจำลองของ Midilli โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2 = 0.99995$) และค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด ($RMSE = 0.00323$)

5. ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรศึกษาผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อให้ได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมทั้งคุณภาพด้านกายภาพและคุณภาพด้านเคมี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Chumroenphat T, Somboonwatthanakul I, Saensouk S, Siriamornpun S. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods. Food Chemistry 2021;339:128121. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128121.
- [2] Hirun S, Utama-ang N, Roach PD. Turmeric (*Curcuma longa* L.) drying: an optimization approach using microwave-vacuum drying. Journal of Food Science and Technology 2014;51:2127-33. doi: 10.1007/s13197-012-0709-9.
- [3] Ratmanee P, Phitakwinai S, Nilhont W, Buakaew W. Thin layer drying kinetics of turmeric using hot air dryer. The Journal of Industrial Technology 2021;17(2):32-45. doi: 10.14416/j.ind.tech.2021.06.001. (In Thai)
- [4] Komonsing N, Khuwijitjaru P, Nagle M, Müller J, Mahayothee B. Effect of drying temperature together with light on drying characteristics and bioactive compounds in turmeric slice. Journal of Food Engineering 2022;317:110695. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110695.
- [5] Monton C, Luprasong C, Charoenchai L. Convection combined microwave drying affect quality of volatile oil compositions and quantity of curcuminoids of turmeric raw material. Revista Brasileira de Farmacognosia 2019;29(4):434-40.
- [6] Krachang N, Uengkimbuan N. Kinetics and modeling of turmeric using hot air and infrared drying. Burapha Science Journal 2016;21(3):239-48. (In Thai)
- [7] Wang D, Wang Y, Pandiselvam R, Su D, Xu H. Comparative analysis of drying methods on *Pleurotus eryngii*: impact on drying efficiency, nutritional quality, and flavor profile. Food and Bioprocess Technology 2024;17:4598-616.
- [8] Pakseepaeng J, Sayompark D, Witinantakit K. Drying kinetic and quality of black kaempferia drying using microwave-vacuum technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2023;13(2):21-41. (In Thai)
- [9] Gong B, Moraru CI. A mechanistic, state diagram approach to understanding microwave vacuum drying and expansion of natural cheese. LWT 2025;233:118515. doi: 10.1016/j.lwt.2025.118515.
- [10] Wardhani NSK, Amanda N, Sari AR. Microwave vacuum drying on fruit: a review. Advances in Biological Sciences Research 2022;19:309-16. doi: 10.2991/absr.k.220305.047.

- [11] Nathakaranakule A, Paengkanya S, Soponronnarit S. Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input. Food and Bioproducts Processing 2019;116:105-17. doi: 10.1016/j.fbp.2019.04.010.
- [12] Jia Y, Khalifa I, Hu L, Zhu W, Li J, Li K, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: a comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. Food and Bioproducts Processing 2019;118:67-76. doi: 10.1016/j.fbp.2019.08.018.
- [13] Thai Industrial Standards Institute. Turmeric (*Curcuma longa* Linn.)-Dried form (TIS 890-1989). Bangkok: Ministry of Industry; 1989.
- [14] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official methods of analysis. 17th ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC international; 2000.
- [15] Manangan W, Witinantakit K. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3):84-98. (In Thai)
- [16] An J, Du Y, Yan J, Xie H, Liao X, Wei H. Study on the characteristics and kinetics of microwave hot air combined drying of peanut pods. Case Studies in Thermal Engineering 2024;60:104640. doi: 10.1016/j.csite.2024.104640.
- [17] Jaekhom S, Witinantakit K, Boonthum E. Kaffir lime leaves drying using far infrared-vacuum technique. Srinakharinwirot Engineering Journal 2021;16(1):59-70. (In Thai)
- [18] Karthikeyan AK, Murugavelh S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. Renewable Energy 2018;128(Pt A):305-12. doi: 10.1016/j.renene.2018.05.061.
- [19] Witinantakit K, Jaekhom S. Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):29-44. (In Thai)
- [20] Witinantakit K, Uengkimbuan N, Rungsawang S. Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique. Srinakharinwirot Engineering Journal 2019;14(3):1-13.
- [21] Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics: an engineering approach. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
- [22] Belonio LH, Varith J, Jaturonglumlert S, Narkprasom K, Narkprasom N, Arkanit K, et al. Performance of microwave-vacuum drying on flavonoids and saponins

- availability in *Carica papaya* leaves. Results in Engineering 2025;26:104909. doi: 10.1016/j.rineng.2025.104909.
- [23] Borah MS, Raj GB, Tiwari A, Dash KK. Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. Journal of Agriculture and Food Research 2023;14:100816. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100816.
- [24] Khatun P, Karmakar A, Chakraborty I. Microwave-vacuum drying: modeling validation of drying and rehydration kinetics, moisture diffusivity and physicochemical properties of dried dragon fruit slices. Food and Humanity 2024;2:100292. doi: 10.1016/j.foohum.2024.100292.
- [25] Junlakan W. Vacuum drying kinetics of mango (*Mangifera indica* L. Var.) slices. Burapha Science Journal 2017;22(3):358-73. (in Thai)
- [26] Çelen S. Effect of microwave drying on the drying characteristics, color, microstructure, and thermal properties of trabzon persimmon. Foods 2019;8(2):84. doi: 10.3390/foods8020084.
- [27] Bai J, Wang Y, Cai J, Zhang L, Dai Y, Tian X, et al. Three-dimensional appearance and physicochemical properties of *Pleurotus eryngii* under different drying methods. Foods 2023;12(10):1999. doi: 10.3390/foods12101999.
- [28] Zhang D, Huang D, Zhang X, Zhao H, Gong G, Tang X, et al. Drying performance and energy consumption of *Camellia oleifera* seeds under microwave-vacuum drying. Food Science and Biotechnology 2023;32:969-77. doi: 10.1007/s10068-022-01239-0.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายณัฐภค อิ่มเอิบ นักศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-407-6986
Email: natthapak_im@rmutto.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดน์ สิตรานนท์ อาจารย์ประจำหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
20110 โทรศัพท์ 081-001-0903 Email: jirawat_si@rmutto.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ อาจารย์ประจำ
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีพลังงาน)
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัด
ชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak_wi@rmutto.ac.th

Article History:

Received: December 11, 2025

Revised: March 30, 2026

Accepted: April 9, 2026

ปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาใน
งานก่อสร้างภาคเอกชน: กรณีศึกษาแรงงานพม่าและกัมพูชา
**FACTORS DETERMINING CONTRACTORS' DECISIONS TO EMPLOY
MIGRANT WORKERS IN THE PRIVATE CONSTRUCTION SECTOR:
A CASE OF MYANMAR AND CAMBODIAN LABOR**

เทวกุล จันท์ขามป้อม¹ และ วรธนะ ประภาภรณ์²

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000,

¹tawakun.ch@rmuti.ac.th, ²wantana.pa@rmuti.ac.th

Tewakun Chankampom¹ and Wantana Prapaporn²

^{1,2}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, 150 Sri Chan Road,
Nai Mueang Subdistrict, Mueang District, Khon Kaen 40000 Thailand,

¹tawakun.ch@rmuti.ac.th, ²wantana.pa@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลำดับชั้นของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนของประเทศไทย โดยมุ่งเน้นแรงงานสัญชาติเมียนมาและกัมพูชา ซึ่งเป็นกำลังแรงงานหลักของอุตสาหกรรมก่อสร้าง งานวิจัยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 216 ราย ซึ่งเป็นวิศวกร ผู้รับเหมา และผู้ควบคุมงานในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ข้อมูลถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับสอง โดยใช้โปรแกรม AMOS ผลการวิจัยพบว่า โมเดลการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ตามเกณฑ์มาตรฐานทางสถิติ และสามารถอธิบายการตัดสินใจของผู้รับเหมาได้ด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ด้าน ได้แก่ ด้านการจ้างงาน ด้านกฎหมาย ด้านต้นทุนแรงงาน ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน และด้านเศรษฐกิจ โดยปัจจัยด้านการจ้างงานมีอิทธิพลสูงที่สุด รองลงมาคือด้านกฎหมาย ด้านต้นทุนแรงงาน ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน และด้านเศรษฐกิจ ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของ

ผู้รับเหมาไม่ได้พิจารณาเพียงมิติด้านต้นทุนแรงงาน แต่เป็นกระบวนการเชิงพหุปัจจัยที่ผสมผสานความยืดหยุ่นในการบริหารแรงงาน การปฏิบัติตามข้อกำหนดทางกฎหมาย และประสิทธิภาพในการบริหารโครงการเข้าด้วยกัน ผลการวิจัยนี้ช่วยยืนยันเชิงประจักษ์ถึงบทบาทเชิงโครงสร้างของปัจจัยด้านการจ้างงานและกฎหมายที่มีต่อการตัดสินใจของผู้รับเหมาในบริบทอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย และสามารถใช้เป็นกรอบอ้างอิงเชิงวิชาการสำหรับการพัฒนาโยบายและแนวทางการบริหารแรงงานต่างด้าวในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การตัดสินใจของผู้รับเหมา, แรงงานต่างด้าว, อุตสาหกรรมก่อสร้าง, การจ้างแรงงาน, แรงงานพม่าและกัมพูชา

ABSTRACT

This study analyzes the hierarchical structure of factors influencing contractors' decisions to employ migrant workers in Thailand's private construction sector, with particular emphasis on Myanmar and Cambodian labor. A quantitative research approach was employed using a questionnaire survey of 216 engineers, contractors, and site supervisors involved in private construction projects in Bangkok and its metropolitan areas. The data were analyzed using second-order confirmatory factor analysis (CFA) in AMOS. The results indicate that the proposed decision-making model fits the empirical data well and that contractors' decisions can be explained by five key dimensions: employment, laws, labor costs, labor characteristics, and economic conditions. Employment-related factors exert the most decisive influence, followed by legal, cost, labor characteristic, and economic factors. The findings suggest that contractors' decisions are not driven solely by labor costs but reflect a multidimensional decision-making process that integrates labor flexibility, legal compliance, and project efficiency. This study provides empirical evidence on the structural roles of employment and legal factors and offers practical insights for migrant labor management in Thailand's private construction sector.

KEYWORDS: Contractors' Decision, Migrant Workers, Construction Industry, Labor Employment, Myanmar and Cambodian Labor

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ที่มีบทบาทต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคเอกชนที่มี

การลงทุนโครงการก่อสร้างขนาดกลางและขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือและแรงงานระดับล่างในภาคก่อสร้างได้ทวีความรุนแรงขึ้น เนื่องจากแรงงานไทยจำนวนมากหันไปประกอบอาชีพในภาคบริการหรือภาคอุตสาหกรรมอื่นที่มีสภาพการทำงานและรายได้ที่มั่นคงกว่า [2] เพื่อทดแทนแรงงานที่ขาดแคลน ผู้รับเหมาก่อสร้างจำนวนมากจึงหันมาใช้แรงงานต่างด้าว โดยเฉพาะแรงงานจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น เมียนมา กัมพูชา และลาว ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา [3] ข้อมูลจากกระทรวงแรงงาน [4] ระบุว่า แรงงานต่างด้าวในภาคก่อสร้างมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 28 ของแรงงานทั้งหมดในภาคนี้ โดยส่วนใหญ่เป็นแรงงานสัญชาติเมียนมาและกัมพูชา

อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านแรงงานเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านต้นทุน แรงจูงใจทางเศรษฐกิจ ความมั่นคงในการจ้างงาน รวมถึงกฎระเบียบด้านกฎหมายแรงงานและการบริหารจัดการในสถานประกอบการ [5] การทำความเข้าใจปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจดังกล่าวจึงมีความสำคัญ ทั้งในเชิงวิชาการและเชิงนโยบาย เพราะจะช่วยให้ผู้บริหารโครงการก่อสร้างและหน่วยงานภาครัฐสามารถกำหนดแนวทางการบริหารแรงงานต่างด้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดความเสี่ยงจากปัญหาการขาดแคลนแรงงานในอนาคต ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์ ปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในภาคก่อสร้างเอกชน โดยมุ่งเน้นกรณีของแรงงานสัญชาติพม่าและกัมพูชา ซึ่งเป็นกลุ่มแรงงานหลักในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยในปัจจุบัน เพื่อให้ได้ข้อเสนอเชิงนโยบายและแนวทางการจัดการแรงงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย

2. การทบทวนวรรณกรรม

การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานในโครงการก่อสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพงาน ระยะเวลา และต้นทุนของโครงการ ผู้รับเหมาจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายมิติ งานวิจัยที่ผ่านมาได้ชี้ให้เห็นว่าความพร้อมใช้งานของแรงงาน จำนวนแรงงานที่สามารถเข้าถึงได้ รวมถึงความต่อเนื่องของการทำงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้รับเหมาพิจารณาก่อนตัดสินใจจ้างแรงงาน [6] ในขณะเดียวกัน ต้นทุนแรงงานถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกำไรและการบริหารต้นทุนของโครงการ อัตราค่าแรง ค่าล่วงเวลา ค่าใช้จ่ายแฝงในการจัดการแรงงาน และความคุ้มค่างบประมาณแรงงานทักษะสูงกับแรงงานทั่วไป ล้วนเป็นเหตุผลที่กำหนดการเลือกแรงงานในแต่ละประเภท [7,8] นอกจากนี้ ลักษณะส่วนบุคคลและอุปนิสัยของแรงงาน เช่น วินัย ความตรงต่อเวลา ความรับผิดชอบ และประสิทธิภาพการทำงาน มีผลต่อความราบรื่นของโครงการ การเลือกแรงงานที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตภาพ ลดงานซ้ำ และทำให้งานส่งมอบได้ตามกำหนด [9] ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ เช่น ภาวะตลาดแรงงาน เงินเฟ้อ อัตราจ้างงาน และการหมุนเวียนแรงงาน ส่งผลต่อความสามารถในการเข้าถึงแรงงานและการตั้งค่าแรงงานในโครงการ โดยเฉพาะในบริบทประเทศ

ไทยที่แรงงานไทยในภาคก่อสร้างมีจำนวนลดลง การใช้แรงงานต่างด้าวจึงเป็นทางเลือกสำคัญ [10] ในขณะเดียวกัน ปัจจัยด้านกฎหมายและข้อกำหนดด้านเอกสารแรงงาน รวมถึงความปลอดภัยในการทำงาน เป็นเงื่อนไขสำคัญที่ผู้รับเหมาต้องพิจารณาเพื่อปฏิบัติตามกฎหมายและมาตรฐานของผู้ว่าจ้าง [11] จากการทบทวนวรรณกรรมทั้งหมดนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานของผู้รับเหมา สามารถจัดเป็น 5 มิติหลัก ได้แก่ ด้านการจ้างงาน ด้านต้นทุน ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน ด้านเศรษฐกิจ และด้านกฎหมาย ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของแต่ละปัจจัยย่อยตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานในมุมมองของผู้รับเหมา

ตัวแปรแฝง	ตัวแปรสังเกตได้	อ้างอิง
ด้านการจ้างงาน (Employment)	Va1: อัตราค่าจ้างเหมาะสมกับลักษณะงานที่ทำ	[12]
	Va2: งานที่คนไทยหลีกเลี่ยง เช่น งานเสี่ยงอันตราย งานร้อน	[13]
	Va3: การขาดแคลนแรงงานไทยในประเทศ	[14]
	Va4: ความจำเป็นในการพึ่งพาแรงงานต่างด้าว เพื่อให้การดำเนินงานราบรื่น	[15]
	Va5: ความเต็มใจในการทำงานหนัก หรือการทำงานล่วงเวลา	[16]
ด้านต้นทุน (Cost)	Vb1: ค่าแรงของแรงงานต่างด้าวต่ำกว่าการจ้างแรงงานไทย	[17,18]
	Vb2: สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงาน	[17,19]
	Vb3: การจ่ายค่าแรงรายวันช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายในบางช่วงเวลา	[17,20]
	Vb4: ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังคนในช่วงเวลางานที่เร่งด่วน	[21]
ด้านลักษณะและ อุปนิสัย (Characteristic)	Vc1: มีสุขภาพร่างกายแข็งแรง สามารถทำงานที่ต้องใช้แรงกายได้ดี	[22]
	Vc2: สามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นได้ดี	[23]
	Vc3: มีความกระตือรือร้นในการทำงาน	[24]
	Vc4: สามารถพัฒนาทักษะและมีมือได้เมื่อทำงานไปนานๆ	[25]
	Vc5: มีความอดทนและขยันในการทำงาน	[25,26]
	Vc6: มีความพร้อมในการทำงาน เช่น เวลาทำงานมีความยืดหยุ่น ความพร้อมในการเดินทาง	[27]

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานในมุมมองของผู้รับเหมา (ต่อ)

ตัวแปรแฝง	ตัวแปรสังเกตได้	อ้างอิง
ด้านเศรษฐกิจ (Economy)	Vd1: ความไม่แน่นอนของเศรษฐกิจ	[28,29]
	Vd2: ผลกระทบต่อคุณภาพงานก่อสร้างในเชิงเศรษฐกิจ	[30]
	Vd3: สภาวะเศรษฐกิจถดถอยทำให้เกิดการลดจำนวน แรงงาน	[31]
ด้านกฎหมาย (Laws)	Ve1: กฎหมายแรงงานและการขึ้นทะเบียนแรงงานต่างด้าว เช่น ภาษี ค่าธรรมเนียมต่างๆ	[32]
	Ve2: ข้อบังคับเกี่ยวกับการจ้างแรงงานต่างด้าวถูกกฎหมาย	[32,33]
	Ve3: มาตรการป้องกันการลักลอบจ้างแรงงานผิดกฎหมาย อย่างเข้มงวด	[32]
	Ve4: ไม่มีการใช้แรงงานผิดกฎหมายหรือบังคับใช้แรงงาน	[32]

3. ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในภาคก่อสร้างเอกชน โดยเน้นศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และการบริหารจัดการ ได้แก่ ด้านการจ้างงาน ด้านต้นทุนแรงงาน ด้านลักษณะและอุปนิสัยแรงงาน ด้านเศรษฐกิจ และปัจจัยสนับสนุนด้านกฎหมายแรงงานต่างด้าว โดยมุ่งวิเคราะห์ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเลือกใช้แรงงานต่างด้าวสัญชาติพม่าและกัมพูชาในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนมากน้อยเพียงใด โดยดำเนินการในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการจ้างแรงงานต่างด้าวจำนวนมากในโครงการก่อสร้างภาคเอกชน และเป็นศูนย์กลางของกิจกรรมการก่อสร้างเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย

ประชากรในการวิจัย ได้แก่ วิศวกร ผู้รับเหมา และผู้ควบคุมงานในภาคก่อสร้างเอกชนที่มีประสบการณ์ในการจ้างแรงงานต่างด้าวสัญชาติพม่าและกัมพูชา กลุ่มตัวอย่างได้มาจากการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive sampling) โดยคัดเลือกผู้รับเหมาที่ดำเนินโครงการก่อสร้างเอกชนในพื้นที่ศึกษา ทั้งในระดับโครงการขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ จำนวนไม่น้อยกว่า 200 ราย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติได้อย่างมีนัยสำคัญ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้คือผู้รับเหมาและบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ทั้งนี้ จำนวนประชากรที่แท้จริงไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด เนื่องจากลักษณะของอุตสาหกรรมก่อสร้างมีความหลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงของผู้ปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นจำนวนโครงการ ขนาดของผู้ประกอบการ หรือรูปแบบการจ้างแรงงาน จึงเป็นข้อจำกัดในการกำหนดขนาดประชากรที่แน่นอน เมื่อจำนวนประชากรไม่ทราบแน่ชัด นักวิจัยจึงกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักเกณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับในงานวิจัยเชิงสำรวจ และสอดคล้องกับข้อเสนอแนะด้านระเบียบวิธีวิจัยที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงยืนยันลำดับสอง โดยทั่วไปมีข้อเสนอแนะให้ใช้กลุ่มตัวอย่างไม่น้อยกว่า 200 หน่วย เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและเสถียรเพียงพอ

ในการศึกษาครั้งนี้ นักวิจัยสามารถรวบรวมแบบสอบถามได้จำนวนทั้งสิ้น 216 ชุด ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับงานวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) ทั้งยังสอดคล้องกับแนวทางในวรรณกรรมที่ระบุว่ากลุ่มตัวอย่างขนาดประมาณ 200 [34] หน่วยสามารถให้พลังทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้น เช่น การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation) นอกจากนี้ การกำหนดจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำดังกล่าวยังเหมาะสมกับบริบทของงานก่อสร้าง ซึ่งมักประสบปัญหาในการเข้าถึงผู้ตอบแบบสอบถาม และมีลักษณะของประชากรที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้แนวคิดด้าน ความพอเหมาะ (Pragmatic sufficiency) เป็นแนวทางที่เหมาะสมมากกว่าการยึดตามสูตรเชิงทฤษฎีอย่างเคร่งครัด

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงสำรวจแบบเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลคือแบบสอบถาม (Questionnaire) ซึ่งออกแบบเพื่อวัดตัวแปรที่มีระดับการวัดแบบอันตรภาคชั้น (Interval Scale) และใช้มาตราประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ ก่อนนำแบบสอบถามไปใช้จริงในภาคสนาม ผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือเพื่อให้มั่นใจว่าแบบสอบถามมีความถูกต้อง ครบถ้วนประเด็นที่ต้องการศึกษา และมีความเชื่อถือได้ โดยกระบวนการตรวจสอบประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

(1) การตรวจสอบความตรงของเนื้อหา (Content Validity)

ผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านประเมินความเหมาะสมของแต่ละข้อคำถาม และคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item Objective Congruence: IOC) [35]

ซึ่งกำหนดเกณฑ์ค่า IOC ต้องมากกว่า 0.50 ผลการประเมินพบว่าแบบสอบถามทั้งฉบับมีค่า IOC เท่ากับ 0.667 แสดงว่าเนื้อหาของข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยและสามารถนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างได้

(2) การทดสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability Testing)

สำหรับข้อคำถามที่ผ่านเกณฑ์ค่า IOC ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (Try Out) กับประชากรจำนวน 30 ราย ซึ่งมีใช้กลุ่มตัวอย่างจริง แต่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง เพื่อทดสอบความเชื่อถือได้ของแบบสอบถาม โดยจำนวน 30 รายเป็นเกณฑ์ขั้นต่ำที่เหมาะสมตามหลักสถิติ เนื่องจากเชื่อว่าจะทำให้ข้อมูลมีการกระจายตัวที่เข้าใกล้รูปแบบโค้งปกติ (Normal Curve) [36] การประเมินความเชื่อมั่นใช้มาตราประเมินแบบลำดับ (Ordinal Scale) ผ่านมาตราประมาณค่า 5 ระดับ ได้แก่ มากที่สุด (5) มาก (4) ปานกลาง (3) น้อย (2) และน้อยที่สุด (1)

ในการหาค่าความเชื่อมั่น ผู้วิจัยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) [37] โดยแปลงค่าสู่ช่วงเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ผลการทดสอบพบว่าค่า Alpha Coefficient เท่ากับ 0.869 ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูงมาก แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ดีและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัย

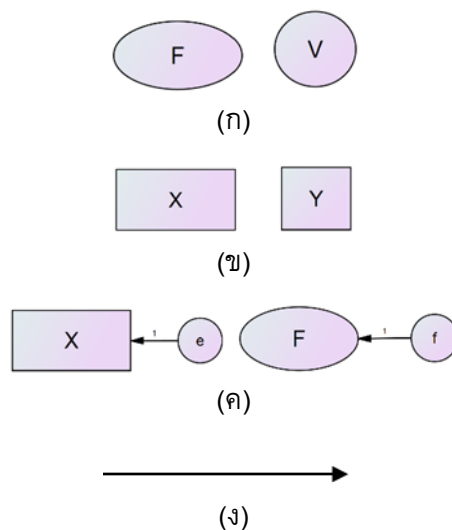
4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

กระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามออนไลน์ผ่านระบบ Google Forms ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความสะดวก รวดเร็ว และช่วยให้เข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้หลากหลายและทั่วถึงมากยิ่งขึ้น วิธีการดังกล่าวเหมาะสมกับลักษณะของการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) ที่มุ่งเน้นการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวนมากภายในระยะเวลาอันจำกัด ทั้งยังช่วยลดข้อจำกัดด้านระยะทางและเวลาในการติดต่อผู้ตอบแบบสอบถาม

การเก็บข้อมูลมุ่งเน้นการสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยในการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวในภาคก่อสร้าง โดยแบบสอบถามได้รับการออกแบบตามกรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework) และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถวัดตัวแปรที่สนใจได้อย่างครอบคลุมและเที่ยงตรง เนื้อหาของแบบสอบถามแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ เช่น ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบ บทบาทหน้าที่ในโครงการก่อสร้าง รวมถึงความคิดเห็นต่อปัจจัยด้านแรงงานต่างด้าว โดยครอบคลุมกลุ่มผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ได้แก่ หัวหน้างาน ผู้ควบคุมแรงงาน และหัวหน้าช่าง การเผยแพร่แบบสอบถามดำเนินการผ่านช่องทางออนไลน์ ได้แก่ อีเมล และแพลตฟอร์มสื่อออนไลน์ เพื่อเพิ่มอัตราการตอบกลับและกระจายแบบสอบถามไปยังผู้ตอบที่มีบทบาทหลากหลายภายในภาคก่อสร้าง ข้อมูลที่ได้รับจากผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดจะถูกตรวจสอบความสมบูรณ์ก่อนนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสะท้อนสภาพจริงของอุตสาหกรรมก่อสร้าง

4.4 การสร้างแบบจำลอง

- (1) วัดตัวแปรแฝงซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้โดยตรง แต่เป็นตัวแปรที่ได้ข้อมูลจากตัวแปรสังเกตได้ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์วงรีหรือวงกลม ตามรูปที่ 1(ก)
- (2) วัดตัวแปรสังเกตได้ซึ่งเป็นตัวแปรที่เก็บข้อมูลได้โดยตรงจากกลุ่มตัวอย่าง สัญลักษณ์ที่แสดงถึงตัวแปรสังเกตได้ คือสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสก็ได้ ตามรูปที่ 1(ข)
- (3) วัดตัวแปรความคลาดเคลื่อนในการวัด (Measurement error) ของตัวแปรแฝงและตัวแปรสังเกตได้ จะใช้สัญลักษณ์วงกลมและมีตัวอักษร e ในตัวแปรแฝง ส่วนในตัวแปรสังเกตได้จะมีตัวอักษร f ตามรูปที่ 1(ค)
- (4) วาดลูกศรเส้นตรงเชื่อมโยงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ หรือคำห้้นกองค์ระกอบ (Factor loading) ตัวแปรแฝงกับตัวแปรสังเกตได้ ตามรูปที่ 1(ง)
- (5) ใส่ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละโมเดลที่ถูกกำหนดเป็น “1” จำนวนโมเดลละหนึ่งค่า
- (6) เพิ่มตัวแปรอันดับที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์วงรี หลังจากนั้นลากเส้นจากตัวแปรอันดับที่ 2 ไปยังวงรีโมเดลย่อย
- (7) ระบุชื่อตัวแปรแฝงและตัวแปรสังเกตได้ จะได้โมเดลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันอันดับที่ 2



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ตัวแปรแฝง (ก) ตัวแปรสังเกตได้ (ข) ตัวแปรความคลาดเคลื่อน (ค) และลูกศรความสัมพันธ์ (ง) ที่ปรากฏในโมเดล

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สอง (Second-Order Confirmatory Factor Analysis: CFA) เป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างระหว่างองค์ประกอบย่อย (First-Order Factors) และองค์ประกอบระดับสูง (Second-Order Factor) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าองค์ประกอบย่อยดังกล่าวอยู่ภายใต้โครงสร้างแฝงเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถอธิบายโครงสร้างของแนวคิดหลักได้อย่างถูกต้องตามทฤษฎีในการศึกษา

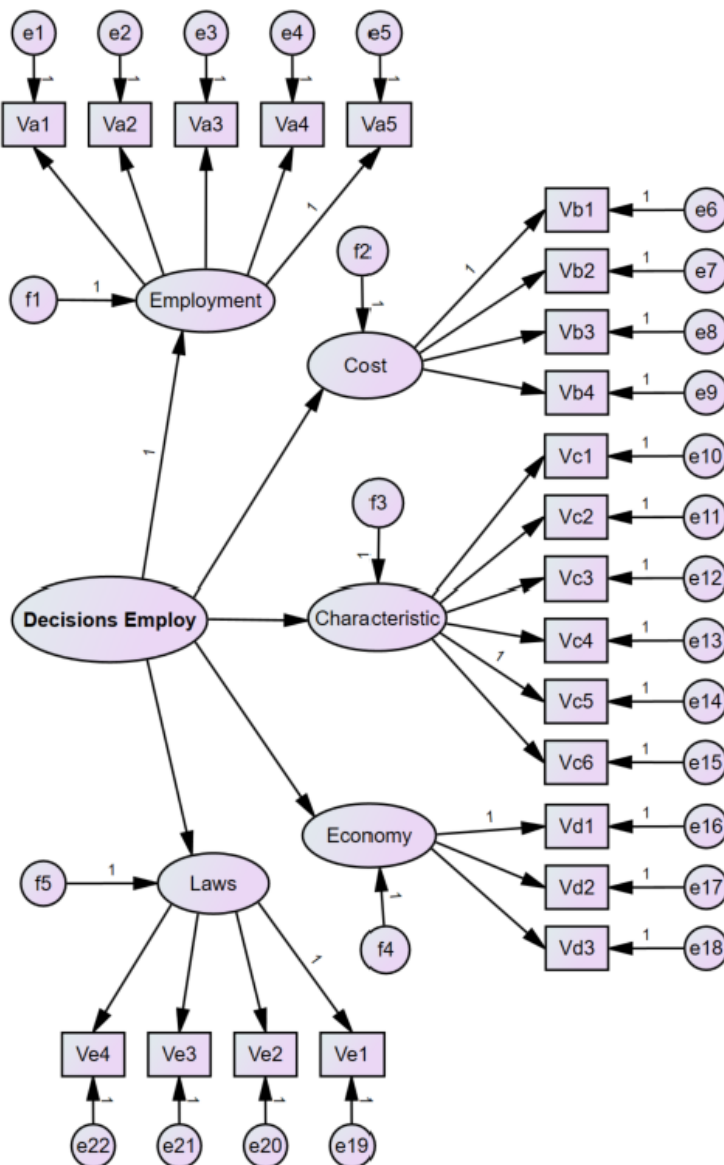
นี้ องค์ประกอบระดับสูงคือ “การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว” โดยมีองค์ประกอบย่อยที่ต้องการตรวจสอบประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) ปัจจัยด้านการจ้างงาน (2) ปัจจัยด้านต้นทุนแรงงาน (3) ปัจจัยด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน (4) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ และ (5) ปัจจัยด้านกฎหมาย ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อประเมินว่าองค์ประกอบใดมีความสำคัญมากน้อยแตกต่างกันเพียงใดต่อการตัดสินใจดังกล่าว ซึ่งการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองดำเนินการโดยสร้างโมเดลโครงสร้างที่เชื่อมโยงองค์ประกอบย่อยทั้ง 5 เข้ากับองค์ประกอบระดับสูง พร้อมทั้งกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนให้กับตัวแปรแฝงแต่ละตัวตามหลักการจำลองโมเดลเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) ทั้งนี้ ได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรแฝงสำหรับองค์ประกอบย่อยตั้งแต่ f1 ถึง f5 เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการประเมินความสอดคล้องของโมเดล

โมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองที่ได้จัดทำขึ้น ถูกนำไปประเมินความสอดคล้องเชิงโครงสร้างระหว่างองค์ประกอบย่อยและองค์ประกอบหลัก โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องของโมเดลตามมาตรฐานทางสถิติ เพื่อยืนยันว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายโครงสร้างเชิงแนวคิดของการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวได้อย่างเหมาะสมตามทฤษฎีและข้อมูลเชิงประจักษ์ ซึ่งโมเดลที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2

4.6 การปรับโมเดล

การปรับโมเดล (Model Modification Indexes: MI) ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าจากเครื่องมือวัด สามารถดำเนินการได้ทันทีโดยไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของโมเดลตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ เมื่อมีการปรับโมเดลแล้ว ต้องตรวจสอบค่าดัชนีความสอดคล้องของโมเดลเพื่อยืนยันความเหมาะสมของโมเดลที่พัฒนา โดยพิจารณาตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ (1) ค่าสถิติไคสแควร์ (Chi-Square) ต้องมีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด หรือค่าดัชนีไคสแควร์สัมพัทธ์ (Relative Chi-Square) ต้องน้อยกว่า 2 (2) ค่าดัชนีความสอดคล้องของโมเดล (Goodness of Fit Indices) ได้แก่ ค่า GFI, AGFI, CFI, TLI และ NFI ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 0.90 และ (3) ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า (Error of Approximation) ได้แก่ RMSEA, RMR

และ SRMR ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของโมเดลการวัดและโมเดลสมการโครงสร้างทุกเส้นทางต้องมีความแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($|t| > 1.96$) และมีทิศทางที่สอดคล้องกับทฤษฎี จึงจะสรุปได้ว่าโมเดลสมการโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์และสามารถนำไปใช้ตีความผลการวิจัยได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2 โมเดลปัจจัยเชิงยืนยันลำดับที่ 2 ของการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ก่อนการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับสอง ได้ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลเบื้องต้นเพื่อให้มั่นใจว่ามีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ พบว่าไม่มีข้อมูลสูญหายในระดับที่กระทบต่อผลลัพธ์ และไม่พบค่าผิดปกติรุนแรง ทั้งค่า skewness และ kurtosis ของตัวแปรทุกตัวอยู่ในช่วง ± 2 สะท้อนว่าการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงปกติ สอดคล้องกับเกณฑ์ของ [34] ผลการวิเคราะห์เชิงยืนยันอันดับสองชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างโมเดลสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยย่อยทั้งห้า ได้แก่ ปัจจัยด้านการจ้างงาน ต้นทุนแรงงาน ลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ และปัจจัยด้านกฎหมาย ได้อย่างเหมาะสม โดยค่าน้ำหนักองค์ประกอบของปัจจัยย่อยอยู่ในช่วง 0.609-0.918 และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.001$ แสดงว่าปัจจัยทั้งห้ามีอิทธิพลเชิงบวกและเป็นองค์ประกอบสำคัญของการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวในภาคก่อสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันโดยใช้โปรแกรม AMOS ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ยืนยันความสอดคล้องขององค์ประกอบย่อยภายใต้โครงสร้างใหญ่ตามกรอบทฤษฎี ได้ตรวจสอบค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (Regression Weights) ของปัจจัยทั้งห้า และตัวแปรร้อย จำนวน 22 ตัว ซึ่งผลสรุปในตารางที่ 2

ผลการตรวจสอบดัชนีความสอดคล้องของโมเดลได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้ ค่าสถิติไคสแควร์ = 2032.451 ค่าไคสแควร์สัมพันธ์ = 1.156 สถิติทดสอบ P-value = 0.077 ดัชนี NFI = 0.905 ดัชนี GFI = 0.901 ดัชนี CFI = 0.984 Standardized RMR = 0.032 และ RMSEA = 0.039 โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้องให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด คือ relative Chi-Square มีค่าน้อยกว่า 2 ดัชนี RMSEA และ RMR มีค่าน้อยกว่า 0.05 และดัชนี GFI, NFI, TLI และ CFI มีค่ามากกว่า 0.90 [38] ซึ่งถือว่าโมเดลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ หรือเรียกว่า Model Fit จึงสรุปได้ว่า การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในภาคก่อสร้างเอกชน ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ โดยที่ด้านการจ้างงาน มีความสำคัญสูงสุด รองลงมาได้แก่ ด้านกฎหมาย, ด้านต้นทุน, ด้านลักษณะและอุปนิสัย และด้านเศรษฐกิจ ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบพบว่า 1) ตัวบ่งชี้ที่มีน้ำหนักสูงสุดด้านการจ้างงาน คือ Va3 รองลงมา คือ Va1, Va4, Va5 และ Va2 ตามลำดับ 2) ตัวบ่งชี้ที่มีน้ำหนักสูงสุดด้านต้นทุน คือ Vb4 รองลงมา คือ Vb1, Vb2 และ Vb3 ตามลำดับ 3) ตัวบ่งชี้ที่มีน้ำหนักสูงสุดด้านลักษณะและอุปนิสัย คือ Vc5 รองลงมา คือ Vc6, Vc4, Vc3, Vc1 และ Vc2 ตามลำดับ 4) ตัวบ่งชี้ที่มีน้ำหนักสูงสุดด้านเศรษฐกิจ คือ Vd3 รองลงมา คือ Vd2 และ Vd1 ตามลำดับ 5) ตัวบ่งชี้ที่มีน้ำหนักสูงสุดด้านกฎหมาย คือ Ve2 รองลงมา คือ Ve4, Ve3 และ Ve1 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยย่อยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว

ตัวแปรแฝง ตัวแปรป่งชี้	ด้านการจ้างงาน (Employment)		ด้านต้นทุน (Cost)		ด้านลักษณะ และอุปนิสัย (Characteristic)		ด้านเศรษฐกิจ (Economy)		ด้านกฎหมาย (Laws)		R ²
	β _i	S.E.	β _i	S.E.	β _i	S.E.	β _i	S.E.	β _i	S.E.	
Va1	0.783	0.100									0.612
Va2	0.609	0.136									0.371
Va3	0.786	-									0.619
Va4	0.755	0.127									0.570
Va5	0.742	0.143									0.550
Vb1			0.785	0.124							0.617
Vb2			0.781	0.094							0.610
Vb3			0.728	0.105							0.530
Vb4			0.873	-							0.763
Vc1					0.791	0.091					0.626
Vc2					0.760	0.104					0.578
Vc3					0.817	0.069					0.667
Vc4					0.834	-					0.695
Vc5					0.915	0.091					0.838
Vc6					0.903	0.113					0.531
Vd1							0.865	-			0.747
Vd2							0.868	0.067			0.753
Vd3							0.918	0.071			0.843
Ve1									0.795	0.094	0.633
Ve2									0.845	0.058	0.714
Ve3									0.823	0.076	0.677
Ve4									0.837	-	0.701

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว

ตัวแปรแฝง	การตัดสินใจเลือกใช้แรงงาน		R ²
	β_i	S.E.	
1 ด้านการจ้างงาน (Employment)	0.930	0.164	0.864
2 ด้านต้นทุน (Cost)	0.825	0.139	0.726
3 ด้านลักษณะและอุปนิสัย (Characteristic)	0.785	-	0.616
4 ด้านเศรษฐกิจ (Economy)	0.624	0.176	0.289
5 ด้านกฎหมาย (Laws)	0.835	0.187	0.698

6. บทสรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในอุตสาหกรรมก่อสร้างภาคเอกชน โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับสอง ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ร้อยละ 67 มีอายุอยู่ในช่วงวัยแรงงานตอนต้นถึงตอนกลาง ร้อยละ 60.2 โดยมีตำแหน่งงานหลักเป็นวิศวกรและมีประสบการณ์ทำงานในโครงการก่อสร้างไม่เกิน 6 ปี สะท้อนให้เห็นว่า การตัดสินใจด้านการใช้แรงงานส่วนใหญ่อยู่ภายใต้การพิจารณาของบุคลากรสายเทคนิคที่มีบทบาทโดยตรงในหน่วยงานโครงการ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับสองแสดงให้เห็นว่า โมเดลการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ตามเกณฑ์มาตรฐานทางสถิติ โดยการตัดสินใจดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ด้าน ได้แก่ ด้านการจ้างงาน ด้านกฎหมาย ด้านต้นทุน ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน และด้านเศรษฐกิจ ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดมีอิทธิพลเชิงบวกและมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาน้ำหนักองค์ประกอบหลัก พบว่า ด้านการจ้างงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงที่สุดต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว รองลงมาคือด้านกฎหมาย ด้านต้นทุน ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงาน และด้านเศรษฐกิจ ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าผู้รับเหมาให้ความสำคัญกับความยืดหยุ่น ความพร้อมในการทำงาน และรูปแบบการจ้างงานเป็นหลัก ควบคู่ไปกับการปฏิบัติตามกฎหมายแรงงานและการควบคุมต้นทุนโครงการ

ในระดับตัวบ่งชี้พบว่า ปัจจัยย่อยในแต่ละองค์ประกอบมีบทบาทแตกต่างกัน โดยด้านการจ้างงาน ตัวบ่งชี้ที่เกี่ยวข้องกับความเหมาะสมและประสิทธิภาพในการใช้แรงงานมีน้ำหนักสูงสุด ขณะที่ด้านต้นทุน ตัวบ่งชี้ด้านค่าใช้จ่ายแรงงานโดยรวมมีความสำคัญมากกว่า

รายการต้นทุนย่อยอื่น ด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงานสะท้อนถึงความขยัน อดทน และความรับผิดชอบในการทำงาน ส่วนด้านเศรษฐกิจและด้านกฎหมาย ตัวบ่งชี้ที่เกี่ยวข้องกับสภาพเศรษฐกิจโดยรวมและความชัดเจนของกฎระเบียบแรงงานมีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการ

ผลการวิจัยครั้งนี้ยืนยันว่า การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวในภาคก่อสร้างเอกชนเป็นกระบวนการเชิงพหุปัจจัยที่ต้องพิจารณาทั้งมิติด้านการจัดการแรงงาน ต้นทุน กฎหมาย และบริบททางเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้ช่วยให้เข้าใจถึงลำดับความสำคัญของผู้รับเหมาที่ให้ความสำคัญกับความยืดหยุ่น ความพร้อมในการทำงาน และการปฏิบัติตามกฎหมายอย่างเคร่งครัด ควบคู่ไปกับการควบคุมต้นทุนโครงการและคุณสมบัติของแรงงานในบริบททางเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลงไป แม้ว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่จะดำรงตำแหน่งวิศวกรและมีประสบการณ์ทำงานไม่เกิน 6 ปี แต่ในบริบทโครงการก่อสร้าง วิศวกรประจำโครงการมักมีบทบาทสำคัญในการเสนอแนะ ควบคุม และประสานงานด้านแรงงาน รวมถึงมีส่วนร่วมในกระบวนการพิจารณาคัดเลือกแรงงานในระดับปฏิบัติการ ทั้งนี้ การตัดสินใจขั้นสุดท้ายอาจอยู่ในระดับผู้บริหารโครงการหรือเจ้าของกิจการ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของการวิจัยครั้งนี้

7. การตีความผลการวิจัย

ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวของผู้รับเหมาในภาคก่อสร้างเอกชนเป็นผลลัพธ์ของการพิจารณาปัจจัยหลายมิติร่วมกัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการบริหารทรัพยากรมนุษย์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มองแรงงานเป็นปัจจัยเชิงกลยุทธ์ต่อความสำเร็จของโครงการ [23,39] การที่โมเดลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับสองมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ แสดงให้เห็นว่ากรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษามีสามารถอธิบายพฤติกรรมตัดสินใจของผู้รับเหมาได้อย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาที่พบว่าปัจจัยด้านการจ้างงานมีความสำคัญสูงสุด สะท้อนให้เห็นว่าผู้รับเหมาให้ความสำคัญกับความยืดหยุ่นของแรงงาน ความต่อเนื่องในการทำงาน และความสามารถในการรองรับแผนงานที่มีข้อจำกัดด้านเวลา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dainty et al [40] ที่ระบุว่าความพร้อมและความสามารถในการจัดสรรแรงงานเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมประสิทธิภาพโครงการก่อสร้าง ในบริบทประเทศไทยงานวิจัยของ Sae-ngow and Suksom [41] พบว่าการบริหารแรงงานในโครงการก่อสร้างมักเน้นความยืดหยุ่นของรูปแบบการจ้างมากกว่าความมั่นคงด้านสัญญาจ้างในระยะยาว

ปัจจัยด้านกฎหมายซึ่งมีน้ำหนักองค์ประกอบในลำดับรองลงมา สะท้อนถึงการตระหนักรู้ของผู้รับเหมาต่อข้อจำกัดและความเสี่ยงจากการบังคับใช้กฎหมายแรงงานต่างด้าวที่เข้มงวดขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานศึกษาของ International Labour Organization [42] ที่ชี้ให้เห็นว่า

การปฏิบัติตามกฎหมายแรงงานและการขึ้นทะเบียนแรงงานต่างด้าวเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการในภาคก่อสร้าง ขณะเดียวกันงานวิจัยของ Kongchasing and Sua-iam [43] ระบุว่าผู้รับเหมามีแนวโน้มหลีกเลี่ยงความเสี่ยงด้านกฎหมาย เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของโครงการและต้นทุนแฝงที่เพิ่มขึ้น

ในด้านต้นทุน ผลการวิจัยสะท้อนว่าผู้รับเหมายังคงให้ความสำคัญกับการควบคุมค่าใช้จ่ายแรงงานในภาพรวม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐศาสตร์แรงงานที่มองต้นทุนแรงงานเป็นองค์ประกอบสำคัญของต้นทุนโครงการ [12] อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าการตัดสินใจได้พิจารณาเพียงค่าแรงโดยตรง แต่รวมถึงต้นทุนแฝง เช่น ประสิทธิภาพการทำงานและการลดการขาดแคลนแรงงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Adrian [44] ที่เสนอว่า การจัดการแรงงานที่มีประสิทธิภาพสามารถลดต้นทุนโครงการในระยะยาวได้

ผลการตีความด้านลักษณะและอุปนิสัยของแรงงานบ่งชี้ว่า คุณลักษณะเชิงพฤติกรรม เช่น ความขยัน ความอดทน และความรับผิดชอบ เป็นปัจจัยสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choudhry et al [45] ที่ระบุว่าทัศนคติและพฤติกรรมแรงงานมีผลต่อคุณภาพงานและความปลอดภัยในไซต์ก่อสร้าง ในบริบทของประเทศไทย งานของ Chuasuwan [46] พบว่า ผู้ควบคุมงานให้ความสำคัญกับลักษณะเชิงพฤติกรรมของแรงงานมากกว่าทักษะเฉพาะด้านในบางประเภทงานก่อสร้าง

สำหรับปัจจัยด้านเศรษฐกิจซึ่งมีน้ำหนักองค์ประกอบต่ำที่สุด ผลการวิจัยสะท้อนว่าสภาพเศรษฐกิจโดยรวมทำหน้าที่เป็นปัจจัยเชิงบริบทมากกว่าปัจจัยกำหนดโดยตรง สอดคล้องกับงานของ Shen et al [39] ที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยมหภาคทางเศรษฐกิจส่งผลต่อการวางแผนกำลังคนในระยะยาวมากกว่าการตัดสินใจในระดับโครงการ อย่างไรก็ตาม ความผันผวนทางเศรษฐกิจยังคงมีบทบาทต่อการกำหนดนโยบายแรงงานและระดับความเสี่ยงที่ผู้รับเหมาสามารถยอมรับได้

โดยสรุป การตีความผลการวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า การตัดสินใจเลือกใช้แรงงานต่างด้าวในภาคก่อสร้างเอกชนของประเทศไทยเป็นผลจากการบูรณาการปัจจัยด้านการจัดการแรงงาน กฎหมาย ต้นทุน และคุณลักษณะของแรงงานเข้าด้วยกันภายใต้บริบททางเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้ช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ด้วยการนำเสนอหลักฐานเชิงประจักษ์จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับสอง ซึ่งช่วยอธิบายโครงสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ อย่างเป็นระบบ และสามารถใช้เป็นกรอบอ้างอิงเชิงวิชาการสำหรับการพัฒนานโยบายและแนวทางการบริหารแรงงานต่างด้าวในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยต่อไป

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 ควรขยายขอบเขตการศึกษาให้ครอบคลุมแรงงานจากประเทศอื่นๆ เช่น ลาว หรือ เวียดนาม เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างด้านประสิทธิภาพและปัจจัยการเลือกจ้างในแต่ละกลุ่ม

8.2 ควรศึกษาเชิงลึกด้านผลกระทบทางเศรษฐกิจ หรือผลผลิตจากการใช้แรงงานต่างด้าวในระยะยาว เพื่อให้เห็นผลเชิงนโยบายชัดเจนขึ้น

8.3 การวิจัยต่อไปอาจใช้วิธีผสม (Mixed Methods) เพื่อเก็บข้อมูลเชิงปริมาณร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้รับเหมาและแรงงาน เพื่อให้เข้าใจปัจจัยเชิงพฤติกรรมและวัฒนธรรมมากขึ้น

References

- [1] National Statistical Office. The labor force survey 2023. Bangkok, Thailand: National Statistical Office; 2023. (In Thai).
- [2] Bank of Thailand. Thailand economic report 2022. Bangkok: Bank of Thailand; 2022. (In Thai).
- [3] International Labour Organization. Migrant workers and the Thai construction sector: situation and challenges. Geneva: ILO; 2022.
- [4] Ministry of Labour. Report on the situation of migrant workers in Thailand 2024. Bangkok: Department of Employment, Foreign Workers Administration Division; 2024. (In Thai).
- [5] Chantavanich S, Vungsiriphisal P, Laodumrongchai S. Cross-border labor migration in the Greater Mekong Subregion. Bangkok: Asian Research Center for Migration, Chulalongkorn University; 2020.
- [6] Jarkas AM, Bitar CG. Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. Journal of Construction Engineering and Management 2012;138(7):811-20.
- [7] Chan DW, Kumaraswamy MM. A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects. International Journal of Project Management 1997;15(1):55-63. doi: 10.1016/S0263-7863(96)00039-7.
- [8] Thomas HR, Završki I. Construction baseline productivity: theory and practice. Journal of Construction Engineering and Management 1999;125(5):295-303.
- [9] Zakeri M, Olomolaiye PO, Holt GD, Harris FC. A survey of constraints on Iranian construction operatives' productivity. Construction Management and Economics 1996;14(5):417-26.
- [10] Tipayalai K. Impact of international labor migration on regional economic growth in Thailand. Journal of Economic Structures 2020;9:15.
- [11] Teo EA, Ling FY, Chong AF. Framework for project managers to manage construction safety. International Journal of Project Management 2005;23(4):329-41.
- [12] McConnell CR, Brue SL. Economics: principles, problems, and policies. 17thed. New York: McGraw-Hill; 2008.

- [13] Anderson B, Blinder S. Who counts as a migrant? definitions and their consequences [Internet]. 4thed. Oxford: Migration Observatory, Centre on Migration, Policy and Society (COMPAS), University of Oxford. 2015 [cited 2025 Feb 25]. Available from: http://www.migrationobservatory.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2016/04/Briefing-Who_Counts_as_a_Migrant.pdf.
- [14] Borjas GJ. Labor economics. 6thed. New York: McGraw-Hill; 2013.
- [15] Fix M, Papademetriou DG, Batalova J, Terrazas A, Lin SY, Mittelstadt M. Immigration and the global recession. Washington, DC: Migration Policy Institute; 2009.
- [16] Locke EA, Latham GP. What should we do about motivation theory? six recommendations for the twenty-first century. Academy of Management Review 2004;29(3):388-403.
- [17] Martin PL. Migration, trade and remittances: low- and high-skilled workers. Remittances Review 2016;1(1):37-52.
- [18] Martin PL. Promise unfulfilled: unions, immigration and the farm workers. Ithaca: Cornell University Press; 2003.
- [19] Ruhs M, Anderson B. Who needs migrant workers? labour shortages, immigration, and public policy. Oxford: Oxford University Press; 2010.
- [20] Chan DWM, Kumaraswamy MM. An evaluation of construction time performance in the building industry. Building and Environment 1996;31(6):569-78.
- [21] Theodore N, Valenzuela A Jr, Meléndez E. La esquina (the corner): day laborers on the margins of New York's formal economy. WorkingUSA 2006;9(4):407-23.
- [22] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Migration and the labor markets in Asia: recent trends and policies. Paris: OECD Publishing; 2002.
- [23] Loosemore M, Dainty A, Lingard H. Human resource management in construction projects: strategic and operational approaches. London: Taylor & Francis; 2003.
- [24] Chan APC, Chan APL. Key performance indicators for measuring construction success. Benchmarking: An International Journal 2004;11(2):203-21.
- [25] Becker GS. Human capital: a theoretical and empirical analysis, with special reference to education. 3rded. Chicago: University of Chicago Press; 1993.
- [26] Piore MJ. Birds of passage: migrant labor and industrial societies. Cambridge: Cambridge University Press; 1979.
- [27] Castles S, Miller MJ. The age of migration: International population movements in the modern world. 4thed. Basingstoke: Palgrave Macmillan; 2009.

- [28] Canton H. Organisation for economic co-operation and development (OECD). In: The Europa directory of international organizations 2021. London: Routledge; 2021. p. 677-87.
- [29] Carranza E, Farole T, Gentilini U, Morgandi M, Packard T, Santos I, et al. Managing the employment impacts of the COVID-19 crisis: policy options for relief and restructuring [Internet]. Washington, DC: World Bank; 2020 [cited 2025 Jun 6]. Available from: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/76a1cc4c-be04-59d4-b72b-c11da5ca4857/content>.
- [30] Horta IM, Camanho AS, Moreira Da Costa J. Performance assessment of construction companies: a study of factors promoting financial soundness and innovation in the industry. *International Journal of Production Economics* 2012;137(1):84-93.
- [31] Verick S, Islam I. The great recession of 2008–2009: causes, consequences and policy responses. Bonn: IZA Institute; 2010.
- [32] Holzer H. Immigration policy and less skilled workers in the United States. Washington, D.C.: Migration Policy Institute. 2011 [cited 2025 Jun 10]. Available from: <http://www.migrationpolicy.org/pubs/Holzer-January2011.pdf>.
- [33] World Bank. Migration and development: a role for the World Bank group. Washington, DC: World Bank; 2016.
- [34] Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. Multivariate data analysis. 8thed. Hampshire: Cengage Learning EMEA; 2019.
- [35] Turner RC, Carlson L. Indexes of item-objective congruence for multidimensional items. *International Journal of Testing* 2003;3(2):163-71.
- [36] Nunnally JC, Bernstein IH. Psychometric theory. 3rded. New York: McGraw-Hill; 1994.
- [37] Cronbach LJ. Essentials of psychological testing. 3rded. New York: Harper & Row; 1970.
- [38] Schumacker RE, Lomax RG. A beginner's guide to structural equation modeling. 4thed. New York: Routledge; 2016.
- [39] Shen L, Tam VWY, Tam L, Ji Y. Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice. *Journal of Cleaner Production* 2010;18(3):254-9.
- [40] Dainty A, Green S, Bagilhole B. People and culture in construction: contexts and challenges. In: Dainty A, Green S, Bagilhole B, editors. People and culture in construction: a reader. London: Taylor & Francis; 2007. p. 3-25

- [41] Sae-ngow M, Suksom S. The management of foreign workers of the construction business in Thailand. Journal of MCU Buddhapanya Review 2024;9(4):330-42. (In Thai)
- [42] International Labour Organization. Recruitment of migrant workers in Asia: Policies, practices and challenges. Geneva: ILO Regional Office for Asia and the Pacific; 2018.
- [43] Kongchasing N, Sua-iam G. The main issue working with migrant construction labor: A case study in Thailand. Engineering, Construction and Architectural Management 2022;29(4):1715-30.
- [44] Adrian JJ. Construction productivity: measurement and improvement. Champaign, IL: Stipes Publishing; 2004.
- [45] Choudhry RM, Fang D, Lingard H. Measuring safety climate of a construction company. Journal of Construction Engineering and Management 2009;135(9):890-9.
- [46] Chuasuwan S. The study of the factors affecting lower labor productivity in construction [Master of science]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2010. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.เทวกุล จันทรชามบ่อม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน โทรศัพท์ 093-4474646 E-mail: tawakun.ch@rmuti.ac.th



ผศ.ดร.วรรณะ ประภากรณ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคล อีสาน โทรศัพท์ 083-6777796 E-mail: wantana.pa@rmuti.ac.th

Article History:

Received: December 16, 2025

Revised: March 30, 2026

Accepted: April 9, 2026

การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อลดเวลาในกระบวนการกัดยาง กันกระแทกคัปปลิง

DEVELOPMENT OF JIG AND FIXTURE TO REDUCE TIME IN RUBBER COUPLING MILLING

ณัฐภัทร กาญจนเรืองรอง¹ และ ศรีนยา ประทีปชนะชัย^{2*}

^{1,2*}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง
จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000, ¹dr.nattapat@techno.rru.ac.th, ^{2*}sarinya@techno.rru.ac.th

Nattapat Kanchanaruangrong¹ and Sarinya Prateepchanachai^{2*}

^{1,2*}Lecturer, Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial
Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, 422 Marupong Road Na Muang, Muang,
Chachoengsao, 24000, Thailand, ¹dr.nattapat@techno.rru.ac.th, ^{2*}sarinya@techno.rru.ac.th

* ผู้ประพันธ์บทความ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการกัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิงด้วยเครื่องกัดแบบซีเอ็นซี โดยชิ้นงานผลิตจากวัสดุเทปลอนซึ่งมีความลื่นและยึดหยุ่นสูง ส่งผลให้การจับยึดและการกำหนดตำแหน่งด้วยแรงงานคนเกิดความแปรปรวนและใช้เวลานาน งานวิจัยดำเนินการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลาโดยใช้แผนภูมิมือซ้าย-มือขวา ร่วมกับการจับเวลาโดยตรง การประเมินอัตราเร็วในการทำงานตามระบบ Westinghouse และการคำนวณเวลามาตรฐาน ก่อนนำหลักการ ECRS มาวิเคราะห์เพื่อระบุขั้นตอนที่ก่อให้เกิดความสูญเสีย จากผลการวิเคราะห์พบว่าขั้นตอนการตั้งค่าเครื่องมือตัดและการตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงานเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลามากและพึ่งพาแรงงานคนสูง จึงได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจากวัสดุ MC Nylon เพื่อช่วยกำหนดตำแหน่งอ้างอิงให้คงที่ หลังการปรับปรุงสามารถลดจำนวนขั้นตอนการทำงานจาก 10 ขั้นตอนเหลือ 9 ขั้นตอน ลดเวลารอบเวลาการผลิตจาก 1,151.05 วินาที เหลือ 956.43 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 16.9 โดยเวลาสูญเสียของมือซ้ายลดลงร้อยละ 16.3 ขณะที่เวลาการกัดด้วยเครื่องจักรยังคงเดิม ผลการวิจัยเวลาในการปรับตั้งระบบ ก่อนปรับปรุง เท่ากับ 352.57 และเวลาในการปรับตั้งระบบหลังปรับปรุง

เท่ากับ 151.85 วินาที ผลการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรลดเวลาได้ทั้งหมด 200.72 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นการลดลงร้อยละ 56.93 โดยไม่กระทบต่อขั้นตอนการกัดชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร เพิ่มความสม่ำเสมอของตำแหน่งชิ้นงาน และลดความแปรปรวนที่เกิดจากแรงงานคน ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน, การลดเวลาปรับตั้งเครื่องจักร, แผนภูมิมือซ้าย-มือขวา, ECRS, เครื่องกัดซีเอ็นซี

ABSTRACT

This research aims to develop a jig and fixture to shorten machine setup time in the CNC milling process of rubber coupling components made from polytetrafluoroethylene (PTFE). Due to the high slipperiness and flexibility of the material, conventional manual clamping and positioning resulted in long setup time and high variability. The study applied work and time study techniques, including left-right hand chart analysis, direct time measurement, Westinghouse performance rating, and standard time calculation. The ECRS principle was employed to identify non-value-added activities, particularly in tool setup and workpiece reference positioning. Based on the analysis, a new jig and fixture made from MC Nylon was designed to provide a fixed reference position and minimize reliance on operator skill. After improvement, the number of production steps was reduced from 10 to 9, and the total cycle time declined from 1,151.05 seconds to 956.43 seconds, representing a 16.9% improvement. The non-value-added time of the left hand dropped by 16.3%, while the CNC machining time remained unchanged. The research results indicate that the developed workpiece fixture can effectively shorten machine setup time, improve the consistency of workpiece positioning, and mitigate variability caused by human operations. As a result, the production process becomes more continuous and operates with higher efficiency.

KEYWORDS: Jig and fixture, Machine setup time reduction, Left-right hand chart, ECRS, CNC milling

1. บทนำ

ในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจในปัจจุบัน ภาคอุตสาหกรรมการผลิตต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีและความต้องการของตลาดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สถานประกอบการ

จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีความคล่องตัว สามารถตอบสนองต่อคำสั่งผลิตได้อย่างรวดเร็ว และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสม การวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการทำงานจึงมีบทบาทสำคัญในการลดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่า และเพิ่มความพร้อมของระบบการผลิตให้สอดคล้องกับสภาพการแข่งขัน [1]

ชิ้นส่วนยางกันกระแทกคัปปลิง (Rubber Coupling) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุประเภทเทปลอน หรือโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Teflon/Polytetrafluoroethylene: PTFE) เพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนและแรงกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน วัสดุเทปลอนมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความทนทานต่อแรงเสียดสี น้ำหนักเบา ไม่ดูดซึมน้ำ และมีเสถียรภาพทางเคมีสูง จึงเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการทั้งความทนทานและความยืดหยุ่น อย่างไรก็ตาม เทปลอนเป็นวัสดุที่มีค่าความเหนียวและค่าความลื่นสูง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายในระหว่างกระบวนการกัดขึ้นรูป และมีแนวโน้มที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนของมุมกัดมากกว่าวัสดุโลหะทั่วไป ในกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วนดังกล่าว ปัญหาสำคัญที่พบคือการจับยึดชิ้นงานที่ขาดความมั่นคงเนื่องจากพื้นผิวของวัสดุมีความลื่นสูง ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการขยับตัวระหว่างการกัด ทำให้มุมกัดที่ได้จริงไม่เป็นไปตามแบบที่กำหนด สถานการณ์ดังกล่าวอาจก่อให้เกิดงานเสีย (Defect) งานทำซ้ำ (Rework) หรือความคลาดเคลื่อนในการประกอบเข้ากับคัปปลิง ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการส่งกำลังและอายุการใช้งานของชุดประกอบในระบบยานยนต์

ในกระบวนการกัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิง พบว่าขั้นตอนการปรับตั้งเครื่องจักร (Set-up) เป็นขั้นตอนที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการผลิต โดยในปัจจุบันยังคงอาศัยการจัดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานด้วยแรงงานคนเป็นหลัก ผ่านการชนน็อตยึดชิ้นงานเข้ากับแท่นเครื่องกัดแบบซีเอ็นซี (Computer Numerical Control: CNC) ส่งผลให้ตำแหน่งของชิ้นงานในแต่ละครั้งขาดความแน่นอน ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องทำการปรับตั้งศูนย์แกน X และแกน Y ใหม่ทุกครั้ง ทำให้ต้องใช้เวลาในการปรับตำแหน่งและตรวจสอบความถูกต้องซ้ำหลายครั้งก่อนเริ่มกระบวนการกัด สถานการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของขั้นตอนการทำงานในแต่ละรอบการผลิต ดังนั้น เมื่อการปรับตั้งเครื่องจักรใช้เวลานาน ย่อมก่อให้เกิดการรอคอย ทำให้เครื่องจักรไม่สามารถสร้างผลงานได้อย่างเต็มศักยภาพ และส่งผลให้เกิดต้นทุนด้านแรงงานเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น [2]

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Jig & Fixture) เป็นเครื่องมือที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานให้ถูกต้อง ลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น และช่วยให้ขั้นตอนการทำงานมีความเป็นมาตรฐานมากยิ่งขึ้น หากอุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับลักษณะของชิ้นงาน และกระบวนการผลิต จะสามารถช่วยลดขั้นตอนการปรับตั้งเครื่องจักร รวมถึงลดการพึ่งพาทักษะเฉพาะบุคคลของผู้ปฏิบัติงานได้

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนการดำเนินงานที่ผ่านมา พบว่าการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับกระบวนการกัดอย่างกันกระแทกยังมีการศึกษาค้นคว้าจำกัด อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่ยังไม่สามารถตอบสนองต่อการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะในบริบทของการผลิตจริงที่มีข้อจำกัดด้านเครื่องจักรและพื้นที่การทำงาน และมุ่งเน้นการลดความสูญเสียจากแรงงานคนทั่วไป แต่ยังขาดการออกแบบอุปกรณ์จับยึดเฉพาะสำหรับวัสดุที่มีความลื่นและยึดหยุ่นสูงในกระบวนการกัด CNC

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดขึ้นรูปวัสดุเทปลอน เพื่อเพิ่มความแม่นยำของมุมกัดให้เป็นไปตามแบบที่กำหนด และ 2) เพื่อลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการกัดอย่างกันกระแทกสำหรับคัปปลิง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม ได้แก่

2.1 แผนภูมิมือซ้าย-มือขวา (Left and Right Hand Chart)

เพื่อวิเคราะห์ความสมดุลของการเคลื่อนไหวของพนักงานระหว่างมือทั้งสองข้าง ดังตารางที่ 1 การวิเคราะห์การทำงานของพนักงานในการศึกษาขั้นตอนของการปฏิบัติงาน ณ จุดต่าง ๆ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ชุดเดียวกันกับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ แต่มีความหมายที่เปลี่ยนไปเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานของมือโดยมีเพียง 4 ตัว [3]

ตารางที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของแผนภูมิมือซ้าย-มือขวา

สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	ความหมาย
○	การปฏิบัติงาน (Operation)	การใช้มือหยิบจับชิ้นงานหรือสิ่งของ การจัดตั้ง การปล่อยวัตถุออกจากมือ
⇒	การเคลื่อนมือ (Transportation)	การเคลื่อนของมือจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง
D	มือว่าง (Delay)	ช่วงเวลาที่มืออยู่ว่าง โดยไม่ได้ทำงานอะไรเลย
▽	การถือ (Hold)	กำลังถือของอยู่ในมือ เพื่อให้อีกมือหนึ่งทำงานบนวัตถุนั้น หรือรองงาน

2.2 การปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลักการ ECRS

หลักการลดความสูญเปล่า (ECRS) ประกอบด้วย การกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) และการทำให้ง่าย (Simplify) ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเริ่มลดความสูญเปล่าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแนวทางการลดความสูญเปล่าลงสามารถทำได้โดยอาศัย 4 หลักการที่เรียกสั้น ๆ ว่า ECRS ดังนี้

- 1) การกำจัด (Eliminate) หมายถึง การวิเคราะห์กระบวนการปัจจุบันและการขจัดความสูญเปล่าทั้ง 7 ประการที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต
- 2) การรวมกัน (Combine) สามารถลดการทำงานที่ไม่จำเป็น โดยการพิจารณาว่าสามารถลดขั้นตอนการทำงานได้หรือไม่
- 3) การจัดใหม่ (Rearrange) หมายถึง การปรับเปลี่ยนขั้นตอนการผลิต เพื่อให้ลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นหรือการรอคอย
- 4) การทำให้ง่าย (Simplify) หมายถึง การปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีความสะดวกและง่ายต่ายยิ่งขึ้น โดยอาจออกแบบจิ๊ก (Jig) หรืออุปกรณ์จับยึด (Fixture) เพื่อเพิ่มความสะดวกและความแม่นยำในการดำเนินงาน [4]

2.3 การออกแบบเครื่องมือจับยึดชิ้นงาน

2.3.1 จิ๊ก (Jig) เป็นเครื่องมือพิเศษที่สร้างขึ้นมาเพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่ง จับยึดชิ้นงาน และยังเป็นตัวนำทางของเครื่องมือตัด (Cutting Tools) เช่น ในการกัด หรือคว้านรู จิ๊กจะมีบล็อกนำทางซึ่งอัดติดแน่นอยู่เสมอ บล็อกนำทางนี้ทำด้วยเหล็กพิเศษที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว และจะเป็นตัวที่ใช้สำหรับนำทางในการกัดของดอกสว่านหรือเครื่องมือตัดอื่น ๆ ความสัมพันธ์ของเครื่องมือตัดกับจิ๊ก

2.3.2 ฟิกซ์เจอร์ (Fixture) เป็นเครื่องมือสำหรับการผลิตที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่ง ยึดจับ และรองรับชิ้นงานให้อยู่คงที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ สำหรับฟิกซ์เจอร์จะมีแท่งตั้งระยะและแผ่นกุดเป็นตัวช่วยในการให้ตั้งระยะของเครื่องมือตัดตรงตำแหน่งที่ถูกต้องที่กระทำต่อชิ้นงาน ความสัมพันธ์ของเครื่องมือตัดกับฟิกซ์เจอร์

2.3.3 หลักการของการยึดจับชิ้นงาน ตัวยึดจับชิ้นงานจะถูกนำมาใช้สำหรับอธิบายถึงชิ้นส่วนของจิ๊กหรือฟิกซ์เจอร์ ที่ทำหน้าที่ในการยึดจับชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแบบแผ่นยึดตัวจับ และแบบหนีบยึดจับชิ้นงานให้อยึดแน่นอยู่กับจิ๊กหรือฟิกซ์เจอร์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างเที่ยงตรง และอยู่ในตำแหน่งดังกล่าวโดยสามารถต่อต้านแรงที่เกิดจากการตัดของเครื่องมือตัดที่กระทำต่อชิ้นงานได้เป็นอย่างดี กฎเกณฑ์ขั้นพื้นฐานของการยึดจับชิ้นงานนั้น การทำงานของปากกาหรือตัวยึดจับชิ้นงานในการที่จะยึดชิ้นงานให้อยึดแน่นกับจิ๊กหรือฟิกซ์เจอร์ในระหว่างที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่

ศึกษาการผลิตภายใต้เครื่องกัด CNC จำนวน 1 เครื่อง โดยเก็บข้อมูลการผลิตจำนวน 10 รอบ ก่อนปรับปรุง และ 10 รอบหลังปรับปรุง เพื่อวิเคราะห์เวลามาตรฐานและเปรียบเทียบผล จะต้องให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมั่นคงเพื่อให้ได้ผลงานออกมาอย่างดีและถูกต้อง [5]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Thavornwat and Jonguwuttanaruk [6] ศึกษาการลดเวลาการประกอบตู้ควบคุมระบบโซลาร์ปั๊ม ได้ทำการศึกษาการลดเวลาการประกอบตู้ควบคุมระบบโซลาร์ปั๊ม โดยประยุกต์ใช้แนวคิด ECRS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความสูญเปล่า และลดระยะเวลาการประกอบชิ้นงาน การปรับปรุงกระบวนการดำเนินการผ่านการปรับลำดับขั้นตอนการทำงานและการใช้เครื่องมือช่วย ได้แก่ การใช้จิ๊ก (Jig) และการจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ ผลการวิจัยพบว่าสามารถลดระยะเวลาการทำงานลงได้ และส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวคิด ECRS สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Tantiwong et al [7] ศึกษาการประยุกต์ใช้ข้อมูลระยะเอี่ยมในการปรับปรุงสถานีนงานบรรจุหมีโคราช งานวิจัยเป็นการวิจัยเชิงสำรวจและเชิงทดลอง ศึกษาความไม่สบายของร่างกายจากการทำงานโดยใช้แบบประเมินความเสี่ยงของระบบโครงสร้างกระดูกและกล้ามเนื้อ ร่วมกับการวัดระยะเอี่ยมของแขนในมุมต่าง ๆ และการศึกษาเวลา จากนั้นปรับปรุงสถานีนงานและตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์โดยอาศัยหลักการยศาสตร์และ ECRS เพื่อการจัดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น ผลการวิจัยพบว่าการจัดวางอุปกรณ์ให้อยู่ในช่วงระยะเอี่ยมปกติสามารถลดอาการปวดเมื่อยของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณหลังส่วนล่างและไหล่ นอกจากนี้ ยังสามารถลดขั้นตอนการทำงานจาก 11 ขั้นตอน เหลือ 8 ขั้นตอน และลดเวลาการทำงานลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น แม้งานวิจัยดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการปรับปรุงสถานีนงานและการจัดวางอุปกรณ์ตามหลักการยศาสตร์ แต่ยังไม่เน้นการลดความสูญเปล่าจากการเคลื่อนไหวของแรงงานคนเป็นหลัก โดยยังไม่มีการออกแบบหรือพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อช่วยกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน ลดการพึ่งพาท่าทางของผู้ปฏิบัติงาน และลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรโดยตรง

Sumranhun [8] ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตสินค้าตามฤดูกาลด้วยการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา ร่วมกับการออกแบบอุปกรณ์จับยึดในการลดความสูญเปล่าในการทำงาน งานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิตของชิ้นส่วนสปริงเกอร์ ผ่านการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง โดยใช้แผนภูมิมือซ้ายและมือขวาซึ่งเป็นเครื่องมือการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและเวลา เพื่อช่วยประเมินและปรับปรุงวิธีการทำงาน การใช้หลักการ ECRS ในการออกแบบจัดการของมือซ้ายและมือขวาใหม่ทั้งสองข้าง ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการ

ทำงานเพื่อลดขั้นตอน ลดเวลา และใช้ทรัพยากรอย่างเหมาะสม แสดงให้เห็นว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและเวลา รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์จับยึดเป็นแนวทางหลักในการเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้ Pornprasert et al [9] ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการซ่อมสียร์ถยนต์ โดยทำการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ช่วยในการทำงาน ผลการวิจัยพบว่าสามารถลดเวลาในการทำงานและลดของเสียจากกระบวนการซ่อมได้

Wonginyoo et al [10] ศึกษาการลดเวลาในกระบวนการผลิตถึงน้ำมัน โดยการประยุกต์ใช้แนวคิด ECRS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมถึงย่อยของรถชุดไฮดรอลิก ในการศึกษากระบวนการผลิตพบว่าปัญหาหลักอยู่ในขั้นตอนการเชื่อมส่วนบนของถัง ซึ่งใช้เวลานานไปกับการจัดตำแหน่งชิ้นงาน ซึ่งต้องทำซ้ำทุกครั้งเมื่อมีการนำชิ้นงานใหม่เข้าสู่กระบวนการ ส่งผลให้กำลังการผลิตลดลงและต้นทุนแรงงานเพิ่มขึ้น จึงได้ใช้แนวคิด ECRS มาวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการตัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออก และได้ออกแบบพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อช่วยในกระบวนการเชื่อม อุปกรณ์ดังกล่าวช่วยให้สามารถจัดตำแหน่งชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ ทำให้เวลาในขั้นตอนการเชื่อมลดลง

ดังนั้น จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีการประยุกต์ใช้การออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการทำงานร่วมกับเครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการ รวมถึงหลักการ ECRS เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานและลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต ผลการวิจัยส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าสามารถลดระยะเวลาในการทำงานและลดของเสีย ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิผลของการใช้การออกแบบอุปกรณ์จับยึดและการปรับปรุงวิธีการทำงานเป็นเครื่องมือหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังมุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการทำงานทั่วไป ขณะที่การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเฉพาะสำหรับกระบวนการกัดขึ้นรูปวัสดุที่มีความลื่นและความยืดหยุ่นสูง เช่น วัสดุเทปลอน รวมถึงการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึดเพื่อลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการกัดอย่างกันกระแทกสำหรับคัปปลิง ยังมีการศึกษาอย่างจำกัด จึงนำไปสู่การดำเนินงานวิจัยนี้ ซึ่งมุ่งพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมกับลักษณะของวัสดุและกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของมุมกัดและลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร จะช่วยยกระดับประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยรวม ลดความล่าช้าในการทำงานทำให้ต้นทุนในการผลิตมากขึ้น [11]

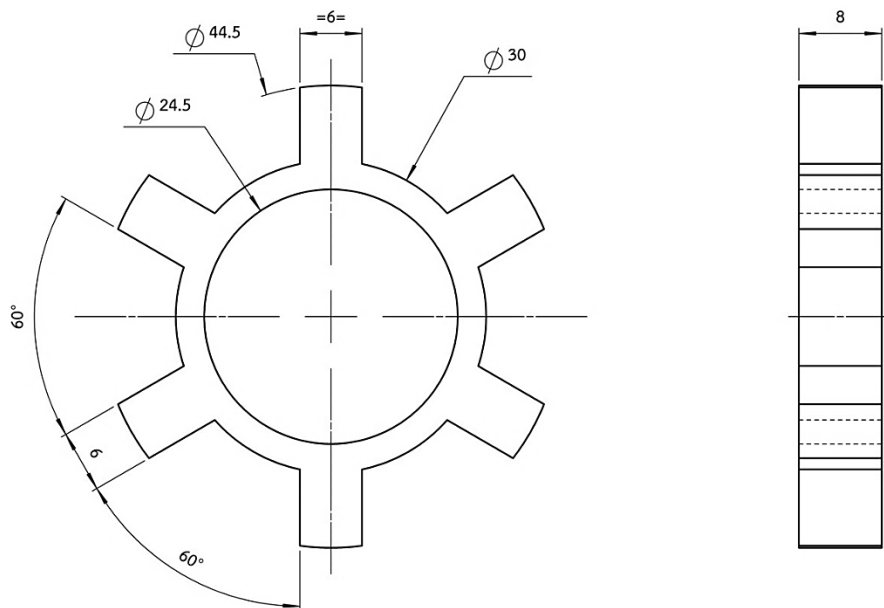
3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 สำนวจสภาพปัจจุบัน

กระบวนการกัดอย่างกันกระแทกสำหรับคัปปลิงพบว่า ในปัจจุบันผู้ปฏิบัติงานดำเนินการจัดตำแหน่งและจับยึดชิ้นงานด้วยแรงงานคน โดยใช้วิธีการขันน็อตยึดชิ้นงานเข้ากับแท่นเครื่องกัด

แบบซีเอ็นซี ชิ้นส่วนยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิงผลิตจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ประเภทเทป ล่อนหรือโพลีเอสเตอร์ฟลูออโรเอทิลีน ซึ่งมีลักษณะและรายละเอียดสำคัญดังรูปที่ 1 ชิ้นงาน มีลักษณะเป็นแผ่นวงแหวน โดยส่วนกลางเป็นรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับสวมกับเพลลาหรือชิ้นส่วนคัปปลิง ตัววงแหวนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 44.5 มิลลิเมตร และมีปีกยื่นรอบวงจำนวน 6 ตำแหน่ง จัดเรียงในระนาบเชิงมุมเท่ากันที่ 60 องศา เพื่อให้สามารถรับแรงบิดและถ่ายแรงได้อย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานมีความหนา 8 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติเด่นด้านความเหนียวและความลื่น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายระหว่าง กระบวนการกัดขึ้นรูป และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดความคลาดเคลื่อนของมุมกัดจากค่าที่กำหนดไว้

การออกแบบอุปกรณ์จับยึดกำหนดตามหลักการกำหนดตำแหน่งเพื่อล็อกองศาอิสระของ ชิ้นงานให้คงที่ โดยกำหนดผิวจุดอ้างอิง (Datum) เพื่อควบคุมตำแหน่งในแกน X-Y และความสูงใน แกน Z ใช้ตัวหยุดเพื่อควบคุมการหมุนของชิ้นงานให้ได้มุมตามต้องการ ตำแหน่งการกัดจับถูก ออกแบบให้ด้านทิศทางแรงตัดจากการกัด เพื่อลดการเลื้อนและการสั่นของชิ้นงานที่มีความลื่นสูง อุปกรณ์มีข้อจำกัดด้านการสึกหรอของจุดกำหนดตำแหน่งและสมบัติวัสดุ จึงควรกำหนดการ ตรวจสอบสภาพ การปรับตั้งเป็นระยะ และการใช้งานต้องเป็นไปตามช่วงขนาดชิ้นงานที่ออกแบบ รองรับ

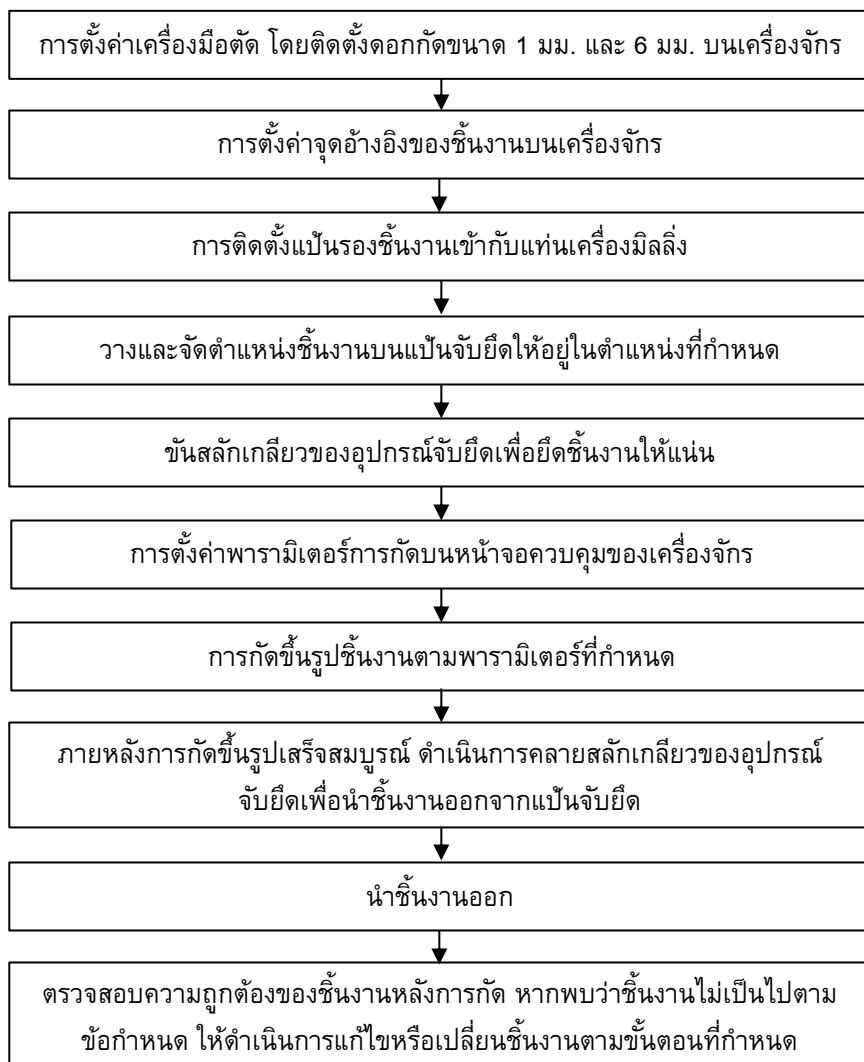


รูปที่ 1 ภาพเขียนแบบชิ้นงานยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิง

ดำเนินการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา ใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาพร้อมกับการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของมือ และการออกแบบอุปกรณ์ช่วยยึดชิ้นงาน เพื่อปรับปรุงวิธีการและลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดเวลาการทำงานลง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2 ลำดับขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการผลิตยางกันกระแทกคัปปลิงด้วยเครื่องกัดแบบซีเอ็นซี แบ่งเป็น 10 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานในการผลิตยางกันกระแทกคัปปลิงด้วยเครื่องกัดแบบซีเอ็นซี

3.3 การศึกษาเวลาโดยตรง

ดำเนินการจับเวลาเบื้องต้น การหาเวลาปกติ และการกำหนดเวลามาตรฐาน ดังนี้

3.3.1 การจับเวลาเบื้องต้น

ผู้วิจัยได้จับเวลาเบื้องต้นและหาค่าเฉลี่ยในการทำงานทั้ง 10 ขั้นตอน ในการศึกษาการจับเวลาการทำงานใช้ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ ± 5 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจำนวนครั้งที่จับเวลามาเบื้องต้นทุกขั้นตอนมีความเพียงพอและน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อได้ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูล ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความสามารถของระบบการวัด (Measurement System Analysis: MSA) โดยพิจารณาค่าร้อยละความแปรปรวนของระบบ (% Variation) และความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลการตรวจสอบพบว่า ค่าความแปรปรวนของระบบเท่ากับ ร้อยละ 12.5 และค่าความสามารถในการทำซ้ำเท่ากับ ร้อยละ 87.5 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการศึกษางานลักษณะนี้ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอในระดับที่เหมาะสม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจับเวลาเบื้องต้น

ขั้นตอน ที่	ค่าเฉลี่ย (วินาที) ($\bar{X}$)	ค่าพิสัย (R)	ค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ย $\left(\frac{R}{\bar{X}}\right)$	จำนวนรอบที่ เหมาะสม (N)
1	121.52	2.80	0.02	3
2	187.20	2.00	0.01	3
3	7.70	1.00	0.13	4
4	4.10	1.00	0.24	17
5	10.60	1.00	0.09	3
6	5.30	1.00	0.19	10
7	799.80	0.00	0.00	3
8	9.23	1.20	0.13	4
9	2.00	1.00	0.50	74
10	3.60	1.10	0.31	27

จากตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณจำนวนรอบที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอนการผลิต ผู้วิจัยกำหนดจำนวนรอบการจับเวลาโดยพิจารณาจากระยะเวลาของแต่ละขั้นตอนการผลิต ขั้นตอนการทำงานที่มีระยะเวลาการปฏิบัติงานเฉลี่ยไม่เกิน 2 นาทีต่อรอบ จะดำเนินการจับเวลาจำนวน 10 รอบต่อขั้นตอน ในขณะที่ขั้นตอนการทำงานที่มีระยะเวลาการปฏิบัติงานเฉลี่ยมากกว่า 2 นาทีต่อรอบ จะดำเนินการจับเวลาจำนวน 5 รอบต่อขั้นตอน เพื่อให้ได้ข้อมูลเวลาที่มีความเพียงพอและเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ และสอดคล้องกับหลักการศึกษางาน โดยการคำนวณหาจำนวนรอบที่เหมาะสมอ้างอิงตามตาราง MayTag [10]

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการปรับตั้งเครื่องจักร (Machine Setup Time) ในระดับเครื่องจักร มีค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ย หรือความแปรปรวนของเวลาอยู่ในระดับต่ำ (เนื่องจากค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ยใช้เป็นตัวชี้วัดความแปรปรวนของเวลาการทำงานในแต่ละขั้นตอน เมื่อค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำ) แสดงว่าการปฏิบัติงานมีความสม่ำเสมอและมีมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ชัดเจน ส่งผลให้กระบวนการปรับตั้งเครื่องจักรสามารถควบคุมเวลาในการทำงานได้ดี และไม่เป็นแหล่งก่อให้เกิดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต ในทางตรงกันข้าม ขั้นตอนที่ 3 - 6 และขั้นตอนที่ 8 - 10 มีค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ยสูง อยู่ระหว่าง 0.13 - 0.50 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแปรปรวนของเวลาการทำงานที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากการพึ่งพาการปฏิบัติงานของแรงงานคนเป็นหลัก โดยเฉพาะกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดตำแหน่ง การจับยึด และการถอดชิ้นงาน ส่งผลให้ขั้นตอนเหล่านี้มีความไม่สม่ำเสมอ และมีแนวโน้มก่อให้เกิดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์จับยึดมาประยุกต์ใช้ เพื่อลดความแปรปรวนของเวลาและเพิ่มความเป็นมาตรฐานของการทำงาน สำหรับขั้นตอนที่ 7 ซึ่งเป็นกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักร CNC พบว่ามีค่าพิสัยต่อค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.00 แสดงถึงความเสถียรของการทำงานของเครื่องจักร และความสม่ำเสมอของเวลาตัดเฉือน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ถ้าหากออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึด จะมีบทบาทเกี่ยวข้องกับตำแหน่งและความแม่นยำมากกว่าการลดเวลาการผลิต

3.3.2 การประเมินอัตราเร็วในการทำงาน

ผู้วิจัยดำเนินการประเมินอัตราเร็วในการทำงาน เนื่องจากในบางครั้งผู้ปฏิบัติงานมีงานช้าหรือเร็วกว่าปกติ เนื่องจากหลายสาเหตุ จึงต้องปรับเวลาให้เป็นเวลาปกติด้วยการปรับอัตราเร็ว (Rating Factor) ก่อนนำเวลาไปกำหนดเป็นเวลามาตรฐานต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประเมินระบบ Westinghouse system of rating [3] โดยระบบนี้ประเมินผู้ปฏิบัติงานจาก 4 ปัจจัยหลัก คือ 1) ทักษะ (Skill) 2) ความพยายาม (Effort) 3) เงื่อนไขในการทำงาน (Conditions) 4) ความสม่ำเสมอ (Consistency) โดยให้คะแนนแต่ละปัจจัย แล้วนำมา

รวมกันเป็นค่าปรับสมรรถนะ (Rating Factor) การคำนวณหาค่าเวลาปกติ (Normal Time: NT) ดังสมการที่ (1) [8]

$$NT = ST \times (1 + RF) \quad (1)$$

โดยที่ NT คือ เวลาปกติ (วินาที) ST คือ ค่าตัวแทนเวลา (Selected time) และ RF คือ การประเมินอัตราเร็ว (Rating factor)

3.3.3 กำหนดเวลามาตรฐาน

การกำหนดเวลามาตรฐาน สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$Std.T = NT \times (1 + A) \quad (2)$$

โดยที่ Std.T คือ เวลามาตรฐาน (วินาที) NT คือ เวลาปกติ (วินาที) และ A คือ ค่าเวลาเผื่อ (Allowance time)

ตารางที่ 3 เวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการ

ขั้นตอนที่	ค่าตัวแทนเวลา	การประเมินอัตราเร็ว	เวลาปกติ (วินาที)	เวลามาตรฐาน (วินาที)
1	121.52	+1.05	127.60	127.60
2	187.20	+1.05	196.56	196.56
3	7.70	+1.10	8.47	8.47
4	4.10	+1.10	4.51	4.51
5	10.60	+1.05	11.13	11.13
6	5.30	+1.00	5.30	5.30
7	799.80	+1.10	879.78	879.78
8	9.23	+1.05	9.69	9.69
9	2.00	+1.15	2.30	2.30
10	3.60	+1.10	3.96	3.96

งานวิจัยนี้ไม่รวมเวลาเผื่อกิจกรรมต่าง ๆ ในการคำนวณเวลามาตรฐาน โดยกำหนดค่า Allowance เท่ากับศูนย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการในเชิงเวลาเท่านั้น ดังตารางที่ 3 เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลก่อน-หลังของการปรับปรุงวิธีการทำงานและการใช้อุปกรณ์จับยึดภายใต้เงื่อนไขการผลิตเดียวกัน เพื่อให้ผลต่างของเวลาเกิดจากการปรับปรุงเป็นหลัก โดยผลการวิจัยจึงสะท้อนเวลาปกติของกระบวนการสำหรับการเปรียบเทียบเชิงทดลอง ทั้งนี้ เวลาที่ได้ยังไม่รวมค่าเผื่อที่ใช้ในสภาวะการผลิตจริง จึงควรมีการกำหนดค่าเผื่อตามนโยบายองค์กรหรือการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมหากนำไปใช้วางแผนกำลังการผลิต

3.3.4 ความเร็วในการผลิต

ความเร็วในการผลิต หรือ Takt Time ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับเวลาในการทำงานว่าสามารถรองรับความต้องการของลูกค้าได้หรือไม่ หากขั้นตอนใดมีเวลามาตรฐานสูงกว่า Takt Time ขั้นตอนนั้นจะต้องถูกปรับปรุงเพื่อลดเวลาลง ดังสมการที่ 3 [8]

$$\text{Takt Time} = \frac{\text{เวลาในการทำงาน}}{\text{ปริมาณความต้องการ}} \quad (3)$$

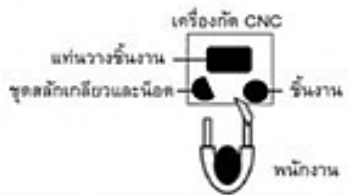
บริษัทกรณีศึกษามีเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน (28,800 วินาทีต่อวัน) ทำงาน 26 วันต่อเดือน ส่งผลให้มีเวลาทำงานรวมทั้งสิ้น 748,800 วินาทีต่อเดือน (28,800 x 26) โดยคิดจากปริมาณความต้องการสูงสุด 6,000 ชิ้นต่อเดือน หรือคิดเป็น 230.77 ชิ้นต่อวัน (6000/26) จะมี Takt Time เท่ากับ 124.8 วินาทีต่อชิ้น (28,800/230.77)

จากตารางที่ 3 พบว่า ขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าเครื่องมือตัด โดยติดตั้งดอกกัดขนาด 1 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร บนเครื่องจักรและขั้นตอนที่ 2 การตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงานบนเครื่องจักร มีเวลาในการทำงานที่เกินกว่า Takt Time เท่ากับ 2.8 วินาที และ 71.76 วินาทีตามลำดับ จึงเป็นขั้นตอนที่ต้องนำมาวิเคราะห์และลดเวลาการทำงานลง

4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิมือซ้าย-ขวา ก่อนปรับปรุง

จากการจัดทำแผนภูมิมือซ้าย-ขวาของกระบวนการผลิตของพนักงาน 1 คน ก่อนการปรับปรุง พบว่าการปฏิบัติงานส่วนใหญ่ยังอาศัยแรงงานคนโดยใช้มือขวาเป็นหลักมากกว่ามือซ้าย ส่งผลให้เกิดความสูญเปล่าจากการเคลื่อนไหวที่ไม่เพิ่มคุณค่าในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยจึงใช้แผนภูมิมือซ้าย-ขวาในการวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังรูปที่ 3

แผนภูมิมือซ้าย-ขวา					
ขั้นตอน : งานกัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิ่ง					
	ประสิทธิภาพ	ความสูญเสีย			
มือซ้าย	9.70	1,141.35			
มือขวา	351.25	799.80			
ผลรวม	360.95	1,941.15			
มือซ้าย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์		เวลา (วินาที)	มือขวา
ประกอบดอกกัด	<u>121.52</u>	▽	○	121.52	ใช้มือติดตั้งและขันดอกกัด
จับและประกอบแผงควบคุม	<u>187.20</u>	▽	○	187.20	กดปุ่ม Jog เพื่อตั้งค่าอ้างอิง
ใช้สองมือยกและประกอบแป้นรองให้เข้าตำแหน่ง	7.70	○	○	7.70	ใช้สองมือจัดแนวและวางลงยึดแป้นรองกับแท่นวางชิ้นงาน
จับชิ้นงานกันเลื่อน	<u>4.10</u>	▽	➡	4.10	เอื้อมมือตวัดชิ้นงานให้ชิดแนวอ้างอิง
จับชิ้นงานกันเลื่อน	<u>10.60</u>	▽	○	10.60	ขันชุดสลักเกลียวและน็อตเพื่อล็อกชิ้นงานด้วยประแจ
ว่าง	<u>5.30</u>	D	○	5.30	กดปุ่มป้อนค่าการกัดชิ้นงาน
เผื่อการทำงานของเครื่องกัด	<u>799.80</u>	D	D	<u>799.80</u>	เผื่อการทำงานของเครื่องกัด
จับประกอบชิ้นงาน	<u>9.23</u>	▽	○	9.23	คลายชุดสลักเกลียวและน็อต
ใช้สองมือยกชิ้นงานออกและเคลื่อนย้ายไปจุดวาง	2.00	➡	➡	2.00	ใช้สองมือยกชิ้นงานและเคลื่อนย้ายไปจุดวาง
จับและประกอบชิ้นงาน	<u>3.60</u>	▽	○	3.60	ตรวจสอบชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัด
	1151.05			1151.05	

รูปที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิมือซ้าย-ขวา ก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 3 พบว่ามือซ้ายมีขั้นตอนการว่างงาน 1,141.35 วินาที เพราะมือซ้ายทำหน้าที่หลักในการประกอบชิ้นงาน จับยึด และรอคอย ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการใช้เวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรเป็นเวลานาน และมือขวามีขั้นตอนที่สูญเสียไปรวม 799.80 วินาที อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในมุมของการทำงานของเครื่องกัด พบว่าเป็นช่วงเวลาที่เครื่องจักรกำลังปฏิบัติงานตัดเฉือนชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง จึงถือเป็นการทำงานเต็มประสิทธิภาพของเครื่องจักร ผู้วิจัยจึงนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาพิจารณาร่วมกับหลักการ ECRS พบว่า ในขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าเครื่องมือกัด สามารถ

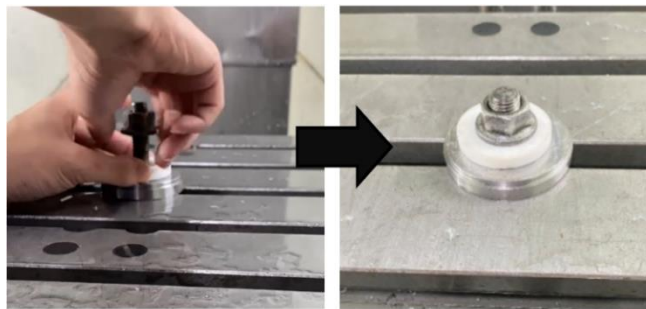
ลดขั้นตอนการขันยัดและปรับตั้งตำแหน่งด้วยแรงงานคน โดยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ช่วยให้การปรับตั้งค่าเครื่องจักรทำได้สะดวกและรวดเร็ว (Simplify) มากขึ้น และในขั้นตอนที่ 2 การตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงาน สามารถกำจัดจัดการตั้งค่าจุดอ้างอิงซ้ำในทุกครั้งของการผลิต (Eliminate) และลดการเอื้อม การคาดคะเนตำแหน่ง และความแปรปรวนจากแรงงานคน ซึ่งขึ้นอยู่กับทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน โดยการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจะช่วยกำหนดตำแหน่งอ้างอิงได้ง่ายขึ้น (Simplify)

นอกจากนี้ ในส่วนของการรวมกัน (Combine) พบว่าสามารถรวมกิจกรรมจับชิ้นงานและวางบนอุปกรณ์ยึดกับประกอบชิ้นงานให้แนบกับอุปกรณ์ยึด ให้เป็นจังหวะการทำงานเดียวกัน โดยออกแบบอุปกรณ์จับยึดให้สามารถจัดแนวและล็อกตำแหน่งได้พร้อมกัน ลดการเคลื่อนไหวซ้ำของมือซ้าย-ขวา และลดเวลาการจับยึดหลายครั้งติดต่อกัน ส่งผลให้จำนวนขั้นตอนลดลงและเวลาปฏิบัติงานรวมลดลงอย่างชัดเจน และในส่วนของการจัดใหม่ (Rearrange) ผู้วิจัยได้พิจารณาปรับลำดับขั้นตอนและตำแหน่งอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับทิศทางการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน เช่น การจัดวางอุปกรณ์จับยึดและเครื่องมือวัดให้อยู่ในระยะเอื้อมหยิบตามธรรมชาติ ลดการหมุนตัวหรือเอื้อมข้ามลำตัว รวมทั้งปรับลำดับการเตรียมอุปกรณ์ก่อนเริ่มติดตั้งดอกกัด เพื่อลดการย้อนกลับของขั้นตอนการทำงาน

จากแผนภูมิมือซ้าย-ขวาของกระบวนการกัดอย่างกันกระแทกด้วยเครื่อง CNC เมื่อพิจารณากิจกรรมที่ก่อให้เกิดคุณค่า (Value Added: VA) พบว่าไม่มีขั้นตอนใดที่แรงงานคนสร้างคุณค่าให้กับชิ้นงานโดยตรง เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงตามข้อกำหนดของลูกค้า คือระยะที่เครื่อง CNC ทำการกัดขึ้นรูป ซึ่งใช้เวลา 799.80 วินาที กิจกรรมดังกล่าวจึงนับเป็นขั้นตอนที่สร้างคุณค่าในกระบวนการผลิต ขณะที่บทบาทของแรงงานในแผนภูมิส่วนใหญ่เป็นการเตรียมงาน ควบคุม และสนับสนุนการทำงานของเครื่องจักร ส่วนกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น (Necessary Non-Value Added: NNVA) ได้แก่ การประกอบและติดตั้งดอกกัด จับและประกอบแผงควบคุม การจัดแนวและยึดจับชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง จับชิ้นงานกันเลื่อน การยึดล็อกชิ้นงาน เพราะเป็นการตั้งค่าเครื่องก่อนผลิต การคลายชุดล็อกหลังการกัด การเคลื่อนย้ายชิ้นงานออกจากจุดปฏิบัติงาน รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานภายหลังการผลิต กิจกรรมเหล่านี้ไม่ได้ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพโดยตรง แต่มีความจำเป็นต่อความถูกต้อง ความปลอดภัย และความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต จึงไม่สามารถตัดออกได้ทันที ขณะที่กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non-Value Added: NVA) ได้แก่ ช่วงเวลาว่างและการเฝารอการทำงานของเครื่องกัดในระหว่างที่เครื่อง CNC ดำเนินกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นเวลาที่แรงงานไม่ได้มีส่วนทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มมูลค่าใด ๆ ต่อผลิตภัณฑ์ กิจกรรมลักษณะนี้ถือเป็นความสูญเปล่าประเภทการรอคอย จึงเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาปรับปรุง เช่น การจัดสมดุล

คนกับเครื่องจักรหรือมอบหมายงานอื่นในช่วงที่เครื่องกำลังทำงาน เพื่อลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิต

ดังนั้น กิจกรรมที่จัดเป็นเวลาในการปรับตั้งระบบ คือขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมความพร้อมของเครื่องจักร ก่อนเริ่มการตัดจริง ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าเครื่องมือตัด ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 127.60 วินาที ขั้นตอนที่ 2 การตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงาน ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 196.56 วินาที และขั้นตอนที่ 3-6 การติดตั้ง วาง จัดตำแหน่ง ชิ้นยึด และตั้งค่าพารามิเตอร์ ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 8.47, 4.51, 11.13 และ 5.30 รวมเวลาในการปรับตั้งระบบก่อนปรับปรุงเท่ากับ 352.57 วินาที

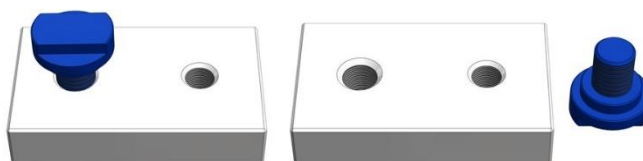


รูปที่ 4 การติดตั้งชิ้นงานบนแท่นวางก่อนปรับปรุง

4.2 การปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างกันกระแทกคัปปลิ้ง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการกักตักอย่างกันกระแทกคัปปลิ้ง โดยออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานขึ้นใหม่ เพื่อสนับสนุนการทำงานของผู้ปฏิบัติงานให้มีความสะดวกและเป็นระบบมากขึ้น อุปกรณ์ดังกล่าวช่วยให้พนักงานสามารถวางชิ้นงานลงในฟิกซ์เจอร์และทำการล็อกชิ้นงานด้วยจิกได้อย่างง่ายดาย

รูปที่ 5 แสดงลักษณะอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งผลิตจากวัสดุเอ็มซีไนลอน (MC Nylon) ที่มีสมบัติด้านความแข็งแรง ความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอ สามารถรองรับแรงยึดจับได้ดีโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผิวชิ้นงาน จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นอุปกรณ์จับยึดในกระบวนการผลิต และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของตำแหน่งชิ้นงาน



รูปที่ 5 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใหม่

ภายหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลขั้นตอนการผลิตด้วยกัน กระแทกปลั่งด้วยเครื่องกัดแบบซีเอ็นซี โดยครั้งแรกยังคงแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 10 ขั้นตอนเช่นเดิม อย่างไรก็ตาม พบว่าสามารถลดระยะเวลาในขั้นตอนที่ 2 ได้อย่างชัดเจน เหลือเพียง 9 ขั้นตอน จะถูกจัดออกตามหลัก ECRS เนื่องจากไม่จำเป็นต้องดำเนินการตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงานบนเครื่องจักรซ้ำในทุกรอบการผลิต เนื่องจากการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ได้กำหนดตำแหน่งอ้างอิงไว้ตั้งแต่ชิ้นงานชิ้นแรก และสามารถรักษาตำแหน่งชิ้นงานให้คงที่ตลอดกระบวนการผลิต ในการทำงานทั้ง 9 ขั้นตอน สามารถสรุปขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือ การตั้งค่าเครื่องมือตัด ขั้นตอนที่ 2 คือ การติดตั้งแป้นรองชิ้นงานเข้ากับแท่นเครื่องมิลลิ่ง ขั้นตอนที่ 3 คือ วางและจัดตำแหน่งชิ้นงานบนแป้นจับยึด ขั้นตอนที่ 4 คือ ขนอุปกรณ์จับยึดเพื่อยึดชิ้นงานให้แน่น ขั้นตอนที่ 5 คือ การตั้งค่าพารามิเตอร์การกัดบนหน้าจอควบคุม ขั้นตอนที่ 6 คือ การกัดขึ้นรูปชิ้นงานตามพารามิเตอร์ที่กำหนด ขั้นตอนที่ 7 คือ คลายยึดของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ขั้นตอนที่ 8 คือ นำชิ้นงานออก และ ขั้นตอนที่ 9 คือ การตรวจสอบชิ้นงาน

เมื่อจับเวลาหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต สามารถหาเวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการหลังปรับปรุง โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ ± 5 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการหลังปรับปรุง

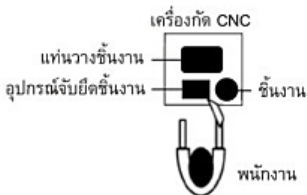
ขั้นตอนที่	ค่าตัวแทนเวลา	การประเมินอัตราเร็ว	เวลาปกติ (วินาที)	เวลามาตรฐาน (วินาที)
1	121.52	+1.05	127.60	127.60
2	6.80	+1.05	7.14	7.14
3	3.50	+1.05	3.68	3.68
4	8.50	+1.05	8.93	8.93
5	4.50	+1.00	4.50	4.50
6	799.80	+1.10	879.78	879.78
7	7.50	+1.05	7.88	7.88
8	1.50	+1.05	1.58	1.58
9	2.80	+1.05	2.94	2.94

จากตารางที่ 4 เวลามาตรฐานของแต่ละกระบวนการหลังปรับปรุงพบว่า การใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการจับยึดและการจัดตำแหน่งชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ในขณะที่ขั้นตอนการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องจักร CNC (ขั้นตอนที่ 6) ยังคงใช้เวลาเท่าเดิม เนื่องจากเป็น เวลาการทำงานของเครื่องจักรโดยตรง สะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงด้วยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน สามารถลดรอบเวลาการผลิตโดยรวม และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างเหมาะสม

4.3 การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิมือซ้าย-ขวา หลังปรับปรุง

จากประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้จัดทำแผนภูมิมือซ้าย-มือขวา เพื่อ ใช้เปรียบเทียบวิธีการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 6

แผนภูมิมือซ้าย-ขวา					
ขั้นตอน : งานกัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิ่ง					
	ประสิทธิภาพ	ความสูญเสีย			
มือซ้าย	1.5	954.92			
มือขวา	156.63	799.80			
ผลรวม	158.13	1754.72			
มือซ้าย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์		เวลา (วินาที)	มือขวา
ประกอบอุปกรณ์ขณะตั้ง ค่าเครื่องมือกัด	<u>121.52</u>	▽	○	121.52	ใช้มือติดตั้งและขันดอกกัด
จับชิ้นงานเตรียมวางลง อุปกรณ์จับยึด	<u>6.80</u>	▽	○	6.80	วางชิ้นงานลงอุปกรณ์จับยึดตาม ตำแหน่งอ้างอิง
ประกอบชิ้นงานให้แนบ กับอุปกรณ์จับยึด	<u>3.50</u>	▽	○	3.50	กดและล็อกอุปกรณ์จับยึดเพื่อ กำหนดตำแหน่ง
จับประกอบชิ้นงาน	<u>8.50</u>	▽	○	8.50	ขันเกลียวอุปกรณ์จับยึดให้แน่น
ว่าง	<u>4.50</u>	D	○	4.50	ตั้งค่าพารามิเตอร์การกัดบน หน้าจอ CNC
รอการทำงานของ เครื่องจักร CNC	<u>799.80</u>	D	D	<u>799.80</u>	รอการทำงานของเครื่องจักร CNC
จับประกอบขณะปลด ล็อกอุปกรณ์จับยึด	<u>7.50</u>	▽	○	7.50	คลายเกลียวของอุปกรณ์จับยึด
ใช้สองมือหยิบชิ้นงาน ออกจากอุปกรณ์จับยึด	1.50	⇒	⇒	1.50	ใช้สองมือหยิบชิ้นงานออกจาก อุปกรณ์จับยึด
จับและประกอบชิ้นงาน	<u>2.80</u>	▽	○	2.80	ตรวจสอบชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัด
	956.43			956.43	

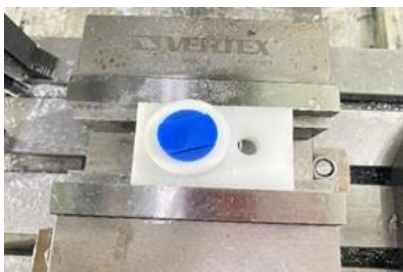
รูปที่ 6 การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิมือซ้าย-ขวา หลังปรับปรุง

จากแผนภูมิมือซ้าย-ขวาหลังการปรับปรุง พบว่าเวลารวมต่อรอบการผลิตเท่ากับ 956.43 วินาที โดยมือซ้ายมีเวลาที่ก่อให้เกิดคุณค่าเพียง 1.50 วินาที และมีความสูญเสียเปล่าสูงถึง 954.92 วินาที เนื่องจากทำหน้าที่หลักในการประกอบและรอคอยเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่มือขวามีเวลาที่ก่อให้เกิดคุณค่า 156.63 วินาที และมีความสูญเสียเปล่า 799.80 วินาที ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการรอการทำงาน ของเครื่องกัด CNC ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่า หลังการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน กิจกรรมการจัดตำแหน่งและการจับยึดด้วยแรงงานคนลดลง ทำให้การทำงานมีความเป็นระบบและสม่ำเสมอมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความสูญเสียเปล่ายังคงเกิดจากเวลาการทำงานของเครื่องจักรเป็นหลัก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของกระบวนการกัด CNC

ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถสรุปเวลารวมจากแผนภูมิซ้าย-ขวาก่อนและหลังปรับปรุง ไว้ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า หลังการปรับปรุงด้วยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เวลาสูญเสียเปล่าของมือซ้ายลดลงอย่างชัดเจนจากการใช้มือจับหรือประกอบชิ้นงาน อุปกรณ์ หรือวัตถุไว้โดยยังไม่เกิดการทำงานที่สร้างคุณค่ารอคอย ขณะที่เวลารอของมือขวายังคงเดิมเนื่องจากเป็นเวลาการทำงานเต็มที่ของเครื่อง CNC ส่งผลให้รอบเวลาการผลิตรวมลดลง 16.9% ช่วยเพิ่มความสมดุลของการใช้แรงงานและสนับสนุนการผลิตให้เข้าใกล้ Takt Time มากขึ้น

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบเวลารวมจากแผนภูมิซ้าย-ขวา

รายการ	ก่อนปรับปรุง (วินาที)	หลังปรับปรุง (วินาที)	วิเคราะห์ผล
มือซ้าย-เวลาสูญเสียเปล่า	1,141.35	954.92	ลดลง 186.43 วินาที (16.3%)
มือขวา-เวลาสูญเสียเปล่า	799.80	799.80	คงเดิม (เวลารอเครื่อง CNC ทำงาน)
รอบเวลาการผลิต	1,151.05	956.43	ลดลง 192.62 วินาที (16.9%)



ก) การใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นในการปฏิบัติงานจริง



ข) ชิ้นงานกันกระแทกคัปปลิงจากเทปลอน หลังการกัดขึ้นรูปด้วย CNC

รูปที่ 7 การปรับปรุงกระบวนการกัดอย่างกันกระแทกคัปปลิงโดยใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

จากรูปที่ 7 แสดงการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ทำให้ลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร พบว่าขั้นตอนที่ 1 ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 127.60 นาที (คงเดิม) และขั้นตอนที่ 3-6 มีค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 7.14, 3.68, 8.93 และ 4.50 รวมเวลาในการปรับตั้งระบบหลังปรับปรุง เท่ากับ 151.85 วินาที ผลการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร ลดเวลาได้ทั้งหมด 200.72 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นการลดลงประมาณ 57.1%

ค่าความแปรปรวนของระบบสะท้อนการกระจายของข้อมูลเวลา โดยหลังการปรับปรุ่ ค่าดังกล่าวลดลงจากร้อยละ 12.5 เหลือร้อยละ 7.2 ขณะที่ค่าความสามารถในการทำซ้ำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87.5 เป็นร้อยละ 92.8 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในด้านเวลาเวลารอบการผลิตลดลงจาก 1,151.05 วินาที เหลือ 956.43 วินาที และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรลดลงจาก 352.57 วินาที เหลือ 151.85 วินาที พร้อมทั้งจำนวนขั้นตอนลดลงจาก 10 เหลือ 9 ขั้นตอน ส่งผลให้กระบวนการโดยรวมมีความกระชับและมีเสถียรภาพมากขึ้น สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

ตัวชี้วัด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	การเปลี่ยนแปลง
เวลารอบการผลิต (วินาที)	1,151.05	956.43	ลดลง 194.62 (16.09%)
เวลา setup (วินาที)	352.57	151.85	ลดลง 200.72 (56.93%)
จำนวนขั้นตอน (ขั้นตอน)	10	9	ลดลง 1 ขั้นตอน
%Variation	12.5%	7.2%	ลดลง
Repeatability	87.5%	92.8%	เพิ่มขึ้น

5. อภิปรายผล

จากผลการวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อลดเวลาในกระบวนการกัดยางกันกระแทก คัปปลิ่ง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจน โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS และการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลาเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตทั่วไป หรือปรับปรุงสถานงานและท่าทางการทำงานของแรงงานคนเป็นหลัก [6-9] ขณะที่งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเฉพาะสำหรับกระบวนการกัดวัสดุเทปลอน ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความลื่นและความยืดหยุ่นสูง และก่อให้เกิดปัญหาการเคลื่อนตัวของชิ้นงานในระหว่างการกัด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนปรับปรุง เท่ากับ 352.57 วินาที และลดลงเหลือ 151.85 วินาที หลังการพัฒนาอุปกรณ์จับยึด คิดเป็นการลดลง 200.72 วินาทีต่อชิ้น หรือร้อยละ 56.93 ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึง

การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดช่วยลดเวลาในขั้นตอนการปรับตั้งเครื่องจักรโดยตรง ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยงานส่วนใหญ่มักนำเสนอผลในระดับภาพรวมของสายการผลิต และยังขาดการวิเคราะห์เวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเชิงกระบวนการ โดยเฉพาะในงานกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC สำหรับวัสดุโพลีเอสเตอร์ฟลูออโรเอทิลีน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เวลาการกัดของเครื่องจักรจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่การลดขั้นตอนการตั้งค่าจุดอ้างอิงซ้ำ และการออกแบบฟิกซ์เจอร์ให้กำหนดตำแหน่งได้ทันที ทำให้จำนวนขั้นตอนลดลงจาก 10 ขั้นตอน เหลือ 9 ขั้นตอน และ รอบเวลาการผลิตลดลงร้อยละ 16.9 สะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบอุปกรณ์เฉพาะกระบวนการสามารถยกระดับความสม่ำเสมอและลดความแปรปรวนจากแรงงานคนได้มากกว่าการปรับลำดับงานเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ออกแบบอุปกรณ์จับยึดเฉพาะสำหรับวัสดุที่มีความลื่นสูง และการประยุกต์ใช้เพื่อมุ่งลดเวลา เวลาในการปรับตั้งระบบของเครื่องจักรในกระบวนการ กัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิง งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์จับยึดที่เหมาะสมกับลักษณะเชิงกลของวัสดุเทปลอน ซึ่งแสดงผลเชิงปริมาณของการลดเวลาเวลาในการปรับตั้งระบบอย่างชัดเจน เชื่อมโยงผลการวิเคราะห์แผนภูมิมือซ้าย-มือขวา เข้ากับการออกแบบทางวิศวกรรมของฟิกซ์เจอร์ แยกกิจกรรมที่ก่อให้เกิดคุณค่า กิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็น และกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า อย่างเป็นระบบในบริบทเครื่องจักร CNC งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องมือที่ช่วยควบคุมตำแหน่งชิ้นงานอย่างคงที่ ลดการพึ่งพาทักษะเฉพาะบุคคล และทำให้กระบวนการผลิตมีความเสถียรมากขึ้น จึงเป็นการขยายองค์ความรู้ด้านการออกแบบ Jig & Fixture ในบริบทการกัดวัสดุโพลีเอสเตอร์ฟลูออโรเอทิลีนซึ่งยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา

6. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเพื่อลดเวลาในกระบวนการกัดยางกันกระแทกคัปปลิง เพื่อพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดชิ้นรูปวัสดุเทปลอน และเพื่อลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการกัดยางกันกระแทกสำหรับคัปปลิง พบว่ากิจกรรมที่จัดเป็นเวลาในการปรับตั้งระบบคือ ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมความพร้อมของเครื่องจักร ก่อนเริ่มการตัดจริง ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าเครื่องมือตัด ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 127.60 วินาที ขั้นตอนที่ 2 การตั้งค่าจุดอ้างอิงของชิ้นงาน ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 196.56 วินาที และขั้นตอนที่ 3-6 การติดตั้ง วาง จัดตำแหน่ง ชิ้นยึด และตั้งค่าพารามิเตอร์ ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 8.47, 4.51, 11.13 และ 5.30 รวมเวลาในการปรับตั้งระบบก่อนปรับปรุง เท่ากับ 352.57 วินาที และผลการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรหลังการปรับปรุง โดยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานพบว่าขั้นตอนที่ 1 ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 127.60 นาที (คงเดิม) โดยขั้นตอนที่ 2 ถูกตัดออก (Eliminate) ไม่ต้องตั้งจุดอ้างอิงซ้ำ ส่วนขั้นตอนที่ 3-6 ลดเวลาจากการจัดตำแหน่งอัตโนมัติและลดการถือ ประคอง และการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ค่าเวลามาตรฐานเท่ากับ 7.14, 3.68, 8.93 และ

4.50 รวมเวลาในการปรับตั้งระบบหลังปรับปรุง เท่ากับ 151.85 วินาที ผลการลดเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร ลดเวลาได้ทั้งหมด 200.72 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นการลดลงประมาณ 56.93% โดยไม่กระทบต่อขั้นตอนการกักชิ้นงาน ซึ่งยังคงมีเวลาเท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมีบทบาทสำคัญในการลดเวลาในการปรับตั้งระบบและความสูญเสียจากแรงงานคนโดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความเอื้อเฟื้อจากสถานประกอบการที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษางานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้บริหาร หัวหน้างานฝ่ายผลิต หัวหน้าพนักงาน ตลอดจนผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงมหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนและเอื้ออำนวยต่อการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จเรียบร้อย

References

- [1] Noavabutra P, Sudasna-Na-Ayudhya P, Witchakul S. Comparison of forecasting methods for spread of Covid-19 in Bangkok. Proceedings of the 41st Conference of Industrial Engineering Network; 2023 May 11-12; Chonburi, Thailand. p. 117-22. (In Thai)
- [2] Heebgaew T and Somsud A. Machine setup time reduction to increase the efficiency in production. Proceedings of the 36th Conference of Industrial Engineering Network; 2018 July 23-26; Ubonratchathani, Thailand. p. 1015-20. (In Thai)
- [3] Kanchanapanyakorn R. Industrial Work Study. Bangkok: Top Publishing; 2009. (In Thai)
- [4] Pangjundee T, Inmanee C, Thongbaisri A, Thammavijit K, Rassami C. Reducing waste in manufacturing process of the motorcycle seat lock. Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University 2016;4(2):73-82. (In Thai)
- [5] Meesaeng A. Jig and fixture design for waste reduction in air hose cutting process: a case study of an automotive part factory [Thesis]. Pathum Thani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2011. (In Thai)
- [6] Thavornwat C, Jonguwuttanaruk K, Na-Badalung C, Sangkatip R. Reducing assembly time for solar pump control panels. Proceedings of the 43th Conference of Industrial Engineering Network 2025; 2025 May 7-9; Krabi, Thailand. p. ID166-1-6. (In Thai)
- [7] Tantiwong P, Suksai K, Raksasombat N. Application of reach distance data for improving workstation of Korat noodle packing. EAU Heritage Journal Science and Technology 2022;16(1):114-26. (In Thai)

- [8] Sumranhun P, Saisuwan N, Rungcharoen S, Damrongwatthanayothin B, Puinun S, Ruamsup W, et al. The improving productivity in seasonal product manufacturing by motion and time study and jig design. Thai Industrial Engineering Network Journal 2024;10(1):51-9. (In Thai)
- [9] Pomprasert P, Prateepchanachai S. Monmongkol M, Ployngam J, Palaphan N, Keanmanee S. Reducing wastes in process of flat washers to edge welding car with collapsible case study: auto paint car repair establishment. Proceedings of the 41st Conference of Industrial Engineering Network; 2023 May 11-12, Chonburi, Thailand. p. 435-41. (In Thai)
- [10] Wonginyoo C, Bumpen P, Wangphanich P, Choomrit N. Streamlining production: ECRS approach to enhancing efficiency in case tank sub weld of hydraulic excavator. Engineering and Technology Horizons 2025;42(4):420401. doi: 10.55003/ETH.420401.
- [11] Inseemeesak B and Lertkowitz P. Improving the efficiency of the production process of automotive part in order to reduce cost. Journal of Science and Technology Thonburi University 2024;8(1):44-59. (in Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร. ณัฐภัทร กาญจนเรืองรอง อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 E-mail: dr.nattapat@techno.rru.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีนยา ประทีปชนะชัย อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ 422 ถนนมรุพงษ์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 E-mail: sarinya@techno.rru.ac.th

Article History:

Received: January 6, 2026

Revised: April 5, 2026

Accepted: April 10, 2026

THERMAL PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC-THERMAL SOLAR DRYER INTEGRATED WITH HIGH-POROSITY STEEL MESH

Eakpoom Boonthum¹, Prapanphong Somsila², Athiwut Sanpoka³, Apinunt Namkhet⁴
and Umphisak Teeboonma^{5*}

¹Candidate PhD, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District,
Ubon Ratchathani 34190, Thailand, eakpoom.bt@gmail.com

²Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and technology,
Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, 145 Moo 15, Surin-Prasat Road,
Mueang Surin District, Surin 32000, Thailand, praphanpong.so@rmuti.ac.th

³Lecturer, Department of Mechanical Technical Education, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan Khonkhaen Campus, 150 Srichan Road,
Mueang District, Khon Kaen 40000, Thailand, athiwut.sa@rmuti.ac.th

^{4,5*}Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District,
Ubon Ratchathani 34190, Thailand, ⁴apinunt.n@ubu.ac.th, ^{5*}umphisak.t@ubu.ac.th

** Corresponding author*

ABSTRACT

The growing global demand for sustainable, cost-effective drying technologies has driven significant advancements in solar drying systems. This study experimentally evaluated the performance of a solar dryer integrated with porous materials for drying kaffir lime leaves under tropical climatic conditions in Thailand to enhance thermal efficiency and drying effectiveness. The dryer incorporated a 150 Watt photovoltaic-thermal (PVT) panel, a double-pass solar collector, and porous materials with a porosity of 0.97 onto the absorber plate. Experiments were conducted at air velocities of 0.07, 0.09, and 0.10 m/s to investigate drying kinetics, including moisture ratio (MR), drying rate (DR), and specific energy consumption (SEC). The results revealed that moisture removal occurred primarily during the falling-rate period, governed by internal diffusion. The integration of porous materials enhanced drying performance, with DR improving by approximately 45-50% and SEC decreasing by 30-33%

compared to the case without porous materials. Statistical analyses using two-way ANOVA confirmed significant effects of air velocity ($p < 0.05$) and porous materials ($p < 0.01$), with porous materials identified as the dominant factor. Overall, the solar dryer incorporated with porous materials demonstrated faster drying, greater thermal stability, and improved energy efficiency.

KEYWORDS: Solar dryer, Porous materials, PVT, Thermal performance

1. Introduction

Solar energy represents an abundant, renewable, and environmentally sustainable energy source that is both inexhaustible and cost-free. Given the current global challenges associated with climate change, largely driven by the combustion of fossil fuels, as well as the escalating costs of conventional energy sources, the adoption of solar energy has become increasingly imperative [1-3]. The transition from fossil-fuel-based energy to renewable energy sources in production across both agricultural and industrial sectors plays a crucial role in mitigating global warming while simultaneously reducing production costs. Thailand and other ASEAN countries, situated near the equator, predominantly rely on agriculture, necessitating effective methods for preserving and processing agricultural products. A widely adopted preservation technique involves reducing the moisture content of agricultural commodities, a process that requires substantial heat. Among the available heat sources, solar energy presents a viable, low-cost alternative. Traditionally, farmers have relied on open-sun drying to reduce the moisture content of agricultural products. However, this method is susceptible to contamination from dust, insects, and other environmental pollutants. To address these concerns, many farmers have shifted towards using mechanical dryers, which offer greater control over drying conditions and product quality. Nevertheless, the high energy consumption associated with conventional drying systems significantly increases production costs. As a result, solar dryers have emerged as a more cost-effective and sustainable alternative. Despite their growing adoption, the efficiency of solar drying systems remains relatively low, and their performance is constrained by the intermittency of solar radiation, particularly during unfavorable weather conditions [4]. Over the years, numerous researchers have investigated various strategies to enhance the efficiency of solar dryers. For instance, Al-Jethelah et al [5] developed and analyzed the performance of an

innovative indirect free convection solar dryer. Their findings revealed that the thermal efficiency of the newly designed dryer exceeded that of conventional drying systems by 68%, 39%, 49%, and 85%, respectively, demonstrating significant improvements in drying performance. Manirathnam et al [6] conducted a study on enhancing the efficiency of solar dryers by integrating phase change materials (PCMs). The findings indicated that incorporating PCMs led to more stable temperatures in the drying chamber during periods of cloud cover. Additionally, the use of PCMs increased the overall efficiency of the solar dryer compared to conventional solar drying systems that do not use thermal energy storage. Udomkun et al [7] conducted a comprehensive qualitative study on the design variations of solar dryers and the key factors influencing their adoption across Asia and Africa. Their research assessed the economic, environmental, and social impacts of solar drying technologies, as well as the determinants affecting their widespread implementation. The findings indicated that while solar dryers offer a cost-effective solution, particularly for developing countries, their adoption is often hindered by the high initial investment required for implementation. Mohana et al [8] conducted a study on design and energy efficiency, highlighting existing gaps in developing cost-effective, energy-efficient solar dryers. Their research emphasized the economic and social benefits associated with solar drying technology. The findings indicated that while solar dryers present a sustainable alternative for agricultural and industrial applications, their widespread adoption remains constrained by certain limitations. Ismail et al [9] conducted a study on a double-pass solar air heater (DPSAH) incorporating lava rock as a porous medium. The integration of lava rock enhances the system's thermal storage capacity, making it a viable short-term thermal energy collector for solar drying applications. Additionally, the presence of lava rock increases convective heat transfer by expanding the heat transfer surface area and inducing turbulence in the airflow channel. A mathematical model based on energy balance equations was developed and numerically solved using MATLAB to evaluate the thermal performance of the collector under varying solar radiation intensities and wind speeds. Key design parameters considered in the study included collector size, air mass flow rate, and lava rock volume. The results demonstrated that the collector's optimal thermal efficiency ranged from 62% to 64% at solar intensities of 500 W/m² to 800 W/m², respectively, with an optimal air mass flow rate of 0.035 kg/s. Furthermore, an optimal porosity of approximately 89% was determined, balancing thermal efficiency and pressure drop. The collector was found to achieve an optimal output

temperature range of 41.7°C to 48.3°C, making it well-suited for agricultural and food drying applications. Moreover, compared with conventional DPSAH systems, integrating lava rock increased the average output temperature by more than 17.5%, highlighting its effectiveness in improving thermal performance. Sandali et al [10] conducted a qualitative study to enhance the efficiency of solar dryers by identifying key techniques and influencing factors that improve performance. Their analysis encompassed various efficiency parameters of solar drying systems (SDS), providing a comprehensive assessment of their operational effectiveness. The findings revealed that climatic conditions and solar radiation play a critical role in determining the efficiency of solar dryers. Furthermore, integrating solar panels for electricity generation, coupled with battery storage to provide heat during periods of insufficient sunlight, was identified as a viable strategy to enhance the overall efficiency and reliability of solar drying systems. Srivastava et al [11] conducted an experimental investigation of the thermal performance of a flat-plate solar collector and a solar dryer. Their study presented the performance characteristics of the solar collector and solar dryer integrated with a phase change material (PCM) storage system under quasi-steady-state conditions. The analysis was based on the system's fundamental energy balance, and a computational model was developed to predict various performance parameters of the solar drying system. To validate the thermal model, the study compared its predictions with theoretical calculations. Additionally, optimal values for both solar collector efficiency and dryer efficiency were determined using a genetic algorithm. A comparative assessment was conducted of the experimental, theoretical, and optimized efficiency values for the solar collector and dryer. Experimental trials were conducted over multiple days from June 2013 to March 2014, with specific observations recorded on March 24, 2014, to evaluate the system's empirical performance. The findings indicated strong agreement between the theoretical, experimental, and optimized efficiency values of the solar collector and dryer, reinforcing the reliability of the proposed model. Jadallah et al [12] conducted a comprehensive investigation into the performance of a dual-pass hybrid photovoltaic-thermal (PVT) solar cell system designed for drying applications. Their study encompassed both theoretical and experimental analyses, including the design, construction, and modeling of the system to simulate its output. The PVT heat collector extracts hot air that can be used as a heat source for drying processes. Key performance parameters, such as temperature distribution, useful heat, electrical power generation, and thermal efficiency, were evaluated

using MATLAB, specifically developed for this purpose. The findings indicate that the highest outlet fluid temperature achieved was 63 °C at a lower mass flow rate of 0.017 kg/s. Furthermore, at a higher mass flow rate of 0.031 kg/s, the system exhibited peak electrical, thermal, and overall efficiencies of 12.65%, 56.73%, and 85%, respectively. Additionally, the maximum electrical and thermal power outputs were recorded at 50.57 W and 389.37 W, respectively, at a mass flow rate of 0.031 kg/s. These results demonstrate the system's potential for efficient integration into drying applications, leveraging both electrical and thermal energy outputs. Singh et al [13] conducted a qualitative investigation into the advancement of solar dryer applications, with a particular emphasis on their utilization in both industrial and agricultural sectors. Their findings highlighted that solar dryers reduce fossil fuel consumption and hold significant potential to promote sustainability in these sectors. Similarly, Dadi et al [14] conducted a qualitative analysis of solar dryers, examining key design parameters and associated costs while emphasizing their advantages, including reduced post-harvest losses, enhanced product quality, and reduced environmental impact. The study concluded that, compared to conventional drying methods, solar dryers offer superior efficiency and product quality, making them a viable alternative for sustainable drying processes. Agrawal et al [15] conducted a comprehensive review of the research and development of solar dryers integrated with heat storage systems, focusing on the various heat storage materials used in these drying technologies. Their findings indicate that Phase Change Materials (PCMs) exhibit superior thermal energy storage efficiency, facilitating continuous drying operations. The incorporation of heat storage mechanisms significantly enhances the reliability of solar dryers, thereby expanding their applicability across diverse climatic conditions. Jha et al [16] conducted a comprehensive review of the design, applications, and simulation studies of hybrid solar drying technologies, with particular emphasis on systems integrating solar energy with supplementary energy sources. Their findings indicate that solar dryers integrated with heat pump systems exhibit superior efficiency and are particularly suitable for drying delicate agricultural products. Additionally, incorporating biomass as an auxiliary energy source in solar dryers offers a significant cost advantage, thereby enhancing the overall economic feasibility of the drying process. While solar dryers demonstrate adaptability and efficiency across diverse operational conditions, further advancements in system design and hygiene standards are needed to optimize their performance and broaden their applicability. Kamarulzaman et al [17] conducted a qualitative

study examining the technological advancements and design optimization of solar dryers. Their findings indicate that solar dryers exhibit high efficiency, low carbon dioxide emissions, and an economically favorable payback period of 0.5 to 4.6 years. Furthermore, solar drying technology is recognized for its cost-effectiveness, energy efficiency, and environmental sustainability. However, further advancements in design and optimization are necessary to enhance performance and reliability. Ramana et al [18] conducted a qualitative investigation to enhance the performance of solar dryers by optimizing the design of heat collectors and incorporating energy storage materials. Their findings demonstrated that a dual-purpose solar dryer, designed for both drying and heating applications and integrated with phase change materials (PCM), exhibited superior energy efficiency. Additionally, the study highlighted that implementing PCM not only reduced costs but also enhanced the overall investment value of the system. Luampon et al [19] investigated the use of stainless steel wire mesh as a porous material to enhance specific energy consumption (SEC) efficiency in a hot-air dryer. The experimental findings indicated that incorporating a hot-air recirculation duct resulted in a higher drying rate than in the system without recirculation. As the recirculation ratio increased, the drying rate improved, the drying time decreased, and the SEC was significantly reduced. These results highlight the potential of stainless steel wire mesh to enhance energy efficiency in a hot-air dryer. Kumar et al [20] conducted a comprehensive study on the influence of porous materials on the flow characteristics and temperature distribution within a passive solar air heater. The research examines the impact of flow resistance induced by a porous medium (representing agricultural products) at the outlet of a free-convection-based solar air heater. Both experimental and numerical approaches were employed to analyze these effects. The findings provide valuable insights into optimizing the design and efficiency of solar air heaters for agricultural drying applications.

Previous research has demonstrated that integrating porous materials into dryers can enhance their overall performance. Building upon these findings, this study aims to investigate the efficiency and effectiveness of solar dryers incorporating porous materials to optimize drying performance.

2. Methodology

2.1 Materials and method

In this study, a solar dryer was designed and functions as a passive system, incorporating a 150-Watt photovoltaic-thermal (PVT) panel with cooling fins on its back. The PVT panel is installed above the drying chamber, which is fabricated using steel sheets, insulated, and has inside dimensions of 0.9 m × 0.9 m × 1.2 m. The dryer is connected to a double-pass solar collector panel. The solar collector panel, measuring 0.75m wide, 1.75m long, and 0.25m high, features a 1.5 mm-thick steel absorber plate. To improve thermal performance, a porous material is made from perforated steel sheets with a 10 mm hole diameter and a 1.2 mm thickness, at 2 PPI, and cut and shaped into hollow rectangular boxes measuring 90 mm × 100 mm each. Porous materials are arranged along the length of the solar collector. These boxes span the width of the solar collector panel and are placed directly above the absorber plate. Porous material was fabricated using steel mesh, which was inserted into hollow rectangular enclosures to facilitate porosity measurements. In this study, the investigated porosity value was determined to be 0.97. A centrifugal fan transports the heated air from the solar collector panel to the drying chamber through a lower sidewall. Schematic diagrams, a photograph of the solar dryer, porous material, and measurement points utilized during the experiments are shown in Figures 1, 2, 3, and 4, respectively.

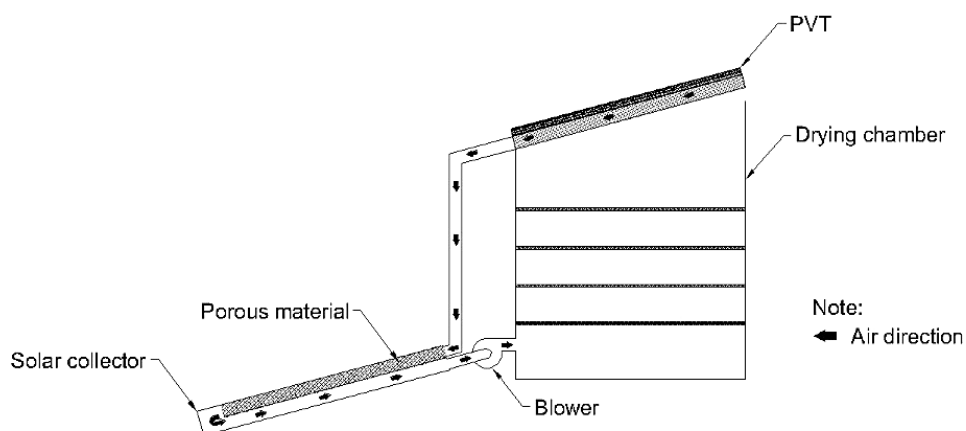


Figure 1 Schematic diagram of the photovoltaic-thermal solar dryer integrated with high-porosity porous material.



Figure 2 Photograph of the experimental photovoltaic-thermal solar dryer system.



Figure 3 High-porosity porous material configuration: assembled hollow rectangular modules (90mm × 100mm × 100mm) fabricated from perforated steel sheets.

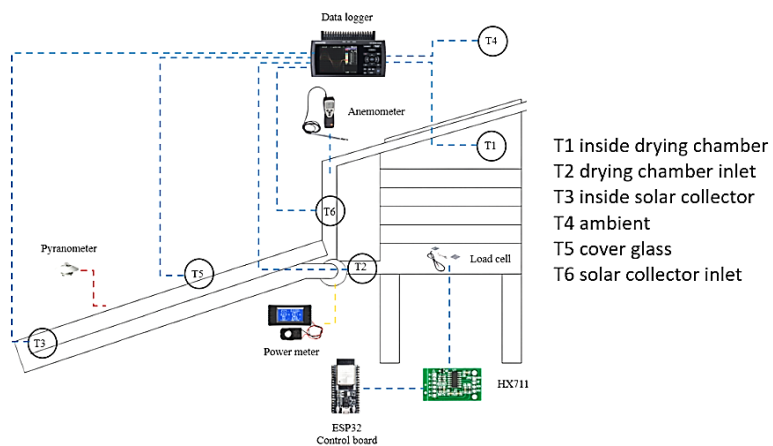


Figure 4 Instrumentation and measurement point locations for the experimental solar dryer system.

The experimental investigation of the solar dryer was conducted in Thailand under tropical climatic conditions during June and July 2025, between 9:00 a.m. and 4:00 p.m. Kaffir lime leaves were used as the drying sample, with each trial commencing with an initial mass of 200 g. The moisture content of the samples was evaluated in compliance with the AOAC (2019) standard. The velocity of hot air within the solar dryer was measured using a hot-wire anemometer with a range of 0 to 20 m/s, a tolerance of ± 0.03 m/s ($\pm 5\%$), and a resolution of 0.1 m/s. Temperature readings were obtained using K-type thermocouples connected to a data logger with an accuracy of ± 1 °C. Additionally, the mass of the dried samples was monitored using a load cell capable of measuring weights from 1 to 20 kg, and a digital scale with a maximum capacity of 500 g and a resolution of 0.1 g. Porosity ($\mathcal{E}$) of porous material is then calculated using Eq. (1).

$$\mathcal{E} = \frac{V_p}{V_t} = 1 - \frac{(m_s / \rho_s)}{V_t} \quad (1)$$

When V_p = volume of pores (m^3)

m_s = mass of solid (kg)

ρ_s = density of solid (kg/m^3)

V_t = total volume of material (m^3)

2.2 Analysis

The moisture ratio is an estimate of the moisture content, assuming the equilibrium moisture content is negligible. It is calculated by comparing the moisture content at a given time to the initial moisture content, as shown in Equation (2).

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (2)$$

When MR = Moisture ratio

M_{in} = Initial moisture content

M_t = Moisture content each time interval

Moisture content refers to the proportion of moisture contained in the product relative to its dry weight. The dry weight of the sample was determined by drying a portion of the product in a hot-air oven at 103 °C for 72 hours, following the AOAC (2019) standard [21]. These recorded values were then used to determine the moisture content at each time interval, as outlined in Equation (3).

$$MC = \frac{w-d}{d} \quad (3)$$

When MC = Dry basis moisture content at each time interval (d.b.)

w = Wet weight of product at each time interval (g)

d = Dry weight of product (g)

The drying rate quantifies the amount of moisture removed over a specific period and is defined in Equation (4).

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (4)$$

When DR = Drying rate (g/h)

Δw = Mass of evaporated water (g)

Δt = Time interval (h)

Specific energy consumption is the energy required to remove a specific quantity of moisture from the material and is calculated using Equation (5).

$$SEC = \frac{3.6E}{w_i - w_f} \quad (5)$$

When SEC= Specific energy consumption (MJ/kg)

w_i = Wet weight before drying (kg)

w_f = Wet weight after drying (kg)

3 Results

An experimental analysis was performed without incorporating porous materials at air velocities of 0.07, 0.09, and 0.10 m/s from 9:00 a.m. to 4:00 p.m. The study provided crucial insights into solar radiation levels and temperature distributions across the dryer's components. Solar radiation values ranged from 371 to 1,001 W/m², with an average of 766.1 W/m². The temperature in the drying chamber ranged from 36 °C to 45 °C, with a mean of 41.1 °C. The inlet temperature to the drying chamber fluctuated between 36 °C and 46 °C, with an average of 41.5 °C. The absorber plate temperature ranged from 49 °C to 66 °C, with an average of 56.6 °C. Ambient temperatures ranged from 29 °C to 35 °C, with a mean of 32.4 °C. Additionally, the solar collector inlet temperature varied from 32 °C to 36 °C, with an average of 34.2 °C. These findings are illustrated in Figures 5-7.

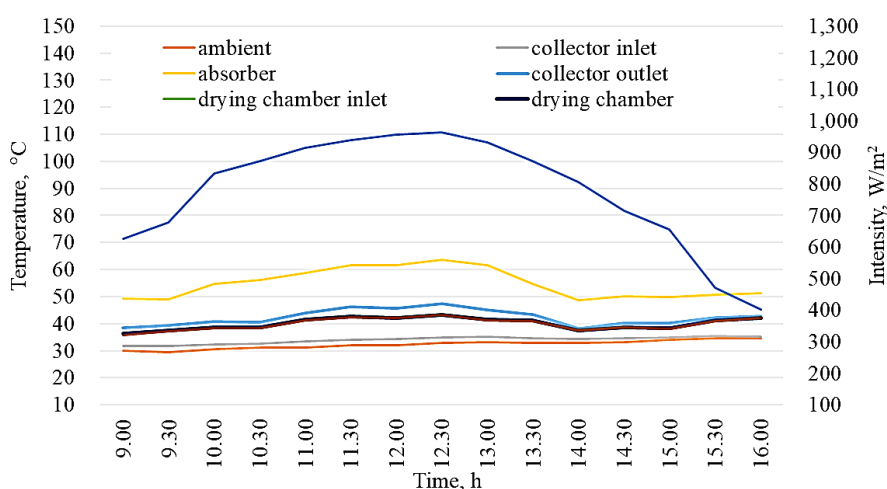


Figure 5 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer without T porous material at air velocities of 0.07 m/s.

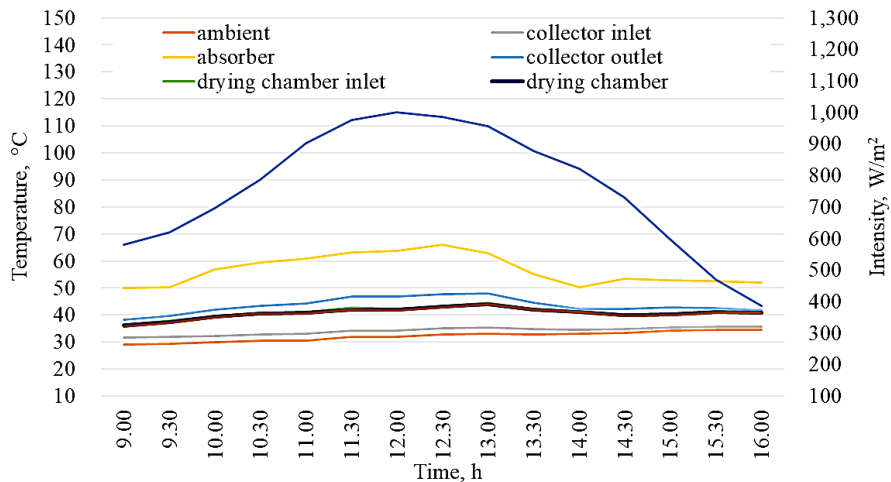


Figure 6 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer without porous material at air velocities of 0.09 m/s.

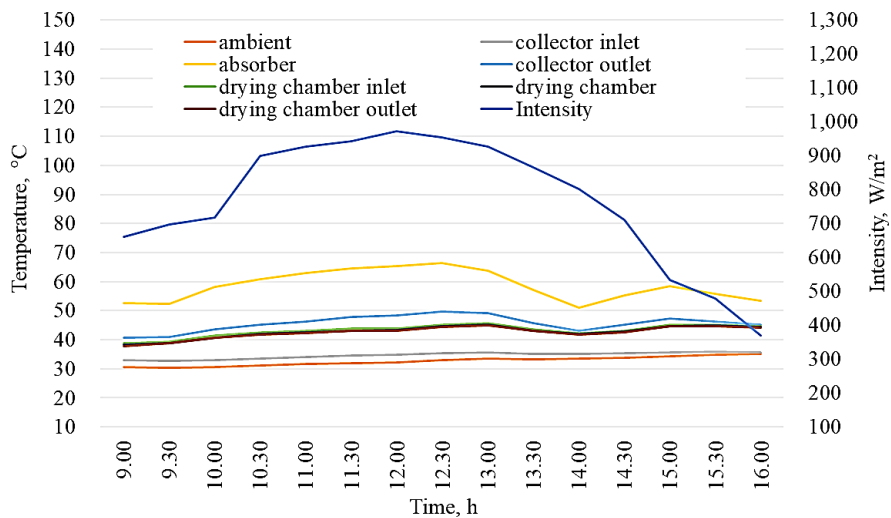


Figure 7 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer without porous material at air velocities of 0.10 m/s.

The experimental assessment of the solar dryer, incorporating porous materials with a porosity of 0.97, reveals significant improvements in thermal performance. Solar radiation levels ranged from 411 to 1,022 W/m², with an average of 778.9 W/m². The drying chamber temperature ranged from 37 °C to 50 °C, with a mean of 44.1 °C. Drying chamber inlet

temperature ranged from 38 °C to 51 °C, averaging 44.5 °C. The absorber plate temperature fluctuated between 50 °C and 68 °C, with an average value of 58.5 °C. Ambient temperatures ranged from 31 °C to 33 °C, with a mean of 31.9 °C. Solar collector inlet temperature ranged from 32 °C to 35 °C, with an average of 33.5 °C. These results indicate that integrating porous materials into the absorber plate enabled sustained higher air temperatures than without porous materials. The improvement in thermal stability is illustrated in Figures 8-10.

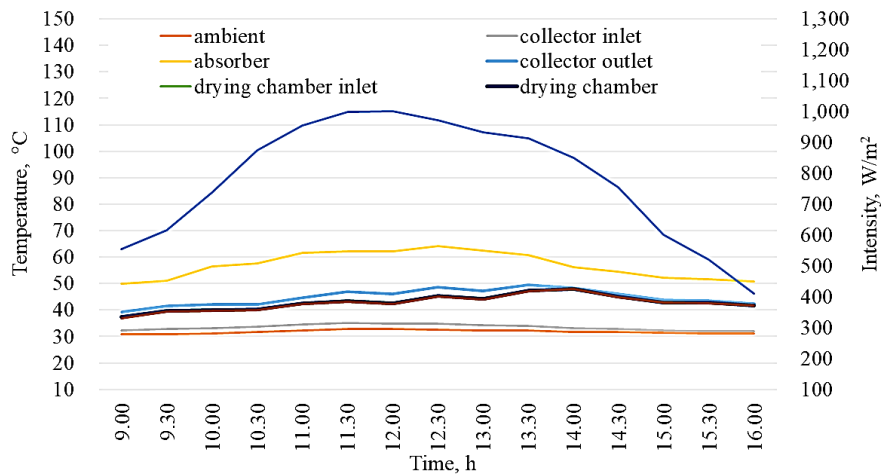


Figure 8 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer with porous material at air velocities of 0.07 m/s.

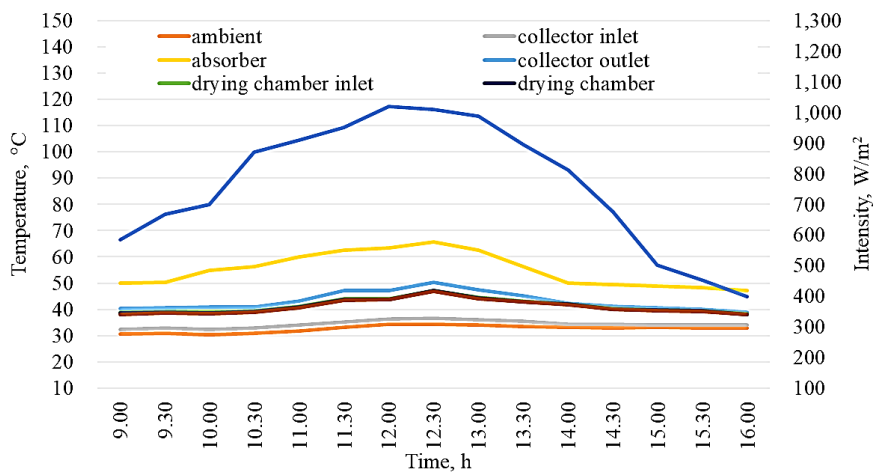


Figure 9 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer with porous material at air velocities of 0.09 m/s.

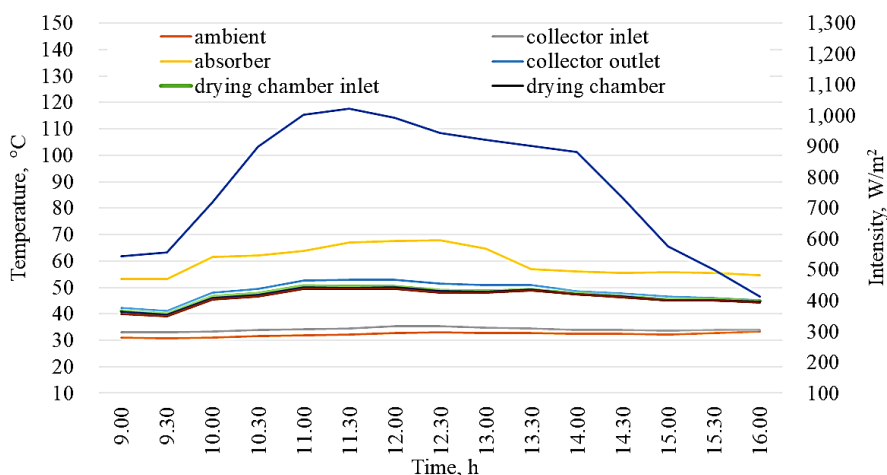


Figure 10 Diurnal temperature profiles and solar radiation intensity for solar dryer with porous material at air velocities of 0.10 m/s.

Figure 11 presents the variation of moisture ratio (MR) with drying time for kaffir lime leaves at air velocities of 0.07, 0.09, and 0.10 m/s under two conditions: with and without porous materials. In all cases, MR decreased continuously over the 420 min drying period, indicating that moisture removal predominantly occurred during the falling-rate period, governed by internal diffusion. The incorporation of porous material accelerated moisture reduction across all velocities. MR decreased continuously under all test conditions. The system with porous materials consistently produced lower MR values, achieving 12–25% improvement over the non-porous configuration. Increasing air velocity reduced MR, although porous material reduced sensitivity to velocity by stabilizing heat distribution. Air velocity also contributed significantly to drying kinetics. Increasing the velocity from 0.07 to 0.10 m/s reduced MR by 10–12% without porous materials, whereas with porous materials, the reduction was 8–9%. This suggests that while velocity enhances external convection, porous structures reduce the sensitivity of air velocity by stabilizing thermal conditions and improving heat distribution. This demonstrates that integrating porous materials with higher air velocities significantly enhances moisture-removal efficiency, thereby improving drying performance [22].

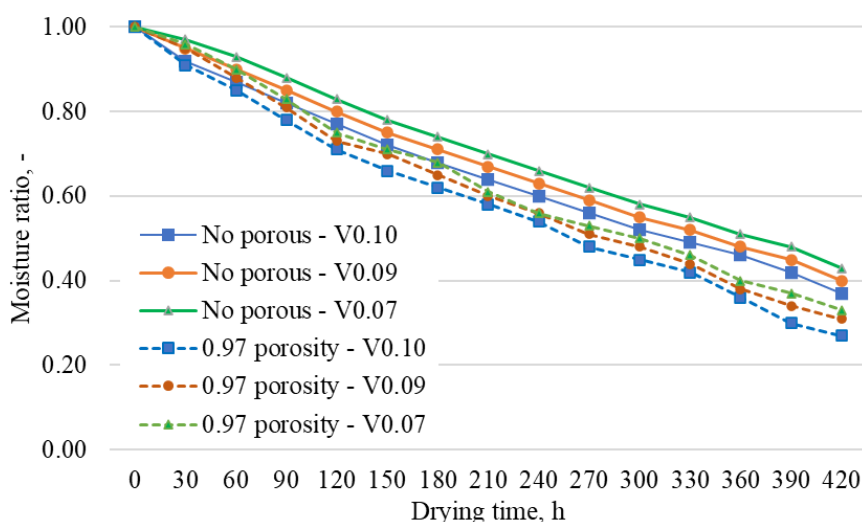


Figure 11 Moisture ratio (MR) versus drying time for kaffir lime leaves at three air velocities with and without porous material integration.

Figure 12 illustrates the effect of air velocity and incorporates 0.97 porosity porous materials on the drying rate of kaffir lime leaves. In the porous configuration, drying rates increased gradually with air velocity, from 6.86 g/h at 0.07 m/s to 7.71 g/h at 0.10 m/s, representing a 12% increase. In contrast, the inclusion of porous materials substantially enhanced performance, yielding drying rates of 10.28, 10.71, and 11.14 g/h at the respective velocities. At 0.07–0.10 m/s, drying rates without porous material ranged from 6.86–7.71 g/h. With porous material, rates increased to 10.28–11.14 g/h—an enhancement of 44.5–49.9%. These findings confirm that porous media intensify turbulence and increase heat-transfer surfaces, resulting in faster moisture removal. These results indicate that porous material accelerated drying by nearly 50%, with greater benefits at lower velocities, consistent with theoretical drying relationships and previous research [23]. The error bars in Figure 12, representing standard deviations, highlight the reliability of the experimental data. Overall, the integration of porous materials enhanced turbulence, increased heat transfer surface area, and stabilized thermal conditions, resulting in faster moisture removal.

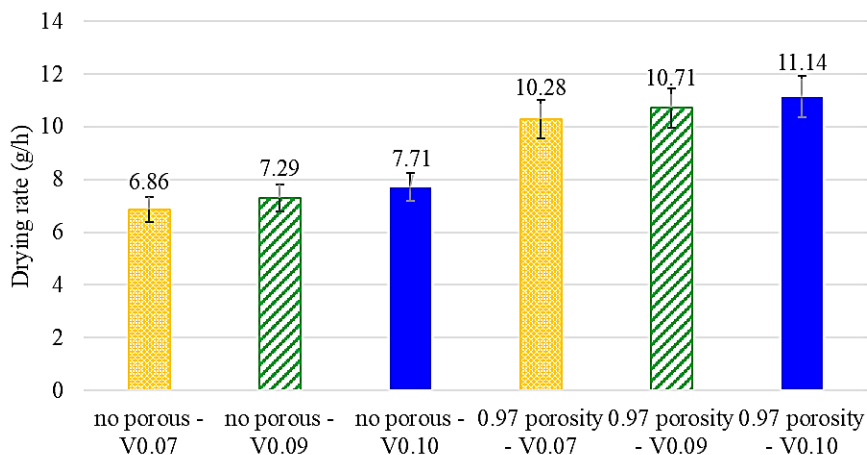


Figure 12 Effect of air velocity and porous material integration on average drying rate of kaffir lime leaves.

Figure 13 presents the variation of specific energy consumption (SEC) under different airflow velocities (0.07, 0.09, and 0.10 m/s) for solar air heater configurations with and without porous material. Without porous materials, the SEC decreased with increasing air velocity. Without porous media, SEC values ranged from 34.13 to 30.33 MJ/kg. With porous media, SEC drastically improved, ranging from 22.75 to 21.00 MJ/kg, representing a 30–33% reduction. This study demonstrated that integrating porous materials (porosity 0.97) into a passive solar dryer significantly improves drying performance and energy efficiency when drying kaffir lime leaves. Drying rate improved by 45–50%, while specific energy consumption decreased by 30–33%. Porous materials increased turbulence, enhanced thermal distribution, and reduced sensitivity to airflow variations. Statistical analysis confirmed porous media as the dominant factor influencing drying performance. The porous-integrated solar dryer offers an effective, sustainable solution suitable for agricultural applications in tropical climates. Additionally, this configuration enhanced the drying rate, which aligns with established drying kinetics [24]. Consequently, this approach effectively reduced the specific energy consumption of the drying process, indicating improved energy efficiency under these conditions. The error bars in Figure 13 (standard deviations) further validate the reliability of the experimental results.

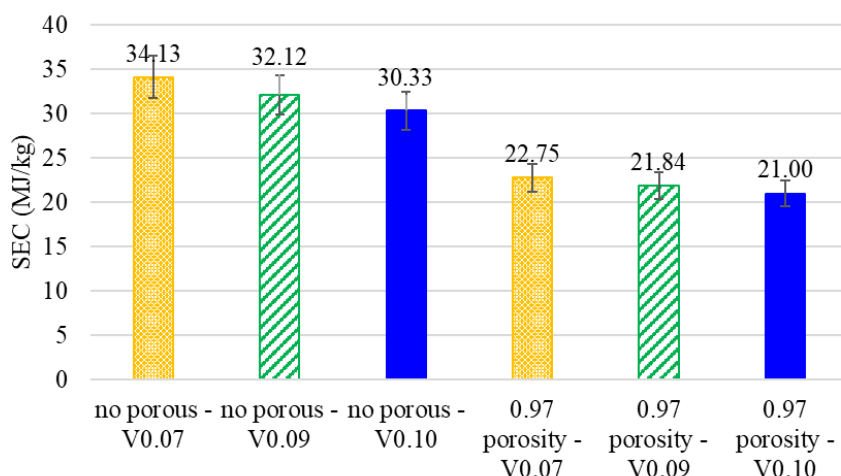


Figure 13 Specific energy consumption (SEC) for solar drying of kaffir lime leaves with and without porous material integration.

4 Conclusions

This study experimentally evaluated the performance of a solar dryer integrated with porous materials for drying kaffir lime leaves under tropical conditions. The findings clearly demonstrated that incorporating 0.97 porosity porous materials and a velocity of 0.07–0.10 m/s significantly enhanced the thermal and drying performance of the dryer compared with the configuration without porous materials. The results revealed that moisture removal predominantly occurred during the falling-rate period, governed by internal diffusion. The integration of porous materials accelerated drying kinetics, yielding approximately from 6.86–7.71 to 10.28–11.14 g/h (45–50%) improvements in drying rate across air velocities of 0.07–0.10 m/s. Similarly, the specific energy consumption (SEC) decreased from 30.3–34.1 to 21.0–22.8 MJ/kg, competitive with literature, 58–65% vs conventional, confirming the dryer's enhanced energy efficiency. The improved performance can be attributed to increased turbulence, enhanced heat transfer surface area, and stabilized thermal conditions within the solar collector, which collectively promoted faster moisture diffusion and more efficient utilization of solar energy. Moreover, integrating porous materials reduced the dryer's sensitivity to air velocity, indicating that drying performance was primarily controlled by internal mass transfer rather than external convection. In summary, the study highlights the solar-porous dryer as an energy-efficient, sustainable, and practical technology for agricultural drying applications. By

reducing drying time, improving energy efficiency, and enhancing product quality, the dryer offers a promising solution for advancing renewable energy integration in post-harvest processing, particularly in regions reliant on solar-based agricultural practices.

Acknowledgement

This research was supported by the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

References

- [1] Liu C. Fossil fuel, greenhouse gas and global warming. *Global Journal of Science Frontier Research* 2023;23(H4):21-9.
- [2] Peters GP, Meinshausen M. We are not on track: greenhouse gas emissions are higher than ever!. *Front. Young Minds* 2024;12:1343809. doi: 10.3389/frym.2024.1343809.
- [3] Sharma SK, Chandra A, Ojha KV. Experimental investigation on emission characteristics of diesel-neem oil biodiesel blended with nanoparticles in the diesel-powered engine [Internat]. *Proceedings of the International Conference on Frontiers in Desalination, Energy, Environment and Material Sciences for Sustainable Development*; 2023 Mar 16-17 [cite 2025 Oct 20]; Gorakhpur, India. p. 175-86. doi: 10.21467/proceedings.161.20.
- [4] Boonthum E, Sirichana S, Namkhet A, Teeboonma U. Comparative study on performance of passive and active solar dryer. *Key Engineering Materials* 2024;978:97-103.
- [5] Al-Jethelah M, Deyab H, Yaseen T. Thermal performance of novel indirect passive solar dryer. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences* 2021;30(2):293-303.
- [6] Manirathnam AS, Kumar KS, Sudhakar S, Balaji SV, Kumar SS, Vibishan R. Improving the efficiency of solar drying unit with PCM (paraffin wax). *Journal of Physics: Conference Series* 2021;2070:012213. doi: 10.1088/1742-6596/2070/1/012213.
- [7] Udomkun P, Romuli S, Schock S, Mahayothee B, Sartas M, Wossen T, et al. Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: an innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management* 2020;268:110730. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110730.

- [8] Mohana Y, Mohanapriya R, Anukiruthika T, Yoha KS, Moses JA, Anandharamakrishnan C. Solar dryers for food applications: concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy* 2020;208:321-44.
- [9] Ismail AF, Abd Hamid AS, Ibrahim A, Jarimi H, Sopian K. Performance analysis of a double pass solar air thermal collector with porous media using lava rock. *Energies* 2022;15(3):905. doi: 10.3390/en15030905.
- [10] Sandali M, Boubekri A, Mennouche D. Improvement of the thermal performance of solar drying systems using different techniques: a Review. *Journal of Solar Energy Engineering* 2019;141(5):050802. doi: 10.1115/1.4043613.
- [11] Srivastava A, Shukla S, Singh UK. Thermal performance analysis of flat plate solar collector and solar dryer of indirect solar drying system. *Journal of Thermal Engineering* 2016;2:21-31.
- [12] Jadallah AA., Alsaadi MK, Hussien SA. The hybrid photovoltaic-thermal double-pass solar system for drying applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020;765:012024. doi: 10.1088/1757-899X/765/1/012024.
- [13] Singh S, Dhiman P. Thermal performance of double pass packed bed solar air heaters-a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;53:1010-31.
- [14] Dadi JF, Jujara IH, Malek JI, Patel PS, Bhadoriya PS, Patel VM. A review paper on solar dryer. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research* 2016;3(3):143-52.
- [15] Agrawal A, Sarviya RM. A review of research and development work on solar dryers with heat storage. *International Journal of Sustainable Energy* 2016;35(6):583-605.
- [16] Jha A, Tripathy PP. Recent advancements in design, application, and simulation studies of hybrid solar drying technology. *Food Engineering Reviews* 2021;13:375-410.
- [17] Kamarulzaman A, Hasanuzzaman M, Rahim NA. Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: a review. *Solar Energy* 2021;221:559-82.
- [18] Ramana AS, Ashokumaar TV, Vignesh K. Review on performance enhancement studies on solar dryer. *Applied Mechanics and Materials* 2015;787:129-33.
- [19] Luampon R, Bunchan S, Krittacom B. Specific energy consumption improvement with applying stainless wire mesh porous material for a hot air dryer. *Key Engineering Materials* 2019;801:345-50.

- [20] Kumar D, Premachandran B. Investigation of the effect of porous material on the flow and temperature patterns of a passive solar air heater. *Journal of Solar Energy Engineering* 2020;142(6):061002. doi: 10.1115/1.4046632.
- [21] Pawar SB, Pratape, VM. Fundamentals of Infrared heating and its application in drying of food materials: a Review. *Journal of Food Process Engineering* 2017;40(1):e12308. doi: 10.1111/jfpe.12308.
- [22] Sopian K, Supranto, Othman MY, Daud WR, Yatim B. Double-pass solar collectors with porous media suitable for higher-temperature solar-assisted drying systems. *Journal of Energy Engineering* 2007;133(1):13-8.
- [23] Safri N, Zainuddin Z, Azmi M, Fudholi A, Zulkifle I, Ruslan M. Temperature performance of a portable solar greenhouse dryer with various collector design. *Sains Malaysiana* 2020;49(10):2539-45.
- [24] Yong, C., Islam, M., & Mujumdar, A. Mechanical means of enhancing drying rates: effect on drying kinetics and quality. *Drying Technology* 2006;24(3):397-404.

Author's Profile



Mr. Eakpoom Boonthum, Candidate PhD. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190, Thailand, E-mail: eakpoom.bt@gmail.com. Research interests are drying technology, renewable energy, thermal energy, and energy efficiency.



Mr. Prapanpong Somsila, Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus, Surin Province, 32000, Thailand, E-mail: praphanpong.so@rmuti.ac.th. Research interests are drying technology, and renewable energy.



Mr. Athiwut Sanpoka, Lecturer. Department of Mechanical Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkhaen Campus, Khonkhaen Province, Thailand, 40000, E-mail: athiwut.sa@rmuti.ac.th. Research interests are drying technology, renewable energy, and energy efficiency.



Asst. Prof Dr. Apinunt Namkhet, Lecturer. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190, Thailand, E-mail: apinunt.n@ubu.ac.th. Research interests are renewable energy, and porous materials.



Assoc. Prof. Dr. Umphisak Teeboonma, Lecturer. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190, Thailand, E-mail: umphisak.t@ubu.ac.th. Research interests are drying technology, renewable energy, and energy efficiency.

Article History:

Received: October 24, 2025

Revised: April 10, 2026

Accepted: April 11, 2026

อิทธิพลของความแข็งแรงเดิมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล
และระดับการทดแทนต่อกำลังอัด การต้านทานการขัดสี และการแทรกซึม
คลอไรด์ของคอนกรีต

INFLUENCE OF PARENT CONCRETE STRENGTH AND REPLACEMENT
LEVELS OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE ON COMPRESSIVE
STRENGTH, ABRASION RESISTANCE, AND CHLORIDE ION
PENETRATION OF CONCRETE

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ¹ นันทชัย ชูศิลป์² จุฑามาศ ลักษณะกิจ³ และ เปรมณัช ชุมพร้อม⁴
^{1,2,3,4} อาจารย์, หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000,
¹Thaweesak.t@rmuts.ac.th, ²Nuntachai.c@rmuts.ac.th, ³Chuthamat.l@rmuts.ac.th and
⁴Premmanat.c@rmuts.ac.th

Thaweesak Thongkwan¹, Nuntachai Chusilp², Chuthamat Laksanakit³
and Premmanat Chumprom⁴

^{1,2,3,4} Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd.,
Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

¹Thaweesak.t@rmuts.ac.th, ²Nuntachai.c@rmuts.ac.th, ³Chuthamat.l@rmuts.ac.th and
⁴Premmanat.c@rmuts.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความแข็งแรงเดิมของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล RCA และระดับการทดแทน
มวลรวมหายาบ ต่อสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีต โดยใช้ RCA จาก 2 แหล่งได้แก่
1RCA กำลังอัด 20-25 N/mm² และ 2RCA กำลังอัด 40-45 N/mm² ทดแทนมวลรวมหายาบ
ธรรมชาติร้อยละ 25 50 และ 100 โดยน้ำหนัก คอนกรีตถูกประเมิน กำลังอัด BS EN 12390
การต้านทานการขัดสี ASTM C 944 และการแทรกซึมคลอไรด์ ASTM C 1202 ผลการทดสอบ
พบว่าเนื้อมอร์ตาร์ที่เกาะติดผิวมวลรวม RCA ทำให้เกิดความพรุนและการดูดซึมน้ำสูง
กำลังอัดของคอนกรีต 2RCA ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1RCA ร้อยละ 1-7 แสดงถึงอิทธิพลของคุณภาพ

คอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง ภายใต้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการทดแทน RCA เพิ่มขึ้น ความต้านทานการขัดสีมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อใช้ RCA มากขึ้น คอนกรีตที่ใช้ 2RCA ให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีต่ำกว่า 1RCA ร้อยละ 5-27 ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มีประสิทธิภาพดีขึ้นตามระดับการทดแทน RCA และอยู่ในช่วงระดับปานกลางถึงต่ำ คอนกรีตที่ใช้ 2RCA ให้ความต้านทานสูงกว่า 1RCA ร้อยละ 7-22 ผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของคอนกรีตที่ใช้ RCA ถูกกำหนดโดยคุณภาพของคอนกรีตต้นทาง และระดับการทดแทน โดยสามารถใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้อย่างน้อยร้อยละ 50 โดยไม่ส่งผลเสียต่อกำลังอัด การต้านทานการขัดสี และการแทรกซึมคลอไรด์

คำสำคัญ: มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล, กำลังอัด, การต้านทานการขัดสี, การแทรกซึมคลอไรด์

ABSTRACT

This study examines the effect of the original strength of RCA recycled concrete aggregates and the level of coarse aggregate substitution to the mechanical properties and durability of concrete. Using RCA from 2 sources: 1RCA with a compressive strength of 20-25 N/mm² and 2RCA with compressive strength of 40-45 N/mm². Concrete was evaluated compressive strength BS EN 12390, abrasion resistance ASTM C 944 and chloride ion penetration ASTM C 1202. The test results showed that the mortar texture adhering to the RCA aggregate surface caused high porosity and water absorption. The compressive strength of 2RCA concrete provides a compressive strength value higher than 1RCA by 1-7%, indicating the influence of the quality of the recycled concrete at the source. Under a constant water-cement ratio. Compression tends to increase as RCA substitution levels increase. Abrasion resistance is better when RCA is used. Concrete based on 2RCA provides a loss value due to abrasion that is 5-27% lower than 1RCA. Chloride ion penetration resistance performs better according to RCA substitution levels and is in the moderate to low range. All studies show that the performance of RCA-based concrete is determined by the quality of the source concrete and the level of substitution. At least 50% of the concrete aggregates can be recycled without adversely affecting compressive strength, abrasion resistance, and chloride ion penetration.

KEYWORDS: recycled concrete aggregates, compressive strength, abrasion resistance, chloride ion penetration

1. บทนำ

การก่อสร้างเป็นภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และก่อให้เกิดของเสียในปริมาณที่สูง จึงถูกกำหนดให้เป็นเป้าหมายสำคัญในการประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) โดยมุ่งเน้นการลดใช้ทรัพยากร ยืดอายุการใช้งาน และนำกลับมาใช้งานใหม่ในรูปแบบกระบวนการรีไซเคิล [1] คอนกรีตเป็นวัสดุที่อยู่ในเป้าหมาย และมีงานวิจัยที่ใช้วัสดุรีไซเคิลในคอนกรีตมากขึ้น เช่น การใช้วัสดุพอลิเมอร์ ประเภทพลาสติก หรือเศษยาง ช่วยเพิ่มสมบัติการดูดซับพลังงานและความเหนียว แม้กำลังอัดจะลดลงก็ตาม ซึ่งสามารถใช้เป็นบล็อกปูพื้น ผนังมวลเบา หรือแม้แต่โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [2-4] การนำมวลรวมจากคอนกรีตที่ถูกรื้อถอนกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมรีไซเคิลในคอนกรีต หรือที่เรียกว่าคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate, RCA) ก็เป็นแนวทางสำคัญในการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5] มีการศึกษาผลของการใช้คอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีตระบุว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสามารถทดแทนมวลรวมธรรมชาติได้ โดยพฤติกรรมเชิงโครงสร้างยังอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้เมื่อออกแบบส่วนผสมอย่างเหมาะสม [6] อย่างไรก็ตามสมบัติมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะแตกต่างจากมวลรวมธรรมชาติเนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีมอร์ตาร์เก่าติดอยู่ที่ผิวมวลรวมเดิม งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การเพิ่มสัดส่วนการทดแทนมวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลส่งผลให้กำลังอัด การหดตัว การคืบ และการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ คุณภาพการต้านทานลดลงตามปริมาณอัตราทดแทนที่สูงขึ้น [5] แต่หากควบคุมปริมาณการทดแทนให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 30 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลยังสามารถให้กำลังอัดที่ระดับยอมรับได้ [7,8]

สมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิล มีงานวิจัยศึกษาอย่างกว้างขวางพบว่าจากผิวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ยังมีมอร์ตาร์เก่าเกาะติดอยู่กับมวลรวมเดิม (Attached old mortar, AOM) ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะมีการดูดซึมน้ำมากกว่าสองเท่าของมวลรวมธรรมชาติ มวลรวมรีไซเคิลมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติประมาณร้อยละ 7-9 ซึ่งการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตต้องมีการปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพื่อชดเชยผลกระทบจากการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล [7] ด้านสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดระยะยาวเพิ่มขึ้นต่ำกว่าคอนกรีตมวลรวมธรรมชาติ โดยมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผล คือสัดส่วนการแทนที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการใช้วัสดุผสมเพิ่ม [8] คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีกำลังอัดและกำลังดึงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติประมาณร้อยละ 10-25 อีกทั้งคุณภาพและกำลังของคอนกรีตต้นทางที่ใช้ผลิตคอนกรีตรีไซเคิลเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ควบคุมสมบัติเชิงกลของคอนกรีต [9] ด้านสมบัติความคงทน ความต้านทานการขัดสี การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลไม่ได้ทำให้ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตลดลง อธิบายได้ว่าความพรุนและความหยาบของผิวมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลช่วยเสริมสร้างการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมส่งผลให้ผิวหน้าคอนกรีต

มีความต้านทานต่อการขัดสีได้ดีขึ้น [10,11] ส่วนการแทรกซึมของคลอไรด์ ขึ้นอยู่กับความพรุนจากมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ และปัจจัยด้านอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีความพรุนแตกต่างกัน ทำให้มีอิทธิพลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ฉะนั้นต้องควบคุม และกำหนดแนวทางการออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสม ก็สามารถใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลในสภาพแวดล้อมคลอไรด์ได้ [12-13]

โดยรวมจะเห็นได้ว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีสมบัติด้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ สาเหตุหลักมาจากมอร์ตาร์เดิมที่ติดอยู่กับมวลรวม ซึ่งมีความพรุน ส่งผลให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก และเขตเปลี่ยนผ่านระหว่างมวลรวมกับปูนซีเมนต์ (Interfacial transition zone, ITZ) ที่อ่อนแอ งานวิจัยจึงมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย เช่น การกำจัดมอร์ตาร์เดิมที่ติดอยู่กับมวลรวม (AOM) ด้วยการล้างน้ำ การขัดด้วยเครื่องขัดสี (Los Angeles abrasion) การปรับปรุงด้วยความร้อน และการใช้กรดอ่อน การปรับปรุงคุณภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุพอลิโซลัน การปรับกระบวนการผสมคอนกรีต และการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลด้วยการเสริมแรงเพื่อชดเชยการสูญเสียสมบัติเชิงกล [14]

แม้การศึกษาเกี่ยวกับการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในคอนกรีตมีการพัฒนาอย่างกว้างขวาง แต่ยังพบช่องว่างของการศึกษา โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาเฉพาะผลของระดับการแทนที่ หรือด้านคุณภาพของคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางแยกจากกัน อีกทั้งการศึกษาลักษณะจากเงื่อนไข่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์คงที่ ยังคงมีจำกัด และยังไม่ชัดเจนสำหรับวรรณกรรมที่ผ่านมา งานวิจัยดังกล่าวนี้จึงแสดงให้เห็นผลกระทบที่แตกต่างจากแนวคิดเดิมทั่วไปใน ด้านการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงรวมของตัวแปร อธิบายกลไกที่จะทำให้คอนกรีตจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณภาพดีขึ้น โดยไม่เพิ่มกระบวนการผลิตในการใช้งานจริง อีกทั้งยังพัฒนาแนวทางการประเมินสมบัติของคอนกรีต ทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทนควบคู่กัน ดังนั้น การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์ผลของคุณภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางในแต่ละระดับการทดแทนมวลรวมของคอนกรีตด้วยอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์คงที่ เพื่อดูผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะกำลังอัด กับสมบัติความคงทนของคอนกรีตด้านการต้านทานการขัดสี และการแทรกซึมคลอไรด์ เพื่อสนับสนุนความต้องการลดใช้ทรัพยากร ยืดอายุการใช้งาน และนำกลับมาใช้งานใหม่ ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ให้สามารถต่อยอดพัฒนาองค์ความรู้ และการประยุกต์ใช้งานจริงอย่างยั่งยืน

2. วัสดุ และวิธีการ

2.1 วัสดุ

การศึกษานี้ใช้วัสดุในการผสมคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement - General Use) ตามมาตรฐาน ASTM

C 1157/C1157M-23 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพแห้งตามมาตรฐาน ASTM C 33 มวลรวมหยาบธรรมชาติเป็นหินปูนบดย่อย ขนาดใหญ่สุด 19 mm อยู่ในสภาพแห้งตามมาตรฐาน ASTM C 33 มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล RCA จาก 2 แหล่งที่มีลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ 1RCA ที่มาจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดต้านทาง 20-25 N/mm² และ 2RCA ที่มาจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดต้านทาง 40-45 N/mm² ผ่านการบดย่อยและใช้ตัวอย่างมวลรวมหยาบ 3 ขนาดประกอบด้วยขนาด 4.75-9.50 mm 9.50-12.5 mm และ 12.5-19.00 mm ทำการผสมเข้าด้วยกันร้อยละ 15 35 และ 50 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C 33 มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล RCA ที่ใช้อยู่ในสภาพแห้งในการผสม เพื่อให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมการใช้งานจริง ลดกระบวนการผลิตคอนกรีต และเพื่อศึกษาผลของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตรีไซเคิลต่อสมบัติคอนกรีตโดยตรง ใช้น้ำสะอาดในการผสมคอนกรีต กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.60 เพื่อควบคุมตัวแปรหลักให้คงที่ มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของคุณภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต้านทาง และระดับการทดแทนโดยตรง และกำหนดเพื่อให้ความสามารถในการทำงานได้ในสภาวะคอนกรีตสดของส่วนผสมโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง จากนั้นกำหนดอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดคอนกรีตส่วนผสมควบคุม และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 2 แหล่ง ระดับการทดแทนร้อยละ 25 50 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ทำการผสมคอนกรีตตรวจสอบค่ายุบตัว จากนั้นเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีตต่อไป



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป



(ข) มวลรวมหยาบธรรมชาติ



(ค) ทรายแม่น้ำ



(ง) มวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิล RCA

รูปที่ 1 วัสดุในการผสมคอนกรีต

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Mix designation	Concrete mix proportions (kg/m ³)								
	Cement	Sand	Natural stone			RCA			Water
			19.00 mm	12.50 mm	9.50 mm	19.00 mm	12.50 mm	9.50 mm	
Control	300	800	550	385	165	0	0	0	180
1RCA25	300	800	350	289	124	200	96	41	180
1RCA50	300	800	275	193	83	275	193	83	180
1RCA100	300	800	0	0	0	550	385	165	180
2RCA25	300	800	350	289	124	200	96	41	180
2RCA50	300	800	275	193	83	275	193	83	180
2RCA100	300	800	0	0	0	550	385	165	180

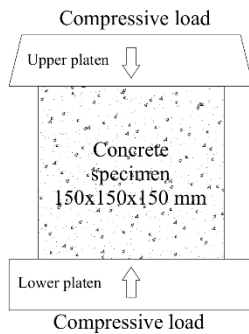
2.2 วิธีการ

2.2.1 การทดสอบกำลังอัด

การประเมินกำลังอัดของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน BS EN 12390 ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 mm บ่มภายใต้สภาวะควบคุมจนถึงอายุที่ทดสอบคือ 7 14 และ 28 วัน การทดสอบกำลังอัดจะดำเนินการโดยเครื่องทดสอบแรงอัดโดยวางตัวอย่างในตำแหน่งศูนย์กลางของแท่นกด และเพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราควบคุม 0.6 ± 0.2 N/mm²/s จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ดังแสดงรูปที่ 2 ค่ากำลังอัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ผลการทดสอบในแต่ละชุดเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

เมื่อ f_c คือกำลังอัดของคอนกรีต (N/mm² หรือ MPa) P คือแรงกดสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างวิบัติ (N) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (mm²)



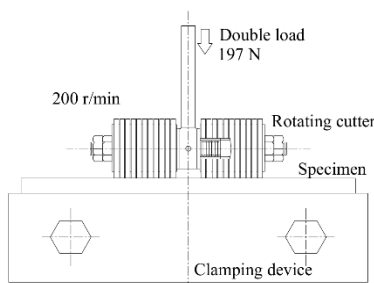
รูปที่ 2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

2.2.2 การทดสอบการต้านทานการขัดสี

การประเมินการขัดสีของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 944 ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 50 mm ทดสอบเริ่มต้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ จากนั้นทดสอบภายใต้น้ำหนักกระทำ 197 N โดยใช้หัวขัดหมุน (Rotating cutter) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ดังแสดงรูปที่ 3 ระยะเวลา 2 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ ดำเนินการอีก 5 รอบจนครบ 12 นาที ค่าร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ผลการทดสอบในแต่ละชุดเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

$$\text{Abrasion loss (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_i คือน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนการทดสอบ (g) และ W_f คือน้ำหนักของตัวอย่างหลังการทดสอบ (g)



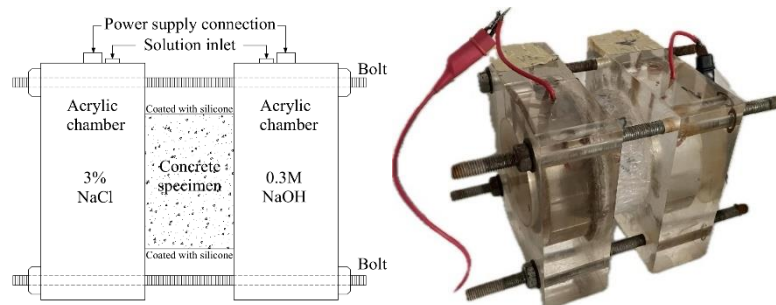
รูปที่ 3 การทดสอบการต้านทานการขัดสี

2.2.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

การประเมินการแทรกซึมคลอไรด์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm หนา 50 mm ตัวอย่างถูกปรับสภาพด้วยการดูดอากาศและแช่น้ำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวสม่ำเสมอ จากนั้นติดตั้งตัวอย่างตามรูปที่ 4 เตรียมสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3M (NaOH) จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 V บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทุก 30 นาทีเป็นเวลา 360 นาที ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 ผลการทดสอบในแต่ละชุดเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

เมื่อ Q คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน (Coulombs) I คือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามช่วงเวลาเป็นนาฬิกา (Ampere)



รูปที่ 4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

3.1 สมบัติส่วนผสมคอนกรีต

3.1.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มาตรฐาน มอก.2594 ชนิดใช้งานทั่วไป (GU) จากผลการทดสอบสมบัติของวัสดุประสาน พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีความถ่วงจำเพาะ 3.14 สามารถใช้คำนวณส่วนผสมคอนกรีตได้ การทดสอบร้อยละของตัวอย่างที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 μ m) พบว่ามีค่าอยู่ที่ร้อยละ 6.82 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 กำหนดไม่เกินร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของวัสดุประสานที่มีความละเอียด จะช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การแข็งตัวของคอนกรีตมีประสิทธิภาพ

และแข็งแรง การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก พบว่า แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 65.46 อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีปริมาณร้อยละ 3.21 และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีปริมาณร้อยละ 2.87 องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ดังกล่าวมีผลเชื่อมโยงกับสมบัติของคอนกรีตต่อไป [15]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

สมบัติวัสดุ	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
ความถ่วงจำเพาะ	3.14
ร้อยละของตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ($45\ \mu\text{m}$), %	6.82
แคลเซียมออกไซด์ (CaO), %	65.46
ซิลิกา (SiO_2), %	14.28
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), %	3.21
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3), %	2.87

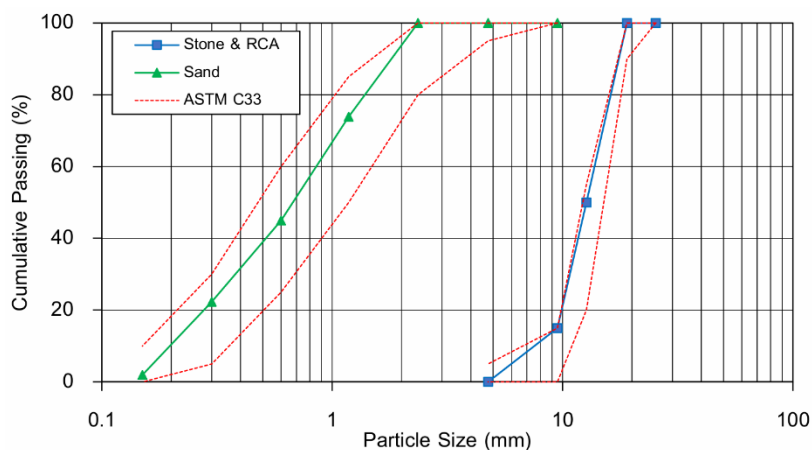
3.1.2 มวลรวม

การทดสอบสมบัติของมวลรวม จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม หินธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.72 หินทรายมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 ในขณะที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA และ 2RCA มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.62 และ 2.67 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความหนาแน่นต่ำกว่าหินย่อยธรรมชาติเล็กน้อย เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Limbachiya et al [7] ที่พบว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติประมาณร้อยละ 7-9 เมื่อพิจารณาร้อยละการดูดซึมน้ำ พบว่า 1RCA และ 2RCA มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าหิน และทรายธรรมชาติ อย่างชัดเจน โดย 1RCA และ 2RCA มีการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.24 และ 4.82 ตามลำดับ ขณะที่หินและทรายมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.46 และ 0.63 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่า 2 เท่า [7] สาเหตุหลักมาจากเนื้อมอร์ตาร์เดิมที่ติดอยู่กับผิวมวลรวมซึ่งมีความพรุนและการดูดซึมน้ำสูง [16] การดูดซึมน้ำของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่สูงอาจส่งผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ด้านหน่วยน้ำหนัก พบว่าหินมีหน่วยน้ำหนัก $1,531\ \text{kg/m}^3$ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA และ 2RCA ที่มีค่า 1,319 และ $1,325\ \text{kg/m}^3$ ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะอย่างเห็นได้ชัด ด้านความทนทานต่อการขัดสีมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA และ 2RCA มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีร้อยละ 44.82 และ 50.58 ตามลำดับ การสูญเสียเนื่องจากการขัดสีของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่สูงกว่าหินธรรมชาติแสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการขัดสีที่ได้น้อย อันเป็น

ผลจากความแข็งแรงของเนื้อมอร์ตาร์เดิมที่ห่อหุ้มมวลรวม [17] ซึ่งอาจมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตในการใช้งาน

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

สมบัติวัสดุ	หิน	1RCA	2RCA	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ	2.72	2.62	2.67	2.65
ร้อยละการดูดซึม, (%)	0.46	5.24	4.82	0.63
หน่วยน้ำหนัก, (kg/m ³)	1,531	1,319	1,325	-
การสูญเสียเนื่องจากการขัดสี Los Angeles abrasion loss, (%)	34.92	44.82	50.58	-
โมดูลัสความละเอียด FM	7.35	7.35	7.35	2.57



รูปที่ 5 การกระจายขนาดอนุภาคของมวลรวม

การกระจายขนาดอนุภาคของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วย หินธรรมชาติ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และทราย การกระจายขนาดของอนุภาคหินธรรมชาติ และมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลใช้ขนาดอนุภาคที่เหมือนกัน โดยกำหนดแบ่งขนาดอนุภาคเป็น 3 ขนาด คือขนาด 19.05-12.70 mm, 12.70-9.53 mm และ 9.53-4.75 mm โดยการกระจายขนาดของหินธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เป็นไปตามมาตรฐานการกระจายอนุภาคของมวลรวมหายาสำหรับคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C 33 อีกทั้งการกระจายอนุภาคของมวลรวมหายา สอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียด ที่มีค่าเท่ากับ 7.35 แสดงให้เห็นถึงลักษณะกายภาพที่มี

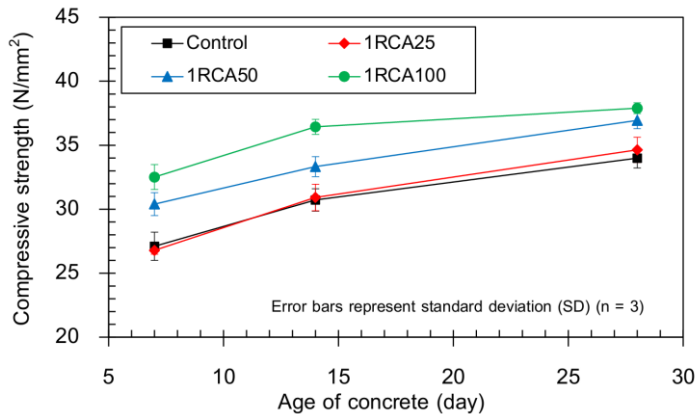
ขนาดเท่ากันสามารถทดแทนกันได้ในส่วนผสมคอนกรีต ส่วนมวลรวมละเอียด ทราบ การกระจายขนาดของอนุภาค สอดคล้องกับมาตรฐานการกระจายอนุภาคของมวลรวมละเอียดสำหรับคอนกรีตมาตรฐาน ASTM C 33 และค่าโมดูลัสความละเอียด มีค่าเท่ากับ 2.57 การกระจายขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจะเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงคุณภาพของคอนกรีตต่อไป

3.2 กำลังอัดคอนกรีต

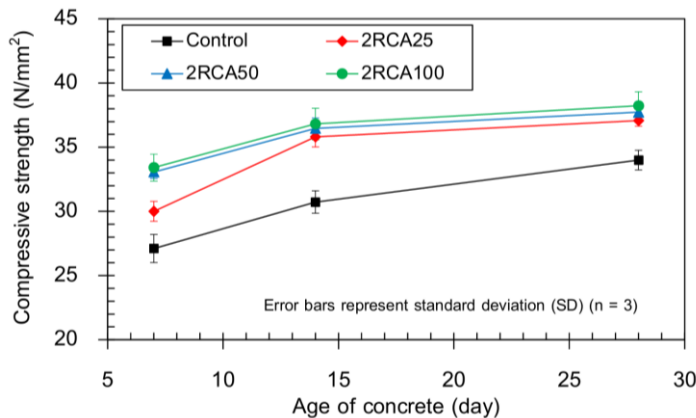
จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการทดแทนมวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจาก 2 กลุ่ม ที่อายุบ่มคอนกรีต 7 14 และ 28 วัน พบว่าแนวโน้มการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ไม่ได้ทำให้กำลังอัดลดลงทั้งหมด โดยส่วนผสมควบคุมกำลังอัดเท่ากับ 27.11 30.73 และ 33.99 N/mm² ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ขณะที่กลุ่ม 1RCA แสดงดังรูปที่ 6 การทดแทนร้อยละ 25 มีการลดลงเล็กน้อยในช่วงต้นที่ 7 วัน ร้อยละ 1.18 ของส่วนผสมควบคุม ก่อนจะมีค่าเทียบเท่าหรือสูงกว่าในช่วง 14-28 วัน มากกว่าร้อยละ 0.63 และ 1.91 ของส่วนผสมควบคุม ที่อายุ 14 และ 28 วัน เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนร้อยละ 50 และ 100 กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตส่วนผสมควบคุมอย่างต่อเนื่องทุกอายุบ่มคอนกรีต ร้อยละ 50 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 12.17 8.47 และ 8.68 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนร้อยละ 100 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 19.96 18.58 และ 11.48 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตกลุ่ม 2RCA แสดงดังรูปที่ 7 ให้กำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมควบคุมทุกระดับการทดแทนและทุกอายุบ่มคอนกรีต การทดแทนร้อยละ 25 มีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 10.69 16.51 และ 9.05 ที่อายุ 7 14 และ 28 เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนร้อยละ 50 ยิ่งมีค่ามีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยสูงกว่าร้อยละ 21.97 18.68 และ 10.99 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ และหากพิจารณาการทดแทนร้อยละ 100 พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสม หากเทียบกับส่วนผสมควบคุมมีค่ามากกว่าร้อยละ 23.26 19.79 และ 12.48 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต [8] อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงต้นมีความเด่นชัด ช่วงอายุบ่ม 7-14 วัน ซึ่งอาจเกิดจากการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Effective water-cement ratio) จากการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเดิม ขณะที่ช่วงปลาย ช่วงอายุบ่ม 14-28 วัน อัตราการเพิ่มกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่นำมาใช้ในกระบวนการไฮเดรชันมีข้อจำกัด กลไกการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต (Internal curing) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล อาจมีบทบาทในช่วงต้นถึงช่วงกลางของการพัฒนากำลังอัด การพัฒนากำลังอัดจึงเป็นผลจากกลไกร่วมระหว่างการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการบ่มคอนกรีตจากภายในเนื้อคอนกรีตเอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ El-Hawary and Al-Sulily [18] ที่ระบุว่าการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลสามารถกักเก็บน้ำเพื่อทำการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต (Internal curing) จากการค่อย ๆ ปล่อยน้ำ

เพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการเกิดรอยแตกร้าว ความต้านทานการแซ่เยือกแข็ง-ละลายของคอนกรีตได้



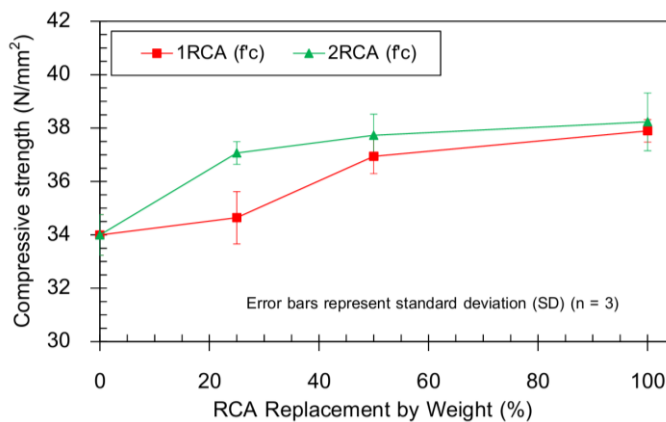
รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 2RCA

ระดับการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัด ที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 8 หากพิจารณาการใช้กลุ่มคอนกรีตรีไซเคิล กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล กรณีกลุ่ม 1RCA กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อเพิ่มระดับการทดแทน ขณะที่กลุ่ม 2RCA ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ากลุ่ม 1RCA อย่างสม่ำเสมอในทุกุระดับการทดแทน และมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดที่ชัดเจนกว่า ซึ่งแตกต่างจากข้อสรุปดั้งเดิมที่รายงานว่า การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทำให้กำลังอัดลดลง [7,17,19] ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ ผลของความพรุนของเนื้อมอร์ตาร์

ที่ติดอยู่กับผิวมวลรวมเด่นกว่าสมบัติมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล [20] แต่ในมิติของค่ายุบตัวของทั้งสองกลุ่มลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยการทดแทนร้อยละ 0-50 มีค่ายุบตัวที่ความสามารถในการทำงานได้ในระดับปานกลาง (5-10 cm) ส่วนการทดแทนมวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 100 มีค่ายุบตัวที่ความสามารถในการทำงานได้ในระดับต่ำ (2.5-5 cm) [21] แนวโน้มกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Effective water-cement ratio) จากการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เดิมมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในช่วงแรก สะท้อนให้เห็นจากค่ายุบตัวที่ลดลง ในขณะที่เดียวกันน้ำที่ถูกดูดซึมไว้อาจปล่อยออกมาในระยะต่อมามีส่วนช่วยในกลไกการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต (Internal curing)



รูปที่ 8 ระดับการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน

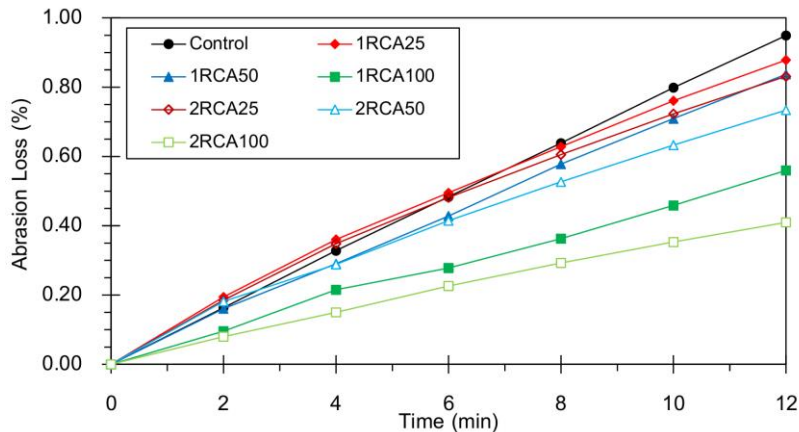
ความแตกต่างระหว่างคุณภาพของคอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง 1RCA และ 2RCA ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล และความสามารถในการทำงาน ด้านกำลังอัดพบว่า 2RCA ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1RCA ร้อยละ 7.00 2.12 และ 0.89 ของการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Gebremariam et al [22] และ Hameed et al [23] ซึ่งสะท้อนว่าคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางกำลังที่ดีกว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่ดี ทั้งในแง่ความหนาแน่นและความแข็งแรงของเนื้อมอร์ตาร์เก่าที่ติดอยู่ในด้านคอนกรีตสดค่ายุบตัวของคอนกรีตแม้ 2RCA จะให้กำลังอัดที่สูงกว่าแต่แนวโน้มการลดลงของค่ายุบตัวยังใกล้เคียงกับ 1RCA แสดงให้เห็นว่าคุณภาพคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่าสมบัติคอนกรีตสด ดังนั้นคุณภาพของคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางจึงเป็นตัวแปรสำคัญกำหนดศักยภาพด้านสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสำหรับใช้งาน

3.3 การต้านทานการขีดสีของคอนกรีต

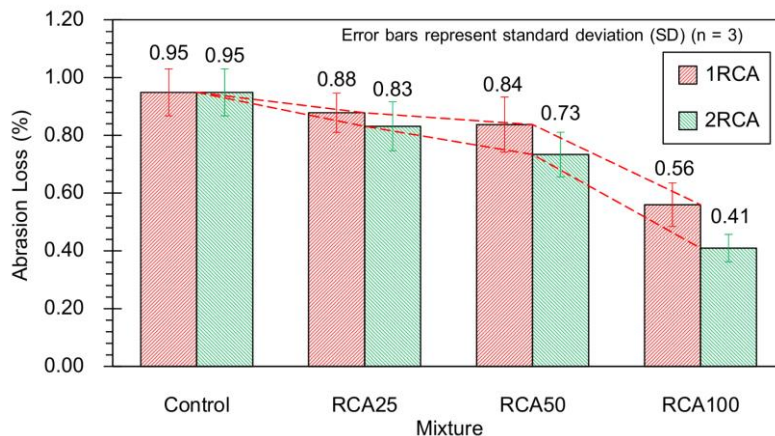
จากผลการทดสอบการต้านทานการขีดสีของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 944 โดยการเพิ่มน้ำหนักเป็นสองเท่า (Double load) ใช้เวลาทดสอบ 12 นาที [24] จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีตามระยะเวลาการทดสอบในช่วง 12 นาที พบว่า 1RCA มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกช่วงเวลาการทดสอบ เมื่อเทียบกับกลุ่ม 2RCA แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของคอนกรีตมีผลต่อการขีดสีของคอนกรีต [25] ในด้านระดับการทดแทนเมื่อมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มขึ้นการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีก็จะน้อยลง ซึ่งแตกต่างจากข้อสรุปดั้งเดิมที่รายงานว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าสูญเสียจากการขีดสีเพิ่มขึ้น [26] ทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของคุณภาพ และระดับการแทนที่ของคอนกรีตรีไซเคิลที่มีผลทำให้การต้านทานการขีดสีดีขึ้น ในทุกช่วงเวลาการทดสอบอย่างเห็นได้ชัด

จากรูปที่ 10 แสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีสูงสุดของคอนกรีตที่มีการทดแทนมวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิล ผลทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทุกส่วนผสมมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีน้อยกว่าคอนกรีตส่วนผสมควบคุม และมีค่าน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มคอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีต โดยกลุ่ม 1RCA มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 7.45 11.78 และ 41.01 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ที่ระดับการทดแทนร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม 2RCA มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 12.40 22.68 และ 56.85 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ที่ระดับการทดแทนที่ร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของคอนกรีตจะถูกควบคุมโดยพฤติกรรมวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของมวลรวมเพียงอย่างเดียว จากผลการทดสอบปริมาณของเนื้อมอร์ตาร์เก่าที่ติดอยู่ทำให้คอนกรีตต้านทานการขีดสีได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Brito [10] ที่ระบุว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลไม่ได้ทำให้ความต้านทานการขีดสีต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้คุณภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่อาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของผิวคอนกรีต และปัจจัยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลงจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เกิดกลไกการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต โดยการปล่อยน้ำออกมาในระหว่างกระบวนการไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นขึ้น มีปริมาณความพรุนน้อยลง ส่งผลให้ความต้านทานการขีดสีดีขึ้น [27] ด้านความแตกต่างระหว่างคุณภาพของคอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง 1RCA และ 2RCA พบว่าคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิล 2RCA มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีที่ต่ำกว่ากลุ่ม 1RCA โดยมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5.35 12.36 และ 26.85 ที่ระดับการทดแทนที่ร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า 2RCA สามารถคงความทนทานต่อการขีดสีได้ดีกว่า 1RCA อันเนื่องมาจากคุณภาพของคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางที่มีสมบัติแข็งแรงกว่า [11] การศึกษาการขีดสี

ของคอนกรีตจึงเป็นการยืนยันความคงทนอีกด้าน เพื่อใช้ประกอบในการผลิตคอนกรีตในการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการขัดสี



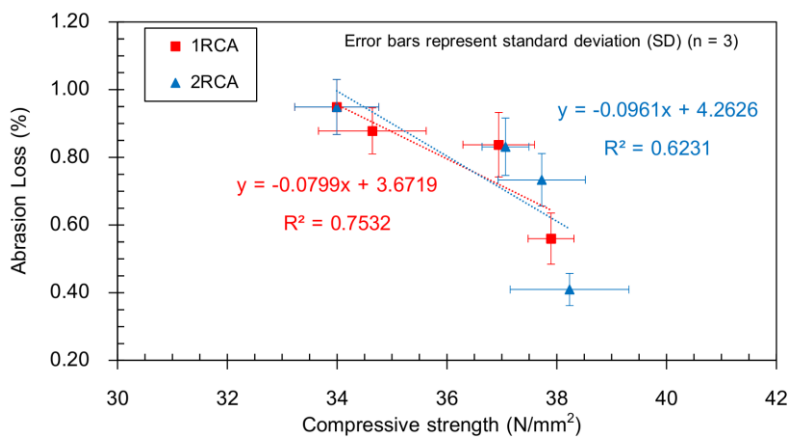
รูปที่ 9 ช่วงเวลากับการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีต



รูปที่ 10 การสูญเสียเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

จากผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่มีการทดแทนมวลรวมด้วยคอนกรีตรีไซเคิล 2 กลุ่ม จากรูปที่ 11 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีกับกำลังอัดคอนกรีตทั้งกลุ่ม 1RCA และ 2RCA มีความสัมพันธ์แสดงเส้นตรงที่มีแนวโน้มลง บ่งชี้ว่าการกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตจะลดลง [24] สามารถต้านทานการขัดสีได้สูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นและความแข็งแรงของคอนกรีตที่สูงขึ้น ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิล 1RCA มีความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียเนื่องจากการขัดสี

กับกำลังอัดที่สูงกว่า 2RCA แสดงให้เห็นว่าสามารถต้านทานการขัดสีได้ดีกว่า [11] การศึกษายังแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อความต้านทานการขัดสี [28,29] อีกทั้งยังสามารถคาดการณ์ค่าการสูญเสียเนื่องจากการขัดสีได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยกลุ่มคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA ความสัมพันธ์คือ $\text{Abrasion loss}(\%) = (-0.0799f'_c + 3.6719)$ และคอนกรีตรีไซเคิลกลุ่ม 2RCA ความสัมพันธ์คือ $\text{Abrasion loss}(\%) = (-0.0961f'_c + 4.2626)$ ความเชื่อถือของข้อมูลถูกวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval, CI) โดยกำหนดช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลจากการวิเคราะห์กลุ่ม 1RCA และ 2RCA กำลังอัดช่วงความเชื่อมั่น CI สูงสุดเท่ากับ 2.57 N/mm^2 และ 3.06 N/mm^2 การสูญเสียเนื่องจากการขัดสีช่วงความเชื่อมั่น CI สูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.24 และ 0.21 ทั้งหมดตามลำดับ อีกทั้งค่า R^2 ยังช่วยบ่งชี้ความแปรปรวนของข้อมูลได้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตจึงมีความสัมพันธ์กับความคงทนของคอนกรีตด้านการต้านทานการขัดสีการใช้คอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีตจึงสามารถคาดการณ์ได้ในการใช้งาน



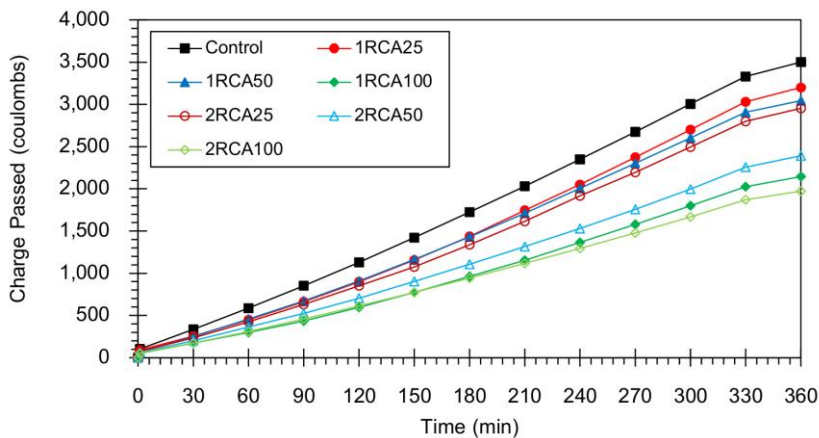
รูปที่ 11 การสูญเสียเนื่องจากการขัดสีและกำลังอัดของคอนกรีต

3.4 การแทรกซึมคลอไรด์คอนกรีต

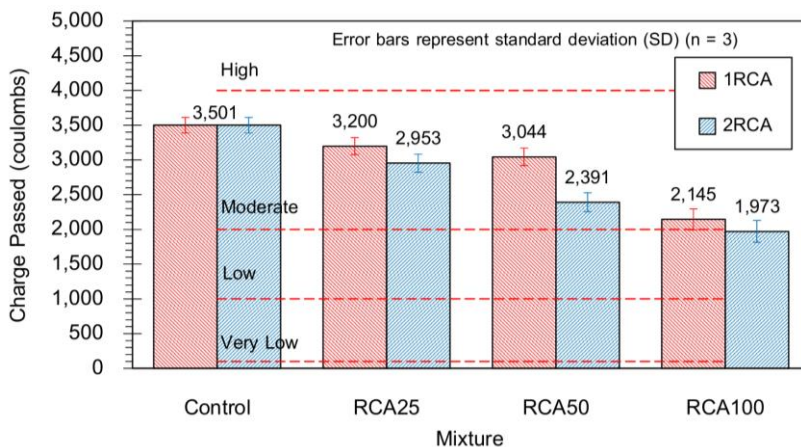
จากผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ASTM C 1202 ที่มีการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านจะเพิ่มขึ้นตามเวลาทดสอบของคอนกรีต สอดคล้องกับพฤติกรรมของการแทรกซึมคลอไรด์ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปคลอไรด์จะแทรกซึมผ่านคอนกรีตได้มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกซึมที่สูงขึ้น แสดงถึงพฤติกรรมป้องกันการกัดกร่อนที่ลดลง [30] หากพิจารณาคอนกรีตส่วนผสมควบคุมมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ด้อยที่สุด แต่เมื่อมีการทดแทนมวลรวมหยาบด้วยคอนกรีต

รีไซเคิลประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ด้านความแตกต่างของแหล่งคอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลกลุ่ม 2RCA สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ากลุ่ม 1RCA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตรีไซเคิลที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีด้วย แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของสมบัติเชิงกลและสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่สัมพันธ์กัน [31,32]

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์โดยแสดงค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ภายในตัวอย่างคอนกรีตจากรูปที่ 13 ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตส่วนผสมควบคุม ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ที่มีค่าประมาณ 3,501 คูลอมป์ หากเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลาง เมื่อมีการทดแทนมวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีตค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมีค่าลดลง โดยกลุ่ม 1RCA ลดลงร้อยละ 8.61 13.05 และ 43.66 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม สำหรับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม 2RCA ลดลงร้อยละ 15.64 31.71 และ 38.73 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม สำหรับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 25 50 และ 100 ตามลำดับ การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0-50 ถึงแม้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านจะลดลงตามปริมาณคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ยังคงอยู่ในระดับปานกลาง แต่หากใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 100 ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์จะอยู่ในระดับหรือใกล้เคียงระดับต่ำ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทำให้ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น [12,13] อธิบายได้จากกลไกการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต (Internal curing) ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาแน่นของมอร์ตาร์และลดความพรุนของคอนกรีต นอกจากนี้ความหยาบของผิวมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลยังส่งผลให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ซึ่งช่วยลดช่องว่างการแทรกซึมเข้าไปได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความต้านทานคลอไรด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความพรุนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพียงอย่างเดียว แต่ความหยาบของผิวมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และกลไกการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ด้านความแตกต่างของแหล่งคอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง พบว่าคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลกลุ่ม 2RCA มีค่าสูงกว่า กลุ่ม 1RCA ร้อยละ 7.69 21.46 และ 8.04 ดังนั้นจะเห็นว่าคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีด้วย [33,34]



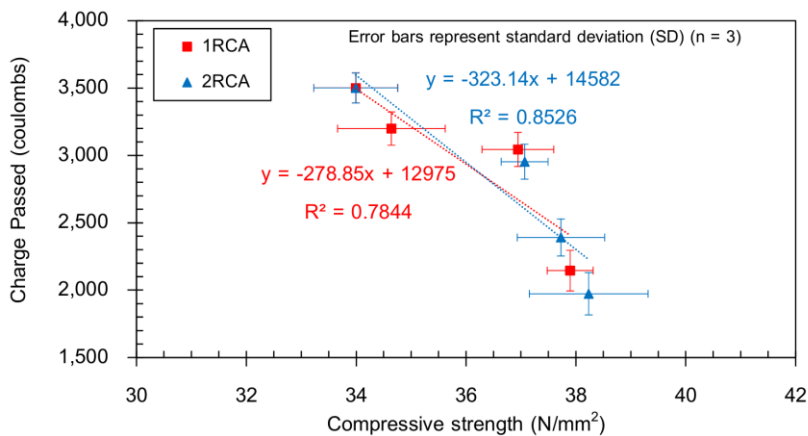
รูปที่ 12 ช่วงเวลากับประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีต



รูปที่ 13 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

จากรูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่หรือการแทรกซึมของคลอไรด์กับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีระดับการทดแทนมวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจาก 2 กลุ่มตัวอย่าง พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและค่าการแทรกซึมคลอไรด์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ [31,32] คือ คอนกรีตรีไซเคิล 1RCA สมการเชิงเส้น $\text{Charge Passed (C)} = (-278.85f'_c + 12,975)$ และคอนกรีตรีไซเคิล 2RCA สมการเชิงเส้น $\text{Charge Passed (C)} = (-323.14f'_c + 14,582)$ ความเชื่อถือของข้อมูลถูกวิเคราะห์ทางสถิติด้วยช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval, CI) โดยกำหนดช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลจากการวิเคราะห์กลุ่ม 1RCA และ 2RCA กำลังอัดช่วงความเชื่อมั่น CI สูงสุดเท่ากับ 2.57 N/mm^2 และ 3.06 N/mm^2 การแทรกซึมคลอไรด์ช่วงความเชื่อมั่น CI สูงสุด

เท่ากับ 374.91 คูลอมบ์ และ 391.18 คูลอมบ์ ทั้งหมดตามลำดับ อีกทั้งค่า R^2 ยังช่วยบ่งชี้ความแปรปรวนของข้อมูลได้ จากสมการทั้งสองพบว่าเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จะลดลง [24] บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้น คอนกรีตที่กำลังสูงขึ้นจะมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความพรุนน้อยลง ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น [12,13] หากเมื่อเปรียบเทียบมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางระหว่าง 1RCA และ 2RCA พบว่า 2RCA สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่า สอดคล้องกับคอนกรีตรีไซเคิลที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่า [33,34] การทดสอบนี้ยังสามารถยืนยันบทบาทของกำลังอัดที่สัมพันธ์กับความคงทนของคอนกรีตด้านการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 14 การแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

4. บทสรุป

สมบัติทางกายภาพของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล สะท้อนถึงมอร์ตาร์เดิมที่เกาะติดอยู่บนผิวมวลรวม ส่งผลให้เกิดความพรุน การดูดซึมน้ำที่สูง ค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ และการสูญเสียจากการขัดสีเพิ่มมากขึ้น ทั้งหมดเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตสด สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่ถูกเปรียบเทียบโดยคุณภาพของคอนกรีตต้นทาง และระดับการทดแทนมวลรวม โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 2RCA กำลังอัดต้นทาง 40-45 N/mm² ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 1RCA กำลังอัดต้นทาง 20-25 N/mm² โดยมากกว่าประมาณร้อยละ 1-7 แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต้นทางเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

การเพิ่มการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีต ภายใต้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น แต่ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลง ทุกระดับการทดแทน ทั้งหมดสามารถอธิบายได้จากกลไกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลงขณะคอนกรีตสดจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และภายหลังคอนกรีตแข็งตัวเกิดการบวมจากภายในของน้ำที่สะสมอยู่ในเนื้อมอร์ตาร์เดิมที่เกาะติดกับมวลรวม

ความต้านทานการขีดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีค่าการสูญเสีย เนื่องจากการขีดสีน้อยลงเมื่อมีระดับการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 2RCA กำลังอัดต้นทาง 40-45 N/mm² ให้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีต่ำกว่า 1RCA กำลังอัดต้นทาง 20-25 N/mm² คิดเป็นร้อยละ 5-27 ด้านความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าการสูญเสียเนื่องจากการขีดสีพบความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบผกผันค่า R² เท่ากับ 0.62-0.75 ซึ่งบ่งชี้ว่าสามารถใช้กำลังอัดเป็นตัวแปรในการคาดการณ์สมบัติการต้านทานการขีดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล พบว่าเมื่อมีระดับการทดแทนมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ คุณภาพของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต้นทาง 2RCA กำลังอัดต้นทาง 40-45 N/mm² มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ากลุ่ม 1RCA กำลังอัดต้นทาง 20-25 N/mm² คิดเป็นร้อยละ 7-22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าการแทรกซึมคลอไรด์พบความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบผกผันค่า R² เท่ากับ 0.78-0.85 ซึ่งสะท้อนความสัมพันธ์เชิงสอดคล้องระหว่างสมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสมรรถนะของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล มีผลจากคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลจากต้นทาง และระดับการทดแทนที่เหมาะสม โดยสามารถใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยไม่ส่งผลเสียต่อกำลังอัด การต้านทานการขีดสี และการแทรกซึมคลอไรด์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลระยะยาว และความคงทนด้านอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการใช้งานจริง สามารถใช้มวลรวมรีไซเคิลได้มากขึ้นหากมีการปรับปรุงค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้มีความสามารถในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่หลากหลายเพื่อเปรียบเทียบผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติความคงทนของคอนกรีต จะช่วยเสริมความสมบูรณ์ของงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาในอนาคตควรศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค เช่น SEM, ITZ, การวิเคราะห์โครงสร้างความพรุน เพื่อสังเกตผลการบวมภายในเนื้อคอนกรีต และคุณภาพของมอร์ตาร์ใน

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลโดยตรง ซึ่งจะให้ความเข้าใจที่ยิ่งขึ้นเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความคงทน ที่สังเกตได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ที่สนับสนุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Benachio GLF, Duarte Freitas Mdo C, Tavares SF. Circular economy in the construction industry: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 2020;260:121046. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121046.
- [2] Nitisuwanluksa N. Effects of polypropylene plastic ratio in autoclaved aerated concrete on compressive strength and thermal conductivity. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2016;6(1):174-87. (In Thai)
- [3] Vudjung C, Thiakthum S. Paving blocks for the elderly: a study of the preparation of concrete mixed with crumb rubber and bonded rubber. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2021;11(3):90-109.
- [4] Kanbua P, Kankaset L, Plitsiri I, Intaboot N. Behaviors of reinforced concrete beams containing crumb rubber from recycled tires. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2024;14(1):15-30. (In Thai).
- [5] Nitichote K, Yodsudjai W. Development of sustainable concrete by using of recycled aggregate in concrete. *Journal of Thailand Concrete Association* 2017;5(2):29-35. (In Thai)
- [6] Sripundon Y, Musiket K, Piyaphipan S, Tuenpusa P. Effects of W/C ratios on fracture parameters of recycled aggregate concrete notched-beams. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2019;9(3):218-37. (In Thai).
- [7] Limbachiya MC, Leelawat T, Dhir RK. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures* 2000;33(9):574-80.
- [8] Xiao J, Li L, Tam Y, Li H. The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete* 2014;15(1):3-12. doi: 10.1002/suco.201300024.

- [9] Tabsh SW, Abdelfatah AS. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and building materials* 2009;23(2):1163-7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007.
- [10] de Brito J. Abrasion resistance of concrete made with recycled aggregates. *International Journal of Sustainable Engineering* 2010;3(1):58-64. doi: 10.1080/19397030903254710
- [11] Hua M, Chen B, Liu Y, Liu H, Zhu P, Chen C, et al. Durability and abrasion resistance of innovative recycled pervious concrete with recycled coarse aggregate of different quality under sulfate attack. *Applied Sciences* 2021;11(20):9647. doi: 10.3390/app11209647.
- [12] Vázquez E, Barra MB, Aponte D, Jiménez C, Valls S. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials* 2013;67(Pt A):61-7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028.
- [13] Zhang Z, Zhao X. Uncertainty-aware prediction of chloride resistance in recycled aggregate concrete exposed to marine conditions. *Case Studies in Construction Materials* 2025;23:e05464. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05464.
- [14] Mistri A, Bhattacharyya SK, Dhami NK, Mukherjee A, Barai SV. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials* 2020;233:117894. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117894.
- [15] Jamal MA, Mohammed AS, Ali JA. Modeling the impact of SiO₂, Al₂O₃, CaO, and Fe₂O₃ on the compressive strength of cement modified with nano-silica and silica fume. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design* 2025;8:156. doi: 10.1007/s41939-025-00739-w.
- [16] Zarei A, Sharghi M, Jeong H, Afshin H. A comparative evaluation of modification methods for improving the mechanical properties of recycled aggregate-recycled steel fiber concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2024;28(9):3962-75. doi: 10.1007/s12205-024-0005-z.
- [17] Verian KP, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation & Recycling* 2018;133:30-49. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- [18] El-Hawary M, Al-Sulily A. Internal curing of recycled aggregates concrete. *Journal of Cleaner Production* 2020;275:122911. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122911.

- [19] Kumar P, Singh N. Influence of recycled concrete aggregates and coal bottom ash on various properties of high volume fly ash-self compacting concrete. *Journal of Building Engineering* 2020;32:101491. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101491.
- [20] Lu L. Optimal replacement ratio of recycled concrete aggregate balancing mechanical performance with sustainability: a Review. *Buildings* 2024;14(7):2204. doi: 10.3390/buildings14072204.
- [21] Gambhir ML. *Concrete technology*. 5th ed. New Delhi: McGraw Hill Education; 2013.
- [22] Gebremariam HG, Taye S, Tarekegn AG. Parent concrete strength effects on the quality of recycled aggregate concrete: a review. *Heliyon* 2024;10(4):e26212. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26212.
- [23] Hameed R, Al-Soudani M, Amli AS, Ali H, Shahzad S, Hameed A. Impact of parent concrete strength of recycled aggregates on the mechanical performance of RAC bricks. *Revista de la Construcción. Journal of Construction* 2025;24(2):505-32. doi: 10.7764/RDLC.24.2.505.
- [24] Sanawung W, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Strength, abrasion resistance, and chloride ion penetration of concrete containing palm oil fuel ash. *KMUTT Research and Development Journal* 2018;41(1):83–96. (In Thai).
- [25] Abdulla NA. Effect of recycled coarse aggregate type on concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2014;27(10):04014273. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001247.
- [26] Kumar R. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials* 2017;142:248-55. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077.
- [27] Rahmani K, Shamsai A, Saghafian B, Peroti S. Effect of water and cement ratio on compressive strength and abrasion of microsilica concrete. *Middle-East Journal of Scientific Research* 2012;12(8):1056-61.
- [28] Bai X, Zhou H, Bian X, Chen X, Ren C. Compressive strength, permeability, and abrasion resistance of pervious concrete incorporating recycled aggregate. *Sustainability* 2024;16(10):4063. doi: 10.3390/su16104063.
- [29] Kılıç A, AtiŞ CD, Teymen A, Karahan O, Özcan F, Bilim C, et al. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement and concrete composites* 2008;30(4):290-96. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011

- [30] Mousavinezhad S, Nozari S, Newton CM. Classifying concrete permeability using rapid chloride permeability and surface resistivity tests: benefits, limitations, and predictive models—a state-of-the-art review. *Buildings* 2025;15(23):4216. doi: 10.3390/buildings15234216.
- [31] Silva RV, de Brito Jd, Neves R, Dhir RK. Prediction of chloride ion penetration of recycled aggregate concrete. *Materials Research* 2015;18(2):427-40. doi: 10.1590/1516-1439.000214.
- [32] Ramezaniapour AA, Pilvar A, Mahdikhani M, Moodi F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials* 2011;25(5):2472-79. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069.
- [33] Wang Y, Liao J, Zhang B. A review of chloride penetration of recycled concrete with enhancement treatment and service life prediction. *Materials* 2024;17(6):1349. doi: 10.3390/ma17061349.
- [34] Ying J, Han Z, Shen L, Li W. Influence of parent concrete properties on compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete with strengthened recycled aggregates. *Materials* 2020;13(20):4631. doi: 10.3390/ma13204631.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ทวีศักดิ์ ทองขวัญ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-Mail thaweesak.t@rmuts.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162 งานวิจัยด้านการทดสอบวัสดุ วัสดุวิศวกรรม และวิศวกรรมระบบราง



รศ.ดร.นันทชัย ชูศิลป์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-Mail nuntachai.c@rmuts.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162 งานวิจัยด้านวัสดุพอลิโพรพิลีน คอนกรีต และโครงสร้างวัสดุผสม



รศ.ดร.จุฑามาศ ลักษณะกิจ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-Mail chuthamat.l@rmutsv.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162 งานวิจัยด้านวัสดุก่อสร้างจากขยะ วิศวกรรม ความปลอดภัยทางถนน



ผศ.เปรมณัช ชุมพร้อม อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-Mail premmanat.c@rmutsv.ac.th โทรศัพท์ 0-7431-7162 งานวิจัยด้านการทดสอบวัสดุ วัสดุวิศวกรรม และเทคโนโลยี คอนกรีต

Article History:

Received: January 18, 2026

Revised: April 16, 2026

Accepted: April 17, 2026

REPRESENTATIVE-DAY DISCRETE-EVENT SIMULATION TO REDUCE OVERTIME IN OUTBOUND WAREHOUSE DOCKING

Pachira Na nan¹, Thammawit Prasert² and Peerapong Pakawanich^{3*}

¹M.Eng. Student, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000, Thailand. Email: nanan_p2@su.ac.th

^{2,3*}Lecturer, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000, Thailand,

²prasert_t@su.ac.th, ³pakawanich_p@su.ac.th

**Corresponding author*

ABSTRACT

Overtime in outbound warehouse docking operations is a persistent logistics challenge, yet existing studies rarely address realistic labor calendars, zoning constraints, heterogeneous truck-type processes, or extreme congestion days. This study develops a data-driven, minute-resolution discrete-event simulation (DES) in Python to evaluate five dispatching and bay-sharing policies (S0–S4) at a Thai beverage manufacturer. Operational data from 235 working days covering four truck types (EXP, MAN, CAN, BOT) across 19 bays were used to calibrate the model. A hybrid scenario-reduction approach-combining tail-based extreme-day retention and Ward's hierarchical clustering-compressed the dataset to 40 representative days (including 16 extreme days), reducing computational effort by 83% while preserving workload fidelity (NRMSE = 0.070; Pearson r = 0.873). A total of 200 DES runs (40 days $\times$ 5 policies) were conducted, with all improvements confirmed statistically significant (paired t-test, p < 0.001). FIFO dispatching with BOT-to-CAN bay sharing (S1) proved most robust, reducing weighted-average overtime by 43.34% (from 112.94 to 63.99 min/day) with the lowest truck waiting times. While S2 achieved slightly lower absolute overtime (62.79 min/day), it redistributed delays under peak conditions rather than relieving congestion. Sensitivity analysis identified a 90-minute end-of-shift activation window as optimal. S1 is recommended as the operational default, deployable via gate-level queue management

without optimization infrastructure. The proposed DES framework offers an efficient, tail-aware platform for evidence-based dock policy evaluation before real-world implementation.

KEYWORDS: discrete-event simulation, outbound logistics, overtime reduction, representative-day selection, truck dock scheduling.

1. Introduction

Transportation and logistics operations play a central role in ensuring supply chain continuity, particularly at the plant interface where inbound and outbound flows are consolidated. In such environments, dock and bay management significantly affects operational performance from truck arrival through docking, loading, and departure. Ineffective dock control can propagate congestion, prolong waiting times [1-5], and ultimately lead to overtime, making dock operations a persistent managerial concern in logistics and manufacturing systems [6].

A substantial body of research models dock-level decision-making as door or dock assignment and truck scheduling problems [2-4,7,8]. Prior studies show that assignment and sequencing decisions made under limited dock capacity and handling resources strongly influence throughput, waiting time, and service performance [1-3,7]. Optimization-based approaches dominate this literature, ranging from exact formulations to heuristic and metaheuristic methods, with several studies proposing integrated door–schedule models that incorporate handling times and operational interactions [1,6,8]. For example, Li et al [9] developed an integrated model that jointly determines dock mode configuration, truck assignment, and scheduling under mixed service mode docks where loading and unloading operations share dock capacity. Their study highlights that flexible dock configurations can substantially improve operational performance compared with static assignment strategies. However, analytical optimization models often simplify operational details such as labor calendars, zoning rules, and dispatching practices. Consequently, they may have limited ability to explain how congestion accumulates throughout the day and eventually leads to overtime under realistic end-of-shift conditions.

To capture these operational complexities, discrete-event simulation (DES) has been widely applied in logistics and warehousing research. DES explicitly models event-driven interactions among trucks, docks, equipment, and labor resources, allowing operational rules and constraints to be represented directly. Reviews identify DES as a key methodology for analyzing logistics

systems where operational feasibility and timing interactions are difficult to represent analytically [10]. Previous studies demonstrate that DES can effectively evaluate trade-offs among dock utilization, waiting time, and resource allocation under alternative operating policies [11,12]. Simulation has also been incorporated into digital-twin frameworks, where operational data are used to calibrate models for monitoring and decision support [11]. Related work by Kaarlela et al [13] illustrates how simulation environments combined with data-driven models can support operational planning and scenario evaluation in transportation systems. Such perspectives are particularly relevant for overtime management because overtime depends not only on total workload but also on when congestion occurs relative to labor schedules and breaks [14].

Overtime should therefore be viewed not only as a cost indicator but also as an operational outcome influenced by staffing levels, break feasibility, and job-specific processing requirements. In many dock operations, different truck types require different processing structures, meaning that similar arrival volumes may generate very different labor workloads and congestion patterns. As a result, evaluating dispatching, sharing, and zoning policies requires models that explicitly represent labor calendars and shop-floor rules rather than relying solely on idealized capacity assumptions. Simulation-based policy evaluation is therefore well suited for comparing operational policies under realistic operating conditions.

A key challenge in simulation-based dock studies, however, concerns experimental design when long-term operational data are available. Many studies rely on "typical-day" scenarios or synthetic inputs that smooth out demand variability, even though overtime is often triggered by rare peak-congestion days rather than average conditions. To address this issue, representative-day selection—an approach related to scenario reduction in long time-series analysis—has been proposed as a practical way to preserve demand variability while reducing computational effort [15,16]. By explicitly retaining extreme days instead of averaging them, such methods can maintain low-probability but high-impact operating conditions that strongly influence overtime formation [6,15,16].

In representative-day frameworks, each operating day is encoded using features that capture workload level and variability, such as daily truck volume and temporal indicators. A hybrid "extreme + typical" strategy is commonly applied, where extreme days are first identified and preserved to retain rare operational conditions [17-19]. The remaining days are then clustered to identify representative normal scenarios using clustering techniques such as hierarchical clustering, with the number of clusters determined through internal

validation metrics [15,20,21]. Representative days selected from each cluster can subsequently be used to reconstruct annual workload patterns and evaluate operational policies while maintaining fidelity to the original time-series characteristics [15,16,22].

In practice, recurring overtime has been observed in outbound dock operations where dispatching decisions are performed manually and non-FIFO sequencing is frequently applied. Trucks arriving later may be served earlier, resulting in long and uneven waiting times and raising concerns regarding fairness and operational governance. The company therefore seeks to evaluate whether FIFO-based dispatching, potentially combined with controlled bay sharing, can reduce driver waiting without increasing overtime under realistic operational constraints.

Despite extensive research on dock assignment, truck scheduling, and simulation-based analysis, important gaps remain for this decision context. Existing studies often evaluate system performance under stylized or average operating conditions, while extreme congestion days that strongly influence overtime are underrepresented. In addition, many optimization-based approaches are tested under simplified problem settings that do not explicitly represent labor calendars, zoning restrictions, and heterogeneous job processes. As a result, limited attention has been given to governance-oriented dispatching policies such as FIFO implemented under realistic operational constraints, and the interaction between fairness-driven rules and overtime formation remains insufficiently understood.

Motivated by these gaps, this study develops a data-calibrated, minute-resolution discrete-event simulation (DES) based on real operational data from an outbound warehouse. A representative-day selection procedure is used to preserve annual workload variability, including extreme operating conditions, while keeping the experimental design computationally tractable. Within this framework, alternative dispatching and controlled sharing policies are evaluated under identical arrival streams to quantify their impacts on waiting time and overtime. The results provide evidence-based guidance for selecting governance-aligned dock policies prior to real-world implementation.

2. Methodology

2.1 Case Study System

The case study focuses on a large beverage manufacturer's outbound transportation unit in Thailand, where finished goods are loaded into third-party carrier trucks via 19 loading

bays, which include four job types: export (EXP), manual/hand-stacked (MAN), canned products (CAN), and bottled products (BOT), divided into three operational zones: bays 1-6 serve EXP and MAN, bays 7-8 serve CAN, and bays 9-19 serve BOT, Table 1 outlines the process structure and projected resource requirements for each job type at the outgoing port. Each row includes the truck type (EXP, MAN, CAN, BOT), the number of consecutive steps required for completion, the step labels that describe the DES workflow (loading, positioning), the time (minutes), and the number of workers (people) assigned to each step. EXP and MAN are designed as two-step processes. Step 1 involves a forklift loading goods onto a truck with two employees, followed by Step 2 where another group of three employees positions the goods. Resources are shared between EXP and MAN, using the same dock and labor. However, Step 2 of EXP is significantly longer than MAN ($20 + 66 = 86$ minutes vs. $20 + 26 = 46$ minutes). CAN is the simplest and fastest unloading method, involving only one step: the forklift loading goods onto the truck with two employees, with a loading time of 12 minutes per job. BOT is also a two-step process. Step 1 involves the forklift loading goods onto the truck with two employees (25 minutes for two employees per unloading), followed by the necessary rest period (20 minutes). The truck owner is responsible for covering the goods for transport. This area is already occupied, so the forklift operator can work on unloading goods at another dock for the BOT job.

Table 1 Work-type process structure and nominal service times

Work type	Stage description	Distribution	Parameters	Number of workers
EXP	Loading	Normal	$N(20, 7.12^2)$	2
	positioning	Triangular	$T(46, 66, 86)$	3
MAN	Loading	Normal	$N(20, 7.12^2)$	2
	positioning	Normal	$N(26, 6^2)$	3
CAN	Loading	Empirical	Empirical data with mean = 12	4
BOT	Loading	Empirical	Empirical data with mean = 25	10
	Mandatory hold	Deterministic	Fixed = 20	-

2.2 Motivation for Observed Operations

According to dock logs, around 65% of demand is accounted for by BOT, followed by CAN (28%), and the remainder by EXP and MAN. Although the port is designated, bay sharing is used in practice to alleviate congestion. CAN bays are occasionally utilized by BOT (around 2-3% overall, peaking to ~14% on congested days), and a considerable share of CAN vehicles is processed in bays 1-6 (about 15% total). It is suggested by these patterns that congestion is relieved through discretionary, experience-driven reassignment rather than by a constant rule whereby some bottlenecks are eliminated while other flows are interfered with. This effort is driven by the operational concern of late-day queue growth and overtime, which is frequently caused by concentrated arrivals (particularly around midday) combined with zoning, team, and calendar limitations. The DES is thus designed as a realistic testbed for present practice (S0) to be compared with various dispatching and controlled sharing policies (S1-S4) under identical arrival streams.

2.3 Data collection and preparation.

Operational data were collected from a beer distribution warehouse over 235 working days in 2024, covering four truck types: Export (EXP), Manual (MAN), Canned (CAN), and Bottled (BOT). The dataset included truck arrival timestamps, dock check-in times, and loading start and finish times. Inter-arrival times were derived from consecutive arrival timestamps of each truck type. Since arrivals are unscheduled and driver-dependent, empirical distributions constructed from the 235-day records were used for all four truck types. Service times were fitted using the Kolmogorov–Smirnov test ($\alpha = 0.05$); parametric distributions were accepted when $p > 0.05$, otherwise empirical distributions were applied. All resulting distributions and parameters are summarized in Table 1. Operational rules that are not fully recorded in digital systems are elicited through stakeholder interviews and encoded as model constraints, including BOT adjacency, team rules, and bay usage restrictions. Days with no activity, duplicate records, and inconsistent timestamps are removed during the data cleaning process.

2.4 Representative-Day selection.

Each day is encoded as a feature vector capturing workload level and variability (daily truck volume, 7-day rolling mean, 7-day rolling standard deviation) plus calendar indicators (day-of-week, month, and weekend/holiday flags when available). A hybrid “extreme + typical” representative-day approach is then applied to reduce the dataset without losing rare congestion/underload behavior. Extreme days are identified via tail screening of workload indicators and anomaly signals from SOM quantization error, and then retained (16 days) to preserve low-probability, high-impact conditions. The remaining days are clustered using Ward’s hierarchical clustering, with the number of clusters selected using the silhouette coefficient. Within each cluster, representative normal days are chosen using stratified quantile sampling and centroid/medoid-style selection to maintain within-cluster fidelity. Representativeness is evaluated by reconstructing the annual workload series using closest-match assignment and representative-day weights, supported by NRMSE and Pearson correlation as standard reconstruction accuracy metrics.

Figure 1 Duration-curve overlay (actual vs. reconstructed annual workload). The empirical duration curve (blue) is closely tracked by the reconstructed curve from the representative-day set (orange) across both typical days and extremes, indicating high distributional fidelity (NRMSE = 0.070). Figure 2 Time-series overlay (actual vs. reconstructed annual workload). Daily shipment volumes over the 2024 calendar year (x-axis) are compared between observed data (blue) and the representative-day reconstruction (orange). The overall temporal pattern and major fluctuations are reproduced by the reconstruction, showing strong agreement in trend/shape (Pearson $r = 0.873$).

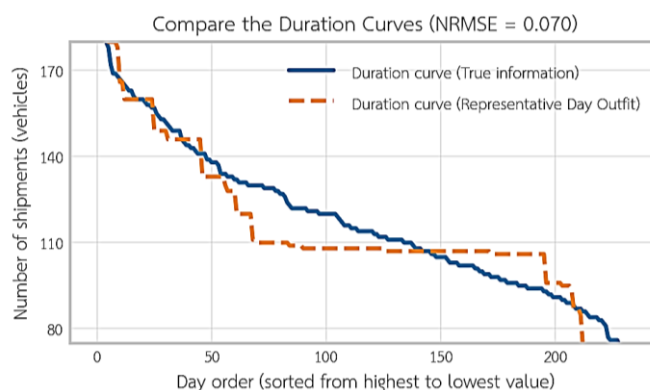


Figure 1 Duration-curve overlay actual vs reconstructed

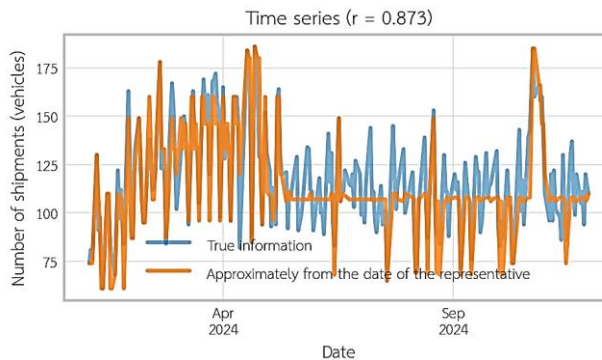


Figure 2 Time-series overlay actual vs reconstructed

Regarding benchmark workload regimes for scenario design, to standardize comparisons in the experimental phase, three benchmark days are defined as anchors for scenario construction: MAX (high-load stress test), AVG (typical-load), and MIN (low-load reference).

Table 2 Benchmark days for scenario design.

Regime	Benchmark day (date)	Daily truck count	Selection rationale
MAX	2024-04-22	196	Stress-test day
AVG	2024-02-07	107	Typical regime
MIN	2024-09-06	68	Low-load reference

Figure 3 summarizes the representative-day selection workflow used to reduce 235 working days to a 40-day experimental set while preserving both typical variability and rare extremes. Each day is encoded as a feature vector, and extreme days are detected using tail-based workload screening and SOM quantization error, yielding 16 extreme days. The remaining 219 non-extreme days are clustered with Ward's hierarchical clustering; $k = 3$ clusters are selected and treated as distinct workload regimes: C0 ($n = 157$, mean = 108.2 trucks/day, std = 17.0) represents the dominant normal operating regime with moderate daily volumes and the widest workload variability; C1 ($n = 55$, mean = 146.5 trucks/day, std = 15.5) captures a high-load regime in which even the lowest-volume day exceeds the median of C0; and C2 ($n = 7$, mean = 105.6 trucks/day, std = 10.0) represents a rare low-variance regime characterized by near-average volumes with unusually stable daily throughput. Twenty-four normal representative days

(C0 = 17, C1 = 6, C2 = 1) are then selected via stratified quantile and centroid-based sampling in proportion to cluster size, and are merged with the 16 extreme days to form the final 40-day experimental set. Representativeness is validated by weighted annual reconstruction (NRMSE = 0.070; $r = 0.873$; Figures 1-2); if acceptable, the representative set is used for simulation.

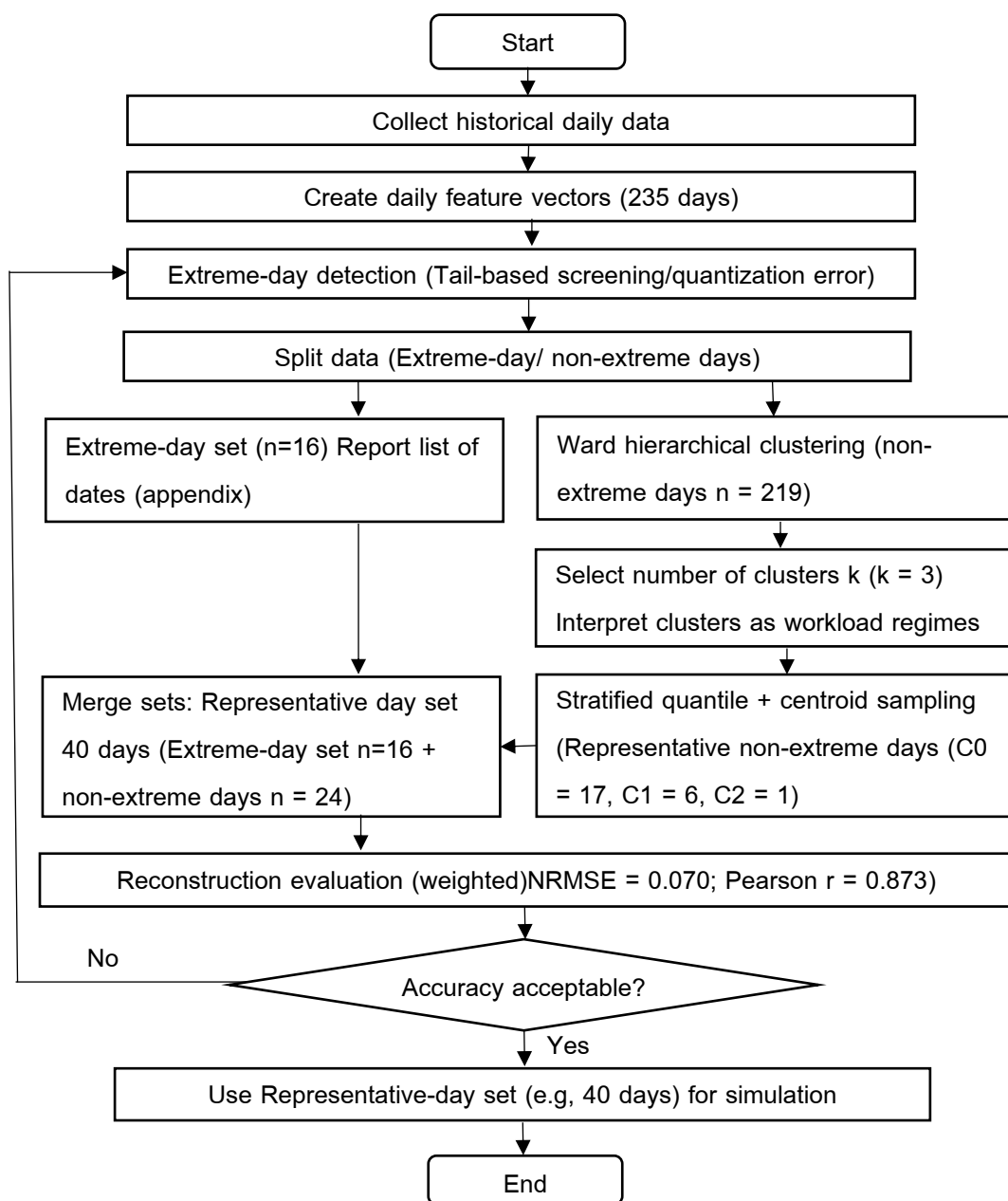


Figure 3 Representative-day selection procedure and outputs.

2.5 DES model and truck dispatching support system control logic.

The discrete-event simulation was implemented in Python (Visual Studio Code; 64-bit, 4-core 2.8 GHz CPU, 16 GB RAM). Model inputs were parameterized using distributions reported in Table 1. Truck arrivals were generated from empirical inter-arrival-time distributions derived from 235 operating days, and each truck progressed through sequential alignment and loading stages, with service times sampled from the corresponding distributions. BOT trucks incurred an additional 20-minute post-loading detention per operating rules, and resources were allocated on a first-come, first-served basis at the staffing levels specified in Table 1.

To capture annual demand variability, 40 representative days spanning the full range of operating conditions were identified from historical records. Each scenario (e.g., S1, S2) was evaluated by running the simulation across all 40 representative days, with each day's empirical arrival profile applied as a distinct model input rather than as a stochastic replication. Because service-time distributions for high-volume truck types were tightly concentrated around their means (CAN: $n = 2,239$; BOT: $n = 6,965$), output variability attributable to service-time sampling was negligible, and no additional replications per day were required. Each run simulated one complete operating day, initialized from an empty system at 08:00 and terminated upon departure of the last truck; no warm-up period was required.

2.6 Policies and experimental design.

This section specifies the operating policies evaluated in the event-driven DES (Figure 4). The simulation is implemented in Python and parameterized from historical operations, encompassing arrival patterns, service-time distributions, shift constraints, and time-varying resource availability. Truck state attributes—including urgent/non-urgent status, BOT/CAN classification, and (when enabled) slow/fast labels derived via recursive partitioning (RPart)—are carried throughout the simulation. The DES logic is held constant across all experiments; policy effects are isolated exclusively to the dispatch decision step, where candidate ranking and BOT–CAN sharing permissions are applied subject to zoning constraints and resource calendars.

Input:

Day Data: trucks i with (id, arrival time, type)

Bays by zone; process structures and times; resource calendars (shift/lunch);
operational constraints (zoning, BOT team/adjacency, etc.)

Output:

Per-truck metrics (start, finish, wait, flow) and daily KPIs (OT, mean waits)

Procedure RUN_DES (Day Data):

Sort trucks by (arrival time, id); $idx \leftarrow 1$

$t \leftarrow 0$

Initialize bay state (FREE), resource state from calendars

Initialize FIFO queues Q_EXP , Q_MAN , Q_CAN , $Q_BOT \leftarrow$ empty

Initialize event list $E \leftarrow$ empty (min-heap by time)

ENQUEUE_ARRIVALS(t); DISPATCH(t) // initial starts

while ($idx \leq |Day\ Data|$) or (E not empty) do

$t \leftarrow \min(\text{next_arrival_time}(idx), \text{next_event_time}(E))$

Update resource_state at time t (shift/lunch feasibility)

ENQUEUE_ARRIVALS(t)

while (E has events at time t) do

$e \leftarrow \text{pop}(E)$

PROCESS_EVENT(e, t) // release resources, stage transitions, free bays

end while

DISPATCH(t)

end while

COMPUTE_KPIS ()

return outputs

Sub procedure ENQUEUE_ARRIVALS(t):

while ($idx \leq |Day\ Data|$) and ($Day\ Data[idx].\ arrival\ time \leq t$) do

$i \leftarrow Day\ Data[idx]$

push i into FIFO queue $Q_type(i)$

$idx \leftarrow idx + 1$

end while

Figure 4 Event-Driven DES with TDSS

```

Sub procedure DISPATCH(t):
  // Step 1: choose candidates from each queue using FIFO order (baseline order)
  // Step 2: start feasible jobs subject to bays, resources, and constraints
  START_EXP_MAN(t)
  START_CAN(t)
  START_BOT(t)// includes BOT team + adjacency constraints
  // Note: sharing/priority rules are NOT applied here (handled by policy blocks)
Sub procedure PROCESS_EVENT (e, t):
  Release resources tied to completed stage
  if (truck has next stage) then
    Start next stage when feasible, else mark as waiting-for-stage
    Schedule its completion event in E
  else
    Mark truck completed; free bay
  end if
Sub procedure COMPUTE_KPIS ():
  For each truck i:
    wait_i ← start_i — arrival_i
    flow_i ← finish_i — arrival_i
  day_finish ← max_i(finish_i)
  OT ← max (0, day_finish — SHIFT_END)
  Report mean waits by type and OT

```

Figure 4 Event-Driven DES with TDSS (continued)

Five policies (S0–S4) are evaluated by varying only the dispatch rule set. S0 represents current practice (non-FIFO, type separation, urgent-first prioritization, with urgent BOT trucks permitted CAN access when feasible). S1 enforces FIFO with BOT-to-CAN sharing. S2 extends S1 by introducing a tail-of-shift rule that prioritizes slow tasks during the final 90 minutes before shift end. S3 applies the same tail-of-shift framework but prioritizes fast tasks instead. S4 evaluates protected capacity pooling, in which BOT-to-CAN sharing is permitted only when CAN operations are not adversely affected.

The experiment follows a repeated-measures design in which all five policies are applied to each of the 40 representative days, yielding 200 DES runs (40 days $\times$ 5 policies). Since the same empirical arrival stream is used across policies within each day, day-to-day demand variation is controlled and policy effects are attributed solely to the dispatch rule. This paired-by-day structure forms the basis for subsequent statistical comparisons.

2.6.1 Scenario 0: Baseline TDSS S0—current practice

The as-is benchmark policy is defined by Scenario 0. Observed practice is followed for dispatch specifically, non-FIFO, type-separated sequencing with urgent-first overrides where CAN bays may be used by urgent tasks when feasible and capacity is available. In the DES, all core mechanics are fixed (arrivals via `ENQUEUE_ARRIVALS(t)` and resource release/stage transitions via `PROCESS_EVENT(e,t)`); policy influence is restricted to `DISPATCH(t)`, where feasibility (zoning, resource calendars, and BOT team/adjacency constraints) is enforced and the baseline priority logic is then applied. As summarized in Figure 4, no additional end-of-shift prioritization beyond feasibility checks is included in S0.

2.6.2 Alternative Dispatching Policies (S1–S4)

In Scenario 1 (S1), FIFO dispatching with BOT-to-CAN sharing is introduced to examine whether BOT congestion and overtime can be reduced relative to S0. Trucks are served in FIFO order within each type queue under the same feasibility constraints. When BOT demand exists but no BOT bay is available, a BOT truck may use an idle CAN bay (7–8) if sharing conditions are satisfied.

Scenarios 2 and 3 (S2–S3) extend S1 by introducing a tail-of-shift priority rule to examine whether overtime is influenced by end-of-shift sequencing. Outside the final window, dispatch follows the S1 logic. Within the last $W = 90$ minutes before `SHIFT_END`, feasible candidates are re-ranked using slow/fast task labels, where S2 prioritizes slow tasks and S3 prioritizes fast tasks, with FIFO used as the tie-break rule.

In Scenario 4 (S4), protected capacity pooling is evaluated. FIFO dispatching is retained, but BOT-to-CAN sharing is allowed only when CAN operations are unaffected. Specifically, CAN bays may serve BOT trucks only when protection conditions are satisfied

(e.g., no CAN queue or the CAN bay has remained idle for at least τ minutes); otherwise, BOT trucks remain restricted to BOT-eligible bays.

2.7 Performance measures and validation.

Daily overtime in minutes and mean waiting times for BOT and CAN trucks are defined as the primary performance indicators. To support the interpretation of policy effects, additional mechanism indicators are recorded, including the frequency of BOT to CAN sharing and the proportion of BOT trucks processed in CAN bays. Model verification is conducted via deterministic sanity tests covering zoning rules, first-in-first-out behavior and policy overrides, lunch and shift feasibility, and BOT overflow restrictions. For model validation, simulated outputs are compared with historical patterns for selected benchmark days, and stakeholder review is incorporated to confirm that operational practice is reflected by the encoded rules and modeled behaviors.

Prior to hypothesis testing, normality of the paired differences ($S_i - S_0$) for each KPI (OT, BOT mean wait, CAN mean wait) was assessed using the Shapiro–Wilk test ($\alpha = 0.05$), which is recommended for small samples ($n = 40$). Where normality was not rejected ($p > 0.05$), a paired t-test was applied; otherwise, the Wilcoxon signed-rank test was used as a non-parametric alternative.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Representative-day design enables efficient, variability-preserving experiments

The selection pipeline reduced the experimental set from 235 working days to 40 representative days (including extremes) while preserving annual workload structure. Reconstruction accuracy remained high (NRMSE = 0.070; Pearson $r = 0.873$), indicating that typical patterns and tail congestion are retained. This reduces evaluation effort by $\approx 83\%$ and supports a fully crossed design of 200 DES runs (40 days $\times$ 5 policies) with paired-by-day comparisons. Table 3 reports the regime composition in the original year and in the representative set, together with the annual weights used to compute the weighted-overall Key Performance Indicator (KPIs).

Table 3 Day-type composition and annual weights

Day type	Actual days	Representative days	Weight
MAX	10	6	0.04
MIN	26	10	0.11
AVG	199	24	0.85

3.2 Model credibility on benchmark days verification and validation.

The model's reliability was evaluated by comparing observed and simulated overtime (OT) on three benchmark days used to anchor the MAX/AVG/MIN workload regimes. As shown in Table 4, the expected congestion ordering (MAX > AVG > MIN) is reproduced by the DES, and historical OT on all three benchmarks is roughly matched. Based on the usual relative error definition from the findings, a tiny deviation (+0.42%, i.e., 241 vs 240 minutes) is exhibited by the MAX benchmark, although the AVG and MIN are found to be identical (0.00%). It is suggested by this close agreement that the model's stored calendars and operational restrictions (such as shift/lunch feasibility and dock zoning logic) are congruent with observed completion behavior for benchmark regime anchors. In following experiments, paired-by-day policy comparisons (same arrival stream and limitations, different rules) continue to be emphasized, because reliable inference on rule impacts is provided even when unobserved micro-disruptions or discretionary floor judgments vary outside of the recorded data.

Table 4 Benchmark-day overtime validation.

Benchmark date	Regime	OT observed (min)	OT simulated (min)	% error*
2024-04-22	MAX	240.0	241.0	+0.42%
2024-02-07	AVG	78.6	78.6	0.00%
2024-09-06	MIN	22.0	22.0	0.00%

3.3 Simulation results

Distinct performance profiles for each operational strategy are revealed by the comprehensive evaluation of Table 5. The current practice (S0) is established as the baseline

of inefficiency, where the highest overtime and excessive delays for all truck types are exhibited. The most robust system improvement is delivered by the transition to S1, with weighted overtime being reduced by 43.34% and the lowest waiting times secured; notably, S1's superior robustness across different load regimes is confirmed by Figure 5, as significant service degradation is avoided even under maximum load regimes. While the absolute minimum overtime is achieved by S2, substantial risk is introduced, as evidenced by a sharp spike in waiting times for CAN truck types during peak congestion (Figure 5c). Among the remaining alternatives, S3 presents a relatively weaker overall weighted profile despite specific relief for BOT delays being offered during peaks, whereas overtime is successfully controlled by S4 but a severe service imbalance is created by disproportionately increased delays for BOT truck types. Consequently, S1 is identified as the optimal primary strategy, with the others being regarded as specialized alternatives with narrower operational utility with more limited and context-specific operational applicability.

Table 5 Weighted-overall KPIs annualized mean per day.

KPIs	S0	S1	S2	S3	S4
OT (min/day)	112.94	63.99	62.79	65.07	63.84
BOT mean wait (min)	134.68	27.55	34.30	41.29	53.04
CAN mean wait (min)	85.20	20.41	23.35	26.52	21.97

Before conducting paired t-tests, the normality of the paired differences ($S_i - S_0$) for each KPI was assessed using the Shapiro–Wilk test ($\alpha = 0.05$). Since normality was not rejected, paired t-tests were applied to compare each policy with the baseline S0 using the same 40 representative days. For OT, BOT mean waiting time, and CAN mean waiting time, all comparisons showed statistically significant improvements over the baseline policy ($p < 0.001$). These results indicate that the improvements reported in Table 5 reflect systematic policy effects rather than random day-to-day variation.

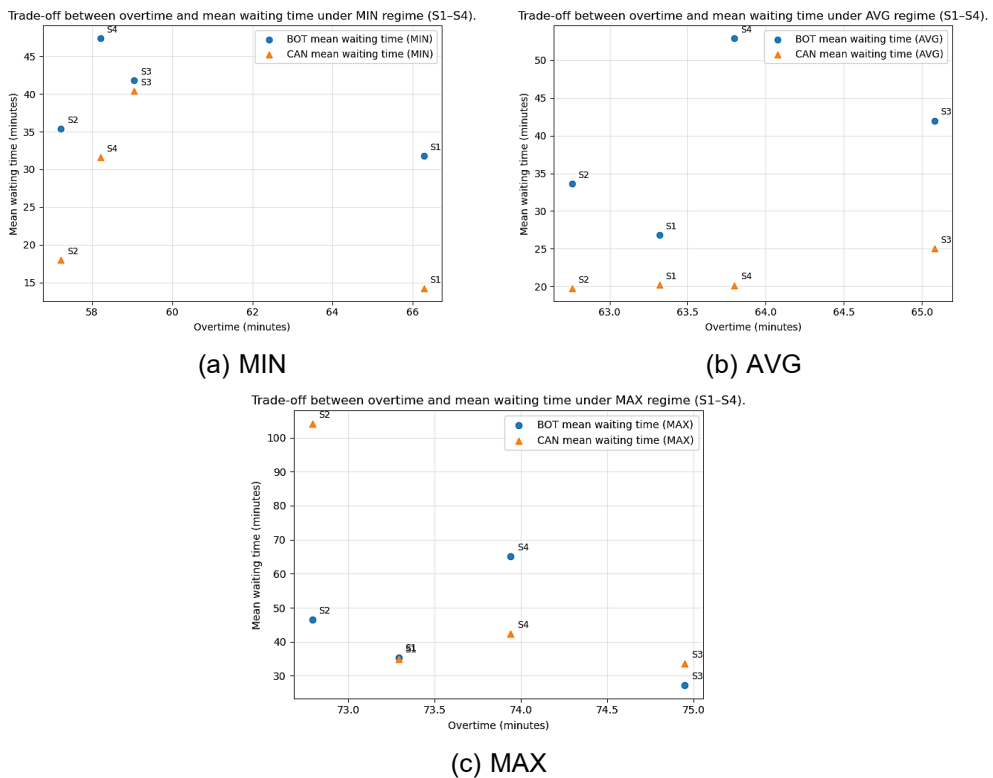


Figure 5 Trade-off between overtime and mean waiting time

3.4 Mechanism evidence from paired-by-day contrasts interpretable contributions.

To isolate true policy effects from day-to-day workload variation, paired-by-day contrasts are computed within each representative day and summarized by regime (MIN/AVG/MAX), as reported in Table 6. Across regimes, overtime is reduced by all scenarios relative to S0, confirming that system congestion rather than isolated sub-processes is addressed by the interventions; the lowest overtime is yielded by S2, but its advantage over S1 is small, suggesting diminishing returns once queues are stabilized by sharing. Substantial improvements in BOT waiting are observed under all policies, with the largest MAX-day reduction found under S3 (226.5 to 27.2 min) and S1 close behind (to 35.4 min), indicating that BOT queue buildup is effectively suppressed by both tail-of-shift logic and FIFO + sharing during peak congestion. For CAN waiting, consistently strong reductions across regimes are delivered by S1, and the best performance under MAX (137.4 to 33.6 min) is exhibited by S3, whereas a clear peak-day drawback is shown by S2 with CAN waiting

remaining high under MAX (104.1 min), implying that some overtime gains are achieved by shifting delay toward CAN in extreme conditions. Overall, queue stabilization via FIFO with controlled form BOT to CAN sharing (S1) is identified by the contrasts as the most robust default, while S2 is best treated as a selective option when potential losses in CAN reliability under maximum-load days are outweighed by overtime minimization.

Table 6 Paired contrasts by day type.

Day type	S0 (min)	S1 (min)	S2 (min)	S3 (min)	S4 (min)
(a) Overtime (OT)					
MIN	122.4	66.28	57.22	59.05	58.2
AVG	111.5	63.32	62.76	65.08	63.8
MAX	123.86	73.29	72.79	74.95	73.94
(b) BOT mean waiting time					
MIN	90	31.8	35.4	41.8	47.4
AVG	133.8	26.8	33.6	41.96	52.91
MAX	226.5	35.4	46.4	27.2	65.1
(c) CAN mean waiting time					
MIN	103.8	14.2	18	40.4	31.6
AVG	81	20.2	19.73	25	20.14
MAX	137.4	34.99	104.1	33.6	42.3

3.5 Managerial implications and policy deployment guidelines

The finding that FIFO with controlled cross-zone sharing (S1) consistently outperforms other configurations across MIN, AVG, and MAX regimes aligns with the simulation-based evidence reported by Azab et al [1], who demonstrated that structured appointment and sequencing policies reduce truck queuing and terminal congestion more effectively than unregulated or fully flexible alternatives. However, while Azab et al [1] focused on container terminal contexts where external truck arrivals are stochastic and appointment windows are predefined the present study extends this logic to an outbound warehouse docking environment where zone-level sharing rules and tail-of-shift decisions interact dynamically

with demand variability captured through representative-day clustering (MIN/AVG/MAX). This distinction is important: our results show that the relative advantage of S1 over S2 and S3 is not uniform across demand regimes—S2 gains merit under MAX conditions specifically for overtime suppression, a nuance not captured in single-scenario optimization frameworks such as that of Azab et al [1].

For practical implementation, managers should adopt S1 as the operational default by deploying a gate-level queue management system that records truck arrival timestamps and enforces service sequencing accordingly. This approach is consistent with Xu et al [5], who demonstrated that dynamic appointment rescheduling under arrival time uncertainty can reduce overall operating costs and alleviate port congestion—suggesting that structured, time-aware sequencing at the gate level supports both efficiency and managerial decision-making. Beyond sequencing governance, the tiered policy framework (S1 as default, S2/S3 as conditional overrides) can be operationalized through appointment-window parameterization in existing dock management systems—an approach consistent with Azab et al [1], who demonstrated that structured truck appointment policies reduce terminal congestion without requiring dedicated optimization infrastructure.

3.6 Sensitivity Analysis of Tail-of-Shift Window (W) for Scenarios S2 and S3

To examine the robustness of the tail-of-shift prioritization rules in S2 and S3, a sensitivity analysis was conducted by varying the activation window W at 60, 90, and 120 minutes before SHIFT_END. The baseline configuration used in the main experiments is $W = 90$ minutes. All other model components, including FIFO dispatching, BOT-to-CAN sharing rules, and resource calendars, remain unchanged. Each configuration was evaluated across the same 40 representative days, resulting in 240 additional DES runs (40 days $\times$ 3 window settings $\times$ 2 policies). Weighted-average KPIs are summarized in Table 7 for comparison with the main results.

The results indicate a non-monotonic relationship between window width W and overtime performance. For S2, reducing the window to $W = 60$ slightly increases overtime (64.12 minutes /day), suggesting insufficient time to reorder slow BOT trucks before shift end. Conversely, extending the window to $W = 120$ increases overtime to 67.43 minutes/day, exceeding even the S1 reference, due to early prioritization of slow trucks that reduces dock throughput and causes backlog accumulation. This effect is stronger in S3, where $W=120$

yields the highest overtime (70.81 minutes /day). Overall, the results indicate that $W = 90$ minutes provides the best performance balance, whereas larger windows may degrade system throughput. These findings confirm that $W = 90$ minutes represents a meaningful inflection threshold beyond which the prioritization rule transitions from beneficial to detrimental, and should be monitored carefully when calibrating the policy in practice.

Table 7 Sensitivity of S2–S3 performance to tail-of-shift window W

	W (min)	OT (min/day)	BOT mean wait (min)	CAN mean wait (min)
S1 (reference)	—	63.99	27.55	20.41
S2	60	64.12	32.18	21.84
S2	90	62.79	34.30	23.35
S2	120	67.43	35.12	31.07
S3	60	66.03	38.52	24.17
S3	90	65.07	41.29	26.52
S3	120	70.81	42.63	33.18

4. CONCLUSION

This study develops a Representative-Day Discrete-Event Simulation (DES) framework to reduce overtime in outbound warehouse docking operations at a Thai beverage manufacturer. By compressing 235 working days into 40 representative days using a hybrid extreme-retention and Ward's hierarchical clustering approach, the framework preserves annual workload variability while reducing computational effort by approximately 83% (NRMSE = 0.070; $r = 0.873$). Three benchmark regimes, MIN (68 trucks), AVG (107 trucks), and MAX (196 trucks), serve as workload-based decision contexts with annual weights of 0.11, 0.85, and 0.04, respectively.

Five dispatching and bay-sharing policies (S0–S4) were evaluated across all representative days in 200 DES runs. Paired t-tests ($\alpha = 0.05$) confirmed that all policies significantly outperform the current non-FIFO baseline (S0) ($p < 0.001$).

Results show that S1 (FIFO dispatching with controlled BOT-to-CAN sharing) is the most robust policy across regimes. Under AVG conditions, which represent most operating days, S1 reduces weighted-average overtime by 43.34% (112.94 to 63.99 min/day) while maintaining

the lowest waiting times in BOT (27.55 min) and CAN (20.41 min) zones. Under MIN conditions, S1 avoids unnecessary cross-zone interference, while under MAX conditions it remains the reliable baseline, with S3 suitable for peak-day BOT congestion and S2 applicable when overtime reduction is prioritized despite higher CAN waiting times. Sensitivity analysis indicates that a 90-minute tail-of-shift activation window provides the best performance balance.

The study extends representative-day selection methods to warehouse logistics, introduces regime-based policy evaluation using benchmark-day anchors, and distinguishes genuine overtime reduction from delay redistribution across zones. The framework also provides practical deployment guidelines without requiring full-year simulations, with validation errors close to zero across benchmark days.

Future research may explore real-time adaptive dispatching using machine learning based rule switching, integration with digital-twin systems for continuous monitoring, incorporation of cost-based objectives balancing overtime and service equity, and application of the representative-day DES framework to multi-facility or port terminal environments.

References

- [1] Azab A, Karam A, Eltawil A. A simulation-based optimization approach for external trucks appointment scheduling in container terminals. *International Journal of Modelling and Simulation* 2020;40(5):321-38. doi: 10.1080/02286203.2019.1615261.
- [2] Gelareh S, Glover F, Guemri O, Hanafi S, Nduwayo P, Todosijević R. A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem. *Omega* 2020;91:102015. doi: 10.1016/j.omega.2018.12.004.
- [3] Monemi RN, Gelareh S. Dock assignment and truck scheduling problem; consideration of multiple scenarios with resource allocation constraints. *Computers & Operations Research* 2023;151:106074. doi: 10.1016/j.cor.2022.106074.
- [4] Shahmardan A, Sajadieh MS. Truck scheduling in a multi-door cross-docking center with partial unloading–reinforcement learning-based simulated annealing approaches. *Computers & Industrial Engineering* 2020;139:106134. doi: 10.1016/j.cie.2019.106134.
- [5] Xu B, Liu X, Li J, Yang Y, Wu J, Shen Y, et al. Dynamic appointment rescheduling of trucks under uncertainty of arrival time. *Journal of Marine Science and Engineering* 2022;10(5):695. doi: 10.3390/jmse10050695.

- [6] Teichgraeber H, Lindenmeyer CP, Baumgärtner N, Kotzur L, Stolten D, Robinius M, et al. Extreme events in time series aggregation: a case study for optimal residential energy supply systems. *Applied Energy* 2020;275:115223. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115223.
- [7] Tadumadze G, Emde S. Loading and scheduling outbound trucks at a dispatch warehouse. *IIE Transactions* 2022;54(8):770-84. doi: 10.1080/24725854.2021.1983923.
- [8] Sayed SI, Contreras I, Diaz JA, Luna DE. Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. *Top* 2020;28:705-27. doi: 10.1007/s11750-020-00556-z.
- [9] Li Y, Mohammadi M, Zhang X, Lan Y, van Jaarsveld W. Integrated trucks assignment and scheduling problem with mixed service mode docks: a Q-learning-based adaptive large neighborhood search algorithm. *European Journal of Operational Research* 2025;33(1):117-37. doi: 10.1016/j.ejor.2025.12.036.
- [10] Bottani E, Casella G. Discrete-event simulation in logistics and supply chain management: a scientometric perspective. *Production & Manufacturing Research* 2024;12(1):2415038. doi: 10.1080/21693277.2024.2415038.
- [11] da Silva MR, Agostino IR, Frazzon EM. Integration of machine learning and simulation for dynamic rescheduling in truck appointment systems. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2023;125:102747. doi: 10.1016/j.simpat.2023.102747.
- [12] Derhami S, Smith JS, Gue KR. A simulation-based optimization approach to design optimal layouts for block stacking warehouses. *International Journal of Production Economics* 2020;223:107525. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107525.
- [13] Kaarlela T, Alekseev S, Maljamäki P, Ikäheimo E, Kurvinen E. Digital twin framework for electric truck route and infrastructure planning in the Nordic region. *Transportation Engineering* 2026;23:100426. doi: 10.1016/j.treng.2026.100426.
- [14] Rizqi ZU, Chou SY, Cahyo WN. A simulation-based digital twin for smart warehouse: towards standardization. *Decision Analytics Journal* 2024;12:100509. doi: 10.1016/j.dajour.2024.100509.
- [15] Cebecauer M, Jenelius E, Gundlegård D, Burghout W. Revealing representative day-types in transport networks using traffic data clustering. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 2024;28(5):695-718. doi: 10.1080/15472450.2023.2205020.
- [16] Yeganefar A, Amin-Naseri MR, Sheikh-El-Eslami MK. Improvement of representative days selection in power system planning by incorporating the extreme days of the net

- load to take account of the variability and intermittency of renewable resources. *Applied Energy* 2020;272:115224. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115224.
- [17] Chen Z, Xiong Y, Yin B, Sun S, Zuo R. Recognizing geochemical patterns related to mineralization using a self-organizing map. *Applied Geochemistry* 2023;151:105621. doi: 10.1016/j.apgeochem.2023.105621
- [18] Li C, Conejo AJ, Sirola JD, Grossmann IE. On representative day selection for capacity expansion planning of power systems under extreme operating conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2022;137:107697. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107697.
- [19] Licen S, Astel A, Tsakovski S. Self-organizing map algorithm for assessing spatial and temporal patterns of pollutants in environmental compartments: a review. *Science of The Total Environment* 2023;878:163084. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163084.
- [20] Dalmaijer ES, Nord CL, Astle DE. Statistical power for cluster analysis. *BMC Bioinformatics* 2022;23(1):205. doi: 10.1186/s12859-022-04675-1.
- [21] Ribeiro R, Fanzeres B. Identifying representative days of solar irradiance and wind speed in Brazil using machine learning techniques. *Energy and AI* 2024;15:100320. doi: 10.1016/j.egyai.2023.100320.
- [22] Hoffmann M, Kotzur L, Stolten D, Robinus M. A review on time series aggregation methods for energy system models. *Energies* 2020;13(3):641. doi: 10.3390/en13030641.

Author's Profile



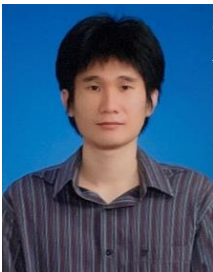
Pachira Na nan, M.Eng. Student at Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000, Thailand. Email: nanan_p2@su.ac.th

Interested Research Area: Production planning and scheduling, Optimization, Logistics and Supply Chain Management



Thammawit Prasert, Lecturer at Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000, Thailand. Email: prasert_t@su.ac.th

Interested Research Area: Design of Experiment, Production planning and scheduling, Optimization, Logistics and Supply Chain Management



Peerapong Pakawanich, Lecturer at Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000, Thailand. Email: pakawanich_p@su.ac.th

Interested Research Area: Operations Research, Logistics and Supply Chain Management

Article History:

Received: January 21, 2026

Revised: April 18, 2026

Accepted: April 20, 2026

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เคตารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปรามิทย เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghami	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เลาหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กานติส สุตสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ฐิติฤทธิ์ ประดับเพชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเชื้อ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญญา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร กุวโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โกคาร์ตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุทักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มานิช สรรพกิจพิพาการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรนุช แจ่งสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชระ เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โลจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สมศักดิ์ มีตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่องพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันห์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน

รศ.วิญญู แสงวสินกลกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจระประวัต	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณทล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักรินทร์ กลั่นเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ้มเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัติภา เจียรไนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอธนาทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าพฤษทรัพย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แทะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.พงษ์ชัย ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พัฒนพงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐิแทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริพล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุริดา ทิปรักษ์พันธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.โสภา แซ่เฮ้ง	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สมล แซ่เฮ้ง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขล านครินทร์
ผศ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.อุษณีย์ คำพูล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ณัฐนนท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ขาดปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญา ภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
อ.ดร.กำธร เสพย์ธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.จักรภาพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิธีรบุญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อ.ดร.อุษฎี สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.ลัญจกร อมรภิรมย์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอเนตต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กิรติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินทร์รัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุชัยญา วงศ์รอด	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

อ.ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสมาน	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงศ์ เหลือรัตน์วัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์	สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัฒน์ ปล้องใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมที่มีคุณภาพ เพื่อสนองความต้องการของส่วนราชการ เอกชน ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ
2. ค้นคว้าและวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสิ่งที่ยังประโยชน์ให้เกิดแก่ประเทศไทยโดยตรง
3. บริการวิชาการ และให้คำปรึกษาแนะนำทางวิศวกรรมศาสตร์แก่หน่วยงานของรัฐและเอกชน รวมทั้งประชาชนทั่วไป

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

**“คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เป็นคณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอกชน ที่เป็นที่ยอมรับ
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีมั่นคงและยั่งยืน”**

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

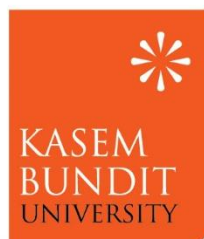
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

- เว็บไซต์: http://eng.kbu.ac.th/home/?main_page=research&page=engineer_journal
- E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th
- <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
- โทรศัพท์: 0-2320-2777 ต่อ 1211



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250
โทร. 0-2320-2777
Fax : 0-2321-4444

วิทยาเขตร่มเกล้า

60 ถนนร่มเกล้า เขตมีนบุรี
กรุงเทพฯ 10510
โทร. 0-2904-2222
Fax : 0-2904-2200