

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 (2026)

มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)





กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 (มกราคม – กุมภาพันธ์ 2569)

Vol. 1 No. 1 (January – February 2026)

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)



วัตถุประสงค์

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

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

เงื่อนไขการตีพิมพ์

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

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดี ด้านวิชาการ การวิจัย การบริการวิชาการ

และการประกันคุณภาพและมาตรฐานการศึกษาทุกระดับ

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดร.วิจิตรา โพธิสาร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถิตพงษ์ เสี่ยงมศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุตรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูพงษ์ ทองคำสมุทร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิปาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา ประเมษฐานุวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลธลา วรรณปะเช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจากาจ จอมโนนเขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.สินาค โกศลนันท์

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงส่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ ชัยจิตวินิชกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา ทองสุพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพจน์ สมมูล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ โตอ่อน

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมจัดการบทความและรูปแบบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี อนุชา ศรีบุรีรัมย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุตรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการเผยแพร่ :

ปีละ 6 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์

ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน

ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม

ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน – ธันวาคม

สำนักงาน

กองบรรณาธิการวารสาร "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

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

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

โทร: 088-574-2199

Email: jeit@ksu.ac.th

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เดือนกุมภาพันธ์ ปีพุทธศักราช 2569 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากร ทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความ มาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านคงได้รับประโยชน์จาก ผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิชาการ	
Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน ชินพรรณี เอกวราไพศาลกุล, ปรินทร์ สว่างจิตร์, กฤตณัย ชูรัมย์ย์ และ ณิชฎภัทร คล้ายสุวรรณ	1-14
บทความวิจัย	
Design and Capability Analysis of a Solar-Powered Conveyor for Water Hyacinth Removal: A Case Study at Kumphawapi Flood Gate Suwapat Kosasaeng, Weerapol Kaewka, Sorawin Phukapak, Niwat Bhumiphan, Chawisorn Phukapak, Ariyapong Pluapant and Narathip Pawaree	15-28
Automated Document Management for HVAC product: An Excel VBA Approach Arnon Lerdwongpaisan, Kanokwan Chuaykong and Weerapat Pookkaman	29-44
การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า ในการปรับปรุงการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน วีรชัย มีภูธราภิรักษ์, ศรีวรรณ ขำตรี และ จันทโรทัย พรหมจันทร์	45-61
การปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของแผนกคลังสินค้าสโตร์ A กรณีศึกษา บริษัท เคเค เมททอล 2012 จำกัด วิทวัส น้อยมณี, วาสนา พ่วงพรพิทักษ์ และ ศุภณัฐ จรพุทธานนท์	62-74
การพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ณปภัช คงฤทธิ์, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์ และ พลสรรค์ แซ่เตียว	75-86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO ₂ ต่อความกว้างรอยตัด บนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง	87-102
วีระพล ทับทิมดี, ปวีวรรณ นาสวาสดี และ ประเวศ เชื้อวงษ์	

บทความวิชาการ (Academic Article)

Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

ชินพรรณ เอกวราไพศาลกุล^{1,*}, ปริณทร์ สว่างจิตร์¹, กฤตณัย ชูรัมย์ย์¹ และ ณิชฎภัทร คล้ายสุวรรณ²

¹ นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 แผนการเรียนวิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ โรงเรียนบางกะปิ

² ข้าราชการครู โรงเรียนบางกะปิ

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: uou7yu7@gmail.com โทรศัพท์: 099-4362622

(รับบทความ: 19 สิงหาคม 2568; แก้ไขบทความ: 3 พฤศจิกายน 2568; ตอรับบทความ: 6 พฤศจิกายน 2568)

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอกรอบแนวคิด Carbon-Egg Cycle ที่มุ่งสร้างระบบหมุนเวียนคาร์บอนจากเหลือทิ้งในท้องถิ่นร่วมกับการใช้ประโยชน์จากพลังงานส่วนเกินในอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาแนวทางใหม่ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจหมุนเวียน กระบวนการนี้นำเปลือกไข่ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ผ่านการแคลซิเนชันด้วยความร้อนส่วนเกินจากอุตสาหกรรม ซึ่งจะได้แคลเซียมออกไซด์สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะถูกดักจับและจัดเก็บเพื่อนำไปใช้ต่อเช่นกัน แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุอัดกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมต่าง ๆ ของชุมชน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน จะกลับคืนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสามารถนำกลับสู่การแคลซิเนชันอีกครั้ง เกิดเป็นวงจรการหมุนเวียนคาร์บอนที่ลดทั้งของเสียและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยในกระบวนการสามารถจัดเก็บเพื่อนำไปใช้ในภาคส่วนต่าง ๆ เช่น ภาคการเกษตร นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ปรับค่าความเป็นกรดในดินได้อีกด้วย คุณค่าของ Carbon-Egg Cycle อยู่ที่การบูรณาการของเสียชีวภาพกับการใช้พลังงานร่วม เพื่อลดการสูญเสียทรัพยากรและเพิ่มทางเลือกในการจัดการคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก กรอบแนวคิดนี้ชี้ให้เห็นแนวทางสู่การออกแบบระบบที่ตอบสนองเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และสามารถขยายผลสู่การประยุกต์ใช้ในระดับต่าง ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: วงจรคาร์บอนจากเปลือกไข่ การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ การใช้พลังงานร่วม การจัดการคาร์บอนไดออกไซด์ เศรษฐกิจหมุนเวียน

การอ้างอิงบทความ: ชินพรรณ เอกวราไพศาลกุล, ปริณทร์ สว่างจิตร์, กฤตณัย ชูรัมย์ย์ และ ณิชฎภัทร คล้ายสุวรรณ, "Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน," *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 1-14, 2569.

บทความวิชาการ (Academic Article)

Carbon–Egg Cycle: An Engineering Framework toward Carbon Neutrality through Eggshell Valorization and Waste Heat Utilization from Local Industries for Resource, Economic, and Community Sustainability

Chinnaphat Ekwaraphaisankul^{1,*}, Parin Sawangchit¹, Krittanai Suirum¹ and Nattapat Klaisuwan²

¹ Grade 12 Students, Science–Mathematics Program, Bangkapi School

² Teacher, Bangkapi School

*Corresponding Author: uou7yu7@gmail.com, Tel: 099-4362622

(Received: August 19, 2025; Revised: November 3, 2025; Accepted: November 6, 2025)

Abstract

This article presents the Carbon–Egg Cycle framework, aiming to establish a circular carbon system by integrating local waste management with the utilization of surplus energy from industries, thereby advancing environmental engineering and circular economy approaches. The process converts eggshells, primarily composed of calcium carbonate (CaCO_3), through calcination using surplus industrial heat, producing calcium oxide (CaO) for further applications while capturing and storing the released carbon dioxide (CO_2) for subsequent use. The resulting CaO is formed into CO_2 capture materials for community-scale activities, and through carbonation, it reverts to CaCO_3 , which can re-enter the calcination process, forming a continuous carbon cycle that reduces both waste and greenhouse gas emissions. Simultaneously, captured CO_2 can be utilized in various sectors, and CaCO_3 obtained from carbonation can serve as a soil amendment to reduce acidity and enhance productivity. The value of the Carbon–Egg Cycle lies in its integration of biowaste with energy reuse, minimizing resource loss and providing community- and small-industry-scale CO_2 management solutions. This framework demonstrates a pathway toward carbon neutrality and offers scalability for broader applications.

Keywords: Carbon–Egg Cycle, Eggshell Valorization, Waste Heat Utilization, Carbon Dioxide Management, Circular Economy

Please cite this article as: C. Ekwaraphaisankul, P. Sawangchit, K. Suirum and N. Klaisuwan, “Carbon–Egg Cycle: An Engineering Framework toward Carbon Neutrality through Eggshell Valorization and Waste Heat Utilization from Local Industries for Resource, Economic, and Community Sustainability,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 1-14, 2026.

บทความวิชาการ (Academic Article)

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในชั้นบรรยากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่เร่งให้เกิดภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน [1] ทั้งนี้ แหล่งกำเนิด CO_2 ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ตลอดจนกระบวนการในกิจกรรมทางการเกษตร ซึ่งล้วนส่งผลต่อการสะสมก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ [2] ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) และเทคโนโลยีดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอน (Carbon Capture and Utilization: CCU) จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจในทางวิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง [3]

ขณะเดียวกัน วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เปลือกไข่ มักถูกกำจัดโดยขาดการใช้ประโยชน์และอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมทั้งที่เปลือกไข่ ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มากกว่า 95% โดยมวล [4] และสามารถแปรสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800–900 °C ซึ่งกระบวนการนี้สามารถจะแยก CO_2 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และได้ CaO ที่สามารถใช้เป็นวัสดุดักจับ CO_2 ในระบบการเผาไหม้หรือระบบปิดได้ [5] โดยกระบวนการนี้สอดคล้องกับแนวคิด Calcium Looping ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิค CCS/CCU ที่มีประสิทธิภาพ

แนวคิด Carbon-Egg Cycle ที่นำเสนอในงานนี้มีเป้าหมายในการออกแบบระบบดัดแปลงเตาเผาเซรามิกในชุมชนเพื่อแปรรูปเปลือกไข่เป็น CaO และดักจับ CO_2 ที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งจัดเก็บ CO_2 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การเร่งการเจริญเติบโตของพืชในเรือนกระจก ขณะเดียวกัน CaO ที่ได้จะถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นดักจับ CO_2 เพื่อใช้ในกิจกรรมที่มีการปล่อย

ก๊าซเรือนกระจก เช่น เตาอบขนมและกระบวนการผลิตขนมหวานท้องถิ่นซึ่งใช้ไข่เป็นวัตถุดิบหลัก ระบบนี้จึงผสานทั้งแนวคิดการใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) จากเตาเผาที่มีอยู่ และการสร้างระบบหมุนเวียนทรัพยากร (Circular Resource Flow) ในระดับชุมชน

จุดเด่นของแนวคิดนี้คือการบูรณาการเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเข้ากับบริบทชุมชน ลดภาระการลงทุนและพลังงาน พร้อมทั้งสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือทิ้ง จึงมีศักยภาพทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม

ดังนั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอกรอบแนวคิดทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสำหรับระบบ Carbon-Egg Cycle โดยมุ่งชี้ให้เห็นศักยภาพของการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจและความยั่งยืนในระดับชุมชน อย่างไรก็ตาม บทความนี้นำเสนอในระดับแนวคิดเชิงวิศวกรรม (Conceptual Engineering Design) โดยยังไม่ได้ดำเนินการทดลองเชิงปฏิบัติหรือสร้างระบบต้นแบบจริง ข้อเสนอทั้งหมดอาศัยการวิเคราะห์ทฤษฎี และทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนและหลักการ Calcium Looping

การดักจับคาร์บอน (Carbon Capture) เป็นหนึ่งในมาตรการสำคัญในการลดปริมาณ CO_2 ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สองทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยี CCS (Carbon Capture and Storage) และ CCU (Carbon Capture and Utilization) ได้รับ

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

การพัฒนาขึ้นเพื่อจัดการกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากกิจกรรมอุตสาหกรรมและพลังงาน² หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมคือ Calcium Looping (CaL)

หลักการของ Calcium Looping [6] เกี่ยวข้องกับการใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นวัสดุดักจับ CO₂ ในกระบวนการสองขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) คาร์บอนเนชัน (Carbonation) คือ ขั้นที่ CaO ทำปฏิกิริยากับ CO₂ ในก๊าซไอเสียเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ซึ่งสามารถกักเก็บ CO₂ ได้อย่างมั่นคงในรูปสารแข็ง

2) แคลซิเนชัน (Calcination) คือ ขั้นที่ CaCO₃ ที่ถูกให้ความร้อนสูง (ประมาณ 800–900 °C) เพื่อสลายตัวกลับเป็น CaO และปล่อย CO₂ ออกมาเพื่อกักเก็บหรือใช้ประโยชน์ในกิจกรรมอื่น กระบวนการนี้สามารถวนซ้ำได้หลายรอบโดย CaO ไม่สูญเสียประสิทธิภาพมาก

งานวิจัยล่าสุดแสดงให้เห็นว่า CaO ที่สกัดจากวัสดุเหลือใช้ เช่น เปลือกไข่ สามารถใช้เป็นตัวดักจับ CO₂ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] ดังนั้น การนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ในกระบวนการนี้ไม่เพียงช่วยลดปัญหาขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังสร้างมูลค่าเพิ่มและลดต้นทุนในการจัดหาวัสดุดักจับ

2.2 เปลือกไข่เป็นแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และวัตถุดิบต้นกำเนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เปลือกไข่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอาหารและครัวเรือน มีองค์ประกอบหลักเป็น CaCO₃ มากกว่า 95% โดยมวล [4] การนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์เชิงวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมถือเป็นกลยุทธ์

หนึ่งในการลดของเสียและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้

งานวิจัยโดย Hsieh et al. (2021) [5] พบว่า CaO ที่ได้จากเปลือกไข่สามารถดักจับ CO₂ ได้ในปริมาณสูงถึง 0.65 - 0.70 mol CO₂/mol CaO ในรอบแรก และยังคงประสิทธิภาพการดักจับมากกว่า 80% หลังจากวนรอบการใช้ซ้ำหลายครั้ง นอกจากนี้ การปรับขนาดอนุภาคและโครงสร้างผิวของ CaO มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ CO₂ โดย CaO ที่มีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงและโครงสร้างพรุนสามารถเพิ่มอัตราการดูดซับ CO₂ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การนำเปลือกไข่มาใช้เป็นวัสดุดักจับ CO₂ ยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยเปลี่ยนของเสียให้เป็นวัตถุดิบมีค่าและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้ การเตรียม CaO จากเปลือกไข่ด้วยวิธีการเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสม สามารถสร้างนวัตกรรมดักจับ CO₂ ที่มีความทนทานต่อการวนรอบการใช้งาน และสามารถประยุกต์ใช้ในระบุดักจับคาร์บอนขนาดเล็กหรือระดับชุมชนได้ [4]

โดยสรุป ข้อมูลจากงานวิจัยปัจจุบันชี้ให้เห็นว่า เปลือกไข่เป็นวัสดุชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการผลิต CaO และการดักจับ CO₂ ทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความคุ้มค่า และความยั่งยืน ถือเป็นองค์ความรู้สำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยี CCS/CCU ที่สามารถนำไปใช้ในระบุดักจับและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2.3 การใช้พลังงานร่วมเพื่อให้ได้ CaO จากเปลือกไข่

กระบวนการได้มาซึ่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนสูงเพื่อแปลงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ให้กลายเป็น

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

CaO ซึ่งกระบวนการนี้โดยทั่วไปต้องอาศัยเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ทำให้ต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มเติม ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มการปล่อยก๊าซ CO₂ ทำให้การผลิต CaO โดยตรงจากเปลือกไข่ไม่อาจแก้ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างยั่งยืน ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการให้ความร้อนโดยตรงแก่เปลือกไข่ ซึ่งอาจเพิ่มการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซ CO₂ จำเป็นต้องพัฒนากระบวนการที่เหมาะสม แนวคิดสำคัญของงานศึกษาในครั้งนี้ คือ การใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) ซึ่งช่วยให้สามารถนำความร้อนที่สูญเสียอยู่แล้วมาใช้แปรสภาพ CaCO₃ จากเปลือกไข่ให้เป็น CaO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันไม่สร้างภาระเพิ่มเติมต่อสิ่งแวดล้อมหรือกระบวนการผลิตหลัก [7]

งานวิจัยหลายชิ้นระบุว่า อุตสาหกรรมที่ให้ความร้อนสูง เช่น การเผาเซรามิกและอิฐ มักสูญเสียพลังงานความร้อนจำนวนมากออกไป [8] การนำความร้อนส่วนนี้มาประยุกต์ใช้สำหรับการแปรสภาพ CaCO₃ จากเปลือกไข่สามารถทำได้ โดยไม่รบกวนกระบวนการผลิตหลัก ตลอดจนจรรยาบรรณควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการเผาเพื่อรักษาคุณสมบัติทางกายภาพและพื้นที่ผิวเฉพาะของ CaO ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดักจับ CO₂

นอกจากนี้ แนวคิดการใช้พลังงานร่วมยังสอดคล้องกับหลักการ อุตสาหกรรมสีเขียวและเศรษฐกิจหมุนเวียน (Green Industry & Circular Economy) เนื่องจากเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการใช้เชื้อเพลิงใหม่ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้พลังงานร่วมเป็นแนวทางที่มีศักยภาพและยั่งยืน ในการผลิต CaO จากเปลือกไข่ โดยสามารถประหยัดพลังงาน ลดต้นทุน และรักษา

คุณภาพของ CaO สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรมต่อไป

2.4 ความเป็นไปได้ของกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) ร่วมกับระบบดักจับและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) แม้จะเป็นวิธีการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำ CaO มาใช้เป็นวัสดุดักจับ CO₂ ได้ แต่ผลจากปฏิกิริยานี้ก็จะปล่อย CO₂ ออกมาเช่นกัน หากปล่อยก๊าซโดยตรงสู่ชั้นบรรยากาศจะขัดแย้งกับเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดำเนินการ จึงต้องผนวกกระบวนการแคลซิเนชันเข้ากับระบบดักจับและใช้ประโยชน์จาก CO₂ (Carbon Capture and Utilization: CCU) เพื่อให้ CO₂ ที่เกิดขึ้นถูกแยกและนำไปใช้ในภาคส่วนอื่นแทนการปล่อยทิ้ง [9]

งานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอเกี่ยวกับ Calcium Looping (CaL) ซึ่งอาศัยวงจรการสลับกันระหว่างคาร์บอเนชัน (Carbonation) และแคลซิเนชัน โดยใช้ CaO เป็นตัวกลางดักจับ CO₂ แล้วนำ CaCO₃ ที่เกิดขึ้นมาเผาไหม้เพื่อให้ได้ CaO และปล่อย CO₂ ให้อยู่ในสถานะที่ง่ายต่อการกักเก็บ [10] การดำเนินการในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถกักเก็บ CO₂ ได้ในรูปแบบเข้มข้น พร้อมทั้งรักษาวัฏจักร CaO ให้ใช้งานได้หลายรอบ ขณะที่งานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ยังเสนอการปรับปรุงสมบัติของ CaO เช่น การควบคุมโครงสร้างอนุภาคและพื้นที่ผิว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียประสิทธิภาพเมื่อวนรอบ [11]

การใช้ประโยชน์จาก CO₂ ที่ได้จากกระบวนการแคลซิเนชัน งานวิจัยหลายชิ้นชี้ว่า CO₂ สามารถนำไปใช้เพิ่มความเข้มข้นในโรงเรือนเพื่อเร่งการ

บทความวิชาการ (Academic Article)

สังเคราะห์แสงของพืช หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่มที่ต้องการก๊าซ CO_2 บริสุทธิ์ [12] [13] การออกแบบระบบในลักษณะนี้ จึงเป็นการสร้างคุณค่าด้วยการนำ CO_2 ไปก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และไม่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศอันจะส่งผลต่อวิกฤตทางสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรมชี้ให้เห็นว่าแนวทางการผสมผสานกระบวนการแคลซิเนชันเข้ากับระบบดักจับ และใช้ประโยชน์ CO_2 เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ควบคู่กับการสร้างประโยชน์เชิงเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งเป็นฐานข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปต่อยอดในการออกแบบระบบประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรมและชุมชนต่อไป

3. กรอบแนวคิดและข้อเสนอในการออกแบบเชิงวิศวกรรม

3.1 หลักคิดที่ใช้ในการออกแบบ

กรอบแนวคิดในงานครั้งนี้มีพื้นฐานจากเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกควบคู่กับการสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยกำหนดหลักการสำคัญดังนี้

1) ความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการแคลซิเนชันของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แม้จะได้เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการดักจับ CO_2 ได้ แต่ก็ปล่อย CO_2 ออกมาในกระบวนการเดียวกัน การออกแบบระบบจึงต้องตั้งอยู่บนหลักการวงจรปิด (Closed-Loop) โดยมุ่งให้ CO_2 ที่เกิดขึ้นถูกกักเก็บและนำไปใช้ประโยชน์แทนการปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

2) การใช้ของเสียเป็นทรัพยากร เปลือกไข่จากครัวเรือนและอุตสาหกรรมอาหารเป็นของเหลือทิ้งที่มี

ปริมาณสูงและมีองค์ประกอบของ CaCO_3 เกินร้อยละ 90 จึงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต CaO ได้ แนวคิดนี้จึงสะท้อนหลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่เปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ให้เป็นทรัพยากรที่มีมูลค่า

3) การอาศัยพลังงานร่วม เนื่องจากการแคลซิเนชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง (800–900 °C) การออกแบบระบบจึงคำนึงถึงการนำประโยชน์จากพลังงานความร้อนร่วมในกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีอยู่ เช่น เตาเผาเซรามิก ซึ่งการใช้แหล่งพลังงานเหล่านี้สามารถลดภาระการใช้เชื้อเพลิงโดยตรงและเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของระบบ

4) ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือเชิงวิศวกรรม การทำงานของระบบต้องรองรับอุณหภูมิสูง การจัดการก๊าซ CO_2 ที่มีความดันบางช่วง และการป้องกันการรั่วไหลที่อาจกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม หลักการออกแบบจึงต้องรวมถึงมาตรการควบคุมและความปลอดภัยที่เหมาะสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

กล่าวโดยสรุป หลักการออกแบบดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญ สำหรับการสร้างกรอบแนวคิด ที่ไม่เพียงคำนึงถึงประสิทธิภาพทางเทคนิค แต่ยังเชื่อมโยงกับเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และความเหมาะสมเชิงสังคม ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดโครงสร้างระบบและสมการคำนวณเบื้องต้นในส่วนถัดไป

3.2 โครงสร้างระบบ (System Architecture)

โครงสร้างระบบที่นำเสนอมีพื้นฐานจากหลักการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ โดยมุ่งสร้างกระบวนการแบบวงจรปิด (Closed-Loop Process) ที่สามารถผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ ควบคู่กับการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย

1) หน่วยแปรสภาพวัตถุดิบ (Raw Material Preparation & Calcination Unit) เปลือกไข่จากครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำความสะอาด กำจัดสิ่งปนเปื้อน และอบแห้งเพื่อควบคุมความชื้นให้น้อยกว่า 5% โดยมวล ขั้นตอนนี้จะช่วยให้ได้วัตถุดิบที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเหมาะสมต่อการเผา โดยในการเผาจะดำเนินการภายใต้หลักการการใช้พลังงานร่วม โดยจะเลือกอุตสาหกรรมในพื้นที่ที่ต้องใช้ความร้อนในระดับเดียวกับที่จะเกิดกระบวนการแคลซิเนชันโดยที่ไม่รบกวนกระบวนการในอุตสาหกรรมเดิม ในบริบทนี้เสนอให้เลือกใช้อุตสาหกรรมเผาเซรามิก โดยติดตั้งถาดบนเพดานเตาสำหรับใส่เปลือกไข่สด ในสัดส่วนประมาณ 4–5% ของปริมาตรเตา เพื่อไม่กระทบต่อคุณภาพงานเซรามิก ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิของเตา (100–150 °C/ชม.) จะใช้เวลา 6–9 ชั่วโมงจนถึงระดับ 800–900 °C ซึ่งเป็นช่วงที่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ในเปลือกไข่เกิดกระบวนการแคลซิเนชันตามสมการ: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ โดยจะทิ้งไว้ 1–2 ชั่วโมง เพื่อให้การสลายตัวสมบูรณ์ จากนั้นจะนำวัสดุแปรรูปออกผ่านช่องที่ออกแบบไว้เฉพาะเพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของ CaO จากอุณหภูมิที่สูงเกินไป โดยไม่รบกวนกระบวนการเผาเซรามิกหลักที่จะเผาต่อไปตามรอบเวลาของการเผาเซรามิก ผลลัพธ์คือ จะได้ CaO นำไปผลิตวัสดุดักจับ CO₂ โดยการใช้เตาเผาเซรามิกที่มีอยู่แล้ว ช่วยลดภาระการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและต้นทุนด้านพลังงานโดยไม่กระทบต่อการผลิตเซรามิกหลักของชุมชน

2) หน่วยดักจับและจัดเก็บก๊าซ (Gas Capture and Storage Unit) ก๊าซผสมที่ปล่อยออกมาจากเตาเผา ประกอบด้วย CO₂ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากกระบวนการแคลซิเนชัน นอกจากนี้ยังมีไอน้ำและฝุ่น

ละออง ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งผ่านท่อโลหะทนความร้อนเข้าสู่ระบบจัดการก๊าซ โดยเริ่มจากการแยกฝุ่นด้วยอุปกรณ์ไซโคลน (Cyclone Separator) เพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาคแข็ง จากนั้นผ่านระบบดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจลเพื่อปรับลดความชื้นของก๊าซจนถึงระดับที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการอัดเก็บขั้นถัดมาคือการอัด CO₂ ด้วยเครื่องอัดก๊าซ (Gas Booster) จนถึงความดัน 10–20 bar และจัดเก็บในถังแรงดันสูงที่รองรับความดัน 25–30 bar ซึ่งถังดังกล่าวจะติดตั้งอุปกรณ์นิรภัย เช่น เกจวัดแรงดัน วาล์วนิรภัย และวาล์วควบคุม เพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติการ CO₂ ที่ถูกกักเก็บในรูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเพิ่มความเข้มข้น CO₂ ในโรงเรือนเกษตรเพื่อส่งเสริมการสังเคราะห์แสงของพืช หรือใช้ในกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องการก๊าซ CO₂ ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

3) หน่วยผลิตวัสดุดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorbent Production Unit) CaO ที่ได้จากการเผาถูกนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นดักจับ CO₂ โดยมีการผสมกับวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและความทนทานต่อการใช้งาน แผ่นที่ขึ้นรูปจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60–80 °C เป็นเวลา 6–8 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นต่ำและพร้อมใช้งาน การทำงานของแผ่นดักจับอาศัยปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ($\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$) โดยมีความจุดักจับสูงสุดเชิงทฤษฎีประมาณ 0.785 กรัม CO₂ ต่อกรัม CaO [14] แผ่นดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนในระดับชุมชน เช่น เตาอบขนม และยังอาจใช้งานซ้ำได้หลายรอบก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง

ชินพรรณ เอกวาไรไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)



การนำกลับเข้าสู่กระบวนการแคลซิเนชัน เพื่อผลิต CaO และจัดเก็บ CO₂ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อีกครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Calcium Looping และช่วยลดการพึ่งพาวัตถุดิบเปลือกไข่สด แนวทางที่สองคือการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดย CaCO₃ สามารถเพิ่มค่า pH ของดิน ลดความเป็นกรด และปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ส่งผลให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจในพื้นที่ ซึ่งทั้งสองแนวทางสามารถดำเนินการควบคู่กันได้ โดยพิจารณาตามความเหมาะสมของสถานะการผลิตและความต้องการใช้ประโยชน์ในพื้นที่

กล่าวโดยสรุป โครงสร้างระบบ Carbon-Egg Cycle นี้ แสดงให้เห็นถึงการ บูรณาการกระบวนการทางวิศวกรรมที่ครอบคลุมตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบ การใช้พลังงานร่วม การดักจับและกักเก็บก๊าซ ไปจนถึงการสร้างมูลค่าเพิ่ม ระบบนี้จึงสะท้อนศักยภาพของการนำแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนมาใช้ในระดับชุมชน ทั้งในด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการสร้างคุณค่าทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน สามารถสรุปได้ ดังภาพต่อไปนี้

อย่างไรก็ดี โครงสร้างระบบที่นำเสนอในหัวข้อนี้เป็นแบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual System Architecture) เพื่อแสดงกลไกและศักยภาพการเชื่อมโยงทรัพยากรระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ ในชุมชน ยังมีได้อยู่ในขั้นทดลองภาคสนามหรือสร้างระบบจริง จึงอาจมีข้อจำกัดและสมมติฐานบางประการที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะถัดไป

รูปที่ 1 โครงสร้างระบบ Carbon-Egg Cycle

4) หน่วยการใช้ประโยชน์หมุนเวียน (Circular Utilization Unit) CaCO₃ ที่ได้จากการใช้งานแผ่นดักจับมีสองแนวทางการจัดการหลัก แนวทางแรก คือ

3.3 การคำนวณเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น

การยืนยันความเป็นไปได้ของแนวคิด Carbon-Egg Cycle จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงปริมาณเบื้องต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงภายใต้เงื่อนไขด้านมวลและพลังงาน โดยการประเมินนี้

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

อ้างอิงข้อมูลจากสมการเคมีพื้นฐานและค่าที่รายงานไว้ในวรรณกรรมวิชาการ

1) สมดุลปฏิกิริยา (Reaction Balance) ของการแคลซิเนชัน (Calcination) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $\text{CaCO}_3 (s) \rightarrow \text{CaO} (s) + \text{CO}_2 (g)$ โดยที่มวลต่อหนึ่งโมลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีค่า 100 g/mol แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่า 56 g/mol และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่า 44 g/mol เทียบจากฐานข้อมูลมาตรฐาน ดังนั้น เปลือกไข่ 1 กิโลกรัม ซึ่งโดยเฉลี่ยประกอบด้วย CaCO_3 ประมาณ 95% โดยมวล จะสามารถให้ผลผลิต CaO ได้ประมาณ 0.53 กิโลกรัม และก่อให้เกิดการปลดปล่อย CO_2 ประมาณ 0.42 กิโลกรัม

2) พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Energy Requirement) งานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่าค่าความร้อนที่ต้องใช้สำหรับการสลาย CaCO_3 อยู่ที่ประมาณ 178 กิโลจูลต่อโมล [6] ซึ่งถือเป็นต้นทุนพลังงานที่สำคัญของกระบวนการนี้ ดังนั้น เพื่อให้ระบบมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์พลังงานการใช้พลังงานร่วม (Waste Heat Utilization) จึงมีความจำเป็น สมมติว่าอุตสาหกรรมเซรามิกแห่งหนึ่งมีการใช้เตาเผาขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีการใช้พลังงานรวมประมาณ 50 เมกะจูลต่อรอบ และมีการสูญเสียความร้อนผ่านก๊าซเสียประมาณร้อยละ 15–20 หรือเท่ากับพลังงานทั้งหมดประมาณ 10 เมกะจูลต่อรอบ ความร้อนส่วนนี้หากใช้กับกระบวนการแคลซิเนชันจะสามารถรองรับการสลายตัวของ CaCO_3 ได้ราว 5–6 กิโลกรัมต่อรอบ ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้เปลือกไข่จำนวนมากโดยไม่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มเติม

3) สมรรถนะการดักจับ CO_2 (CO_2 Capture Capacity of CaO) เมื่อได้ CaO แล้ว สามารถนำไปใช้ในฐานะวัสดุดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) ตามสมการ

$\text{CaO} (s) + \text{CO}_2 (g) \rightarrow \text{CaCO}_3 (s)$ ซึ่งจากทฤษฎีพบว่าความสามารถสูงสุดของ CaO ในการดักจับ CO_2 อยู่ที่ 0.785 กรัมต่อกรัม CaO [14] ซึ่งหมายความว่าหากได้ CaO 0.53 กิโลกรัมที่ได้จากเปลือกไข่ 1 กิโลกรัม จะสามารถดักจับ CO_2 ได้ประมาณ 416 กรัม

3.4 ความเหมาะสมเชิงบริบทและการขยายผล

การพัฒนาระบบ Carbon–Egg Cycle มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ในพื้นที่ที่โครงสร้างเศรษฐกิจและสังคมผสมผสานระหว่างอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้พลังงานความร้อนสูง และภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทที่แต่ละภาคส่วนสามารถสร้างความเชื่อมโยงในลักษณะวงจรหมุนเวียนของทรัพยากรที่เป็นรูปธรรม กล่าวคือ วัสดุเหลือทิ้งจากภาคหนึ่งสามารถแปรสภาพเป็นทรัพยากรต้นทางให้กับอีกภาคหนึ่ง และผลพลอยได้จากกระบวนการดักจับสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่เหลืออยู่ในพื้นที่

ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร พื้นที่ที่มีการใช้ไข่ในปริมาณมาก เช่น อุตสาหกรรมเบเกอรี่และทำขนมหวาน จะก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทเปลือกไข่จำนวนมาก วัสดุเหล่านี้สามารถเก็บรวบรวมและเข้าสู่กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ภายใต้การใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ในมิติของอุตสาหกรรมการเผาที่ใช้ความร้อนสูง เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก พลังงานความร้อนส่วนเกินที่สูญเสียไปจากการเผาสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแคลซิเนชันของเปลือกไข่ โดยการออกแบบระบบในลักษณะนี้ไม่กระทบต่อคุณภาพของการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกหลัก เนื่องจาก การเผาเปลือกไข่ดำเนินการในภาคเฉพาะที่ติดตั้งเพิ่ม โดยจำกัดปริมาตรวัสดุไม่เกินร้อยละ 4–5 ของปริมาตรเตาเผา สามารถดำเนินการคู่ขนานไปกับ

ชินพรรณ เอกวาไรไพศาลกุล และคณะ, Carbon–Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

กระบวนการเผาเซรามิกโดยไม่รบกวนสมดุลความร้อนของเตา

ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าว คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างการแคลซิเนชันจะไม่ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศโดยตรง แต่ถูกส่งเข้าสู่ระบบจัดการก๊าซเพื่อการดักจับอัดเก็บ และใช้ประโยชน์ต่อไป CO_2 ที่ถูกกักเก็บสามารถนำไปใช้เพิ่มความเข้มข้นในโรงเรือนเพาะปลูกเพื่อส่งเสริมการสังเคราะห์แสงของพืชเศรษฐกิจ หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องการ CO_2 ความบริสุทธิ์สูง ขณะเดียวกัน แผ่นดักจับที่ผลิตจาก CaO สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมการดักจับ CO_2 ระดับชุมชน เช่น เตาอบขนม หรือแหล่งการเผาที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อหมดอายุการใช้งาน แผ่นดักจับเหล่านี้จะกลับคืนสู่สภาพแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งสามารถนำกลับสู่กระบวนการแคลซิเนชันซ้ำได้ หรือเลือกนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อลดความเป็นกรดของดินและเพิ่มศักยภาพการเพาะปลูก ทั้งนี้การเลือกแนวทางการใช้ประโยชน์ขึ้นกับความต้องการและบริบทการผลิตของพื้นที่

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ ตัวอย่างที่สะท้อนศักยภาพของระบบ Carbon-Egg Cycle ได้อย่างเด่นชัดคือ จังหวัดเพชรบุรีที่มีองค์ประกอบครบถ้วนในบูรณาการระบบในลักษณะนี้ กล่าวคือ ภาคอุตสาหกรรมอาหารของจังหวัดมีชื่อเสียงด้านการทำขนมหวานท้องถิ่น เช่น หม้อแกง ทองหยิบ ทองหยอด และฝอยทอง ซึ่งใช้ในปริมาณมาก จึงสามารถนำเปลือกไข่เหลือทิ้งจำนวนมากในแต่ละวัน ขณะเดียวกันในพื้นที่ยังมีอุตสาหกรรมเซรามิกที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง เตาเผาเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งพลังงานร่วมที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ให้เป็น CaO และในมิติภาคเกษตรกรรม จังหวัดเพชรบุรียังมีการปลูกพืชเศรษฐกิจ และการเพาะปลูกในโรงเรือนที่สามารถใช้ประโยชน์จาก CO_2 เพื่อเร่งการสังเคราะห์แสง

และใช้ CaCO_3 เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร

ดังนั้น กรณีของจังหวัดเพชรบุรีจึงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้เชิงประจักษ์ของการประยุกต์ใช้ระบบ Carbon-Egg Cycle ในระดับชุมชน โดยเป็นกรณีตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นว่า วงจรหมุนเวียนของทรัพยากรจากอุตสาหกรรมอาหารไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตและกลับคืนสู่ภาคเกษตรกรรมดำเนินการได้จริงและมีศักยภาพในการสร้างทั้งคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันรูปแบบนี้ยังสามารถขยายผลยังพื้นที่อื่นที่มีโครงสร้างเศรษฐกิจและสังคมคล้ายคลึงกัน เพื่อยกระดับการจัดการของเสีย การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการสร้างความยั่งยืนเชิงระบบในระยะยาว

4. การประเมินความเป็นไปได้

การประเมินความเป็นไปได้ของระบบ Carbon-Egg Cycle จำเป็นต้องพิจารณาในสามมิติหลัก ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่าระบบสามารถดำเนินการได้จริงในบริบทของชุมชน และมีศักยภาพในการขยายผลในระดับกว้าง

4.1 ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม (Technical Feasibility)

จากการคำนวณเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่า เปลือกไข่สด 1 กิโลกรัม ซึ่งประกอบด้วย CaCO_3 ประมาณร้อยละ 95 โดยมวล สามารถผลิต CaO ได้ประมาณ 0.53 กิโลกรัม และปล่อย CO_2 ราว 0.42 กิโลกรัม พลังงานที่ต้องใช้ในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 178 กิโลจูลต่อโมล CaCO_3 หรือประมาณ 1.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่าไม่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับความร้อนที่สูญเสียไปในกระบวนการเผาเซรามิก

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

สมมติกรณีโรงงานเซรามิกชุมชนที่ใช้เตาเผาขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพลังงานทิ้งเฉลี่ย 10 เมกะจูล ต่อรอบ สามารถรองรับการแคลซิเนชันของเปลือกไข่ ได้ราว 5–6 กิโลกรัมต่อรอบ หากเผาเซรามิกสัปดาห์ละ 4 รอบ จะสามารถเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ 20–24 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ หรือประมาณ 1 ตันต่อปี ทั้งนี้ ปริมาณดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้หากมีการใช้เตาเผาขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีการเพิ่มจำนวนรอบการเผา

สมรรถนะการดักจับ CO₂ ของ CaO ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ยังอยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยจากการคำนวณเชิงทฤษฎี CaO 0.53 กิโลกรัม ที่ได้จากเปลือกไข่ 1 กิโลกรัม มีศักยภาพในการดักจับ CO₂ ได้ประมาณ 416 กรัม ซึ่งเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในกิจกรรมการเผาขนาดเล็ก เช่น เตาอบขนม หรือ การเผาในครัวเรือน ทำให้ระบบนี้สามารถรองรับการใช้งานได้จริงในบริบทระดับชุมชน

4.2 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ (Economic Feasibility)

แม้ว่าวัตถุดิบหลักของระบบ คือ เปลือกไข่ซึ่งมีราคาต่ำหรือแทบไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ แต่การประยุกต์ใช้ระบบ Carbon–Egg Cycle จำเป็นต้องอาศัยการลงทุนเริ่มต้น โดยเฉพาะการดัดแปลงเตาเผาเซรามิก ให้สามารถรองรับภาดใส่เปลือกไข่และการแยกวัสดุหลังการเผาโดยไม่กระทบต่อคุณภาพการผลิตหลัก ตลอดจนการติดตั้งระบบจัดการก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แยกฝุ่น เครื่องดูดซับความชื้น เครื่องอัดก๊าซ และถังแรงดันสูงสำหรับจัดเก็บ CO₂ การลงทุนในส่วนนี้ถือเป็นภาระค่าใช้จ่ายระยะสั้นที่ชุมชนหรือผู้ประกอบการต้องรับผิดชอบ

อย่างไรก็ตาม ในระยะยาวระบบดังกล่าวมีความคุ้มค่า เนื่องจากสามารถใช้พลังงานร่วม (Waste Heat) จากการเผาเซรามิกโดยตรง โดยไม่ต้องใช้

เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มเติม จึงช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบมีศักยภาพสร้างรายได้หรือทดแทนต้นทุนในหลายมิติ ได้แก่ (1) CaO ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งกับ CO₂ หรือวัตถุดิบอุตสาหกรรมอื่น (2) CO₂ ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร และ (3) CaCO₃ ที่สามารถนำไปปรับปรุงดินหรือหมุนเวียนกลับเข้าสู่ระบบ การมีผลิตภัณฑ์หลายทางเลือกนี้ช่วยเพิ่มความคุ้มค่าและกระจายความเสี่ยงทางเศรษฐกิจ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการลงทุนเริ่มแรกกับผลตอบแทนระยะยาว เห็นได้ว่าระบบ Carbon–Egg Cycle มีความคุ้มค่าทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะหากมีการสนับสนุนจากภาครัฐหรือองค์กรท้องถิ่นในรูปแบบเงินทุนสนับสนุนเริ่มต้น หรือการร่วมลงทุนระหว่างผู้ประกอบการหลายภาคส่วน ก็จะช่วยเพิ่มความเป็นไปได้และลดอุปสรรคในการเริ่มต้นระบบ

4.3 ความเป็นไปได้ทางสังคมและสิ่งแวดล้อม (Socio-Environmental Feasibility)

ในมิติสิ่งแวดล้อม ระบบนี้สามารถลดการปล่อย CO₂ สู่บรรยากาศได้โดยตรง ผ่านกระบวนการดักจับ และการนำไปใช้ประโยชน์ต่อ ขณะเดียวกันยังช่วยจัดการวัสดุเหลือทิ้งอย่างเปลือกไข่ซึ่งเดิมเป็นภาระด้านการกำจัดของเสียให้กลายเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าเพิ่ม

ในมิติทางสังคม ระบบนี้สามารถสร้างความร่วมมือระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ ในชุมชน ได้แก่ ผู้ประกอบการอาหาร ในฐานะผู้ผลิตเปลือกไข่ และผู้ใช้งานแผ่นดักจับที่ทำจาก CaO ผู้ผลิตเซรามิก ในฐานะผู้ใช้พลังงานร่วมในกระบวนการแคลซิเนชัน และเกษตรกร ในฐานะผู้ใช้ประโยชน์จาก CO₂ และ

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, Carbon–Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นไปกลางทางคาร์บอน ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

CaCO₃ ความเชื่อมโยงเชิงเครือข่ายนี้ไม่เพียงแต่สร้างความเข้มแข็งให้แก่เศรษฐกิจท้องถิ่น แต่ยังสามารถช่วยสนับสนุนการนำหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนมาปฏิบัติจริงในระดับฐานราก

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอกรอบแนวคิด Carbon-Egg Cycle ในฐานระบบเชิงวิศวกรรมที่บูรณาการการใช้ทรัพยากรเหลือทิ้ง วัสดุท้องถิ่น และพลังงานร่วมเพื่อจัดการกับปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ระบบดังกล่าวอาศัยการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ให้กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) โดยใช้ความร้อนจากอุตสาหกรรมเซรามิกที่มีอยู่ในพื้นที่ ซึ่งไม่เพียงช่วยลดการสูญเสียพลังงาน แต่ยังไม่รบกวนกระบวนการผลิตหลักของอุตสาหกรรมดั้งเดิม

โครงสร้างระบบที่นำเสนอครอบคลุมตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบ การแปรสภาพ การดักจับและอัดเก็บ CO₂ ตลอดจนการผลิตวัสดุที่ดักจับและการใช้ประโยชน์เชิงหมุนเวียน ทั้งในรูปแบบของ CaO ก๊าซ CO₂ บริสุทธิ์ และ CaCO₃ ซึ่งสามารถนำกลับเข้าสู่วงจรการผลิตหรือใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น การเพิ่มความเข้มข้น CO₂ ในโรงเรือนเกษตร หรือการใช้ CaCO₃ เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน บ่งชี้ให้เห็นว่าระบบดังกล่าวมีศักยภาพในการสร้างวงจรปิด (Closed-Loop) ที่ผสมทั้งมิติทางวิศวกรรม มิติทางสิ่งแวดล้อม และมิติทางเศรษฐกิจได้อย่างลงตัว

จากการวิเคราะห์เบื้องต้น ระบบ Carbon-Egg Cycle แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ทั้งในมิติด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม แม้จะต้องอาศัยการลงทุนเริ่มต้นในการดัดแปลงเตาเผาและติดตั้งระบบจัดการก๊าซ แต่ในระยะยาวสามารถลดภาระต้นทุน

พลังงาน สร้างมูลค่าเพิ่มจากของเสีย และสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับชุมชนได้อย่างยั่งยืน

กล่าวโดยสรุป แนวคิด Carbon-Egg Cycle เป็นกรณีตัวอย่างของการบูรณาการวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อมเข้ากับทรัพยากรท้องถิ่น เพื่อตอบสนองต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสร้างคุณค่าร่วมทางเศรษฐกิจ-สังคม บทความนี้จึงไม่เพียงนำเสนอแนวทางเชิงเทคนิคที่สามารถนำไปพัฒนาในระดับต้นแบบหรือกึ่งอุตสาหกรรมได้ แต่ยังสามารถช่วยสนับสนุนการออกแบบที่เชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะด้านการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13) และการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน (SDG 12)

อย่างไรก็ดี ระบบ Carbon-Egg Cycle ที่นำเสนอในบทความนี้ยังคงอยู่ในระดับแนวคิด (Conceptual Framework) และข้อเสนอเชิงวิศวกรรมเบื้องต้น ยังไม่มีการทดสอบเชิงปฏิบัติในระดับต้นแบบ (Pilot-Scale) หรืออุตสาหกรรมจริง ดังนั้นการประเมินผลด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย ต้นทุน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในสภาพการใช้งานจริง จึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ควรดำเนินการต่อไป

6. ข้อเสนอแนะ

เพื่อต่อยอดแนวคิดและการออกแบบระบบ Carbon-Egg Cycle ให้เกิดการนำไปใช้ได้จริงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น งานศึกษานี้มีข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและเชิงนโยบาย ดังนี้

บทความวิชาการ (Academic Article)

6.1 การพัฒนาต้นแบบและทดลองปฏิบัติการ

แม้ผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการคำนวณเบื้องต้นจะแสดงถึงความเป็นไปได้ แต่การยืนยันผลจำเป็นต้องดำเนินการสร้างและทดสอบระบบต้นแบบ (Pilot-Scale) ภายใต้สภาวะจริง การดำเนินการในลักษณะนี้จะช่วยสะท้อนสมรรถนะของระบบทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์พลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างรอบด้าน

6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุและกระบวนการดักจับ

การยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุดักจับ CaO ถือเป็นประเด็นสำคัญในเชิงวิศวกรรม การวิจัยและพัฒนาที่มุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างอนุภาค ความพรุน และการผสมผสานกับวัสดุประสานที่เหมาะสม จะช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องยาวนาน ลดต้นทุนการหมุนเวียนวัสดุ และเสริมสมรรถนะของกระบวนการดักจับ CO₂

6.3 การสนับสนุนเชิงนโยบายและกลไกเศรษฐกิจ

การประยุกต์ใช้ระบบ Carbon-Egg Cycle ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กจำเป็นต้องได้รับแรงขับเคลื่อนจากนโยบายและกลไกทางเศรษฐกิจที่เหมาะสม เช่น การจัดสรรเงินทุนสนับสนุน โครงการนำร่อง สิทธิประโยชน์ทางภาษี หรือการสร้างกลไกตลาดสำหรับการใช้ประโยชน์ CO₂ สิ่งเหล่านี้จะช่วยลดความเสี่ยงในการลงทุนเริ่มต้น และเพิ่มแรงจูงใจให้เกิดการนำระบบไปใช้จริงอย่างกว้างขวาง

กล่าวโดยสรุป ข้อเสนอแนะทั้งสามประการนี้สะท้อนแนวทางสำคัญที่ควรได้รับการพัฒนาและสนับสนุนอย่างเป็นระบบ เพื่อให้แนวคิด Carbon-Egg Cycle ไม่เพียงเป็นกรอบเชิงทฤษฎี หากแต่

สามารถพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงที่มีศักยภาพ ทั้งในมิติสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมอย่างยั่งยืน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [2] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Sources of Greenhouse Gas Emissions,” [online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>. [Accessed: 15 September 2025].
- [3] Q. Lin et al., “Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage,” *Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 27–32, 2022.
- [4] M. G. Rinaudo, S. E. Collins, and M. R. Morales, “Eggshell Waste Valorization into CaO/CaCO₃ Solid Base Catalysts,” *Engineering Proceedings*, vol. 67, 2024.
- [5] S. L. Hsieh Lin et al., “CaO recovered from eggshell waste as a potential adsorbent for greenhouse gas CO₂,” *Journal of Environmental Management*, vol. 297, Nov. 2021.
- [6] Y. Zhang et al., “Calcium looping for CO₂ capture and thermochemical heat storage, a potential technology for carbon neutrality: A review,” *Green Energy and Resources*, vol. 2, no. 3, Sep. 2024.

ชินพรธน์ เอกวราไพศาลกุล และคณะ, *Carbon-Egg Cycle: กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน* ผ่านการเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่โดยใช้พลังงานร่วมจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น เพื่อสร้างระบบหมุนเวียนทางทรัพยากรและเศรษฐกิจสู่ความยั่งยืนของชุมชน

บทความวิชาการ (Academic Article)

- [7] R. Loni et al., “A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, Mar. 2021.
- [8] V. Turek et al., “Industrial Waste Heat Utilization in the European Union—An Engineering-Centric Review,” *Engineering Proceedings*, vol. 17, no. 9, 2024.
- [9] J. C. Abanades et al., “Emerging CO₂ capture systems,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 40, pp. 126–166, Sep. 2015.
- [10] J. Blamey et al., “The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 2, pp. 260–279, Apr. 2010.
- [11] M. Krödel et al., “Mechanistic Understanding of CaO-Based Sorbents for High-Temperature CO₂ Capture: Advanced Characterization and Prospect,” *Chemistry Europe*, vol. 13, no. 23, pp. 6259–6272, Dec. 2020.
- [12] A. Wang et al., “CO₂ enrichment in greenhouse production: Towards a sustainable approach,” *Frontiers in Plant Science*, Oct. 2022.
- [13] E. Villagran et al., “CO₂ Enrichment in Protected Agriculture: A Systematic Review of Greenhouses, Controlled Environment Systems, and Vertical Farms—Part 2,” *Sustainability*, vol. 17, no. 7, 2025.
- [14] X. Zhang et al., “Experimental Study on High-Efficiency Cyclic CO₂ Capture from Marine Exhaust by Transition-Metal-Modified CaO/Y₂O₃ Adsorbent,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 12, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Capability Analysis of a Solar-Powered Conveyor for Water Hyacinth Removal: A Case Study at Kumphawapi Flood Gate

Suwapat Kosasaeng¹, Weerapol Kaewka², Sorawin Phukapak³, Niwat Bhumiphan⁴, Chawisorn Phukapak⁵, Ariyapong Pluapant⁶ and Narathip Pawaree^{6,*}

¹ Water Management and Maintenance Division, Regional Irrigation Office 5, Udonthani

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

³ Department of Energy Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

⁴ Department of Smart Electronics and Electric Vehicles Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

⁵ Department of Energy and Environment Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham University

⁶ Department of Industrial management and Logistics Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

* Corresponding Author: narathip.pawaree@gmail.com

(Received: September 13, 2025; Revised: October 7, 2025; Accepted: November 6, 2025)

Abstract

Water hyacinth is a fast-growing invasive plant that disrupts water management in tropical regions. This study presents the design and capability analysis of a solar-powered conveyor system for large-scale water hyacinth removal, demonstrated at the Wiang Kham Sluice Gate, Kumphawapi District, Udon Thani, Thailand. The prototype incorporates conveyor belts, picker wheels, and a photovoltaic power supply sized for off-grid operation. Motor drive requirements were calculated from friction, load, and torque data, while process capability indices (C_p) were applied to assess the stability of motor efficiency and removal rate. Experimental results indicated that a 1.5 kW motor was sufficient for both conveyor and picker wheel assemblies, maintaining efficiency above 76%. The machine achieved an average removal capacity of 60 t/h with $C_p = 1.17$, demonstrating acceptable yet further-optimizable process stability, suggesting potential for performance refinement through parameter adjustment. Economic analysis indicated that the proposed system has an estimated operating cost of around USD 2,700 per 58 ha per cycle, corresponding to a 3–6× cost reduction compared with conventional methods. These findings highlight the feasibility of integrating renewable energy with mechanical design for sustainable aquatic weed management.

Keywords: Water Hyacinth, Process Capability, Machinery Design, Conveyor System

Please cite this article as: S. Kosasaeng, W. Kaewka, S. Phukapak, N. Bhumiphan, C. Phukapak, A. Pluapant and N. Pawaree, "Design and Capability Analysis of a Solar-Powered Conveyor for Water Hyacinth Removal: A Case Study at Kumphawapi Flood Gate," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 15-28, 2026.

1. Introduction

The government currently has a policy for managing water hyacinth, including activities to maintain cleanliness and eliminate aquatic weeds, dredging canals, rivers, and drainage channels, particularly in densely populated areas. This persistent problem has prevented effective water use. Furthermore, canals and rivers are becoming shallow due to the accumulation of water hyacinth, water lettuce, duckweed, and various types of waste. This results in insufficient drainage during the rainy season, leading to flooding in the area, causing damage to communities and homes along the canals [1]. Furthermore, it has damaged the scenic beauty of riverbanks and impacted local livelihoods [2].

Water hyacinth is an invasive species that has infested Thailand's ecosystems [3]. It spreads rapidly. In one month, a single water hyacinth can multiply into as many as 1,000 plants [4]. Even if the water dries up and the plant dies, its seeds can survive for up to 15 years. Once the seed receives sufficient water, it will sprout new plants. This has become a serious and national problem, requiring the government to spend a significant amount of money on water hyacinth eradication. This problem is not limited to Thailand but is also present in over 50 countries worldwide [5].

Contemporary management strategies encompass human extraction, mechanized harvesting, herbicide treatment, and biological control. Each technique, meanwhile, exhibits

significant disadvantages. Manual collection is cost-effective regarding equipment but requires significant work and is inefficient in high biomass scenarios [6]. Mechanical harvesters enhance efficiency but incur substantial capital and maintenance expenses and are inappropriate for shallow or narrow streams [5]. Herbicides offer swift suppression but may jeopardize water quality and ecosystem integrity [7]. Biological management is ecologically sustainable; however, it progresses slowly in achieving substantial reductions and is contingent upon species-specific limitations [7]. Moreover, the disposal of collected biomass poses challenges: inadequate management or valorization of decomposing plant material can emit greenhouse gases, resulting in further environmental and economic liabilities [8]. This expenditure underscores the necessity for integrated strategies that amalgamate the advantages of current methodologies, reduce energy expenditure, and augment the value or secure disposal of harvested biomass.

To solve these issues, this work proposes the design and development of a semi-automatic water hyacinth eradication device powered by solar energy. The prototype features a conveyor-belt system built from corrosion-resistant steel to carry biomass from the sea surface to the bank. The belt is supported by rollers and fitted with drainage channels to minimize water weight prior to release. Power requirements were derived from plant load, belt velocity, friction, and

บทความวิจัย (Research Article)

torque, with motor specifications set to withstand peak loads and integrate an acceptable safety factor. The structure was intended for ease of assembly, transport, and maintenance. Solar photovoltaic panels and batteries were sized according to the machine's daily energy need and the region's solar irradiance, enabling off-grid operation and alignment with clean energy and green technology principles [9].

Following construction, the prototype conducted performance testing and process capability evaluation (C_p) to measure operational stability and consistency. Key performance parameters included conveyance rate, biomass loss, and mean electricity usage. Economic analysis contrasted investment and operating expenses with those of standard removal procedures [6]. Unit cost and payback time calculations were undertaken to establish the financial sustainability and potential scalability of the system for community or agency-level implementation.

2. Theoretical Background and Literature Review

This section discusses the theoretical foundations and research for designing and assessing a solar-powered conveyor system for water hyacinth management. It covers literature reviews on equipment design [10,11], energy efficiency [12,13], and process capability [14,15].

2.1 Motor Power Calculation in Belt Conveyors

Accurate estimation of the motor drive power is essential for designing conveyor belt systems that operate efficiently and reliably [16,17].

The total power requirement is obtained by summing the components needed to overcome belt friction, to transport the material horizontally, to lift the load vertically, and to supply any auxiliary devices [18].

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_t \quad (1)$$

Where:

- P = total required drive power (kW)
- P_1 = horizontal power without load (kW)
- P_2 = horizontal power under load (kW)
- P_3 = vertical lifting power under load (kW)
- P_t = power of auxiliary equipment (kW)

Component Power Formulas

2.1.1 Horizontal power (no load)

$$P_1 = [f(\ell + \ell_0) \cdot W \cdot v] / 6120 \quad (2)$$

2.1.2 Horizontal power – with load

$$P_2 = [f(\ell + \ell_0) \cdot Q_t] / 367 \text{ or } [f(\ell + \ell_0) \cdot W_m \cdot v] / 6120 \quad (3)$$

บทความวิจัย (Research Article)

2.1.3 Vertical lifting power

$$P_3 = [H \cdot Qt] / 367 \text{ or} \\ [H \cdot W_m \cdot v] / 6120 \quad (4)$$

Auxiliary Calculations

2.1.4 Total weight of moving parts

$$W = (W_c / p_c) + (W_r / p_r) + 2W_1 \quad (5)$$

2.1.5 Horizontal power – with load

$$H = l \cdot \tan(\alpha) \quad (6)$$

2.1.6 Vertical lifting power

$$W_m = Qt / (0.06 \cdot v) \quad (7)$$

Where:

- f = Coefficient of friction of carrying rollers
- l = Horizontal length of the conveyor (m)
- l₀ = Equivalent length for return side or tensioning (m)
- H = Vertical lift (m)
- v = Belt speed (m/min)
- W = Weight of moving parts (kg/m)
- W_m = Weight of conveyed material per metre of belt (kg/m)
- Qt = Capacity of material conveyed (ton/hr)
- P_t = Power for auxiliary equipment (kW)

Employing such techniques allows researchers to establish the ideal motor rating, pick an appropriate safety factor, and analyze energy consumption for conveyor systems used in water hyacinth removal or other bulk-handling applications.

2.2 Photovoltaic (PV) System sizing calculations

The sizing of a photovoltaic system is crucial for its energy generation to meet the load demand of an electromechanical device, based on daily energy consumption, solar irradiance, and system losses [19].

2.2.1 Effective Output of a PV Module

$$P_{\text{module,eff}} = (P_{\text{rate}}/1000) \times EF \quad (8)$$

2.2.2 Total Array Capacity and Number of Modules

$$P_{\text{array}} = P_{\text{module,eff}} \times N \quad (9)$$

2.2.3 Daily Energy Production

$$E_{\text{pv,day}} = P_{\text{array}} \times \text{PSH} \quad (10)$$

Where:

- P_{rate} = Rated peak power of a single PV module (W_p)
- EF = Energy yield derating factor
- P_{array} = Total effective array power (kW)
- N = Number of PV modules
- PSH = Peak Sun Hours (h/day)

บทความวิจัย (Research Article)

2.3 Motor Power Calculation for the Picker Wheel Assembly

The picker wheel assembly is crucial for lifting water hyacinth onto a conveyor system as shown in Figure 1, requiring accurate torque estimation for reliability and ensuring smooth operation under varying load conditions.

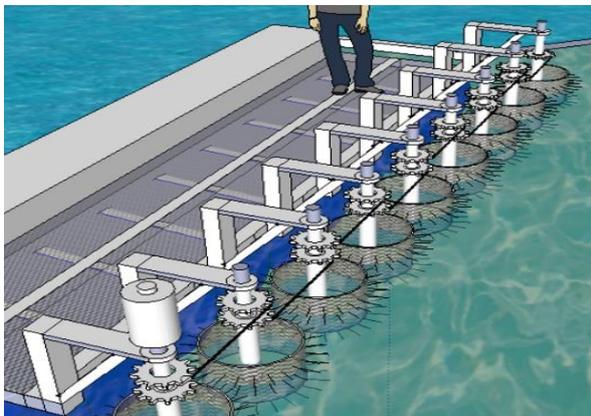


Figure 1. Picker wheel and accelerator drive of the water-hyacinth conveyor belt.

The motor power required to drive the picker wheel assembly was determined based on the torque generated by the combined weight of the wheel structure and the harvested water hyacinth [20,21]. The mechanical power (P) was calculated using the standard relationship:

$$P = (2 \times \pi \times N \times T) / 60 \quad (11)$$

The torque necessary to rotate a single wheel was obtained from:

$$T = W \times g \times r \quad (12)$$

Where:

P = the motor power (W)

N = the rotational speed (rpm)

T = the torque (Nm)

W = the total mass of the wheel (kg)

g = the acceleration due to gravity
(9.81 m/s^2)

r = the wheel radius (m)

In literature review the effective eradication of invasive aquatic plants requires not only practical harvesting equipment but also a good theoretical basis and a thorough evaluation of the effectiveness of the process. Previous research on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) control has shown that harvesting equipment must consider mechanical design principles [21], proper material selection, and operational factors to ensure durability and efficiency. Successful systems must account for the plant's high biomass density, buoyancy, and fluctuating moisture content while being versatile for use in shallow or narrow streams. Researchers have proposed several alternatives, including lightweight but corrosion-resistant designs, improved delivery mechanisms, and energy-efficient power sources to ensure sustainable operation. Building on these findings, this study investigates a semi-automated, solar-powered conveyor system that enables continuous removal of water hyacinths as shown in Figure 2, reduces energy requirements for operation, and addresses environmental concerns.

บทความวิจัย (Research Article)

Another important component covered in the literature is the investigation of process stability using process capacity analysis [22]. In modern manufacturing and machine performance research, quality outcomes are determined by 3 phases: design, production, and inspection. Product specifications are set during design, production ensures these standards are met, and inspection verifies compliance. Process capacity analysis, often expressed by indices such as C_p or C_{pk} [23, 24], evaluates the variability of a process in relation to its design tolerances. This approach provides insight into the consistency and adequacy of operational systems. Applying process capability methods to water hyacinth removal machines provides an objective framework for analyzing throughput, accuracy, and energy efficiency under typical working conditions, while providing guidance for revising design parameters and maintenance procedures.

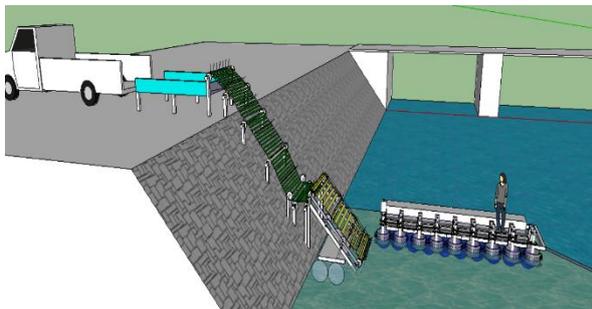


Figure 2. Water hyacinth removal concept using a trapping system with conveyor floats and conveyor belts.

3. Result

3.1 Machinery Design

The conveyor was designed to transport water hyacinth at a belt speed of 60 m/min. A friction coefficient of 0.035 was assumed for the belt and rollers. The average material weight per meter of belt was taken as 75 kg/m, giving a volumetric capacity of approximately 14.4 ton/h.

3.1.1 Stainless Steel Conveyor (Length = 3 m, Width = 1.5 m)

The total weight of the moving parts (excluding material) was calculated as:

$$W = (8/1) + (6/1) + 2 \times (10 \times 1.5) = 44 \text{ kg/m}$$

Vertical lift from the conveyor incline:

$$H = l \times \tan(\alpha) = 3 \times \tan(21^\circ) \approx 1.1516 \text{ m}$$

Power components:

$$P_1 = (0.035 \times (3+3) \times 44 \times 60)/6120 = 0.0906 \text{ kW}$$

$$P_2 = (0.035 \times (3+3) \times 75 \times 60)/6120 = 0.1544 \text{ kW}$$

$$P_3 = (1.1516 \times 75 \times 60)/6120 = 0.8468 \text{ kW}$$

Total required power:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 = 1.0918 \text{ kW}$$

บทความวิจัย (Research Article)

Considering the motor efficiency ($\eta=76.54\%$):

$$P_{\text{rated}} = 1.0918/0.7654 = 1.426 \text{ kW}$$

3.1.2 UPVC Conveyor (Length = 10 m, Width = 1 m)

Weight of moving parts (excluding material, Figure 3):

$$W = (8/1) + (6/1) + 2 \times (5 \times 1.0) = 44 \text{ kg/m}$$

Vertical lift from the conveyor incline:

$$H = l \times \tan(\alpha) = 10 \times \tan(21^\circ) \approx 3.8386 \text{ m}$$

Power components:

$$P_1 = (0.035 \times (10+10) \times 24 \times 20)/6120 = 0.0549 \text{ kW}$$

$$P_2 = (0.035 \times (10+10) \times 50 \times 20)/6120 = 0.1144 \text{ kW}$$

$$P_3 = (3.8386 \times 50 \times 20)/6120 = 0.6272 \text{ kW}$$

Total required power:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 = 0.7965 \text{ kW}$$

Considering the motor efficiency ($\eta=76.54\%$):

$$P_{\text{rated}} = 0.7965/0.7654 = 1.046 \text{ kW}$$

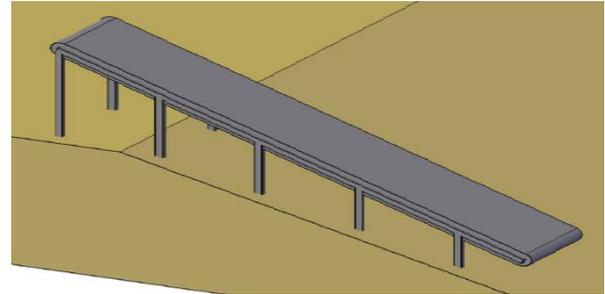


Figure 3. Belt set with width 1.5 m, length 10 m, made from UPVC material.

Both calculations indicate that a 1.5 kW drive motor is appropriate for stainless steel and UPVC conveyors. The selected rating provides sufficient margin for transient loads, prevents over-temperature, and enhances the motor's operational lifespan. Furthermore, running below the rated power improves efficiency and tolerance to shock loads or accidental overloads.

3.1.3 Picker Wheel

The weight of one wheel was calculated from its components: a 1-mm stainless-steel plate (7.72 kg), a 1-inch stainless-steel tube (0.71 kg), and a 4-inch stainless-steel shaft (5.01 kg), giving 13.43 kg. Including the biomass mass of approximately 25 kg, the total load per wheel was:

$$T_{\text{wheel}} = (13.43+25) \times (9.81) \times (0.5) \approx 188.5 \text{ Nm}$$

For a set of 12 wheels, the overall torque was:

$$T_{\text{total}} = 188.5 \times 12 = 2262 \text{ Nm}$$

บทความวิจัย (Research Article)

Motor Power Requirement Using a nominal rotational speed of $N=4$ rpm, the corresponding motor power was:

$$P = (2 \times \pi \times 4 \times 2262)/60 = 0.947 \text{ kW}$$

Considering the motor efficiency ($\eta=76.54\%$):

$$P_{\text{rated}} = 0.947/0.7654 = 1.24 \text{ kW}$$

A 1.5 kW motor was chosen for its reserve capacity, ensuring adequate temperature even under rated load conditions.

3.1.4 Motor Efficiency Test Results

The efficiency of the drive motor was evaluated to verify its suitability for continuous operation in the water hyacinth removal system.



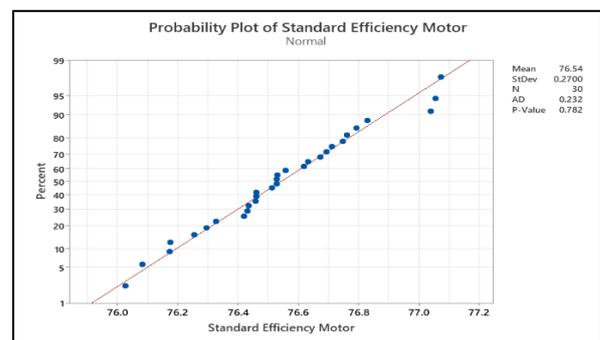
Figure 4. The motor efficiency test.

Tests were conducted under representative loading conditions, with input

power and shaft output measured to determine overall performance as shown in Figure 4.

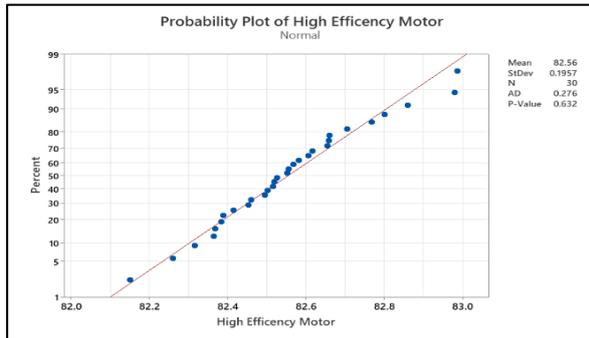
The results indicated that the standard-efficiency motor delivered an average efficiency of 76.54%, while a high-efficiency model of the same power rating achieved an average of 82.56%. These findings confirm that both options meet the operational requirements of the conveyor and picker wheel assemblies.

In Figure 5, the normality test results of the motor efficiency data, the P-value, was found to be greater than 0.05, indicating that the data did not deviate significantly from a normal distribution. Therefore, the efficiency measurements can be regarded as normally distributed, and subsequent statistical analyses, such as the calculation of mean efficiency and process capability indices, can be appropriately applied.



(a)

บทความวิจัย (Research Article)



(b)

Figure 5. Normality Test for (a) Standard Efficiency Motor (b) High Efficiency Motor.

3.1.5 The Photovoltaic (PV) System

The sizing of a photovoltaic system is crucial for its energy generation to meet the load demand of an electromechanical device, based on daily energy consumption, solar irradiance, and system losses. The design data, the PV system specifications include a rated module power of 645 W, an energy yield derating factor of 0.70, a peak sun hour value of 5.23 h/day, and a required load power of approximately 5 kW.

Effective power per module:

$$P_{\text{module,eff}} = (645 \text{ W}/1,000) \times 0.7 \\ = 0.4515 \text{ kW}$$

Number of modules:

$$N = 5/0.4515 = 12 \text{ modules}$$

Select 12 modules, giving:

$$P_{\text{array}} = 12 \times 0.4515 = 4.515 \text{ kW}$$

Daily energy:

$$E_{\text{pv,day}} = 4.515 \times 5.23 = 23.6 \text{ kWh/day}$$

This capacity satisfies the energy requirements of the 1.5 kW conveyor motor with adequate margin.

3.2 Process Capability

Performance testing of the solar-powered conveyor prototype was conducted at Kumphawapi Flood Gate. Each test was performed under similar ambient conditions (temperature 31–34 °C, humidity 65–70 %) using naturally floating water hyacinth with an average biomass density of about 80 kg/m².

The machine operated continuously for 10 minutes per run, and the collected biomass was drained for 2 minutes before weighing with a 0.1 kg-precision digital scale. The throughput rate ($Q = \text{m}/\text{t}$) was computed and converted to tons per hour (t/h). Thirty repetitions $n = 30$ (Table 1) were performed to ensure measurement consistency and reproducibility.

The throughput data were analyzed using Minitab 21. Normality was verified by the Anderson–Darling test. The specification limits were set at $USL = 67 \text{ t/h}$ and $LSL = 53 \text{ t/h}$, symmetrically centered around the design target of 60 t/h. Since the process mean was located at the center of the tolerance range, only the process capability index (C_p) was calculated as

บทความวิจัย (Research Article)

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (13)$$

Bootstrapped 95 % confidence intervals were generated to evaluate statistical stability. A $C_p \geq 1.33$ was considered indicative of adequate process capability.

Following the performance testing of the water hyacinth removal process, the process tolerance limits were set at 60 ± 0.4764 t/h. Process capability research done in Minitab produced a capacity index of $C_p = 1.17$ (Figure 6). Although this number may be provisionally acceptable for a recently built process, it shows large variability and stays below the typically recommended requirement of $C_p \geq 1.33$. Further variance-reduction measures are advised to boost capability.

Table 1. The machine achieved a removal capacity.

Run	Capacity (t/h)			Standard deviation (t/h)		
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 1	Set 2	Set 3
1	60.4	59.8	60.7	0.67	0.33	1.17
2	59.3	60.1	58.9	0.95	0.15	1.02
3	60.5	61.2	59.7	0.33	0.83	0.5
4	60.8	59.6	60.2	0.4	0.67	0.2
5	61.3	60.9	60.5	1.1	0.85	0.6
6	59.5	60	59.2	0.75	0.45	0.6
7	60.1	60.3	59.7	0.5	0.8	0.3
8	60.6	60	60.8	0.33	0.17	0.58
9	59.4	58.9	60.1	1.05	0.75	0.55
10	60.7	61.0	60.2	0.45	0.6	0.35
11	60.5	60.8	59.9	0.38	0.52	0.42
12	60.3	59.8	60.1	0.3	0.65	0.55
13	60.0	59.7	60.2	0.62	0.48	0.4
14	59.8	60.6	59.9	1.0	0.7	0.9
15	61.2	60.4	60.1	0.45	0.33	0.67
16	60.5	60.2	59.6	0.3	0.4	0.55

Table 1. The machine achieved a removal capacity (con).

Run	Capacity (t/h)			Standard deviation (t/h)		
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 1	Set 2	Set 3
17	60.7	60.9	60.1	0.25	0.5	0.35
18	59.6	60.3	60.0	0.55	0.45	0.28
19	60.4	59.8	59.9	0.33	0.22	0.48
20	60.2	59.7	60.5	0.4	0.65	0.5
21	60.0	60.3	59.5	0.58	0.47	0.37
22	60.5	60.8	60.2	0.72	0.53	0.48
23	60.3	59.9	60	0.5	0.44	0.36
24	60.1	60.2	59.8	0.35	0.55	0.25
25	60.6	60.4	60.3	0.65	0.7	0.6
26	60.2	59.6	60.0	0.28	0.4	0.38
27	59.9	60.1	59.7	0.33	0.45	0.29
28	60.4	60.2	60.6	0.6	0.42	0.47
29	60.5	60.8	60.3	0.38	0.55	0.4
30	59.8	60.0	60.4	0.41	0.49	0.31

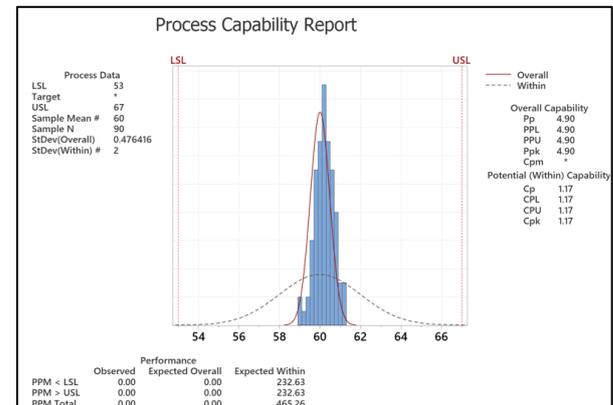


Figure 6: Process capability of water hyacinth removal process.

3.3 Economic Analysis

The survey encompassed 58 ha (360 rai) of water surface, which contained an estimated 28,800 tons of water hyacinth (about 80 tons). Table 2 offers a cost comparison between known water hyacinth control technologies, namely a small-scale

บทความวิจัย (Research Article)

collecting boat and a typical motorized harvester, and the suggested prototype system. The results suggest that the proposed innovation delivers the lowest operational cost, at an estimated operating cost of around USD 2,700 per 58 ha per cycle, corresponding to a 3–6× cost reduction compared with conventional methods.

These findings imply that the solar-powered conveyor-based removal equipment offers a highly cost-effective alternative for large-scale water hyacinth management, particularly in rivers with similar biomass density and access restrictions.

Table 2: Comparison of economic data

Item	Small-Scale Collection Boat	Mechanical Harvester Set	Proposed Prototype
1. Removal capacity (t/h)	10	50	60
2. Total cost of 58 ha per cycle (USD)	8,091	17,633	2,700

4. Discussion

The prototype successfully operated with a mean throughput of 60 t/h ($n = 30$), corresponding with the design aim. All throughput data were converted to tons per hour (t/h) to ensure unit consistency across analyses. The torque values for the picker wheels were collected from direct measurements of 12 wheels, each sustaining roughly 25 kg of wet biomass under field moisture conditions ($\approx 75\%$ water content).

The observed torque–speed (T–rpm) profile verified sufficient driving margin for stable operation at 4 rpm, needing ≈ 1.2 kW of mechanical power.

The photovoltaic subsystem, rated at 4.52 kW, was designed to supply the 1.5 kW motor load in intermittent operation mode, where the conveyor and picker assemblies’ function alternately rather than simultaneously. The 12-module array, paired with a 48 V – 200 Ah battery bank, supplied > 4 hours of backup on cloudy days, assuring enough energy availability during low irradiance periods.

Process capability analysis yielded $C_p = 1.17$, reflecting moderate variability within the tolerance range of 60 ± 7 t/h. Since the process was centered, $C_{pk} \approx C_p$. The standard deviation (σ) produced from capability analysis was then used to construct 95 % confidence intervals (CI) for operational costs. The total cost of USD $2,700 \pm 190$ per 58 ha per cycle represents a 3–6× cost reduction compared to conventional mechanical or manual removal systems, confirming the statistical and economic feasibility of the design.

5. Conclusion

This research successfully designed, built, and tested a solar-powered conveyor machine for water hyacinth removal. Calculations of motor power, photovoltaic sizing, and picker wheel torque were consistent with field measurements, ensuring

บทความวิจัย (Research Article)

that a 1.5 kW motor provides adequate capacity and thermal margin. The process capability index confirmed acceptable stability for biomass removal, while economic evaluation highlighted significant cost savings compared with conventional technologies.

Future work should focus on refining process parameters to reduce variability, improving durability of structural components under continuous load, and exploring valorization of harvested biomass.

6. Acknowledgments

The authors extend sincere gratitude to National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) for funding this research. They also thank the reviewers for their valuable comments and suggestions. Furthermore, the authors acknowledge the technical assistance in data analysis and diagram preparation provided by Regional Irrigation Office 5, UdonThani, as well as the support for data collection from UdonThani Rajabhat University and Rajabhat MahaSarakham University.

7. References

- [1] I. Ashraf, S. R. Ahmad, U. Ashraf, and M. Khan, "Community perspectives to improve flood management and socio-economic impacts of floods at Central Indus River, Pakistan," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 92, p. 103718, 2023.
- [2] Z. A. Kaiser, "Analysis of the livelihood and health of internally displaced persons due to riverbank erosion in Bangladesh," *Journal of Migration and Health*, vol. 7, p. 100157, 2023.
- [3] M. Srisawas, T. Kerdkaew, and P. Chanlert, "From invasive species to bio-based composites: Utilizing water hyacinth for sound absorption and insulation," *Industrial Crops and Products*, vol. 220, p. 119242, 2024.
- [4] E. K. Onyari, G. U. Fayomi, and A. T. Jaiyeola, "Unveiling the situation of water hyacinth on freshwater bodies in Nigeria and South Africa: Management, workable practices and potentials," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100974, 2024.
- [5] A. M. Villamagna and B. R. Murphy, "Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review," *Freshwater Biology*, vol. 55, no. 2, pp. 282–298, 2010.
- [6] S. Patel, "Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: An overview," *Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 249–259, 2012.
- [7] M. Tariq, K. N. Mohammad, B. Ahmed, M. A. Siddiqui, and J. Lee, "Biological

บทความวิจัย (Research Article)

- synthesis of silver nanoparticles and prospects in plant disease management,” *Molecules*, vol. 27, no. 15, p. 4754, 2022.
- [8] S. Rezanian, M. Ponraj, M. F. Din, A. R. Songip, F. M. Sairan, and S. Chelliapan, “The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era: An overview,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 943–954, 2015.
- [9] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [10] Y. Anker, B. Doktor, A. Dahan, V. Mirlas, A. Gimburg, S. Petlakh, and M. Averbukh, “Solar-powered wastewater treatment: Integrating pumped storage and hydroelectric generation for autonomous operation,” *Energy Reports*, vol. 14, pp. 2247–2263, 2025.
- [11] K. Sharma, S. Kothari, N. L. Panwar, and N. Rathore, “Design and development of solar energy powered maize milling machine,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 1671–1676, 2022.
- [12] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M. A. Dittrich, S. Kara, and M. Mori, “Energy efficient machine tools,” *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, pp. 646–667, 2020.
- [13] P. Liu, J. Tuo, F. Liu, C. Li, and X. Zhang, “A novel method for energy efficiency evaluation to support efficient machine tool selection,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 191, pp. 57–66, 2018.
- [14] C. Zhao, M. Dinar, and S. N. Melkote, “A data-driven framework for learning the capability of manufacturing process sequences,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 68–80, 2022.
- [15] T. C. Wang, B. M. Hsu, and M. H. Shu, “Quick-switch inspection scheme based on the overall process capability index for modern industrial web-based processing environment,” *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, vol. 38, no. 5, pp. 847–861, 2022.
- [16] K. Deepak, M. A. Frikha, Y. Benômar, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, “In-wheel motor drive systems for electric vehicles: State of the art, challenges, and future trends,” *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 3121, 2023.
- [17] R. Wrobel, “A technology overview of thermal management of integrated motor drives–electrical machines,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 29, p. 101222, 2022.
- [18] Z. Wang, J. Li, C. Hu, X. Li, and Y. Zhu, “Hybrid energy storage system and management strategy for motor drive with high torque overload,” *Journal of Energy Storage*, vol. 75, p. 109432, 2024.

บทความวิจัย (Research Article)

- [19] L. T. Siow, J. R. Lee, E. H. Ooi, and E. Von Lau, “Application of graphene and graphene derivatives in cooling of photovoltaic (PV) solar panels: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 193, p. 114288, 2024.
- [20] R. Mott, *Machine Elements in Mechanical Design*, Pearson, 2014.
- [21] M. Aishwarya and R. M. Brisilla, “Design of energy-efficient induction motor using ANSYS software,” *Results in Engineering*, vol. 16, p. 100616, 2022.
- [22] P. L. Ramos, A. P. Silva Figueiredo, D. Carvalho do Nascimento, F. Moala, and E. Flores, “Beyond regular SPC: Bridging the Cpk capability index for (a) symmetric data,” *Annals of Data Science*, vol. 12, no. 5, pp. 1607–1633, 2025.
- [23] T. H. Lin, L. C. Huang, Y. Y. Chen, L. C. Lee, and D. Y. Lin, “Implementing process capability index (Cpk) for effective product quality stabilization: The case of a lock manufacturing company,” *Sensors and Materials*, vol. 37, no. 3, pp. 1211–1223, 2025.
- [24] I. Hrvacic, “Design and implementation of SPC systems in defense industry manufacturing process,” *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 27–40, 2018.

Automated Document Management for HVAC product: An Excel VBA Approach

Arnon Lerdwongpaisan¹, Kanokwan Chuaykong¹ and Weerapat Pookkaman^{2,*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

² Information Technology and Business Innovation, Science and Social Sciences, Burapha University

*Corresponding Author: weerapat@buu.ac.th Tel: 082-4545399

(Received: August 25, 2025; Revised: October 8, 2025; Accepted: November 6, 2025)

Abstract

This study develops an automated document management system for HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) products using Excel VBA to solve problems with the current manual processes. The Manufacturing Engineering department handles over 5,000 documents for ten different product types. Each product needs five types of documents: Engineering Technical Standard (ETS), Working Standard (WS), Process Flow Chart (PFC), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and Control Plan (QPCC). The current manual system causes many problems such as taking a long time to process documents, making mistakes when entering data, and having trouble finding documents when needed. The objectives of this research are to develop a document management system for the master list of HVAC products using Excel VBA and to reduce data processing time, minimize errors, and prevent data loss in the manufacturing engineering department. The research applied the ADDIE model (Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation) as a systematic framework for application development design. The new VBA-based system automatically handles data entry, tracks document revisions, creates hyperlinks, and provides search functions. This system effectively eliminates repetitive manual processes and reduces errors, while improving document accessibility and data accuracy. During the evaluation process, the system was tested in a real working environment, focusing on measuring document processing time and data accuracy. The results show significant improvements: processing time dropped by over 60%, data accuracy improved from 95% to 100%, and lost documents were eliminated. These results prove that Excel VBA is an effective and affordable solution for improving document management in companies.

Keywords: Excel VBA, ADDIE Model, Master List, Document Automation, Quality Control

Please cite this article as: A. Lerdwongpaisan, K. Chuaykong and W. Pookkaman, "Automated Document Management for HVAC product: An Excel VBA Approach," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 29-44, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. Introduction

In the automotive industry, the document storage system for HVAC products plays a crucial role in quality control and supporting production processes. Currently, the Manufacturing Engineering Department is responsible for managing documents related to more than 10 types of products. Each product is associated with five key types of documents, namely the Engineering Technical Standard (ETS), Working Standard (WS), Process Flow Chart (PFC), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and Control Plan (QPCC).

However, the existing document storage system, which relies on Microsoft Excel, has several limitations, particularly in terms of complexity in recording and retrieving information. The process of creating and maintaining the Master List, which keeps a record of document revisions, is performed manually.

Normally, the process of registering a new document involves 19 steps and takes an average of 6 Minutes per document, while modifying an existing document involves 17 steps and takes an average of 2 Minutes per document. The processing time varies depending on the document type and the number of revisions required.

Manual data entry in the current system presents several risks, such as incorrect hyperlinking to the latest document versions, misplacement of revision details, or errors in recording the document's effective date.

These issues lead to delays in verification, particularly when retrieving historical documents that have been replaced or archived. Additionally, the Quality Department must manually duplicate and circulate documents for approval and signature. Once approved, documents are stored as Excel and PDF files in the Document Control Center, with older versions being deleted. As a result, when customer complaints arise regarding product issues, the Manufacturing Engineering Department faces challenges in accessing past document records efficiently.

To address these challenges, this research focuses on developing an automated document storage and retrieval system using Visual Basic for Applications (VBA) in Microsoft Excel. VBA enables automated data entry, minimizes redundant manual input, enhances document hyperlinking precision, and reduces human errors. The primary objectives of this research are:

- 1) to develop a document management system for the master list of HVAC products using Excel VBA
- 2) to reduce data processing time, minimize errors, and prevent data loss in the manufacturing engineering department.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 reviews the related literature on VBA for Excel and the ADDIE model. Section 3 explains the research methodology based on the ADDIE model

บทความวิจัย (Research Article)

(figure 1), detailing the phases of Analysis, Design, Development, and Implementation. Section 4 presents the results and discussion, including the Evaluation phase of the ADDIE process. Finally, Section 5 concludes the study, outlining its limitations and providing suggestions for future research.

2. Literature Review

2.1 VBA for Excel

Visual Basic for Applications (VBA) is a programming language integrated within Microsoft Excel that allows for task automation, user interface customization, and the development of interactive systems. Research across education, engineering, and organizational domains has shown that VBA plays an important role in improving productivity, accuracy, and user engagement.

In the educational context, Ulfa and Laily [1] demonstrated that incorporating VBA into vocational accounting practice significantly improved students' ability to complete worksheets and understand accounting workflows. Bernard and Senjayawati [2] developed an Excel VBA-based game to support junior high school students in learning algebra, resulting in improved comprehension and self-confidence. Likewise, Wijaya et al. [3] applied VBA alongside a six-question cognitive theory framework to teach fractions, enabling students to engage in meaningful learning experiences and

significantly improve their conceptual understanding.

In technical and scientific domains, VBA has proven valuable in simulating and optimizing complex processes. Golman and Yermukhambetova [4] created a VBA-based simulation module for energy optimization in spray drying processes, helping chemical engineering students analyze scenarios without needing commercial simulation software. In geoscience, Li et al. [5] introduced GeoBalance, a VBA-driven tool for performing mass balance calculations, matrix operations, and Monte Carlo simulations, making it an accessible solution for geochemical modeling.

From an organizational and operational standpoint, Chaudhry et al. [6] automated a demand management system using Excel VBA, which reduced report generation time by 84.42% and eliminated human error in the Civil Aviation Authority of Pakistan. Rahayu et al. [7] demonstrated that VBA-based learning games effectively improved elementary students' decision-making skills, supporting active learning through interactive design.

Specifically in logistics operations, Klinnak [8] developed a VBA tool to calculate the maximum placement of packages on pallets, helping to reduce calculation errors, communication issues, and document loss. Moreover, Khan et al. [9] automated the material delivery time analysis report in a footwear company using Excel VBA, which

บทความวิจัย (Research Article)

resulted in a 70.86% reduction in report preparation time, improved accuracy, and enhanced productivity. The study demonstrated the practical value of VBA in logistics reporting by transforming repetitive manual tasks into a single-click solution using macros and user forms. Together, these studies reinforce that Excel VBA is a highly adaptable and efficient tool that enhances both educational and operational processes through automation, visualization, and interactive user engagement.

2.2 ADDIE Model

The ADDIE model, which consists of five sequential phases including Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation, has been widely adopted as a structured framework for developing functional and educational applications. It is recognized for supporting a systematic, step-by-step development process that aligns application features with user needs and learning objectives. In addition, its iterative nature enables continuous refinement based on user feedback and testing, which is essential for ensuring relevance, usability, and overall effectiveness.

Many researchers have applied the ADDIE model in a variety of ways to guide the development of applications that are both technically robust and user focused. For example, Mardianto et al. [10] and Zulkifli et al. [11] applied the model in the development of game-based learning tools

for Islamic education and early childhood learning, respectively. Their use of the model demonstrated how the initial phases, particularly the Analysis and Design stages, help define user profiles and structure relevant content. Meanwhile, the later phases ensure usability and engagement through testing, implementation, and iterative improvement. Likewise, Aydin et al. [12] and Samsudin et al. [13] employed the model in the development of mobile health and assistive applications, highlighting the value of detailed user analysis, multimedia integration, and structured evaluation. These studies emphasize the importance of formative feedback in refining application features to meet the needs of specific user groups, such as patients in recovery or individuals with special learning needs. Furthermore, Razali and Shahbodin [14] applied the ADDIE model to develop a project-based collaborative learning platform, demonstrating the model's ability to support structured content delivery, interactive design, and ongoing evaluation to enhance learning experiences.

In summary, the ADDIE model provides a comprehensive and adaptable framework for application development. It ensures that each phase of the process supports clear objectives, structured execution, and responsiveness to user needs. This makes it particularly suitable for developing interactive tools such as Excel VBA applications, where both usability and effectiveness are key to success.

บทความวิจัย (Research Article)

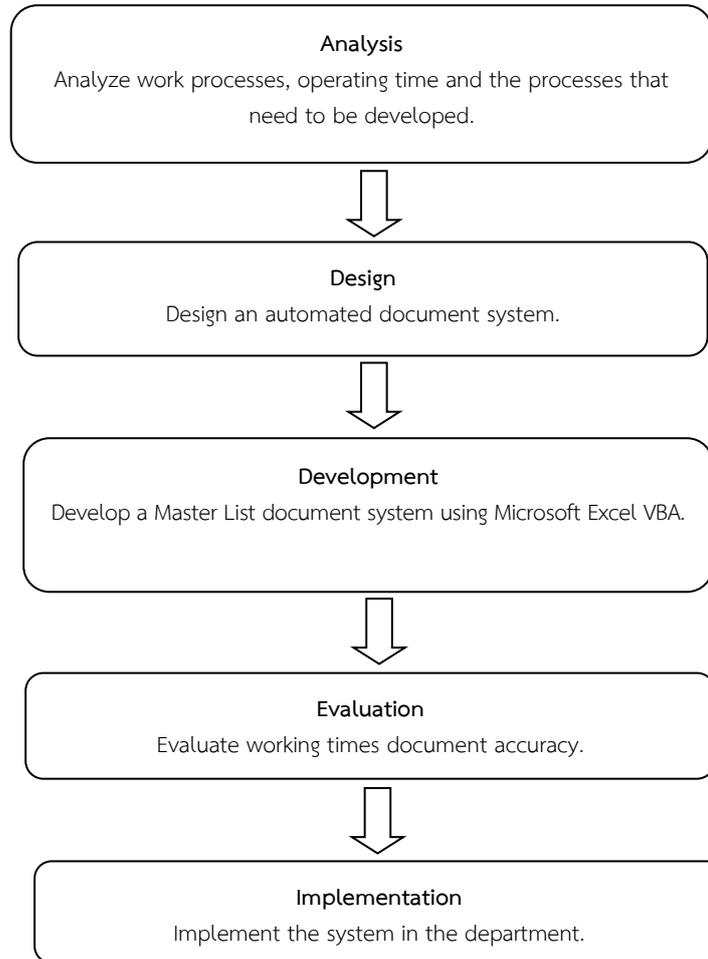


Figure 1. ADDIE Model

Table 1: Total number of new registration documents and edited documents

Products	Total number of new registration documents (copy)	Total number of edited documents (copy)	Total documents (copy)	Average time (minute/copy)
Blower	374	1,222	1,596	4.37
Evaporator	222	966	1,188	3.80
Heater	235	696	931	4.28
Heater Core	91	484	575	4.34
Injection Case	73	191	264	3.65
Slide Door	39	93	132	4.17
Rear Cooler	26	90	116	4.14
Ultra Tube Evaporator	39	69	108	3.98
Intake	15	77	92	4.02
Tube Sheet	30	47	77	4.16
Total	1,144	3,935	5,079	40.91

3. Research Methodology

The development of a data storage method for refrigeration products using VBA in Microsoft Excel, employing the ADDIE Model. The principles are as follows: Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation. The development processes are as follows:

3.1 Analysis

Manufacturing Engineer Section stores documents for ten important products, namely: Evaporator, Heater Core, Ultra tube evaporator, Injection Case, Slide Door, Blower, Heater, Rear cooler, Intake and Tube sheet. Each product consists of five types of documents: Engineering Technical Standard (ETS), Working Standard (WS), Process Flow Chart (PFC), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and Control Plan (QPCC). All the documents serve as detailed documentation for a single product.

The product documents newly created or revised by the Manufacturing Engineering Department are the initial versions, as they must be sent to the Quality Department and authorized personnel for approval. Once the authorized personnel approved, it is saved in both Excel and PDF formats in the Document Control Center, and the old version of the file is deleted. This document will be retrieved and used again if a customer files a complaint regarding a product defect.

Previously, the Manufacturing Engineering Department addressed document retrieval

issues by creating a Master List in Excel, allowing them to see the document revision details from initiation to approval. However, the process of creating a Master List for each product was very time-consuming due to the large number of documents and complexity of the steps involved. This led to errors in data entry and document searching caused by human error. The usual workflow involved manually copying data and creating hyperlinks for both Excel and PDF files, resulting in a complicated, time-consuming, and error-prone search process. Based on calculations, employees spend approximately 4 Minutes per document totaling around five thousand documents for the five main products. As shown in Table 1, this amounted to roughly 333 hours in total. This clearly shows that the company has spent a significant number of resources managing these documents manually.

Based on the data from table 1, we chose the products for Master List document system development using the Pareto principle. From the analysis, the total number of documents and the processing time were categorized by product type. It showed that the Blower product took the longest amount of time to process, accounting for 33 %, which falls into Class A of Pareto. Nevertheless, the researcher developed the document systems for Evaporator, Heater, Heater Core, and Injection Case, which falls into Class B. Altogether, these account for a cumulative percentage of 90 percent of the issues

บทความวิจัย (Research Article)

related to data storage in Master List, as shown in Figure 2.

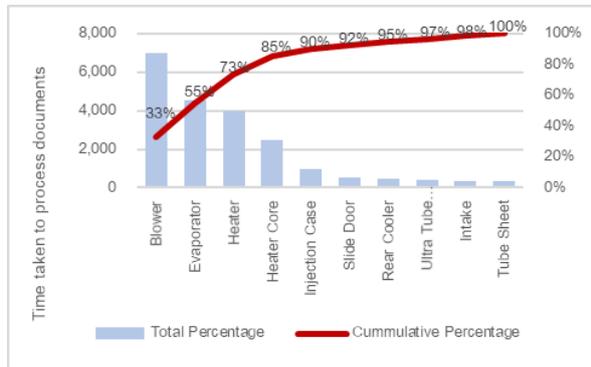


Figure 2. Pareto chart of the time required to process documents.

3.2 Design

Based on the document issues, we developed a document management system with Master List using Microsoft Excel VBA. The program automates the creation of the Master List, guiding users to input data as specified by the system. The design results show that this approach reduces redundant tasks, minimizes data entry errors, and prevents issues related to missing documents during searches.

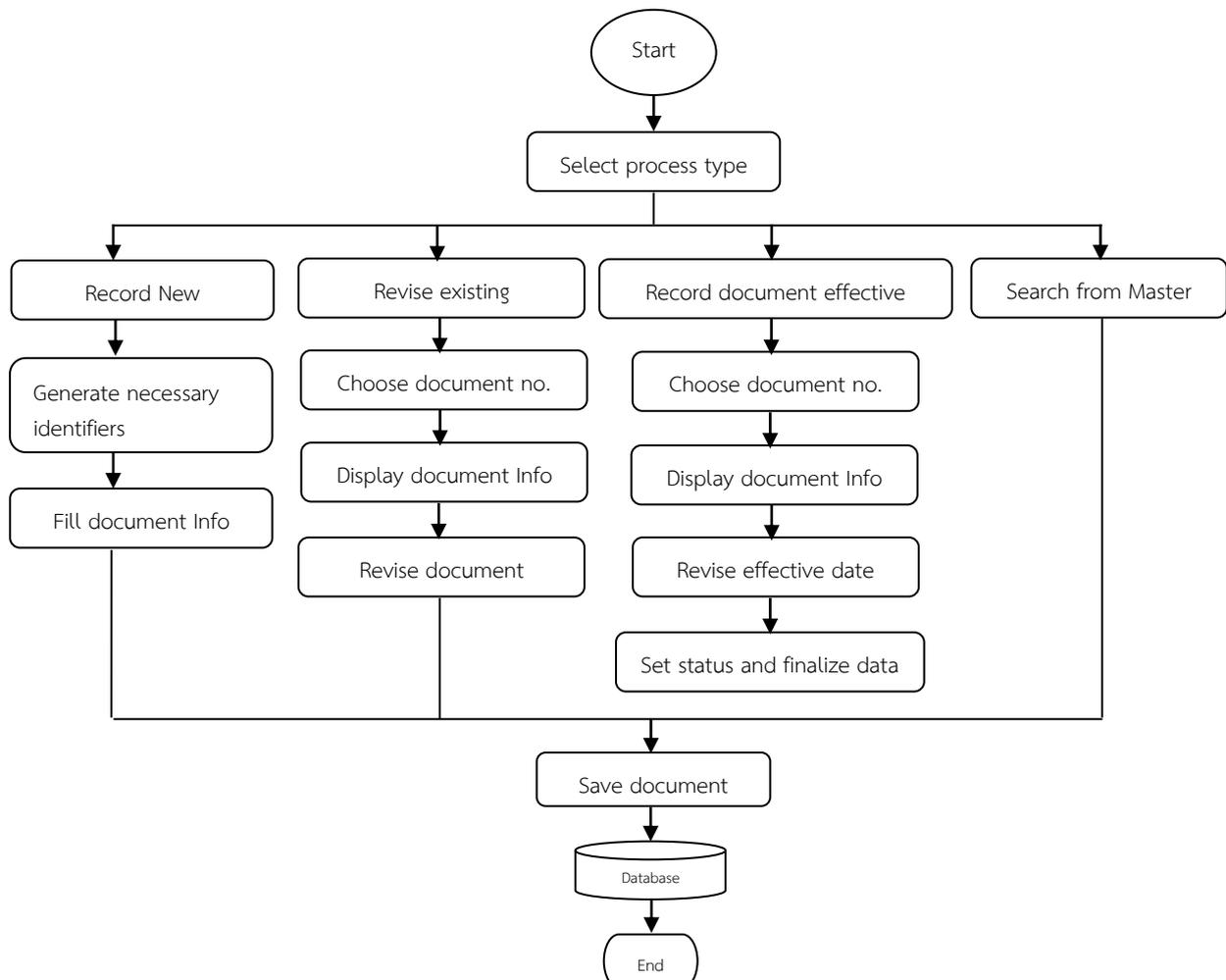


Figure 3. The Master List system workflow

บทความวิจัย (Research Article)

An example of the program’s operation: When a user opens the file, the program prompts the user to select the document type they want. If the user chooses to record a new document, the program automatically displays the document number and revision count. The user then fills in the required information, after which the program automatically adds the data to the database table and highlights the data. If the user chooses to record a document revision, the program asks the user to select the document number, then automatically displays the relevant data. After the user inputs the updated document details, the program again adds the data to the database table and highlights it automatically. The program is designed for user convenience and to minimize human error, the process is as shown in Figure 3.

3.3 Development

After designing the Master List document storage process using Microsoft Excel, as shown in Figure 3, we developed a main menu categorized into five document types. When the user launches the program, it will open a menu consisting of the five types of documents: ETS, WS, PFC, FMEA, and QPCC as shown in Figure 4.

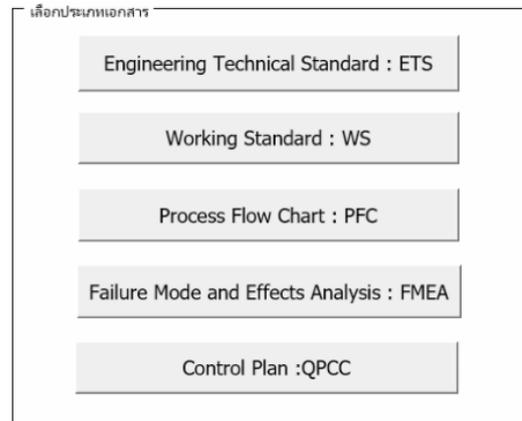


Figure 4. Main Menu in Master List documents system

After choosing the desired document, the menu will then display another menu consisting of four options: Record new document, Revise existing documents, Record document effective date, and Search from Master List. In case of Recording new document, the system will display a window for entering new document information, which consists of: First, Master List (No.), Second, Document No., Third, Model, Fourth, Revisions, Fifth, Document Name, Sixth, Equipment, and Lastly, Seventh, Revision Record. After inputting all data, it will be automatically saved into Master List, simultaneously displaying a screen to enter additional information.

In the case of document revising, the system will display a window for saving the revised document information, along with retrieving the previously saved data for modification, as shown in Figure 5.

บทความวิจัย (Research Article)

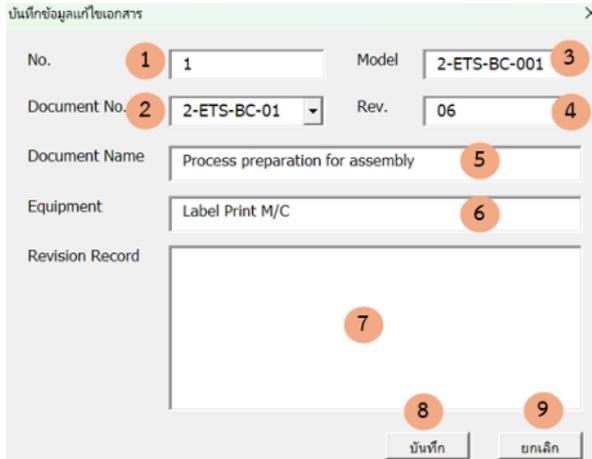


Figure 5. Revising document window

Once the data has been edited and saved. The system will automatically perform the following actions:

First, Delete the Excel file data that was previously hyperlinked from the earlier revision count. Second, Remove the remark data for the establishment. Third, Copy the previous document revision data (Rev.) including the Document Name and Equipment, and display the revision record results. Lastly, highlight incomplete data in yellow, as shown in Figure 6.

Document No.	Link Excel	Link PDF	Model	RI	Document Name	Equipment	Revision Record	Issue by	Effective Date	Register Status	Remark
78	2-ETS-BC-078	No Data		00	Process preparation for assembly	Piping sensor	New Release	C.Thanavut	27 Oct 20	OK	
		2-ETS-BC-078		01	Process preparation for assembly	Piping sensor	Change company name from Marelli to Marelli cabin comfort	C.Thanavut	15 Jan 21	OK	
				02	Process preparation for assembly	Piping sensor	Change company name MCCT to High Marelli	C.Thanavut	4 Jan 22	OK	
				03	Process preparation for assembly	Piping sensor	xxxxxxxxxxxx				

Figure 6. Results of revising document data

In the case of recording document effective date, the system will display a window for entering the document's effective date, which consists of two sections, as shown in Figure 7.

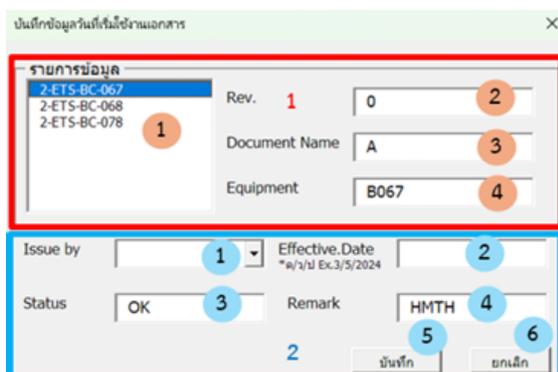


Figure 7. Record documents effective date

The data list section consists of four boxes. First, Document No., which indicates records with incomplete information. When a user selects a document number, the program will automatically fill up the subsequent fields (Revision Number (Rev.), Document Name, and Equipment) to reduce the risk of entering information for the wrong document. This automatic display function helps enhance data accuracy and streamlines the document entry process.

The document effective date entry section consists of six components. First, Issue by, where users can select a name from the list. Second, Effective Date, which must be entered in the MM/DD/YYYY format.

บทความวิจัย (Research Article)

Third, Status, which is automatically set to "OK". Fourth, Remark, which is also automatically displayed. Fifth and sixth are the Save and Cancel buttons, respectively.

After pressing the save button, the system will record the document's effective date and remove the yellow highlight, changing the fields color to blue: Issue by, Effective Date, Status, and Remark in Figure 8.

	Issue by	DC	Register	Remark
		Effective Date	Status	
Marelli	C.Thanakit	4 Jan 22	OK	
	Wachirssak	2 Mar 24	OK	H/M/T

Figure 8. Results of document effective date data recording

When a user selects the option to search from the Master List, the system will display a search window. The user can choose the desired Document No. to check. After selecting Document No., Upon clicking "OK," the program will display the corresponding document data based on the selected number, as shown in Figure 9.

Document No.	Link Excel	Link PDF	Model
	2-ETS-BC-004	2-ETS-BC-004	B02A
5 2-ETS-BC-005		No Data	B02A
	2-ETS-BC-005	2-ETS-BC-005	B02A

Figure 9. Results of searching data from Master List

3.4 Implementation

After developing the Master List document management system using Microsoft Excel VBA, we implemented the system within the production engineering department to evaluate its operational performance. The system was tested in a real working environment, where data were collected using a quantitative approach. The evaluation focused on two key aspects: the time required to complete document processing tasks and the accuracy of recorded information, to assess the overall efficiency of the system.

4. Results and Discussion (Evaluation)

In terms of program performance evaluation, the system was early tested in a real working environment by limited number of five engineers in the production department. The evaluation focused on operational performance, specifically document processing time and accuracy over a one-week period. No personal or behavioral data was collected during the process. This study was classified as internal system performance testing and aimed to assess improvements in two critical areas: the accuracy of recorded documents and the time required for document processing.

บทความวิจัย (Research Article)

Table 2: Comparison of the Document Entry Durations Before and After using the VBA System.

Document Type	Total Document	Manual operation		Using Excel VBA		Time Reduced (%)
		Time	Time	Time	Time	
		(Minutes)	(Minutes/Copy)	(Minutes)	(Minutes/Copy)	
Blower	1,596	6,978	4.37	2,732	1.71	60.85
Evaporator	1,188	4,503	3.80	1,801	1.52	60.00
Heater	931	3,982	4.28	1,553	1.67	61.00
Heater Core	575	2,495	4.34	974	1.69	60.96
Injection Case	264	964	3.65	378	1.43	60.79

4.1 Comparison of Document Entry Time in the Master List

To evaluate the efficiency of the system developed with VBA for managing production document data, this study examined the document entry process in the Master List before and after implementing the VBA system. The focus was on measuring the time required to record each type of document, as the previous manual process was inefficient and could easily lead to mistakes.

Table 2 presents a comparison of the time required to record data into the Master List system for five types of product documents, before and after implementing Excel VBA. The data were based on actual document entries in the system.

After applying the VBA-based system, the time needed for data entry decreased significantly across all document categories. For instance, Blower documents, the most numerous with 1,596 entries, saw their

average input time reduced from 4.37 Minutes to 1.71 Minutes per document, a 60.85% reduction. The Heater category showed the greatest improvement at 61.00%, while Injection Case, despite having the fewest number of entries, still achieved a 60.79% reduction.

The results show that the developed Excel VBA system significantly improved data entry efficiency by automating repetitive tasks. The system was programmed to automatically execute and verify document records, helping users handle many documents efficiently. This not only reduced workload but also enhanced the reliability and speed of the overall document management process. Which is consistent with the studies by Chaudhry et al. [6] and Kalwar et al. [15], stating that VBA facilitates automation in operations, resulting in reduced working time and improved human performance.

บทความวิจัย (Research Article)

4.2 Comparison of Data Accuracy and Lost Documents from the Master List

In terms of program performance evaluation, this study conducted quantitative data collection on the accuracy of document recording and the occurrence of lost documents before and after implementing the VBA-based system for recording data in the Master List, as shown in Table 3.

Based on the data in Table 3, it was found that prior to the improvement of the system, the average accuracy of document recording was approximately 95%, while the average rate of lost documents was around

2%. Notably, the Blower document type had the highest rate of lost documents. After the implementation of the Excel VBA, all document types achieved 100% accuracy, and the rate of Lost documents dropped to 0%. This clearly shows the effectiveness of using Excel VBA in significantly reducing errors and enhancing the efficiency of document storage and retrieval. This result is consistent with the studies by Khan et al. [9] and Kalwar et al. [16], which found that using Excel VBA can improve the accuracy of document storage and recording to 100%.

Table 3: Comparison of Errors in Document Recording and Retrieval from the Master List

Document Type	Total Document	Before Improvement		After Improvement	
		Accuracy (%)	Lost Document (%)	Accuracy (%)	Lost Document (%)
Blower	1,596	95.24	2.85	100	0
Evaporator	1,188	94.36	1.53	100	0
Heater	931	98.28	1.78	100	0
Heater Core	575	94.26	2.04	100	0
Injection Case	264	94.70	0.00	100	0

5. Conclusion and Future work

This research aimed to develop an efficient document management system for the Master List of refrigeration products by using Excel VBA, focusing on improving document processing times, reducing errors, and eliminating lost documents. Quantitative

evaluation results clearly demonstrate the effectiveness of the VBA-based system. The results show a significant reduction in the time required to enter each document, from approximately 4 Minutes to just 1.6 Minutes per document. This represents a reduction of

บทความวิจัย (Research Article)

more than 60 percent compared to the previous manual method.

The Cost–Benefit Analysis conducted to assess the economic feasibility from an industrial engineering perspective based on the reduction in document processing time from 4 Minutes to 1.6 Minutes per document demonstrates a significant improvement in operational efficiency. This reflects a time saving of 2.4 Minutes per document. Assuming a labor cost of 1 baht per minute, this time reduction translates into a labor cost saving of approximately 2.4 baht per document. With an estimated volume of 10,000 documents processed annually, the total cost savings would amount to 24,000 baht per year.

Furthermore, the implementation of the VBA system significantly improved the accuracy of data recording, increasing from an average of about 95 percent to 100 percent. It eliminated the problem of lost documents, which occurred at around 2 percent when using manual recording. These findings highlight the strong potential and practical benefits of using Excel VBA as a reliable tool for improving document management. It helps achieve better efficiency, higher accuracy, and easier access to information. These results demonstrate that even simple tools like Excel VBA can bring industry-grade improvements in document control.

This research is only the first phase in the design and validation of an automated

program for managing Master List documents. It is currently limited to trials conducted by engineers within the relevant department. However, the developed program will be implemented in other departments to increase the number of users and the duration of actual usage. Further development may be required, incorporating feedback from a more diverse group of users and evaluating user satisfaction. In subsequent phases of the research, it may be necessary to obtain research ethics approval to collect evaluation data. In addition, statistical methods may be employed to support the analysis in order to enhance academic credibility.

Future research may also consider connecting the VBA-based system with cloud storage or database platforms such as Microsoft Access or SharePoint. This could enhance data accessibility, support real-time collaboration, and improve version control, making the system more practical and scalable for broader organizational use.

Using Excel VBA for document management within an organization can be a cost-effective solution, as it requires low investment and allows for customized functions tailored to specific needs without the complexity of large-scale systems. It is particularly suitable for organizations already relying on Excel as a primary tool, enabling quick and easy implementation. However, Excel VBA may not be ideal for handling large volumes of data or for organizations that require high system stability and

บทความวิจัย (Research Article)

scalability in the long term. In contrast, Document Management Systems (DMS) are specifically designed for structured document control, offering features such as version control, access permissions, and audit trails, which enhance security and organization. ERP systems, on the other hand, are more suitable for large organizations aiming to integrate various business processes into a unified platform. While ERP solutions often involve high implementation and maintenance costs, they provide comprehensive and systematic management capabilities. Cloud-based solutions have become increasingly popular among modern organizations due to their flexibility, allowing access from any device, real-time collaboration, and scalable usage. However, concerns regarding data privacy and reliance on continuous internet connectivity remain potential limitations.

6. Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies

The authors were responsible for all main research processes, including literature review, research methodology design, system development, data collection, and analysis of results. Artificial intelligence (AI) tools were used only to assist with checking and improving the English language of the manuscript. After receiving suggestions from the AI, the authors thoroughly reviewed and revised all content to ensure accuracy, clarity, and consistency with the research objectives.

The authors take full responsibility for the content of this publication.

7. References

- [1] A. F. Ulfa and N. Laily, “VBA (Visual Basic for Applications) based learning media development in accounting practice learning,” *Journal of Accounting and Business Education*, vol. 7, no. 2, pp. 25–40, 2023.
- [2] M. Bernard and E. Senjayawati, “Developing the students’ ability in understanding mathematics and self-confidence with VBA for Excel,” *Journal of Research and Advances in Mathematics Education*, vol. 4, no. 1, pp. 45–56, Jan. 2019.
- [3] T. T. Wijaya, Z. Zulfah, A. Hidayat, P. Akbar, W. Ariani, and I. Asyura, “Using VBA for Microsoft Excel based on 6-questions cognitive theory in teaching fraction,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1657, no. 1, p. 012078, 2020.
- [4] B. Golman and A. Yermukhambetova, “An Excel VBA-based educational module for simulation and energy optimization of spray drying process,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 27, no. 5, pp. 1103–1112, Sep. 2019.
- [5] X. Li, C. Zhang, R. R. Almeev, and F. Holtz, “GeoBalance: An Excel VBA program for mass balance calculation in

บทความวิจัย (Research Article)

- geosciences,” *Geochemistry*, vol. 80, no. 2, p. 125629, May 2020.
- [6] A. K. Chaudhry, M. A. Kalwar, M. A. Khan, and S. Shaikh, “Improving the efficiency of small management information system by using VBA,” *International Journal of Science and Engineering Investigations*, vol. 10, no. 111, pp. 7–13, Apr. 2021.
- [7] G. Rahayu, H. Arga, D. Altaftazani, and M. Bernard, “Effect of VBA learning media to improve students’ decision-making skill of elementary school,” in *Proceedings of the 2019 Ahmad Dahlan International Conference Series on Education & Learning, Social Science & Humanities (ADICS-ELSSH 2019)*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 42–46.
- [8] N. Klinnak, “Application of VBA package to calculate the maximum placement of product packages on a pallet: Case study of the Government Pharmaceutical Organization,” B.B.A. thesis, Dept. Logistics and Supply Chain Management, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2023.
- [9] M. A. Khan, M. A. Kalwar, and A. K. Chaudhry, “Optimization of material delivery time analysis by using Visual Basic for Applications in Excel,” *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 89–100, Jul. 2021.
- [10] M. Mardianto, H. Matsum, and D. Sarmita, “Development of ADDIE model for chapter *thaharah* learning based on game applications in junior high school,” *Nazhruna: Jurnal Pendidikan Islam*, vol. 5, no. 2, pp. 543–554, May 2022.
- [11] N. N. Zulkifli, Y. Zhang, A. F. M. Ayub, and N. R. C. Nawi, “From analysis to creation: Utilizing the ADDIE model for developing an educational game for children,” in *The Asian Conference on Education 2023*, Tokyo, Japan, 2023, pp. 1841–1851.
- [12] A. Aydin, A. Gürsoy, and H. Karal, “Mobile care app development process: Using the ADDIE model to manage symptoms after breast cancer surgery,” *Discover Oncology*, vol. 14, no. 63, May 2023.
- [13] M. R. Samsudin, R. Sulaiman, T. T. Guan, A. M. Yusof, and M. F. C. Yaacob, “Mobile application development through ADDIE model,” *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, vol. 10, no. 2, pp. 1017–1027, Jun. 2021.
- [14] S. N. Razali and F. Shahbodin, “The development of online project-based collaborative learning using ADDIE model,” *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, vol. 195, pp. 1803–1812, Jul. 2015.
- [15] M. A. Kalwar, M. A. Kalwar, M. A. Khan, A. K. Chaudhry, and S. Shaikh, “Automation of order costing analysis by using Visual Basic for Applications in Microsoft

บทความวิจัย (Research Article)

Excel,” *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 29–59, Jan. 2022.

- [16] M. A. Kalwar, M. A. Kalwar, M. A. Khan, A. K. Chaudhry, and S. Shaikh, “Automation of production plan generating workbook at leather footwear company of Lahore, Pakistan, by using VBA in Microsoft Excel,” *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 111–129, Jun. 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้า ในการปรับปรุงการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน

วีรชัย มัฏฐารักษ์^{1,*} ศรียรรณ ขำตรี² และ จันทโรทัย พรหมจันทร์³

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

² สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

³ พนักงานบริษัท ที.ซี.กรุ๊ป จำกัด

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: weerachai.ma@skru.ac.th โทรศัพท์: 081-9697033

(รับบทความ: 9 สิงหาคม 2568; แก้ไขบทความ: 5 ธันวาคม 2568; ตอรับบทความ: 12 ธันวาคม 2568)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าก่อนและหลังการปรับปรุงการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน กลุ่มตัวอย่างเป็นพนักงานจำนวน 3 คน ประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี Rapid Upper Limb Assessment (RULA) และ Rapid Entire Body Assessment (REBA) และประเมินความเหนื่อยล้าด้วยแบบสอบถามความเหนื่อยล้าจากการทำงาน ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยคะแนน RULA ลดลงจาก 10.00 เป็น 7.00 และค่าเฉลี่ยคะแนน REBA ลดลงจาก 13.00 เป็น 6.67 แสดงให้เห็นว่าระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง หลังการปรับปรุงการทำงาน ค่าเฉลี่ยระดับความเหนื่อยล้าลดลงจาก 6.32 เป็น 4.80 การทดสอบทางสถิติด้วย t-test แบบกลุ่มตัวอย่างสัมพันธ์กัน พบว่าคะแนน RULA และ REBA ก่อนและหลังการปรับปรุงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เช่นเดียวกับคะแนนด้านลักษณะของความอ่อนล้า ความรู้สึกมีพลัง และค่าเฉลี่ยด้านความรู้สึกรวม ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงการทำงานตามหลักการยศาสตร์สามารถช่วยลดทั้งความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าของพนักงานได้ สำหรับการศึกษาในอนาคตควรมีการเก็บข้อมูลการบาดเจ็บเฉพาะส่วนของร่างกาย การเกิดอุบัติเหตุ และการขาดงานพร้อมสาเหตุ เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในการปรับปรุงการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ความเหนื่อยล้า การปรับปรุงการทำงาน โรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน

การอ้างอิงบทความ: วีรชัย มัฏฐารักษ์, ศรียรรณ ขำตรี และ จันทโรทัย พรหมจันทร์, "การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการปรับปรุงการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 45-61, 2569.

Comparison of Ergonomic Risks and Fatigue in Improving the Performance of Smoked Rubber Sheet Factory Employees

Weerachai Madtharak^{1,*}, Sriwan Khamtree² and Jantarotai Promjan³

¹ Major of Industrial Management, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

² Major of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

³ Employee of T.C. Group

*Corresponding Author: weerachai.ma@skru.ac.th, Tel: 081-9697033

(Received: 9 August 2025; Revised: 5 December 2025; Accepted: 12 December 2025)

Abstract

This study aimed to compare ergonomic risk and fatigue before and after work improvement among workers in a rubber smoked sheet factory. The sample consisted of three workers. Ergonomic risk was assessed using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) and the Rapid Entire Body Assessment (REBA), while fatigue was evaluated using a standardized fatigue questionnaire. The results showed that the mean RULA score decreased from 10.00 to 7.00, and the mean REBA score decreased from 13.00 to 6.67 after the ergonomic work improvement, indicating reduced levels of ergonomic risk. In addition, the mean fatigue score decreased from 6.32 to 4.80. Paired t-tests revealed that the RULA and REBA scores before and after the work improvement were significantly different at the 0.05 level. Similarly, the fatigue subscales, namely fatigue characteristics, perceived vigor, and overall feeling, also showed statistically significant differences at the 0.05 level. These findings indicate that ergonomic work improvement in rubber smoked sheet processing can reduce both ergonomic risk and work-related fatigue among workers. Future studies should include records of injuries in specific body regions, accidents, and absenteeism with their causes to support more comprehensive data analysis and application of the findings to improve work efficiency.

Keywords: Ergonomic Risk, Fatigue, Work Improvement, Rubber Smoked Sheet Factory

Please cite this article as: W. Madtharak, S. Khamtree and J. Promjan, "Comparison of Ergonomic Risks and Fatigue in Improving the Performance of Smoked Rubber Sheet Factory Employees," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 45-61, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

สภาพแวดล้อมในการทำงานสามารถส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพ ความเหนื่อยล้า ความปลอดภัย และประสิทธิภาพการทำงานของพนักงาน แนวคิดด้านการเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรมให้ความสำคัญกับทั้งประสิทธิภาพการทำงานและปัจจัยทางจิตวิทยาของผู้ปฏิบัติงาน โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการทำงาน การวัดผลงาน และการลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็น เช่น ความสูญเสียจากการเคลื่อนไหว (Movement Waste) ซึ่งเป็นหนึ่งในความสูญเสีย 7 ประการ (7 Wastes) ควบคู่กับการพิจารณาความปลอดภัยและความเหนื่อยล้าจากการทำงาน แนวคิดเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาศาสตร์ด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) ที่มุ่งเน้นการจัดสภาพการทำงานให้เหมาะสมกับคน เพื่อลดความเสี่ยงด้านสุขภาพและเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรม

การยศาสตร์เป็นศาสตร์ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคนกับสภาพแวดล้อมในการทำงาน การออกแบบหรือปรับปรุงงานให้เหมาะสมกับสรีระและขีดความสามารถของพนักงานช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และส่งผลให้พนักงานมีสุขภาพกายและใจที่ดี รายงานสถานการณ์การประสบอันตรายหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงานในปี พ.ศ. 2565 พบว่ามีลูกจ้างประสบอันตรายจำนวน 76,478 คน หรือคิดเป็นอัตราการประสบอันตรายทุกความรุนแรงร้อยละ 6.55 รายต่อพันราย [1] การปรับปรุงสภาพการทำงานตามหลักการยศาสตร์ในสถานประกอบการของประเทศไทยจึงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสำคัญ ทั้งในระดับโรงงานและระดับชุมชน เพื่อสนับสนุนการสร้างสุขภาวะที่ดีและความเข้มแข็งของฐานการผลิตแรงงาน

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกประมาณ 22 ล้านไร่ [2] และมีการจัดตั้งโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันในรูปแบบสหกรณ์กองทุน

สวนยางกระจายอยู่ทั่วประเทศ ตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดมาตรฐานการผลิตยางแผ่นรมควันตามพระราชบัญญัติมาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551 ได้กำหนดแนวทางการปฏิบัติที่ดีสำหรับการผลิตยางแผ่นรมควันหลายประการ ซึ่งรวมถึงประเด็นด้านความปลอดภัยและปัจจัยทางการยศาสตร์ของผู้ปฏิบัติงานโดยตรง กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควันมีลักษณะงานที่ต้องยก แยก เคลื่อนย้ายแผ่นยางที่มีน้ำหนักมาก ทำงานซ้ำ ๆ ในท่าเดิม และทำงานในสภาพแวดล้อมที่ร้อนและชื้น จึงมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเมื่อยล้าและความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูก

กรณีศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันของสหกรณ์กองทุนสวนยางในตำบลไม้เรียง อำเภอฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดที่มีจำนวนโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันสูงสุดจำนวน 96 แห่ง โรงงานแห่งนี้เปิดดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537–2538 และมีการผลิตอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน มีกำลังการผลิตไม่ต่ำกว่าวันละ 3,000 แผ่น และมีพนักงานในแผนกผลิตไม่น้อยกว่า 8 คน ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงโรงงานขนาดกลางในระดับชุมชนที่มีรูปแบบการดำเนินงานใกล้เคียงกับโรงงานสหกรณ์กองทุนสวนยางแห่งอื่น ๆ ทั่วประเทศ จึงเป็นบริบทที่เหมาะสมในการศึกษาและพัฒนาต้นแบบการปรับปรุงสภาพการทำงานตามหลักการยศาสตร์

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานจำนวนมากที่ศึกษาปัญหาสุขภาพของแรงงานในอุตสาหกรรมยางพารา ทั้งในส่วนของเกษตรกรและพนักงานโรงงาน เช่น ปัญหาความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูก ความเหนื่อยล้าจากการทำงาน และอุบัติเหตุจากการทำงาน อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่เน้นการสำรวจปัญหาสุขภาพหรือประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์เพียงช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่ง หรือมุ่งศึกษาเพียงตัวแปรด้านความเสี่ยงหรือความเหนื่อยล้าแยกจากกัน ยังไม่พบงานวิจัยที่มุ่งเปรียบเทียบ

บทความวิจัย (Research Article)

ระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์และระดับความเหนื่อยล้าก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพการทำงานตามหลักการยศาสตร์ในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันระดับสหกรณ์อย่างเป็นระบบ จากองค์ความรู้ดังกล่าวเป็นประเด็นที่มีความสำคัญต่อการออกแบบมาตรการป้องกันและปรับปรุงงานในโรงงานยางแผ่นรมควันของชุมชน

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการปรับปรุงงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าและความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในการทำงานของพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน ตำบลไม้เรียง อำเภอฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์และระดับความเหนื่อยล้าก่อนและหลังการปรับปรุงการทำงาน ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะสามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับการออกแบบหรือปรับปรุงสภาพการทำงานในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันของสหกรณ์กองทุนสวนยางแห่งอื่น ๆ ต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศาสตร์ด้านจิตวิทยาอุตสาหกรรมและการยศาสตร์มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากต่างมุ่งศึกษาพฤติกรรมการทำงาน และปัจจัยด้านมนุษย์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน สุขภาพ และความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์จึงเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยให้สถานประกอบการสามารถระบุและจัดการปัจจัยเสี่ยงได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ก่อนนำไปสู่การบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยจากการทำงาน สกอล ซีระวรวิญญู [3] อธิบายว่า การประเมินทางการยศาสตร์เพื่อการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่มุ่งสร้างนวัตกรรมควรดำเนินไปอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การทดลอง ออกแบบ ทดสอบ จนถึงการนำผลการประเมินกลับมาปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยครอบคลุมทั้งภาระงานทางกาย (Physical Workload) และ

ภาระงานทางจิตใจ (Mental Workload) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับภาวะความเหนื่อยล้าในการทำงาน

ความเหนื่อยล้าจากการทำงานมีความเกี่ยวข้องกับชั่วโมงการทำงานที่ยาวนาน ภาระงานสูง และการจัดองค์กรที่ไม่เอื้อต่อการฟื้นตัว ส่งผลให้ความผิดพลาดในการทำงาน อุบัติเหตุ และการบาดเจ็บจากการทำงานมีแนวโน้มสูงขึ้น [4] ความเหนื่อยล้าเป็นภาวะหลายมิติ ทั้งทางกาย อารมณ์ และการรับรู้ จึงต้องอาศัยเครื่องมือประเมินทางอ้อม เช่น แบบสอบถาม รายงานตนเองและตัวชี้วัดทางสรีรวิทยา แม้แต่ละเครื่องมือมีข้อจำกัดด้านความเชื่อมั่น ความเอนเอียงจากการรายงานตนเอง และความเหมาะสมกับบริบทอาชีพ [5] แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการติดตามภาวะความเหนื่อยล้าเชิงระบบ เมื่อใช้ควบคู่กับข้อมูลด้านภาระงานและสภาพแวดล้อมในการทำงาน

ในด้านความเสี่ยงทางการยศาสตร์และปัญหา ระบบกล้ามเนื้อและกระดูก (Musculoskeletal Disorders: MSDs) งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่าท่าทางการทำงานที่ไม่เหมาะสมและการเคลื่อนไหวซ้ำ ๆ เป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่อาการปวดเมื่อยและโรคระบบกระดูกและกล้ามเนื้อในแรงงานอุตสาหกรรมและแรงงานชุมชน สุชาติรัตน์ บุญหล้า และ สุนิสา ชายเกลี้ยง [6] ศึกษาพนักงานอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดย่อมด้วยแบบสอบถามอาการไม่สุขสบายและการประเมินท่าทางการทำงานด้วย REBA และ RULA พบว่าพนักงานส่วนใหญ่มีอาการไม่สุขสบายของระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ และมีระดับความเสี่ยงที่ควรปรับปรุงสถานงานโดยเร่งด่วน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าการใช้ REBA และ RULA สามารถระบุท่าทางเสี่ยงสูงและเชื่อมโยงกับความชุกของ MSDs ได้อย่างมีนัยสำคัญ [7,8]

ในกลุ่มแรงงานหัตถกรรมชุมชน รัชณี จุมจี และคณะ [9] ศึกษาการจัดการความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของแรงงานผู้สูงอายุที่ทำงานจักสานไม้ไผ่

บทความวิจัย (Research Article)

พบว่า การปรับสภาพการทำงานให้เหมาะสมกับข้อจำกัดทางกายภาพช่วยลดระดับความเสี่ยงได้อย่างชัดเจน ขณะที่ ขนินชฐา มีวาสนา และคณะ [10] ศึกษาแรงงานทำไม้กวาดดอกหญ้า และเสนอการปรับปรุงสถานี่งานและท่าทางการทำงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดภาระต่อระบบกล้ามเนื้อและกระดูก แสดงให้เห็นว่าการประเมินและปรับสภาพงานตามหลักการยศาสตร์สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและงานหัตถกรรม โดยเฉพาะกลุ่มแรงงานที่มีความเปราะบางทางกายภาพ นอกจากนี้ แนวโน้มการใช้เครื่องมือประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในช่วงปี พ.ศ. 2556–2565 โดย จิตรลดา กิตติจารุวัฒนา และคณะ [7] ยังยืนยันว่า RULA และ REBA เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ประเมินท่าทางการทำงานและความเสี่ยงต่อ MSDs อย่างแพร่หลายในกลุ่มแรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม

สำหรับแรงงานที่เกี่ยวข้องกับการปลูกและแปรรูปยางพารา งานวิจัยรายงานว่ามีความเสี่ยงด้านการยศาสตร์และปัญหา MSDs อยู่ในระดับสูง โดยเฉพาะงานที่ต้องกรีดยาง แบกหาม หรือจัดการวัตถุดิบยางที่มีน้ำหนักมาก Chaiklieng [8] รายงานว่าชาวสวนยางมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกจากท่าทางการทำงานที่ไม่เหมาะสมและการทำงานซ้ำ ๆ ขณะที่ ขนินชฐา มีวาสนา และคณะ [10] ศึกษาแรงงานในกระบวนการแปรรูปยางพารา พบปัญหา MSDs หลายตำแหน่ง เช่น ปวดหลังส่วนล่างจากการยืน นั่ง หรือก้มในท่าเดิมเป็นเวลานาน รวมถึงการยกและเคลื่อนย้ายยางด้วยวิธีดั้งเดิม และชี้ว่าการศึกษิตตามหลักการยศาสตร์แบบเปรียบเทียบก่อน–หลังในกระบวนการแปรรูปยางยังมีจำกัด

ในบริบทโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน วีรชัย มัญญารักษ์ และคณะ [11] ได้ประยุกต์ใช้หลักการยศาสตร์ในการปรับปรุงงานเพื่อลดความเหนื่อยล้าของพนักงาน สะท้อนความสำคัญของการออกแบบ

กระบวนการทำงานที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมยางพาราของไทย อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่รายงานผลเชิงปริมาณทั้งในด้านความเสี่ยงทางการยศาสตร์และระดับความเหนื่อยล้าก่อนและหลังการปรับปรุงงานในโรงงานผลิตยางแผ่นยังมีจำนวนไม่มาก จึงควรให้มีการศึกษาต่อยอดอย่างเป็นระบบ

ด้านความเหนื่อยล้าจากการทำงาน งานวิจัยด้านปัจจัยมนุษย์และสุขภาพจากการทำงาน ระบุว่า ความเหนื่อยล้ามีความสัมพันธ์กับภาระงาน ความเครียดจากงาน และสภาพการจัดองค์กร เช่น ชั่วโมงทำงานที่ยาวนาน ระบบเวรหมุนเวียน และเวลาพักที่ไม่เพียงพอ ซึ่งสัมพันธ์กับความผิดพลาดในการทำงาน และผลลัพธ์ด้านความปลอดภัยที่ลดลง [4] นอกจากนี้ การศึกษากลุ่มพยาบาล พบว่า ภาวะความเหนื่อยล้าเรื้อรังและเฉียบพลันเป็นปัญหาบ่อย และได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยด้านงาน (จำนวนเวร ชั่วโมงทำงาน) และปัจจัยด้านบุคคล (สุขภาพ การนอนหลับ และภาวะสุขภาพจิต) [5,12,13] เช่น การศึกษาของ พชร ศศะนาวิน และ พรชัย สิทธิศรีณกุล [13] พบว่าชั่วโมงทำงาน ระบบเวรหมุนเวียน และภาวะสุขภาพจิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับระดับความเหนื่อยล้าของพยาบาล

ศิวิธ อารงวิศวะ และคณะ [14] รายงานว่าพยาบาลวิชาชีพมีความเหนื่อยล้าด้านอารมณ์ในระดับสูง ขณะที่ด้านการลดความเป็นบุคคลและความสำเร็จส่วนบุคคลอยู่ในระดับต่ำ โดยปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับความเหนื่อยล้าทางอารมณ์ ได้แก่ อายุงาน ความไม่สมดุลระหว่างความทุ่มเทกับผลตอบแทน และความมุ่งมั่นที่มากเกินไป เมื่อพิจารณาร่วมกับงานวิจัยที่ผสนการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ความเหนื่อยล้า และปัจจัยด้านวิถีชีวิตเข้าด้วยกัน [15] จะเห็นได้ว่าการทำความเข้าใจความเหนื่อยล้าจำเป็นต้องพิจารณาทั้งปัจจัยด้านงาน (Job-Related Factors) และปัจจัยด้านบุคคล (Individual and Lifestyle Factors)

บทความวิจัย (Research Article)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยด้านการยศาสตร์ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์และปัญหา MSDs ในกลุ่มแรงงานอุตสาหกรรมและแรงงานชุมชน ขณะที่งานวิจัยด้านความเหนื่อยล้าจากการทำงานมักศึกษาในกลุ่มวิชาชีพที่มีภาระงานสูง เช่น พยาบาล โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือหลัก ทั้ง 2 กลุ่ม มักศึกษาความเสี่ยงทางการยศาสตร์หรือความเหนื่อยล้าแยกจากกัน และเน้นการประเมินในช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่งมากกว่าการติดตามเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพการทำงานตามหลักการยศาสตร์ในบริบทโรงงานเฉพาะด้าน เช่น โรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงออกแบบให้มีการประเมินทั้งความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA และ REBA และระดับความเหนื่อยล้าจากการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุงการทำงานของพนักงานในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน เพื่อสร้างข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับการพัฒนากรอบแนวคิดและแนวทางการปรับปรุงงานตามหลักการยศาสตร์ในบริบทโรงงานระดับชุมชน

3. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาผู้วิจัยแบ่งเป็นขั้นตอนการศึกษา กลุ่มตัวอย่าง และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 ศึกษาปัญหาสุขภาพและคัดเลือกสถานงาน

สำรวจสภาพการทำงาน ของพนักงานในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน รวมถึงข้อมูลปัญหาสุขภาพจากการทำงาน และภาระงานของระบบกล้ามเนื้อ ประเมินค่าดัชนีความผิดปกติ (AI) และภาระงานต่อกล้ามเนื้อในแต่ละสถานงานและคัดเลือกสถานงานที่มีความเสี่ยงสูงสุด โดยเลือกสถานงานลำเลียงยางแผ่นซึ่งมีพนักงาน 3 ตำแหน่ง (พนักงาน

คนที่ 1 ลำเลียงยางแผ่นจากเครื่องรีด พนักงานคนที่ 2 ลำเลียงและพาดยางชั้นล่าง พนักงานคนที่ 3 ลำเลียงและพาดยางชั้นบน) เป็นสถานงานเป้าหมายในการปรับปรุงงาน

3.1.2 การประเมินสภาพการทำงานก่อนการปรับปรุงงาน

สังเกตและบันทึกภาพ วิดีโอท่าทางการทำงานของพนักงานทั้ง 3 ตำแหน่งตลอดกระบวนการลำเลียงยางแผ่นในสภาพการทำงานปกติ เลือกท่าทางการทำงานที่เป็นตัวแทนช่วงที่มีการก้ม เงย บิดตัว และใช้แรงยกหรือเคลื่อนย้ายซ้ำ ๆ เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงทางกายศาสตร์ด้วยวิธี RULA และ REBA พร้อมทั้งประเมินระดับความเหนื่อยล้าจากการทำงานของพนักงานแต่ละคนด้วยแบบประเมินความเหนื่อยล้าของ Piper โดยให้ตอบหลังเสร็จสิ้นการทำงานในช่วงเวลาที่มีภาระงานใกล้เคียงกัน

3.1.3 การออกแบบและปรับปรุงงานตามหลักการยศาสตร์และหลัก ECRS

จากผลการประเมินก่อนปรับปรุงพบว่า พนักงานคนที่ 1 มีการเอื้อมหยิบและป้อนยางแผ่นในระดับที่สูงหรือต่ำเกินไป แสดงดังรูปที่ 1 พนักงานคนที่ 2 ต้องยกและส่งต่อราวไม้ไผ่ด้วยการบิดลำตัว แสดงดังรูปที่ 2 และพนักงานคนที่ 3 ต้องปีนขึ้น-ลงและใช้แรงยกมากในการพาดยางชั้นบน แสดงดังรูปที่ 3 จึงประยุกต์ใช้หลัก ECRS ร่วมกับหลักการยศาสตร์ ได้แก่ E (Eliminate) ลดหรือขจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น เช่น ลดการปีนขึ้นชั้นบนโดยใช้เครื่องทุ่นแรงช่วยพาดยาง C (Combine) รวมขั้นตอนยกและส่งต่อราวไม้ไผ่เพื่อลดจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหว R (Rearrange) ปรับผังการจัดวางตำแหน่งยืน ระยะทางเคลื่อนย้าย และระดับความสูงของจุดรับและส่งยางให้เหมาะสมกับสรีระ ลดการก้มหรือเงยและบิดลำตัว และ S (Simplify)

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 พนักงานคนที่ 1 (ก่อนปรับปรุง)



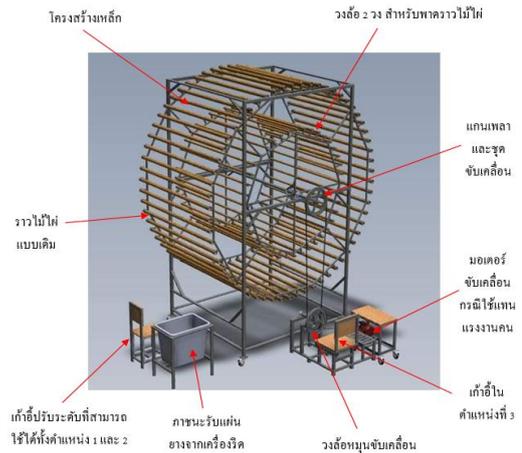
รูปที่ 2 พนักงานคนที่ 2 (ก่อนปรับปรุง)



รูปที่ 3 พนักงานคนที่ 3 (ก่อนปรับปรุง)

ออกแบบและติดตั้งชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นตามหลักการยศาสตร์ โดยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนวงล้อสำหรับช่วยยกและส่งยางไปยังตำแหน่งชั้นบน รวมทั้ง

กำหนดจุดจับและตำแหน่งวางยางให้อยู่ในช่วงการเอื้อมถึงที่เหมาะสม ผลการออกแบบจัดทำเป็นแบบร่าง และแบบชุดอุปกรณ์ลำเลียง แสดงดังรูปที่ 4 เพื่อติดตั้งและทดลองใช้งานจริง



รูปที่ 4 การนำเสนอรูปแบบสำหรับการปรับปรุงงาน

3.1.4 การดำเนินการปรับปรุงและเก็บข้อมูลหลังปรับปรุง

จากการติดตั้งชุดอุปกรณ์ลำเลียงยางแผ่นและจัดผังสถานีงานลำเลียงใหม่ตามแบบที่ออกแบบให้คำแนะนำและฝึกอบรมพนักงานทั้ง 3 คน เกี่ยวกับวิธีการทำงานในสถานีงานใหม่ ทำทางการทำงานที่เหมาะสม และการใช้เครื่องทุ่นแรงอย่างปลอดภัยเมื่อพนักงานมีความคุ้นเคยกับระบบใหม่แล้ว จึงทำการสังเกตและบันทึกภาพ วิดีโอทำทางการทำงานในสถานีงานที่ปรับปรุงแล้ว โดยทำทางการทำงานของพนักงานคนที่ 1 คนที่ 2 และคนที่ 3 แสดงดังรูปที่ 5 รูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ จากนั้นทำการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ด้วย RULA และ REBA และประเมินระดับความเหนื่อยล้าด้วยแบบประเมินของ Piper ภายหลังจากการทำงานภายใต้ภาระงานที่ใกล้เคียงกับช่วงก่อนปรับปรุง

บทความวิจัย (Research Article)

3.1.5 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงงาน

นำคะแนน RULA คะแนน REBA และคะแนนความเหนื่อยล้าจากแบบประเมินของ Piper ก่อนและหลังการปรับปรุงมาวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยสถิติทดสอบค่าที (T-Test) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05



รูปที่ 7 พนักงานคนที่ 3 (หลังปรับปรุง)



รูปที่ 5 พนักงานคนที่ 1 (หลังปรับปรุง)



รูปที่ 6 พนักงานคนที่ 2 (หลังปรับปรุง)

3.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างคือพนักงานในสถานีนงานลำเลียงยางแผ่นของโรงงานผลิตยางแผ่นรมควันแห่งหนึ่งในจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นโรงงานกรณีศึกษาตามเกณฑ์รูปแบบ พื้นที่จังหวัด ระยะเวลาโรงงานที่เปิดการผลิตอย่างต่อเนื่อง และมีจำนวนพนักงานในแผนกผลิตรวมถึงกำลังการผลิต โดยคัดเลือกจากสถานีนงานที่มีค่าดัชนีความผิดปกติและภาระงานต่อกล้ามเนื้อสูงสุดจากการสำรวจเบื้องต้น กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยพนักงาน 3 คน โดยกำหนดให้เป็นผู้ปฏิบัติงานประจำตำแหน่งเดิมต่อเนื่องทั้งในช่วงก่อนและหลังการปรับปรุงงาน ไม่มีโรคทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อที่รุนแรงหรืออยู่ในช่วงพักฟื้นจากการบาดเจ็บและยินยอมเข้าร่วมการวิจัยหลังได้รับการชี้แจงวัตถุประสงค์และขั้นตอนการศึกษาแล้ว

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 การประเมินด้วยวิธี RULA (Rapid Upper Limb Assessment)

ใช้แบบประเมิน RULA ตามแนวคิดของ McAtamney and Corlett [16] เพื่อประเมินความรุนแรงของท่าทางในการทำงานของร่างกายส่วนบน

บทความวิจัย (Research Article)

เหมาะสำหรับงานใช้แขนส่วนบน แขนส่วนล่าง มือ-ข้อมือ และลำตัว โดยเฉพาะงานที่มีการทำซ้ำหรือต้องคงท่าเดิมเป็นเวลานาน การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ (1) ท่าทางของแขนส่วนบน แขนส่วนล่าง มือและข้อมือ (2) ท่าทางของศีรษะ คอ และลำตัว และ (3) ท่าทางของขาและเท้า คะแนนรวม RULA แปลตามความหมายตามเกณฑ์ในตารางที่ 1 เพื่อพิจารณาระดับความเสี่ยงและความเร่งด่วนในการปรับปรุงงาน

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินผลด้วยวิธี RULA [16]

คะแนน	การแปลความหมาย
1-2	งานนั้นยอมรับได้ แต่อาจมีปัญหาทางการยศาสตร์ได้ถ้ามีการทำงานดังกล่าว ซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน
3-4	งานนั้นควรได้รับการพิจารณา การศึกษาละเอียดขึ้นและติดตามผลอย่างต่อเนื่อง การออกแบบงานใหม่อาจมีความจำเป็น
5-6	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมและรีบดำเนินการปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าว
7	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ที่ต้องขึ้นไป ได้รับการปรับปรุงโดยทันที

3.3.2 การประเมินด้วยวิธี REBA (Rapid Entire Body Assessment)

ใช้แบบประเมิน REBA เพื่อประเมินท่าทางการทำงานของทั้งร่างกาย โดยพิจารณาท่าทางของศีรษะ คอ ลำตัว แขน ขา รวมถึงการถือจับน้ำหนัก ลักษณะการเคลื่อนไหว และการทำงานซ้ำ คะแนนรวม REBA แปลความหมายตามเกณฑ์ในตารางที่ 2 เพื่อจัดระดับความเสี่ยงและกำหนดความจำเป็นในการปรับปรุงงาน

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินผลด้วยวิธี REBA [17]

คะแนน	การแปลความหมาย
1	งานนั้นยอมรับได้ แต่อาจมีปัญหาทางการยศาสตร์ได้ถ้ามีการทำงานดังกล่าว ซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานาน
2-3	งานนั้นควรได้รับการพิจารณา การศึกษาละเอียดขึ้น ติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่อง ออกแบบงานใหม่อาจมีความจำเป็น
4-7	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมและรีบดำเนินการปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าว
8-10	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ ที่ต้องปรับปรุงโดยเร็ว
11	งานนั้นมีปัญหาด้านการยศาสตร์ ที่ต้องขึ้นไป ได้รับการปรับปรุงโดยทันที

3.3.3 การประเมินอาการเหนื่อยล้าของ Piper

ใช้แบบประเมินอาการเหนื่อยล้าของ Piper (Revised Piper Fatigue Scale) ซึ่งประกอบด้วยข้อคำถาม 22 ข้อ ประเมินความเหนื่อยล้า 4 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านพฤติกรรม จำนวน 6 ข้อ (2) ด้านอารมณ์ จำนวน 5 ข้อ (3) ด้านความรู้สึก จำนวน 5 ข้อ และ (4) ด้านสติปัญญา จำนวน 6 ข้อ ผู้ตอบให้คะแนนแต่ละข้อในช่วง 0-10 โดย “0” หมายถึง ไม่มีความรู้สึกต่อข้อความนั้น และ “10” หมายถึง มีความรู้สึกมากที่สุด

การแปลความหมายของคะแนนแบบประเมินอาการเหนื่อยล้าของ Piper กำหนดให้คะแนนมีค่าตั้งแต่ 0-220 คะแนน จากข้อคำถามทั้งหมด 22 ข้อ จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยของคะแนนความเหนื่อยล้า โดยนำคะแนนรวมทั้งหมดหารด้วยจำนวนข้อ (22 ข้อ) จะได้ค่าเฉลี่ยของอาการเหนื่อยล้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระดับตามเกณฑ์ Piper et al. [18] ได้แก่ คะแนนเฉลี่ย 7.00-10.00 หมายถึง ระดับอาการเหนื่อยล้า

บทความวิจัย (Research Article)

มาก, คะแนนเฉลี่ย 4.00–6.99 หมายถึง ระดับอาการ
เหนื่อยล้าปานกลาง คะแนนเฉลี่ย 0.01–3.99
หมายถึง ระดับอาการเหนื่อยล้าเล็กน้อย และคะแนน
เฉลี่ย 0.00 หมายถึง ไม่มีอาการเหนื่อยล้า

แบบประเมินความเหนื่อยล้าของ Piper [19]
มีทั้งหมด 22 ข้อ คิดเป็นคะแนนรวม 220 คะแนน
โดยผู้วิจัยแบ่งระดับคะแนนความเหนื่อยล้าออกเป็น 4
ระดับ คือ ไม่มีความเหนื่อยล้า หมายถึง ค่าคะแนน 0
ระดับความเหนื่อยล้าเล็กน้อย หมายถึง ค่าคะแนน
1–73 ระดับความเหนื่อยล้าปานกลาง หมายถึง ค่า
คะแนน 74–147 และระดับความเหนื่อยล้ามาก
หมายถึง ค่าคะแนน 148–220

สำหรับการคิดคะแนนรายด้าน ผู้วิจัยรวมคะแนน
ของข้อคำถามในแต่ละด้านของแบบประเมิน แล้ว
แปลผลตามช่วงคะแนนเป็น 4 ระดับ คือ ไม่มีความ
เหนื่อยล้า หมายถึง ค่าคะแนน 0 ระดับความเหนื่อย
ล้าเล็กน้อย หมายถึง ค่าคะแนน 1–20 ระดับความ
เหนื่อยล้าปานกลาง หมายถึง ค่าคะแนน 21–40 และ
ระดับความเหนื่อยล้ามาก หมายถึง ค่าคะแนน 41–60

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่า
ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อ
อธิบายลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง ระดับความ
เสี่ยงทางการยศาสตร์ และระดับความเหนื่อยล้าก่อน
และหลังการปรับปรุงงาน สำหรับการเปรียบเทียบ
ค่าเฉลี่ยคะแนน RULA คะแนน REBA และคะแนน
ความเหนื่อยล้าจากแบบประเมินของ Piper ก่อนและ
หลังการปรับปรุงงานใช้การทดสอบค่าสถิติแบบที
(T-Test) โดยใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

4. ผลการศึกษา

แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ผลการเปรียบเทียบการ
ประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA,
REBA และความเหนื่อยล้า ก่อน-หลังปรับปรุงงาน

4.1 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยง ทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ก่อน-หลังปรับปรุง งาน

ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยง
ทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ก่อน-หลังปรับปรุงการ
ทำงานของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า Step 9 ศีรษะและคอ
Step 12 ค่าคะแนนเปิดตาราง B และ Step 15
คะแนนรวม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาข้อมูลโดยรวม พบว่า ใน
Step 4 การหมุนของข้อมือ Step 6 ลักษณะการ
เคลื่อนไหวซ้ำ Step 10 ลำตัวเคลื่อนไหว และ Step
13 การใช้แรงกล้ามเนื้อขา/เท้า เมื่อทดสอบ
สมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง
ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างในการประเมินความเสี่ยง
ทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ก่อน-หลังการปรับปรุง
งาน ไม่แสดงข้อมูลความแตกต่างกันอาจเป็นเพราะว่า
ผลการประเมินลักษณะการหมุนของข้อมือ ลักษณะ
การเคลื่อนไหวซ้ำ การเคลื่อนไหวของลำตัวเคลื่อนไหว
และการใช้แรงกล้ามเนื้อขา/เท้า ของพนักงานคะแนน
ประเมินมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังแสดงใน
ตารางที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA ก่อน หลังปรับปรุง

Step	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		t-test	p-value
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD		
Step 1 แขนส่วนบน	5.00	0.00	3.67	1.15	2.00	0.184
Step 2 แขนส่วนล่าง	2.00	0.00	1.33	0.58	2.00	0.184
Step 3 มือและข้อมือ	3.67	0.58	2.33	0.58	2.00	0.184
Step 4 การหมุนของข้อมือ	2.00	0.00	1.00	0.00	-	-
Step 5 คะแนนเปิดตาราง A	7.00	0.00	5.67	1.53	1.51	0.270
Step 6 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1.00	0.00	1.00	0.00	-	-
Step 7 การยกน้ำหนัก	2.00	0.00	0.67	1.15	2.00	0.184
Step 8 สรุปละเอียดเปิดตาราง C	10.00	0.00	6.33	2.31	2.75	0.111
Step 9 ศีรษะและคอ	4.33	0.58	2.00	0.00	7.00	0.020*
Step 10 ลำตัวเคลื่อนไหว	4.00	0.00	3.00	0.00	-	-
Step 11 ขาและเท้า	1.67	0.58	1.00	0.00	2.00	0.184
Step 12 คะแนนเปิดตาราง B	7.33	0.58	4.00	0.00	10.00	0.010*
Step 13 การใช้แรงกล้ามเนื้อขา/เท้า	1.00	0.00	1.00	0.00	-	-
Step 14 การยกน้ำหนัก	2.00	0.00	0.67	1.15	2.00	0.184
Step 15 คะแนนรวม	10.33	0.58	5.67	1.15	5.29	0.034*
Step 16 เปิดตาราง C สรุปละเอียด	10.00	0.00	7.00	2.00	2.60	0.122

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.2 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA ก่อน-หลังปรับปรุงงาน

ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA ก่อน-หลังปรับปรุงการทำงานของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า step 3 ท่าทางของส่วนขา step 4 คะแนนเปิดตาราง A และ step 6 สรุปละเอียดเปิดตาราง C มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาข้อมูลโดยรวม พบว่า ใน step 1 ลักษณะการทำงานศีรษะ/

คอ, step 2 ท่าทางของลำตัว และ step 13 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ เมื่อทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างในการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA ก่อน-หลังการปรับปรุงงาน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในบางตัวแปร อาจเป็นเพราะผลการประเมินลักษณะการทำงานในส่วนศีรษะ/คอ ท่าทางของลำตัว และลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำมีค่าคะแนนที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยแสดงในตารางที่ 4

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA ก่อน-หลังปรับปรุง

Step	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		t-test	p-value
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD		
Step 1 ลักษณะการทำงานศีรษะ/คอ	3.00	0.00	2.00	0.00	-	-
Step 2 ท่าทางของลำตัว	4.00	0.00	3.00	0.00	-	-
Step 3 ท่าทางของส่วนขา	2.67	0.58	1.00	0.00	5.00	0.038*
Step 4 คะแนนเปิดตาราง A	7.67	0.58	4.00	0.00	11.00	0.008*
Step 5 ภาระงาน/น้ำหนัก	1.67	0.58	0.33	0.58	2.00	0.184
Step 6 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	9.33	0.58	4.33	0.58	8.66	0.013*
Step 7 ท่าทางของแขนส่วนบน	5.00	0.00	3.67	1.15	2.00	0.184
Step 8 ท่าทางของแขนล่าง	2.00	0.00	1.33	0.58	2.00	0.184
Step 9 ท่าทางของมือ/ข้อมือ	3.00	0.00	1.67	0.58	4.00	0.057
Step 10 คะแนนเปิดตาราง B	8.00	0.00	5.00	2.65	1.96	0.188
Step 11 พิจารณาการจับยึดวัตถุ	2.00	0.00	0.67	1.15	2.00	0.184
Step 12 สรุปคะแนนไว้เปิดตาราง C	10.00	0.00	5.67	3.79	1.98	0.186
Step 13 ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ	1.00	0.00	1.00	0.00	-	-
Step 14 คะแนนเปิดตาราง C	12.00	0.00	5.67	2.89	3.80	0.063
Step 15 สรุปคะแนนรวม	13.00	0.00	6.67	2.89	3.80	0.063

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.3 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน-หลังปรับปรุงงาน

จากผลการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน-หลังปรับปรุงการทำงานของกลุ่มตัวอย่าง ตามแบบประเมินอาการเหนื่อยล้าของ Piper ตามข้อคำถามจำนวน 22 ข้อ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการทดสอบค่าสถิติแบบที (t-test) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม โดยใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน-หลังปรับปรุงสถานีนงาน พบว่า ข้อ 8 ลักษณะ

ของความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ไม่น่าพอใจ) ข้อ 16 ความรู้สึก (มีพลังหรือหมดพลัง) และค่าเฉลี่ยด้านความรู้สึกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาข้อมูลโดยรวม พบว่า ข้อ 13 ความรู้สึก (มีความตื่นตัวหรือ่วงซึม) ไม่แสดงข้อมูลความแตกต่างกันซึ่งอาจเป็นเพราะผลการประเมินความรู้สึกตื่นตัวหรือ่วงซึมของพนักงานมีค่าคะแนนใกล้เคียงกัน ข้อมูลการประเมินจึงไม่แตกต่างกันมากพอที่จะแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงผลในตารางที่ 5

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน-หลังปรับปรุง

2	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		t-test	p-value
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD		
ด้านพฤติกรรมหรือความรุนแรง						
1) ความรู้สึกทุกข์ทรมานจากความอ่อนล้า	7.00	1.73	5.67	1.15	1.51	0.272
2) ความอ่อนล้าที่เกิดขึ้นกับท่าน รบกวนความสามารถของท่านในการทำงานให้สำเร็จ หรือปฏิบัติกิจกรรมที่เกี่ยวกับการเรียนรู้	6.33	0.57	5.00	0.00	4.00	0.057
3) ความอ่อนล้าที่เกิดขึ้น รบกวนความสามารถของท่านในการพบปะพูดคุย หรือมีกิจกรรมในสังคมร่วมกับ เพื่อนฝูง	5.33	1.15	4.66	1.52	2.00	0.184
4) ความอ่อนล้าที่เกิดขึ้น รบกวนชีวิตทางเพศ	6.33	0.57	5.33	0.57	1.73	0.225
5) ความอ่อนล้าที่ท่านประสบอยู่ในขณะนี้รบกวนความสามารถของท่านในการเข้าร่วมกิจกรรมที่ท่านชอบ	7.00	1.00	6.33	1.15	2.00	0.184
6) ความอ่อนล้าที่เกิดขึ้นกับท่านในขณะนี้ มีระดับความรุนแรง	7.00	1.00	5.00	1.00	3.46	0.074
ค่าเฉลี่ยด้านพฤติกรรมหรือความรุนแรง	6.49	0.76	5.33	0.83	3.03	0.094
ด้านความหมายเชิงอารมณ์						
7) ลักษณะของความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ไม่สนุกสนาน)	7.00	1.00	5.33	0.57	2.50	0.130
8) ลักษณะของความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ไม่น่าพอใจ)	6.33	1.52	4.00	1.00	7.00	0.020*
9) ความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ทำลายฉัน)	7.00	1.00	4.66	0.57	2.65	0.118
10) ความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ไม่ดี)	6.00	1.00	4.66	0.57	4.00	0.057
11) ความอ่อนล้าที่ท่านกำลังประสบอยู่ในขณะนี้ (เป็นสิ่งที่ผิดปกติ)	6.00	2.65	4.00	1.73	3.46	0.074
ค่าเฉลี่ยด้านความหมายเชิงอารมณ์	7.63	1.11	4.53	0.64	3.14	0.088

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้าของพนักงาน ก่อน-หลังปรับปรุง (ต่อ)

ด้าน	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		t-test	p-value
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD		
ด้านความรู้สึก						
12) ความรู้สึก (แข็งแรงหรืออ่อนแอ)	6.00	2.65	4.00	0.00	3.46	0.074
13) ความรู้สึก (มีความตื่นตัวหรือง่วงซึม)	5.33	1.15	4.33	1.15	-	-
14) ความรู้สึก (มีชีวิตชีวาหรือเหงื่อย ไม้กระตือรือร้น)	6.66	0.57	5.33	0.57	4.00	0.057
15) ความรู้สึก (สดชื่นหรือเหนื่อย)	6.33	1.52	4.66	0.57	1.89	0.199
16) ความรู้สึก (มีพลังหรือหมดพลัง)	6.00	1.00	4.33	1.15	5.00	0.038*
ค่าเฉลี่ยด้านความรู้สึก	6.06	1.00	4.53	0.98	5.28	0.034*
ด้านสติปัญญาหรืออารมณ์						
17) ความรู้สึก (มีความอดทนหรือไม่มี ความอดทน)	6.00	1.00	4.33	1.52	1.89	0.199
18) ความรู้สึก (ผ่อนคลายหรือตึงเครียด)	5.33	0.58	4.33	2.31	0.65	0.580
19) ความรู้สึก (ร่าเริงหรือซึมเศร้า)	5.66	0.57	4.66	1.15	1.00	0.423
20) ความรู้สึก (สามารถรวบรวมสมาธิหรือไม่สามารถรวบรวมสมาธิได้)	6.66	0.57	5.33	1.15	1.51	0.270
21) ความรู้สึก (สามารถจำสิ่งต่าง ๆ ได้หรือไม่สามารถจำสิ่งต่าง ๆ)	5.66	0.57	4.66	1.52	1.73	0.225
22) ความรู้สึก (สามารถคิดอย่างกระจ่างแจ้งได้หรือไม่สามารถคิดได้อย่างกระจ่างแจ้ง)	6.00	0.00	5.00	1.00	1.73	0.225
ค่าเฉลี่ยด้านสติปัญญาหรืออารมณ์	5.88	0.38	4.71	1.26	1.39	0.229
ผลคะแนนค่าเฉลี่ยทุกด้าน	6.32	0.98	4.80	0.88	2.64	0.119

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผู้วิจัยมีสรุปผลและข้อเสนอแนะ คือ

5.1 สรุปผล

ผลการปรับปรุงงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าในการทำงานของพนักงานโรงงานผลิต

ยางแผ่นรมควัน โดยผลการลดความเสี่ยงในการทำงานของพนักงานตามหลักการยศาสตร์ พบว่า การประเมินด้วยวิธี RULA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 10 ลดเหลือ 7 สอดคล้องกับผลการประเมิน ด้วยวิธี REBA จากเดิม มีค่าเฉลี่ย 13 ลดเหลือ 6.67 ซึ่งหมายถึงงานยังคงมีระดับความเสี่ยงที่ควรได้รับการศึกษาและปรับปรุงเพิ่มเติม โดยผลการประเมินแสดงให้เห็นว่า

บทความวิจัย (Research Article)

ระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง ส่วนผลการศึกษาความเหนื่อยล้า เมื่อเปรียบเทียบระดับความเหนื่อยล้า ก่อน-หลังการปรับปรุง จากเดิมค่าเฉลี่ย 6.32 ลดเหลือ 4.80 โดยการทดสอบค่าสถิติแบบที (T-Test) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลก่อน-หลังการปรับปรุงงาน พบว่า การประเมินความเสี่ยง ด้วยวิธี RULA และวิธี REBA มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาผลการประเมินบางส่วนของร่างกายไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนผลการประเมินความเหนื่อยล้า พบว่า ลักษณะของความอ่อนล้า ความรู้สึกมีพลัง และค่าเฉลี่ยด้านความรู้สึก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยผลการเปรียบเทียบการประเมินความเหนื่อยล้า ก่อน-หลัง การปรับปรุง พบว่า มีค่าระดับคะแนนลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงงาน ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานของชินิษฐา มีวาสนา และคณะ [10] ซึ่งรายงานว่าการปรับปรุงสภาพแวดล้อมการทำงานสำหรับกลุ่มแรงงานโดยนำปัญหาที่พบมาออกแบบสภาพงานและนำไปให้กลุ่มแรงงานทดลองใช้ทำการเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์รูปแบบเดิมและหลังการปรับปรุงงาน ที่พบว่าท่าทางการทำงานมีระดับความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี RULA หลังจากการปรับปรุง มีค่าคะแนนรวมเฉลี่ยรวมลดลง ซึ่งตามการแปลความหมายถึงแม้ยังเป็นปัญหาทางการยศาสตร์ที่ต้องนำข้อมูลไปพิจารณาเพื่อประกอบการปรับปรุงงาน แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าระดับความรุนแรงจากเดิม 10 เหลือ 7 คะแนน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ด้วยวิธี REBA หลังการปรับปรุงงาน ที่มีค่าเฉลี่ยลดลง ซึ่งตามการแปลความหมายถึงแม้ยังเป็นปัญหาทางการยศาสตร์ งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมและรีบดำเนินการปรับปรุงลักษณะงานดังกล่าว ซึ่งจะเห็นได้

ว่ามีค่าระดับความรุนแรงจากเดิม 13 เหลือ 6.67 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงทางการยศาสตร์ลดลง จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปเป็นแนวทางการศึกษาการปรับปรุงการทำงานในลักษณะอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อปัญหาการยศาสตร์และความเหนื่อยล้าในการทำงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากการศึกษาครั้งนี้ซึ่งเป็นการประเมินเฉพาะตัวชี้วัดเชิงกายภาพ (การยศาสตร์) และเชิงความรู้สึก (ความเหนื่อยล้า) ควรศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงาน ผลผลิตหรือความยั่งยืนของมาตรการในระยะยาว ถึงแม้ความเสี่ยงและความเหนื่อยล้าลดลงแต่การประเมินยังพบว่างานบางลักษณะยังมีความเสี่ยงในระดับที่ควรศึกษาและปรับปรุงเพิ่มเติมหรือการติดตามผลหลังการปรับปรุง ควรมีการบันทึกเก็บข้อมูลสถิติการบาดเจ็บบริเวณต่าง ๆ ของร่างกาย รวมถึงการเกิดอุบัติเหตุ การขาดงานพร้อมสาเหตุต่าง ๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์งานที่เป็นจุดเสี่ยงและจะช่วยในการเก็บข้อมูลให้ทราบถึงปัญหา นายจ้าง/สถานประกอบการสามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ไปเป็นแนวทางในการสร้างแรงจูงใจในการทำงานจากการสร้างความปลอดภัยในการทำงานที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เช่น สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน การยางแห่งประเทศไทย สมาคมส่งเสริมความปลอดภัยและอนามัยในการทำงาน สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลการศึกษาข้อมูลดัชนีความผิดปกติ ผลการศึกษาภาระงานต่อกล้ามเนื้อ ผลประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการพิจารณาปัญหาสุขภาพในการทำงาน รวมถึงการประกอบการปรับปรุงการทำงานต่าง ๆ

บทความวิจัย (Research Article)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน
สหกรณ์กองทุนสวนยาง ในตำบลไม้เรียง อำเภอฉวาง
จังหวัดนครศรีธรรมราช

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มงานกำหนดอัตราเงินสมทบกองทุนเงิน
ทดแทน, “สถานการณ์การประสบอันตรายหรือ
เจ็บป่วยเนื่องจากการทำงาน ปี 2561–2565,”
สำนักงานกองทุนเงินทดแทน สำนักงาน
ประกันสังคม กระทรวงแรงงาน, 2566.
- [2] การยางแห่งประเทศไทย ฝ่ายวิจัยและพัฒนา
เศรษฐกิจยาง, “สถานการณ์ยางพารา ปี พ.ศ.
2563 และแนวโน้มปี พ.ศ. 2564,” [ออนไลน์].
Available:
[https://www.raot.co.th/ewt_dl_link.php?
nid=6750](https://www.raot.co.th/ewt_dl_link.php?nid=6750). [เข้าถึงเมื่อ: 10 ตุลาคม 2564].
- [3] สกล ชีระวรวิญญู, “การยศาสตร์ด้วยการ
ออกแบบ,” ใน *เอกสารการอบรมสมาคมการย
ศาสตร์ไทย*, สมาคมการยศาสตร์ไทย, 2564,
หน้า 23–24.
- [4] T. R. Cunningham, R. J. Guerin, J.
Ferguson, and J. Cavallari, “Work-related
fatigue: A hazard for workers
experiencing disproportionate
occupational risks,” *American Journal of
Industrial Medicine*, vol. 65, no. 11, pp.
913–925, 2022.
- [5] Z. Zeng, S. Zhou, and M. Liu, “Research
progress on assessment tools related to
occupational fatigue in nurses: A
traditional review,” *Frontiers in Public
Health*, vol. 12, p. 1508071, 2024.
- [6] สุดารัตน์ บุญหล้า และ สุนิสา ชายเกลี้ยง,
“ความเสี่ยงทางการยศาสตร์และความผิดปกติ
ทางระบบกระดูกโครงร่างและกล้ามเนื้อของ
พนักงานอุตสาหกรรมสิ่งทอในกิจการส่งออก
ขนาดย่อม,” *วารสารการยศาสตร์ไทย*, ปีที่ 4,
ฉบับที่ 1, หน้า 10–19, 2564.
- [7] จิตรลดา กิตติจรรูวัฒนา และคณะ, “การ
ทบทวนงานวิจัยอย่างมีระบบ: แนวโน้มการใช้
เครื่องมือประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์,”
วารสารวิทยาศาสตร์สุขภาพแห่งประเทศไทย, ปี
ที่ 5, ฉบับที่ 4, หน้า 49–58, 2565.
- [8] S. Chaiklieng, “Occupational health risk
assessment of musculoskeletal disorders
on exposure to working ergonomic
factors in para rubber plant farmers,”
KKU Journal for Public Health Research,
vol. 14, no. 2, pp. 32–44, 2021.
- [9] รัชณี จุมจี และคณะ, “การจัดการความเสี่ยง
ด้านการยศาสตร์ของกลุ่มแรงงานผู้สูงอายุที่
ทำงานจักสานไม้ไผ่ กรณีศึกษา ชุมชนทุ่งขุน
น้อย จังหวัดอุบลราชธานี,” *วารสารการย
ศาสตร์ไทย*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 37–46,
2564.
- [10] ขนิษฐา มีวาสนา และคณะ, “การประเมินความ
เสี่ยงทางการยศาสตร์และปรับปรุงสถานีงาน
สำหรับกลุ่มแรงงานทำไม้กวาดดอกหญ้า ตำบล
บึง อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา,”
วารสารการยศาสตร์ไทย, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า
23–31, 2563.
- [11] วีรชัย มัญญารักษ์, รังสิมา หอมเศรษฐี, และ อุ่น
สังข์พงศ์, “การปรับปรุงงานตามหลักการย
ศาสตร์เพื่อลดความเหนื่อยล้าในการทำงานของ
พนักงานโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน,” *วารสาร
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี*

บทความวิจัย (Research Article)

- พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2, หน้า 165–183, 2567.
- [12] A. Varghese and V. V. Panicker, “Effect of MSDs and scope of ergonomic interventions among rubber processing workers: A systematic review,” *La Medicina del Lavoro*, vol. 113, no. 4, e2022032, 2022.
- [13] พชร ศศะนาวิณ และ พรชัย สิทธิศรีธัญกุล, “ความเหนื่อยล้าเนื่องจากการทำงานและปัจจัยที่เกี่ยวข้องของพยาบาลวิชาชีพโรงพยาบาลระดับตติยภูมิชั้นสูงแห่งหนึ่งในประเทศไทย,” *วารสารสมาคมเวชศาสตร์ป้องกันแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, หน้า 236–243, 2568.
- [14] ศิวัช อารังวิศ, จารุรินทร์ ปิตานพวงศ์, และ วิศรุต ศรีสินทร, “ความเหนื่อยล้าจากการทำงานและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในพยาบาลวิชาชีพโรงพยาบาลสงขลานครินทร์,” *วารสารเวชสารแพทย์ทหารบก*, ปีที่ 82, ฉบับที่ 3, หน้า 171–185, 2562.
- [15] I. Paskarini, E. Dwiyanti, M. Mahmudah, W. Widarjanto, S. A. Nugroho, and D. A. Syaiful, “The interplay of ergonomic risk factor and lifestyle factors on potters’ well-being and work fatigue in Magelang’s tourism village,” *BMC Public Health*, vol. 25, no. 1, p. 1550, 2025.
- [16] L. McAtamney and E. N. Corlett, “RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders,” *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993.
- [17] S. Hignett and L. McAtamney, “Rapid Entire Body Assessment (REBA),” *Applied Ergonomics*, vol. 31, no. 1, pp. 201–205, 2000.
- [18] B. F. Piper, S. M. Dibble, M. J. Dodd, M. Weiss, S. Slaughter, and D. L. Paul, “The revised Piper Fatigue Scale: Psychometric evaluation in women with breast cancer,” *Oncology Nursing Forum*, vol. 25, no. 4, pp. 677–684, 1998.
- [19] B. F. Piper, “Fatigue,” in *Pathophysiological Phenomena in Nursing: Human Responses to Illness*, V. Carrieri-Kohlman, A. M. Lindsey, and C. M. West, eds., 2nd ed., Philadelphia: W.B. Saunders, 1993, pp. 279–302.

บทความวิจัย (Research Article)

การปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของแผนกคลังสินค้าสโตร์ A กรณีศึกษา บริษัท เคเค เมททอล 2012 จำกัด

วิวัฒน์ น้อยมณี¹, วาสนา พ่วงพรพิทักษ์^{1,*} และ ศุภณัฐ จรพทุธานนท์²

¹ สาขาโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² ศูนย์บ่มเพาะวิสาหกิจ (UBI) มหาวิทยาลัยนครพนม

*ผู้ประสานงานบทความฉบับนี้: wasana.ch@muti.ac.th โทรศัพท์: 086-2191529

(รับบทความ: 11 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 17 ธันวาคม 2568; ตอรับบทความ: 18 ธันวาคม 2568)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันแบบไม่ต้องเขียนโค้ด (No-Code Application) เพื่อปรับปรุงกระบวนการหยิบสินค้าในคลังสินค้าของบริษัท คลังสินค้า A โดยมุ่งลดความผิดพลาดและยกระดับประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของพนักงาน ขั้นตอนดำเนินงานประกอบด้วย การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ร่วมกับแนวคิดปัจจัยมนุษย์ (Human Factors) และ Why-Why Analysis เพื่อนำข้อมูลมาออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูปด้วย Glide App โดยกลุ่มตัวอย่างคือ พนักงานคลังสินค้า 8 ราย ดำเนินการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังใช้งานเป็นระยะเวลา 4 เดือน (พฤศจิกายน 2567 – กุมภาพันธ์ 2568) ผลการวิจัยพบว่า ความผิดพลาดจากการหยิบสินค้าลดลงจาก 18 ครั้งเหลือ 7 ครั้ง (ลดลงร้อยละ 61.11) และความผิดพลาดจากจำนวนสินค้าเกินลดลงจาก 8 ครั้งเหลือ 3 ครั้ง (ลดลงร้อยละ 62.50) ส่งผลให้ต้นทุนความเสียหายลดลงจาก 3,211 บาท เหลือ 645 บาท (ลดลงร้อยละ 79.91) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี No-Code โดยเฉพาะ Glide App สามารถช่วยลดความผิดพลาด ทั้งนี้ พนักงานมีความพึงพอใจต่อแอปพลิเคชันในระดับมาก ($\bar{X} = 4.06$, S.D. = 0.791) สะท้อนให้เห็นว่าองค์กรควรให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการทำงานของพนักงาน เพื่อยกระดับมาตรฐานและประสิทธิภาพของงานคลังสินค้าอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แผนผังก้างปลา แอปพลิเคชัน การจัดการคลังสินค้า ปรับปรุงประสิทธิภาพ

การอ้างอิงบทความ: วิวัฒน์ น้อยมณี, วาสนา พ่วงพรพิทักษ์ และ ศุภณัฐ จรพทุธานนท์, "การปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของแผนกคลังสินค้าสโตร์ A กรณีศึกษา บริษัท เคเค เมททอล 2012 จำกัด," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 62-74, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Performance Improvement of the Warehouse Department at Store A: A Case Study of KK Metal 2012 Co., Ltd.

Withawat Noimanee¹, Wasana Phuangpornpitak^{1,*} and Supanat Jonphutthanon²

¹ Department of Logistics Management, Faculty of Business Administration and Information Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

² University Business Incubator (UBI) Nakhon Phanom University

*Corresponding Author: wasana.ch@rmuti.ac.th Tel: 086-2191529

(Received: September 11, 2025; Revised: December 17, 2025; Accepted: December 18, 2025)

Abstract

This research aimed to develop and evaluate the effectiveness of a no-code application to improve the item-picking process in Warehouse A, with the goal of reducing operational errors and enhancing employee efficiency. The research procedure involved analyzing the root causes of errors using a Fishbone Diagram in conjunction with Human Factors principles and Why-Why Analysis. The results were then applied to design and develop a ready-to-use application using Glide App. The research sample consisted of eight warehouse employees, and the study compared performance before and after system implementation over a four-month period (November 2023 – February 2024). The findings indicated that incorrect item-picking errors decreased from 18 to 7 cases (a reduction of 61.11%), and over-picking errors decreased from 8 to 3 cases (a reduction of 62.50%). Consequently, damage costs were reduced from 3,211 THB to 645 THB (a reduction of 79.91%). The results demonstrate that no-code technology, specifically Glide App, can effectively reduce warehouse operational errors. Moreover, employee satisfaction toward the application was at a high level ($\bar{x} = 4.06$, S.D. = 0.791). These outcomes highlight the importance for organizations to adopt digital tools that support employee workflows in order to enhance warehouse standards and operational efficiency sustainably.

Keywords: Fishbone Diagram, Application, Warehouse Management, Performance Improvement

Please cite this article as: W. Noimanee, W. Phuangpornpitak and S. Jonphutthanon, "Performance Improvement of the Warehouse Department at Store A: A Case Study of KK Metal 2012 Co., Ltd.," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 62-74, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในยุคที่อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างเติบโตอย่างต่อเนื่อง ธุรกิจค้าปลีกวัสดุก่อสร้างในประเทศไทย โดยเฉพาะในระดับภูมิภาค เช่น จังหวัดขอนแก่นได้เผชิญกับการแข่งขันที่รุนแรงจากร้านค้าสมัยใหม่ (Modern Trade) เช่น ไทวัสดุ ดูโฮม และโฮมโปร ซึ่งมีรูปแบบการบริหารจัดการคลังสินค้าที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เทคโนโลยีช่วยสนับสนุนการดำเนินงานอย่างครบวงจร [1] ส่งผลให้ธุรกิจค้าปลีกแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องปรับตัวทั้งในด้านการบริการและการบริหารโลจิสติกส์เพื่อรักษาความสามารถในการแข่งขัน [2]

บริษัท เคเค เมททอล 2012 จำกัด ซึ่งเป็นหนึ่งในผู้ประกอบการค้าปลีกวัสดุก่อสร้างในจังหวัดขอนแก่นเผชิญกับปัญหาความผิดพลาดในการจัดสินค้าอันเนื่องมาจากการขาดระบบสนับสนุนการทำงาน เช่น การหยิบสินค้าผิดหรือเกินจำนวน ซึ่งไม่เพียงส่งผลต่อความสูญเสียด้านต้นทุน หากยังลดความเชื่อมั่นของลูกค้าอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันสำเร็จรูป Glide App เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานคลังสินค้า โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ปัญหาเชิงระบบ ได้แก่ Fishbone Diagram, Human Factors และ Why-Why Analysis ซึ่งล้วนเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในภาคอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ [3-6]

เทคโนโลยีแบบไม่ต้องเขียนโค้ด (No-Code Platform) อย่าง Glide App ช่วยให้องค์กรสามารถพัฒนาแอปพลิเคชันที่เชื่อมโยงข้อมูลในรูปแบบ Google Sheet ได้อย่างรวดเร็วและตรงตามความต้องการ โดยเฉพาะในบริบทของธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ที่มีทรัพยากรจำกัด [7] ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือ เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน No-Code (Glide App) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา

กระบวนการ และพฤติกรรมมนุษย์ ได้แก่ Fishbone Diagram, Human Factors และ Why-Why Analysis พร้อมประเมินผลก่อนและหลังการใช้งานจริงในด้านอัตราความผิดพลาดในการหยิบสินค้า ต้นทุนความเสียหาย และระดับความพึงพอใจของพนักงาน เพื่อเสนอแนวทางเพิ่มปรับปรุงกระบวนการหยิบสินค้าในคลังสินค้าแบบดั้งเดิมสู่ระบบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นด้วยเทคโนโลยีที่เข้าถึงได้ง่าย

2. ทบทวนวรรณกรรม

การบริหารคลังสินค้า (Warehouse Management) มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์โดยรวม เนื่องจากเป็นจุดศูนย์กลางในการรวบรวมแยกประเภท และกระจายสินค้าไปยังผู้บริโภคได้อย่างถูกต้องและทันเวลา [4] การจัดการที่ดีจะช่วยลดระยะเวลาการส่งมอบ ลดความผิดพลาด และลดต้นทุนการดำเนินงานในภาพรวม

แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) หรือ Ishikawa Diagram เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในระบบการทำงาน โดยเฉพาะเมื่อร่วมกับแนวคิด 4M+1E (Man, Machine, Material, Method และ Environment) ซึ่งช่วยให้สามารถจำแนกและจัดกลุ่มสาเหตุได้อย่างเป็นระบบ [8]

ขณะเดียวกัน Why-Why Analysis ซึ่งถูกเสนอโดย Deming และถูกนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพในหลายองค์กร ก็เป็นวิธีที่ช่วยค้นหาสาเหตุของปัญหาอย่างลึกซึ้ง โดยการตั้งคำถามว่า "ทำไม" อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 5 ครั้งจนพบสาเหตุหลัก [5]

Human Factors หรือ ปัจจัยมนุษย์ เป็นแนวคิดที่ศึกษาองค์ประกอบทางร่างกาย จิตใจ และสิ่งแวดล้อมของบุคลากรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และโอกาสเกิดความผิดพลาด [9]

บทความวิจัย (Research Article)

ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานคลังสินค้าที่ต้องอาศัยความถูกต้องและความรวดเร็วในการจัดสินค้า [10]

Glide App คือเครื่องมือพัฒนาแอปพลิเคชันแบบไม่ต้องเขียนโค้ด (No-Code App Builder) ที่เชื่อมต่อกับ Google Sheets ได้โดยตรง ช่วยให้ธุรกิจสามารถพัฒนาแอปใช้งานได้เร็วโดยไม่ต้องมีทักษะเขียนโปรแกรม [11] แม้จะมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพเมื่อมีผู้ใช้งานจำนวนมากหรือสัญญาณอินเทอร์เน็ตไม่เสถียร แต่สำหรับองค์กรขนาดกลางหรือแผนกคลังสินค้าที่ต้องการความยืดหยุ่น Glide App เป็นทางเลือกที่น่าสนใจและคุ้มค่าต่อการลงทุน

มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ได้ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันสำเร็จรูป หรือระบบดิจิทัลเพื่อยกระดับประสิทธิภาพในกระบวนการจัดการคลังสินค้าและลดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ เช่น การออกแบบสื่อการเรียนรู้ผ่านแอปพลิเคชัน Glide [6] การประยุกต์ใช้ Glide App สำหรับระบบตรวจสอบสินค้าร่วมกับเครื่องตรวจจับผ่านแอปพลิเคชัน Line ภายในโรงงานอุตสาหกรรม [7] ระบบเว็บแอปพลิเคชันและแดชบอร์ดสำหรับร้านขายจักรยาน [11] นอกจากนี้ยังมี เว็บแอปพลิเคชันจำลองกระบวนการธุรกิจสำหรับหัวหน้างานระดับต้น เพื่อส่งเสริมทักษะการตัดสินใจ [12] แอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมพฤติกรรม การดูแลตนเองในผู้ป่วยโรคหัวใจล้มเหลว [13] แอปพลิเคชันสำหรับงานบริการของห้องปฏิบัติการเคมีคลินิกในโรงพยาบาล [14] แอปพลิเคชันสำหรับธนาคารโรงเรียน [15] และโปรแกรมระบบขายสินค้าหน้าร้านสำหรับธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก [16]

งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นภาคการศึกษาและการแพทย์ ซึ่งแม้แสดงให้เห็นศักยภาพของ No-Code แต่ยังไม่ครอบคลุมบริบทคลังสินค้า SMEs โดยเฉพาะด้านการลดความผิดพลาดในกระบวนการหยิบสินค้า การนำเทคโนโลยีไม่ต้องเขียนโค้ดมาใช้ในคลังสินค้าไทยยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการบูรณาการ

ร่วมกับเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาเชิงอุตสาหกรรม เช่น Fishbone Diagram, Human Factors และ Why-Why Analysis เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดในการหยิบสินค้าในธุรกิจค้าปลีกวัสดุก่อสร้างในระดับ SMEs

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันแบบไม่ต้องเขียนโค้ด (Glide App) เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานของพนักงานคลังสินค้า และเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการใช้งาน เพื่อเสนอแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าของ SMEs อย่างยั่งยืน

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานประกอบด้วยการศึกษารวบรวมแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และนำมาออกแบบขั้นตอนการศึกษาเพื่อใช้เก็บรวบรวมข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษาเพื่อศึกษากระบวนการทำงาน และค้นหาสาเหตุปัญหาที่เกิดขึ้น และประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันสำเร็จรูปในการแก้ไขปัญหา และเปรียบเทียบวัดผลการทำงานระหว่างรูปแบบปัจจุบัน และรูปแบบหลังจากประยุกต์ใช้แอปพลิเคชัน (Glide App) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ศึกษากระบวนการปฏิบัติงานของพนักงานภายในองค์กรและสภาพปัญหาของพนักงานจัดสินค้าภายในคลังสินค้า

จากการศึกษากระบวนการปฏิบัติงานของพนักงานจัดสินค้า ด้วยผังการไหล (Flow Diagram) ดังรูปที่ 1 พบว่าปัญหาภายในกระบวนการจัดสินค้าให้แก่ลูกค้า คือ กระบวนการในส่วนของการจัดงาน (การค้นหาสินค้าตามหน้าบิล) ซึ่งปัญหาที่พบบ่อยจะเกิดขึ้นเป็นประจำ และเห็นได้ชัด คือ พนักงานหาสินค้าไม่เจอ และจัดสินค้าผิด หยิบสินค้าสลับกัน

บทความวิจัย (Research Article)

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาปัญหาการจัดสินค้าของพนักงานคลังสินค้า A ในรูปแบบปัจจุบัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

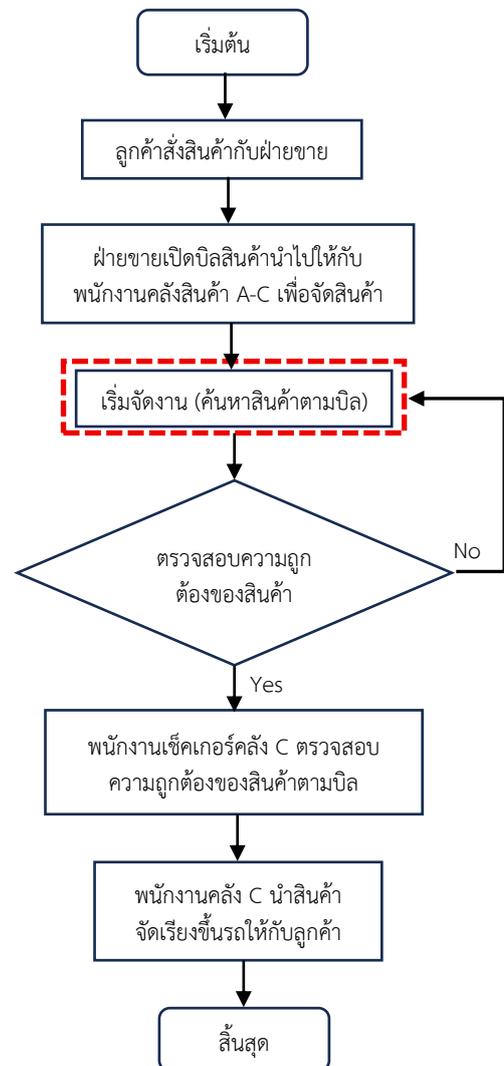
1. ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานของพนักงานแผนกคลังสินค้า A ด้วยการสัมภาษณ์จากหัวหน้าแผนกร่วมกับสังเกตการณ์ และวิเคราะห์ รูปแบบของการทำงาน of พนักงานแผนกเช็คเกอร์ คลัง C โดยอ้างอิงจากแนวคิดเกี่ยวกับปัจจัยมนุษย์ (Human Factor) ทำให้สามารถทราบสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

2. ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลจากการศึกษาแนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ 1) ทฤษฎีแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักๆ ของปัญหาที่เกิดขึ้นของพนักงานด้วยหลักการ 4M + 1E และ 2) แนวคิด Why-Why Analysis ใช้ในการค้นหาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง 3) แนวคิดเกี่ยวกับปัจจัยของมนุษย์ (Human Factor) ใช้ในการค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมที่ส่งผลให้เกิดปัญหาของพนักงานแผนกคลังสินค้า A และ 4) แนวคิดเกี่ยวกับแอปพลิเคชันสำเร็จรูป (Glide App) ใช้ในการสร้างเครื่องมือเพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับความผิดพลาดที่เกิดจากพฤติกรรมของพนักงานแผนกคลังสินค้า A โดยข้อมูลทั้งหมดถูก รวบรวมมาจากหนังสือ บทความ วารสาร วิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

3.3 การพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูป (Glide App)

การพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูปนั้นผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากการสังเกตการทำงาน ร่วมกับการสัมภาษณ์หัวหน้าแผนกคลังสินค้า A และพนักงานตรวจเช็คสินค้าคลัง C มากำหนดเป็น

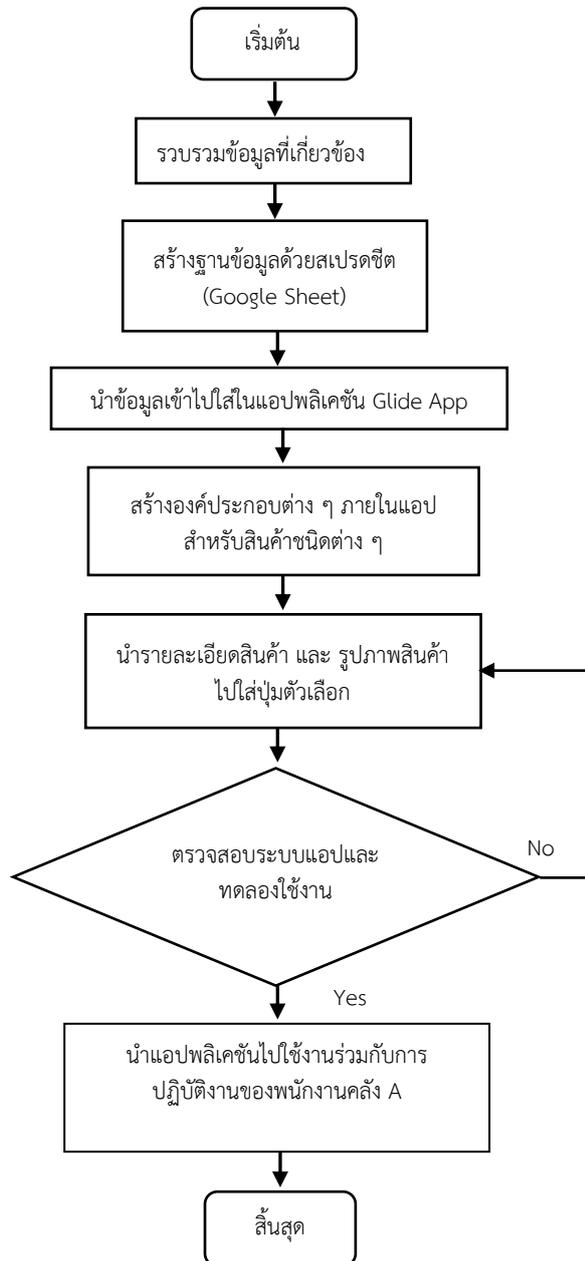
รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูป Glide App ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบและพัฒนา โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รายการสินค้า ประเภทสินค้า จำนวนสินค้าแต่ละรายการ รูปภาพสินค้า และตำแหน่งของสินค้า เพื่อนำไปสร้างฐานข้อมูลด้วยสเปรดชีต จากนั้นนำข้อมูลเข้าสู่แอปพลิเคชัน Glide App พัฒนาโมดูลหลัก ได้แก่ ระบบค้นหาสินค้า และ ตำแหน่งจัดเก็บ ซึ่งแสดงภาพสินค้าและระบุตำแหน่ง ระบบบันทึกการหยิบสินค้า ระบบตรวจสอบยอดและแจ้งเตือนข้อผิดพลาด



รูปที่ 1 กระบวนการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A

บทความวิจัย (Research Article)

จากนั้นทดสอบระบบร่วมกับหัวหน้างานก่อนการนำไปใช้งานจริง แผนผังขั้นตอนการพัฒนาแอปพลิเคชันแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูป (Glide App)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำผลที่ได้ศึกษาวิจัยแล้วจะนำมาเปรียบเทียบและวัดผลของการดำเนินงานของพนักงานคลังสินค้า A จำนวน 8 ราย โดยเก็บข้อมูลก่อนใช้แอป 2 เดือน (พฤศจิกายน - ธันวาคม 2567) ข้อมูลหลังใช้แอป 2 เดือน (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2568) ใช้ข้อมูลจากการตรวจสอบบิลรายการจัดสินค้าประมาณ 480 รายการต่อเดือน รวมทั้งสิ้น 1,920 งานจัดสินค้า ตลอดการวิจัย

ดัชนีวัดผล (KPI: Key Performance Indicator) พร้อมกับวัดผลด้านต้นทุนความเสียหาย หลังจากที่ได้นำเครื่องมือแอปพลิเคชัน สำเร็จรูป Glide App มาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานของพนักงานแผนกคลังสินค้า A จำนวน 8 ราย

และทำการประเมินด้วยแบบสอบถามความพึงพอใจ ที่ผ่านการประเมินความสอดคล้อง โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ด้วยดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถาม มีค่าอยู่ในช่วง 0.67–1.00 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม วิธีการคำนวณค่า KPI แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงวิธีการคำนวณค่า KPI

ตัวชี้วัด	วิธีคำนวณ	แหล่งข้อมูล
อัตราความผิดพลาด	$(\text{จำนวนครั้งที่หยิบผิด} \div \text{จำนวนงานทั้งหมด}) \times 100$	บันทึก ข้อผิดพลาด รายวัน
ต้นทุนความเสียหาย	$\text{ค่าเสียหายสินค้า} \times \text{จำนวนครั้งที่ผิดพลาด}$	เอกสารบัญชี ต้นทุนสินค้า
ระดับความพึงพอใจ ต่อระบบ	คะแนนเฉลี่ยแบบสอบถาม ระดับ Likert 5 ระดับ	แบบสอบถาม

4. ผลการดำเนินการศึกษา

จากปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยแผนผัง

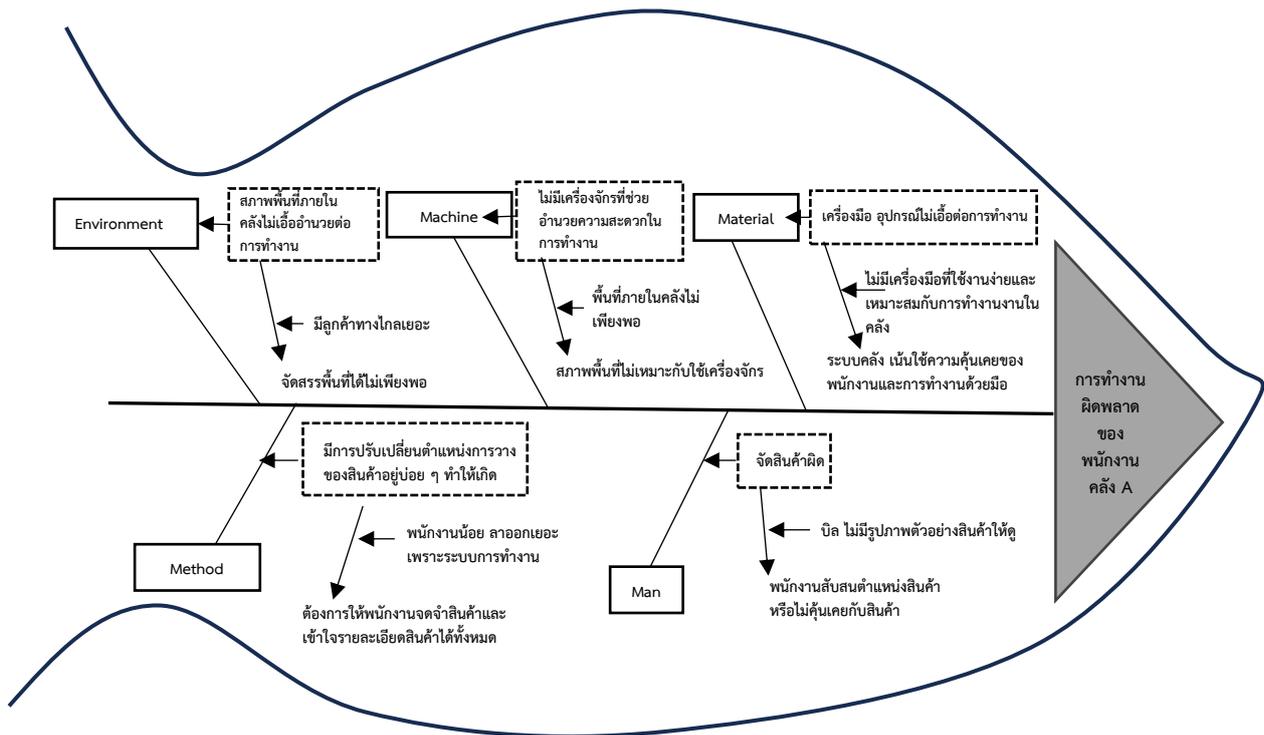
บทความวิจัย (Research Article)

ก้างปลา (Fishbone Diagram) เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาที่เกิดขึ้นเพียง 1 สาเหตุหลัก

จากนั้นวิเคราะห์ด้วยแนวคิด Why-Why Analysis ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ได้ร่วมกับทฤษฎีปัจจัยมนุษย์ (Human Factor) และนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบ และสร้างแอปพลิเคชันสำเร็จรูป (Glide App) เพื่อเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานที่ผิดพลาดของพนักงานคลังสินค้า A ซึ่งมีผลการดำเนินงานดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สภาพปัญหาของพนักงานแผนกคลังสินค้า A ด้วย แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) และแนวคิด Why-Why Analysis

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลของกระบวนการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A และพนักงานตรวจเช็คสินค้าแล้วนำมาวิเคราะห์ตามปัจจัยต่าง ๆ ด้วยแนวคิดของปัจจัยมนุษย์ (Human Factor) โดยนำไปประยุกต์ร่วมกับแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) เพื่อใช้ในการค้นหาสาเหตุของปัญหาที่ตรงประเด็นมากที่สุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การวิเคราะห์แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ Why-Why Analysis

จากการวิเคราะห์แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) พบว่าในส่วนสาเหตุของ “เครื่องมือ (Material)” ที่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหา

หลักคือพนักงานคลังสินค้า A มากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำส่วนของสาเหตุปัญหาเกี่ยวกับ “เครื่องมือ (Material)” มาวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วย Why-Why Analysis ดังตารางที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ Why-Why Analysis

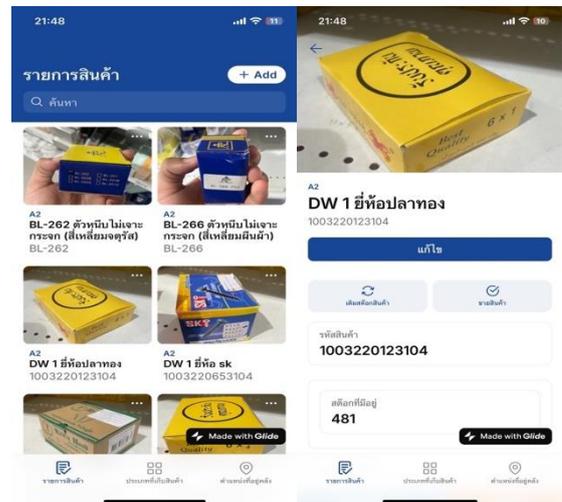
ปัญหา	ทำไม (1)	ทำไม (2)	ทำไม (3)	แนวทางแก้ไข
เครื่องมือและอุปกรณ์ไม่เอื้ออำนวยต่อการทำงาน	เนื่องจากระบบภายในคลังสินค้าปรับให้พนักงานจำเป็นต้องคุ้นเคยกับระบบการทำงานด้วยมือ (Manual)	เพราะทักษะของพนักงานที่ทำงานหรือประสบการณ์ต่อเทคโนโลยีของพนักงานยังไม่มีความพร้อมเท่าที่ควร	ไม่มีเครื่องมือที่ช่วยในการทำงาน เช่น เครื่องมือในการค้นหาสินค้าที่เน้นใช้งานง่าย และเหมาะสมกับทักษะหรือประสบการณ์การทำงานของพนักงาน	บริษัทต้องมีการเพิ่มเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จะช่วยอำนวยความสะดวกให้กับพนักงาน รวมถึงจัดอบรมให้กับพนักงานเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือหรือเทคโนโลยีต่างๆมาใช้ควบคู่กับการทำงาน

4.2 ผลการพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูปด้วย Glide A

หลังจากที่วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริงแล้วนั้น ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบของการพัฒนาแอปพลิเคชันสำเร็จรูปด้วย Glide App สำหรับการแก้ไขปัญหาลูกค้าเกี่ยวกับการค้นหาสินค้าโดยมีขั้นตอนในการพัฒนาแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 2 และ QR Code ของแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 4 หน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 QR Code ของแอปพลิเคชัน



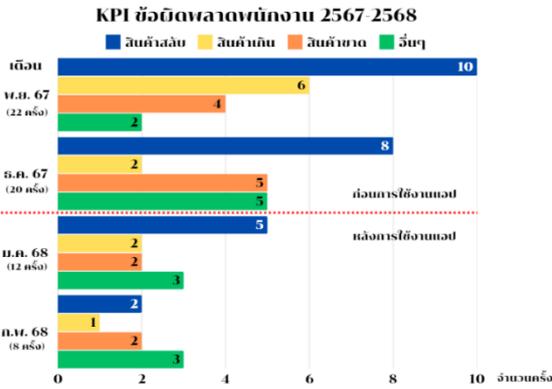
รูปที่ 5 หน้าจอแสดงผลแอปพลิเคชัน

4.3 ผลการใช้แอปพลิเคชันร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A

จากการทดลองใช้แอปพลิเคชันร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A โดยเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม จนถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2568 โดยมีการ

บทความวิจัย (Research Article)

วัดผลด้วยดัชนีวัดผล KPI เกี่ยวกับข้อผิดพลาดของพนักงานแผนกคลังสินค้า A ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ดัชนีวัดผล KPI ข้อผิดพลาดของพนักงานคลังสินค้า A

จากรูปที่ 6 ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อแก้ไขปัญหาในส่วนของการจัดสินค้าผิดพลาด โดยในดัชนีวัดผล KPI นี้ มีส่วนของปัญหาที่เกี่ยวข้องด้วยกันอยู่ 2 ประเด็น คือ 1) สินค้าสลับ และ 2) สินค้าเกิน เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาแอปพลิเคชัน โดยตรงผู้วิจัยจึงสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ดัชนีวัดผลข้อผิดพลาดระหว่างก่อนใช้และหลังใช้แอปพลิเคชัน

KPI ข้อผิดพลาดของพนักงาน		
เดือน (ปี)	สินค้าสลับ	สินค้าเกิน
ก่อนใช้แอปพลิเคชัน		
พฤศจิกายน (2567)	10	6
ธันวาคม (2567)	8	2
รวม	18	8
หลังใช้แอปพลิเคชัน		
มกราคม (2568)	5	2
กุมภาพันธ์ (2568)	2	1
รวม	7	3

จากตารางที่ 3 พบว่าในภาพรวมระหว่างก่อนการใช้แอปพลิเคชัน (พฤศจิกายน-ธันวาคม 2567) และหลังการใช้แอปพลิเคชัน (มกราคม-กุมภาพันธ์ 2568) ร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A พบว่า มีจำนวนข้อผิดพลาดรวมของสินค้าสลับลดลงจากเดิม 18 ครั้ง เหลือ 7 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 61.11 และข้อผิดพลาดรวมของสินค้าเกินจากเดิม 8 ครั้ง ลดลงเหลือ 3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 62.50 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ต้นทุนความเสียหายก่อนการใช้แอปพลิเคชัน

ต้นทุนความเสียหาย (ก่อนการใช้แอปพลิเคชัน)				
เดือน (ปี)	สินค้าสลับ (ครั้ง)	จำนวนเงิน (บาท)	สินค้าเกิน (ครั้ง)	จำนวนเงิน (บาท)
พฤศจิกายน (2567)	10	986.25	6	776.50
ธันวาคม (2567)	8	550.75	2	897.50
รวม	18	1,537	8	1,674

ตารางที่ 5 ต้นทุนความเสียหายหลังการใช้แอปพลิเคชัน

ต้นทุนความเสียหาย (หลังการใช้แอปพลิเคชัน)				
เดือน (ปี)	สินค้าสลับ (ครั้ง)	จำนวนเงิน (บาท)	สินค้าเกิน (ครั้ง)	จำนวนเงิน (บาท)
มกราคม (2568)	5	352.25	2	127.25
กุมภาพันธ์ (2568)	2	110	1	55.50
รวม	7	462.25	3	182.75

ในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 แสดงส่วนของต้นทุนความเสียหายที่เกิดจากพนักงานคลังสินค้า A จัดสินค้าสลับ และจัดสินค้าเกิน ระหว่างก่อนการใช้แอปพลิเคชัน และหลังใช้ แอปพลิเคชัน โดยบริษัท กรณีศึกษา มีนโยบายในการให้พนักงานชดใช้

บทความวิจัย (Research Article)

ค่าเสียหายซึ่งได้กระทำโดยความจงใจหรือประมาทและบริษัทได้มีการกำหนดค่า KPI ความผิดพลาดของพนักงานไม่เกิน 5 ครั้งต่อเดือน คือ เมื่อเกิดปัญหาที่เกี่ยวกับสินค้าข้างต้นบริษัทจะให้พนักงานชำระเงินส่วนต่างที่เสียหายซึ่งจะขึ้นอยู่กับราคาสินค้าแต่ละชนิดนั้น ๆ โดยแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี

เมื่อพิจารณาจากดัชนีวัดผล KPI ข้อผิดพลาดในส่วนของสินค้าสลับ และสินค้าเกินแล้วนั้นพบว่าต้นทุนความเสียหายระหว่างก่อนการใช้แอปพลิเคชัน (พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ.2567) มีต้นทุนความเสียหายรวมอยู่ที่ 3,211 บาท และหลังใช้แอปพลิเคชัน (มกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568) มีต้นทุนความเสียหายรวมลดลงอยู่ที่ 645 บาท คิดเป็นร้อยละ 79.91

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของพนักงานคลังสินค้า A ในการใช้งานแอปพลิเคชัน

จากการทดลองใช้แอปพลิเคชันร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A แล้วนั้นผู้วิจัยได้กำหนดเครื่องมือในการศึกษาเพื่อเป็นตัวชี้วัดทางด้านความพึงพอใจของพนักงานโดยประกอบด้วยส่วนที่ 1 คือ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม และส่วนที่ 2 คือ ข้อมูลเกี่ยวกับความคิดเห็น และความพึงพอใจ โดยแบ่งออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านการออกแบบและจัดวางองค์ประกอบ 2) ด้านการใช้งานแอปพลิเคชัน 3) ด้านประโยชน์ของแอปพลิเคชัน 4) ด้านคู่มือการใช้งาน โดยสามารถวิเคราะห์ผลรวมได้ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปัจจัยแต่ละด้าน

ความคิดเห็นและความพึงพอใจ	\bar{x}	S.D.	ความหมาย
1.ด้านการออกแบบและจัดวางองค์ประกอบ	4.16	0.827	มาก
2.ด้านการใช้งานแอปพลิเคชัน	4.10	0.783	มาก
3.ด้านประโยชน์ของแอปพลิเคชัน	3.98	0.796	มาก
4.ด้านคู่มือการใช้งาน	4.03	0.758	มาก
รวม	4.06	0.791	มาก

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ในภาพรวมของความคิดเห็นและความพึงพอใจในการนำแอปพลิเคชันมาใช้ร่วมกับกระบวนการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A ซึ่งกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย อายุระหว่าง 27-30 ปี และมีประสบการณ์ในการทำงานมากกว่า 4 ปีขึ้นไป มีความพึงพอใจ ต่อแอปพลิเคชันในระดับมากถึง 4 ด้าน ($\bar{X} = 4.06$ และ S.D. = 0.791) แสดงให้เห็นถึงองค์กรควรให้ความสำคัญต่อการพัฒนาระบบที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานของพนักงานให้เป็นมาตรฐานเพื่อพัฒนาศักยภาพการทำงานของพนักงานแผนกคลังสินค้า A ให้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น

4.3.2 การทวนสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน “KK Metal 2012”

โดยการทวนสอบแอปพลิเคชันจะเริ่มจากการประเมินก่อนการนำแอปพลิเคชันไปใช้จริงในช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2567 จำนวน 4 ครั้ง/เดือน และหลังการนำแอปพลิเคชันไปใช้จริงในช่วงเดือน มกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 จำนวน 4 ครั้ง/เดือน โดยมีรายละเอียด ดังรูปที่ 7

ชื่อผู้ประเมิน _____ ตำแหน่ง: _____ วันที่ _____



แบบทวนสอบประสิทธิภาพการใช้งานแอปพลิเคชัน

คำชี้แจง: ขอความกรุณาให้ผู้ประเมินใส่เครื่องหมาย / ลงในช่องว่าง ใ้ให้ครบถ้วน
เงื่อนไข: หากแอปพลิเคชันไม่แสดงผลครบตามจำนวนครั้งที่ตรวจสอบให้ท่านเว้นช่องไว้ตามช่องจำนวนครั้งนั้น

ข้อคำถาม แบบประเมิน	จำนวนครั้งที่ตรวจสอบ										ผลการประเมิน		หมายเหตุ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ใช้ได้	ใช้ไม่ได้	
1. การแสดงผลหน้าจอมูสินค้า													
2. การแสดงผลของชื่อสินค้า													
3. การแสดงผลของรหัสสินค้า													
4. การแสดงผลของรูปภาพตัวอย่าง													
5. การแสดงผลของคำค้นหาสินค้า													
6. ความถูกต้องของรายละเอียดสินค้า													

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

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

รูปที่ 7 ใบทวนสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน “KK Metal 2012”

บทความวิจัย (Research Article)

5. สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยพบว่า การประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันสำเร็จรูป (Glide App) ร่วมกับการทำงานของพนักงานคลัง A โดยมีการวัดผลด้วยดัชนีวัดผล KPI เกี่ยวกับข้อผิดพลาดของพนักงานคลังสินค้า A พบว่าในช่วงระหว่างเดือน พฤศจิกายน ถึงเดือน ธันวาคม 2567 ก่อนการนำแอปพลิเคชันมาใช้ร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A โดยมีข้อผิดพลาดของสินค้าสลับรวมอยู่ที่ 18 ครั้ง และสินค้าเกิน 8 ครั้ง และดัชนีวัดผล KPI ข้อผิดพลาดของเดือน พฤศจิกายน ในส่วนของสินค้าสลับ มีจำนวน 10 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 55.56 และสินค้าเกินจำนวน 6 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 75 และในเดือนธันวาคม สินค้าสลับมีจำนวน 8 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 44.44 และ สินค้าเกินจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 25 และหลังจากการนำแอปพลิเคชันมาใช้ร่วมกับการทำงานของพนักงาน โดยพบว่าช่วงเดือน มกราคม 2568 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2568 มีข้อผิดพลาดสินค้าสลับรวมอยู่ที่ 7 ครั้ง และสินค้าเกิน 3 ครั้ง และดัชนีวัดผล KPI ข้อผิดพลาดของเดือน มกราคม ในส่วนของสินค้าสลับ มีจำนวน 5 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 71.43 และสินค้าเกินจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 66.67 และในเดือนกุมภาพันธ์ สินค้าสลับมีจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 28.57 และสินค้าเกินจำนวน 1 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 33.33 และด้านต้นทุนความเสียหายระหว่างก่อนการใช้แอปพลิเคชัน และหลังใช้แอปพลิเคชัน (พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2567 และ มกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ.2568) มีต้นทุนความเสียหายรวมลดลง 645 บาท คิดเป็นร้อยละ 79.91

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม 2567 กับ เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2568 พบว่าหลังจากการนำแอปพลิเคชันมาใช้ร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A ข้อผิดพลาดสินค้าสลับรวมอยู่ที่ 7 ครั้ง และสินค้าเกิน 3 ครั้ง และดัชนีวัดผล KPI ข้อผิดพลาดของเดือนมกราคม ในส่วนของสินค้าสลับมีจำนวน 5 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 71.43

และสินค้าเกินจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 66.67 และในเดือนกุมภาพันธ์ สินค้าสลับมีจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 28.57 และสินค้าเกิน 1 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 33.33 ในภาพรวมหลังการใช้แอปพลิเคชันร่วมกับการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A พบว่ามีจำนวนข้อผิดพลาดของสินค้าสลับลดลงจากเดิม 18 ครั้ง เหลือ 7 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 61.11 และข้อผิดพลาดของสินค้าเกินจากเดิม 8 ครั้ง ลดลงเหลือ 3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 62.50 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahmawati et al. (2021) ที่ระบุว่าแอปพลิเคชัน Glide สามารถพัฒนาได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องเขียนโค้ด และเหมาะกับองค์กรขนาดกลางในการนำมาใช้งานจริงโดยไม่ต้องลงทุนสูง [7] เช่นเดียวกับงานของ ปิยะณัฐ และสุภารัตน์ (2565) ซึ่งพบว่า Glide App สามารถช่วยลดความผิดพลาดในการตรวจสอบเครื่องจักรในโรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8]

ผลการลดต้นทุนความเสียหายจาก 3,211 บาท เหลือเพียง 645 บาท (ลดลง 79.91%) ยังสะท้อนถึงความคุ้มค่าในการลงทุนด้านเทคโนโลยี แม้จะเป็นเพียงระบบ No-Code ก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ สุธัญญา และคณะ (2566) ที่ระบุว่าระบบแอปพลิเคชันช่วยลดความสูญเสียจากการจัดการสินค้าคงคลังได้ในร้าน Cycle Mania [12] รวมถึงงานของ ภัทรา และจิตทิพย์ (2563) ที่พบว่าแอปพลิเคชันสามารถส่งเสริมการตัดสินใจของหัวหน้างานในระดับต้นได้อย่างเป็นระบบ [13] และในภาพรวมของความพึงพอใจในการนำแอปพลิเคชันมาใช้ร่วมกับกระบวนการทำงานของพนักงานคลังสินค้า A ซึ่งกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจต่อแอปพลิเคชันในระดับมากที่สุดทั้ง 4 ด้าน โดยมีค่าเฉลี่ยของความพึงพอใจอยู่ที่ 4.06 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.791 ยังสอดคล้องกับผลวิจัยของ วรณัฐ (2566) ที่พบว่าแอปพลิเคชันบนมือถือช่วยส่งเสริมพฤติกรรมการดูแลสุขภาพของผู้ป่วยให้ดีขึ้นเมื่อได้รับการออกแบบที่

บทความวิจัย (Research Article)

เหมาะสมรวมถึงพฤติกรรมของพนักงานที่มีการปรับตัวและยอมรับระบบใหม่อย่างราบรื่น [12] แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือทางเทคโนโลยีที่เข้าใจง่ายและใช้งานสะดวกสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของมนุษย์ในเชิงบวกได้จริง เนื่องจากระบบช่วยกำกับขั้นตอนการทำงาน และลดภาระด้านการจดจำของพนักงาน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวอิงจากบริบทกรณีศึกษาเฉพาะแห่งและระยะเวลาทดลองที่จำกัด จึงอาจมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับบริบทอื่น ทั้งนี้ งานวิจัยสะท้อนศักยภาพของเทคโนโลยี No-Code ในการเพิ่มประสิทธิภาพงานคลังสินค้าใน SMEs และควรมีการศึกษาต่อยอดในวงกว้างเพื่อยืนยันผลลัพธ์เพิ่มเติม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, “SMEs จำหน่ายวัสดุก่อสร้างปี 2566 แข่งขันเข้มข้นจากการรุกขยายสาขาของ Modern Trade,” 2566.
<https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/CONSTRUCTION-MATERIALS-CIS3426-FB-09-08-2023.aspx>
[เข้าถึงเมื่อ: 9 สิงหาคม 2566]
- [2] สุพจน์ สุขเกษม และคณะ, “การปรับตัวของธุรกิจค้าปลีกไทยภายใต้การแข่งขันจาก Modern Trade,” วารสารการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, ปีที่ 8, ฉบับที่ 2, หน้า 45–58, 2564.
- [3] Punyisa Kuendee, “Application of 7 quality control (7 QC) tools for quality management: A case study of a liquid chemical warehousing,” 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Nagoya, Japan, pp. 106-110, 2017.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7939188>
- [4] Gijo, E. V., & Antony, J. “Reducing patient waiting time in outpatient department using lean six sigma methodology,” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.30, no.8, pp. 1481-1491, 2014.
<https://doi.org/10.1002/qre.1552>
- [5] Patricia M. Williams “Techniques for Root Cause Analysis, Baylor University Medical Center Proceedings,” Vol. 14, no. 2, pp. 154-157, 2017.
<https://doi.org/10.1080/08998280.2001.11927753>
- [6] A. I. N. Rahmawati, et al., “Say no to coding: Designing of mobile-app-based learning media using Glide Apps,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1869, no. 1, 2021, Art. no. 012079. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1869/1/012079>
- [7] ปิยะณัฐ ปลอดฤทธิ์ และ สุภารัตน์ ชัยกิตติภรณ์, “การประยุกต์ใช้ไกลด์แอปและการแจ้งเตือนทางไลน์สำหรับตรวจสอบบັນจั่น ภายในบริษัทผลิตปุ๋ยเคมีแห่งหนึ่ง,” *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 39-46, 2565.
<https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/scicru/article/view/116>
- [8] Coccia, M., “The Fishbone diagram to identify, systematize and analyze the

บทความวิจัย (Research Article)

- sources of general purpose technologies,” *Journal of Social and Administrative Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 291-303, 2017.
<https://journals.econsciences.com/index.php/JSAS/article/view/1518/1531>
- [9] พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี, “การยศาสตร์ (Ergonomics) หรือปัจจัยมนุษย์วิศวกรรม (Human Factors Engineering),” สมาคมอาชีวอนามัยและความปลอดภัยในการทำงาน (ส. อ.ป.),
<https://www.ohswa.or.th/17533379/ergonomics> [เข้าถึงเมื่อ: 3 มกราคม 2563].
- [10] มนตรี ออบเชย, “การวิเคราะห์ความผิดพลาดของมนุษย์ (Human Error Analysis),” OHSWA.
<https://www.ohswa.or.th/17816723/hse-morning-talk-by-safety-kku-ep8>.
[เข้าถึงเมื่อ: 24 สิงหาคม 2564].
- [11] สุธัญญา หล้าพึ้ง, และคณะ, “การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและระบบรายงานแบบแดชบอร์ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลังและวางแผนการสั่งซื้อ: กรณีศึกษาร้าน Cycle Mania,” *Journal of Logistics and Digital Supply Chain*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, หน้า 58-70, 2566. <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JLDSC/article/download/738/747/19906>
- [12] ภัทรา จันท์เกิด และใจทิพย์ ณ สงขลา, “การพัฒนาชุดการสอนงานด้วยเว็บแอปพลิเคชันจำลองกระบวนการทางธุรกิจ เพื่อส่งเสริมความสามารถในการตัดสินใจสำหรับหัวหน้างานระดับต้น,” *วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, หน้า 56-67, 2563.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JIE/article/view/220630>
- [13] วรัญญา เกษไชย, “ประสิทธิผลของโปรแกรมการส่งเสริมพฤติกรรมการดูแลตนเองด้วยแอปพลิเคชันรักใจคุณบนมือถือสำหรับผู้ป่วยภาวะหัวใจล้มเหลว,” *วารสารการพยาบาลและการดูแลสุขภาพ*, ปีที่ 41, ฉบับที่ 3, หน้า 5-12, 2566. <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/jnat-ned/article/view/265107>
- [14] ปิพัชรินทร์ ทิพย์ทอง, สง่า จีบสันเหี้ยะ และมนพัทธ์ ชำนาญพล, “การพัฒนาและประเมินแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟนสำหรับงานบริการของห้องปฏิบัติการเคมีคลินิกในโรงพยาบาลสกลนคร,” *วารสารการแพทย์และวิทยาศาสตร์สุขภาพ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 3, หน้า 164-177, 2566.
<https://he01.tci-thaijo.org/index.php/jmhs/article/download/267103/180775/1141195>
- [15] สุนิ ประจิตร์, และคณะ, “การพัฒนาระบบแอปพลิเคชันธนาคารโรงเรียน กรณีศึกษา โรงเรียนปากบึงสิงโต ตำบลสิงโตทอง อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา,” *วารสารสหวิทยาการนวัตกรรมปริทรรศน์*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 23-32, 2566. [ออนไลน์].
<https://so04.tci-thaijo.org/index.php/jidir/article/view/260259>.
- [16] ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ, “โปรแกรมระบบขายสินค้าหน้าร้านสำหรับธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก,” *วารสารการจัดการสมัยใหม่*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 69-679, 2566. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/stou-sms-pr/article/view/254202>

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาเถ้าลูกสนทะเลเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์

ณปภัช คงฤทธิ^{1,*}, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์¹ และ พลสรรค์ แซ่เตียว¹

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: napaphat.s@rmutsv.ac.th โทรศัพท์: 086-9553213
(รับบทความ: 4 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 18 ธันวาคม 2568; ตอรับบทความ: 5 มกราคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนทะเล เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลูกสนทะเลเป็นวัสดุประสาน หาระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมที่สุดของมอร์ตาร์ และเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ โดยทำบล็อกซีเมนต์ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ทดสอบตัวอย่างละ 4 ครั้ง พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 10 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล การเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนและระยะเวลาการบ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัด

คำสำคัญ: ปอซโซลาน เถ้าลูกสนทะเล มอร์ตาร์ กำลังอัด

การอ้างอิงบทความ: ณปภัช คงฤทธิ, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์ และ พลสรรค์ แซ่เตียว, "การพัฒนาเถ้าลูกสนทะเลเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 75-86, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Development of Sheoaks Ash as a Replacement of Portland Cement

Napaphat Kongrit^{1,*}, Jakkrapong Jitjamnong¹ and Phonsan Saetiao¹

¹ Department of Petroleum Technology, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology
Srivijaya

*Corresponding Author: napaphat.s@rmutsv.ac.th, Tel: 086-9553213

(Received: September 4, 2025; Revised: December 18, 2025; Accepted: January 5, 2026)

Abstract

The objective of this research was to study the chemical composition of the sheoaks ash to be used as a pozzolan material in cement. The Compressive strength of the mortar is compared to sheoaks ash as a pozzolan material. Study the most appropriate cured time for mortar and compare the mortar density. This research used 125 cubic centimeter cement blocks. Use the sheoaks ash to replace cement was 0, 10, 10, 20 and 30 percent, cured in water for 7, 14, 21 and 28 days. Use ASTM C109 compressive strength, test each sample 4 times. It was found that the mortar used sheoaks ash replacing cement at 10 percent and curing time at 14 days had the compressive strength of 11.72 MPa. Increasing the amount of sheoaks ash and the curing period were the factors affecting the average compressive strength.

Keywords: Pozzolan, Sheoaks Ash, Mortar, Compressive Strength

Please cite this article as: N. Kongrit, J. Jitjamnong and P. Saetiao, "Development of Sheoaks Ash as a Replacement of Portland Cement," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 75-86, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในโครงการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมเมื่อหลุมผลิตปิโตรเลียมหมดศักยภาพ ไม่มีความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์หรือพื้นที่ที่ได้รับสัมปทานหมดระยะเวลาทางภาครัฐแล้ว ผู้ประกอบการปิโตรเลียมจะต้องดำเนินการรื้อถอนสิ่งติดตั้งในกิจการปิโตรเลียมออกจากพื้นที่ตามที่กฎหมายกำหนดไว้ เพื่อความปลอดภัยในการทำกิจกรรมต่าง ๆ และการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ต่อไป โดยจะดำเนินการใน 3 ส่วน คือ 1) การปิดและการสละหลุมถาวร (Plug and Abandonment) 2) การรื้อถอนโครงสร้างแทนปิโตรเลียม และ 3) การรื้อถอนท่อขนส่งปิโตรเลียมใต้ทะเล การปิดและการสละหลุมถาวร จะใช้วิธีการอัดซีเมนต์ลงไปในห้องที่ขุดลึกลงไปจนถึงชั้นหินกักเก็บปิโตรเลียม เพื่อปิดหลุมผลิตอย่างถาวร ซึ่งเมื่อซีเมนต์แข็งตัวแล้วจะต้องทำการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีปิโตรเลียมรั่วไหลออกมาได้อีก

ซีเมนต์ หรือ ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นวัสดุผสมสำหรับผลิตคอนกรีต มีส่วนผสมหลักคือ หินปูนและดินเหนียว และมีผสมอื่น เช่น ซิลิกา อะลูมินา สินแร่เหล็ก ยิปซัม และสารเพิ่มพิเศษชนิดอื่น ๆ ซีเมนต์ตามความหมายของการใช้งานทางวิศวกรรมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ บิทูมินัส (Bituminous) และนอนบิทูมินัส (Nonbituminous) บิทูมินัสซีเมนต์ ได้แก่ มะตอย (Asphalts) และ น้ำมันยาง (Tars) และนอนบิทูมินัสซีเมนต์ ได้แก่ อะลูมินาซีเมนต์ (Alumina Cement) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนต้องผสมน้ำในปริมาณที่เหมาะสม แล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงจะแข็งตัว พอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างมากที่สุดนับเป็นวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่าง ๆ มีส่วนผสมหลักคือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน (Pozzolan) และสารลดน้ำ เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและ

มีงานวิจัยต่าง ๆ มากมายเพื่อพัฒนาคุณภาพซีเมนต์ มีการค้นคว้าวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในซีเมนต์ได้ เช่น ซิลิกาฟุ่ม เถ้าแกลบขาว เถ้าซีลี้อย่างพารา วัสดุรีไซเคิล และกากตะกอนตะกั่ว ซึ่งการนำวัสดุเหลือใช้มาพัฒนาคุณสมบัติบางประการให้ดีขึ้นแล้วยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต

จากข้อมูลข้างต้นทางกลุ่มมีความสนใจในการศึกษาเถ้าของลูกสนเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในพื้นที่จังหวัดสงขลาสามารถพบพืชสนได้ตามชายฝั่งทะเลทั่วไปและไม่ได้มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใด โดยทำการศึกษารวบรวมองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าของลูกสน ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมกับซีเมนต์และดินเพื่อลดต้นทุนการผลิตของซีเมนต์ที่ใช้ในงานปิโตรเลียมและเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

2. ทบทวนวรรณกรรม

ฉิมวิษญ์ วัชรฉินฉณ์ และปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์ (2561) ได้ทำการศึกษานำเถ้าชีวมวลไม้ยางพาราที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าชีวมวลกับผักตบชวา ส่วนผสมคอนกรีตตั้งต้นคือ ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน ในอัตรา 1 : 2 : 4 โดยการทดลองลดปริมาณปูนซีเมนต์และหิน ในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้เถ้าชีวมวลไม้ยางพาราทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 และใช้เส้นใยผักตบชวาทดแทนหินที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ในสัดส่วนร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ผลจากการทดสอบพบว่า เถ้าชีวมวลไม้ยางพารา ในอัตราร้อยละ 15 และ เส้นใยผักตบชวา ร้อยละ 0.5 เป็นส่วนผสมที่แข็งแรงที่สุด มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด 10.27 เมกะปาสคาล ที่ระยะบ่ม 28 วัน [1]

ปิยนุช ม่วงทอง และคณะ (2557) ทำการศึกษาอิทธิพลของวัสดุปอซโซลาน ประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย ที่มีผลต่อ

บทความวิจัย (Research Article)

สมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก นำมาผสมและขึ้นรูปเป็นอิฐดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าถ้าเพิ่มส่วนผสมความต้านทานกำลังอัดให้แก่อิฐดินซีเมนต์ ได้ดีกว่าถ้าใช้ส่วนผสมที่เหมาะสมและให้ค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุดคือ อิฐดินซีเมนต์ผสมแถ้ากลบที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก [2]

จรรยาพร หลู่จิ่ง และคณะ (2566) ทำการศึกษาการเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของปูนซีเมนต์ของอิฐที่มีส่วนผสมของแถ้าไม้ยางพาราด้วยการปรับปรุงแถ้าไม้ยางพาราด้วยสารเคมี โดยเลือกสารเคมีสารเคมีกลุ่มซัลเฟต ได้แก่ Na_2SO_4 และ CaSO_4 และเคมีกลุ่มอัลคาไลน์ ได้แก่ NaOH และ Ca(OH)_2 ศึกษาที่ความเข้มข้น 8, 10 และ 12 โมล จากผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงแถ้าไม้ยางพาราด้วยสารเคมีกลุ่มอัลคาไลน์ โดยเฉพาะ NaOH ที่ความเข้มข้น 8, 10 และ 12 โมล มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐาน มอก. 1505-2541 และที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 และ 12 โมล ช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าอิฐที่ไม่ได้ปรับปรุงแถ้าไม้ยางพารา [3]

Théodore Gautier L.J. Bikoko (2021) ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้แถ้าไม้ (จากอะโวคาโดและยูคาลิปตัส) แทนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0-30 ต่อความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยทดลองทั้งการเติมแถ้าไม้เป็นส่วนผสมและทดแทนซีเมนต์บางส่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แถ้าไม้แทนซีเมนต์ทำให้ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลงในทุกช่วงอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน โดยแถ้าไม้จากยูคาลิปตัสให้ผลดีกว่าในระดับการแทนที่ในปริมาณสูง เช่น ร้อยละ 30 ขณะที่แถ้าไม้จากอะโวคาโดให้ผลดีในระดับการแทนที่ในปริมาณต่ำ เช่น ร้อยละ 5 ความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในทุกกรณี [4]

H. Shams et al. (2025) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสีเขียวที่ใช้แถ้าไม้ (Wood Ash) ซิลิกาฟุ้ง

(Silica Fume) และแถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนผสมแทนซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ส่วนผสมดังกล่าวช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัดและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสม ซิลิกาฟุ้งและแถ้าลอยช่วยเสริมโครงสร้างไมโครของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานและป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดีขึ้น การใช้แถ้าไม้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาคุณสมบัติของแถ้าไม้แต่ละชนิดให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต [5]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) บล็อกอะคริลิก ปริมาตร 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) แถ้าลูกสนทะเลร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก
- 3) ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน
- 4) ใช้น้ำจืดในการบ่มมอร์ตาร์แถ้าลูกสนทะเล
- 5) ขนาดอนุภาคแถ้าลูกสนทะเล 30 เมช

3.2 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เบ้าหล่อคอนกรีต
- 2) ตะแกรงคัดขนาด
- 3) เครื่องทดสอบแรงอัด
- 4) เวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.2 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำ

บทความวิจัย (Research Article)

2) เถ้าหนักลูกสนทะเล

3) ดิน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) นำลูกสนทะเลที่ได้จากพื้นที่จังหวัดสงขลา เผลาเป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง นำเถ้าลูกสนทะเลมาคัดขนาดผ่านตะแกรงคัดขนาด 30 เมช ถ้าเถ้าหนักไม่ผ่านตะแกรงคัดขนาดให้กลับไปทำการบดจนละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดที่กำหนดไว้

2) การออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์โดยหล่อตัวอย่างในบล็อกอะคลิลิคปริมาตร 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (เถ้าลูกสนและซีเมนต์) 0.6 [6] คงที่ตลอดการทดสอบ เถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หล่อมอร์ตาร์แต่ละอัตราส่วนจำนวน 4-5 ก้อน กำหนดระยะเวลาบ่มไว้ 4 ช่วงคือ 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้มอร์ตาร์ทั้งหมด 80 ก้อนตัวอย่าง

3) นำซีเมนต์ เถ้าลูกสนทะเลและน้ำที่ได้ทำการคำนวณส่วนผสมให้สมดุลกับบล็อกอะคลิลิคดังตารางที่ 1 เทลงในถังส่วนผสมและทำการผสมภายในระยะเวลา 30 นาที หากเกิน 30 นาที จะทำให้ซีเมนต์เริ่มแข็งตัว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

ร้อยละของ เถ้าลูกสน แทนที่ ปูนซีเมนต์	เถ้าลูก สน (กรัม)	ดิน (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
0	0	144	96	57.6
10	24	144	72	57.6
20	48	144	48	57.6

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ (ต่อ)

ร้อยละของ เถ้าลูกสน แทนที่ ปูนซีเมนต์	เถ้าลูก สน (กรัม)	ดิน (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
30	72	144	24	57.6

3.3.1 การทดสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักของก้อนคอนกรีตแต่ละก้อน

การคำนวณความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{ความหนาแน่น} = W/V \quad (1)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ หน่วยกรัม (g)

V คือ ปริมาตรของก้อนมอร์ตาร์ หน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

3.3.2 การทดสอบกำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Test Machine)

การคำนวณกำลังอัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$G = P/A \quad (2)$$

เมื่อ G คือ กำลังอัด หน่วยปาสคัล (Pa)

P คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ก้อนตัวอย่างแตก หน่วยนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนคอนกรีต หน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการวิจัย

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสน

ผลการทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer-XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลูกสนมี SiO_2 สูงเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารปอซโซลาน เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ซีเมนต์และทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนได้ [2] โดยเมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลูกสน โดยส่วนประกอบทางเคมี พบว่าเถ้าของลูกสนมีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 13.317 ปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับร้อยละ 1.466 ปริมาณ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 1.741 และปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 62.553 ซึ่งเมื่อนำองค์ประกอบทางเคมีทั้งสิ้นชนิดมารวมตัวกันจะได้ค่าร้อยละ 79.077 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a เถ้าลูกสนจึงมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ [7]

อีกทั้งเถ้าลูกสนซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) สูงสามารถทำปฏิกิริยากับปูนไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากการไฮเดรตของซีเมนต์ เกิดผลิตภัณฑ์เพิ่มเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างปูน ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นในระยะยาว [8]

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนด้วยวิธี XRF

ลำดับ	สารประกอบ	ร้อยละ
1	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	13.317
2	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	1.466
3	โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.383
4	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	5.958

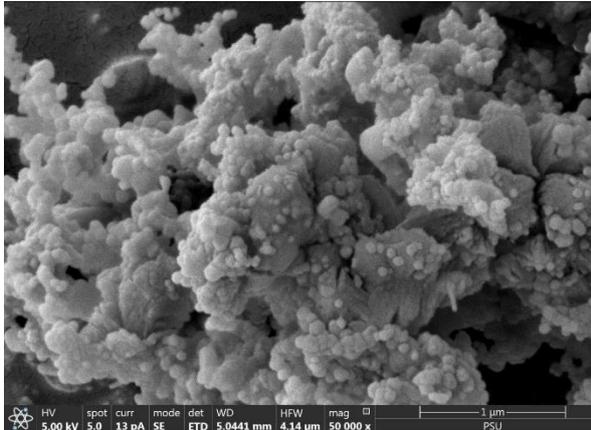
ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลูกสนด้วยวิธี XRF (ต่อ)

ลำดับ	สารประกอบ	ร้อยละ
5	ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5)	1.375
6	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.228
7	คลอรีน (Cl)	0.156
8	โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.839
9	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.553
10	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.453
11	แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.135
12	ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.741
13	คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	0.023
14	สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	0.053
15	รูบิเดียมออกไซด์ (Rb_2O)	0.014
16	สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO)	0.108
17	อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	0.003
18	เซอร์โคเนีย (ZrO_2)	0.097

4.2 ผลการวิเคราะห์เถ้าลูกสนด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

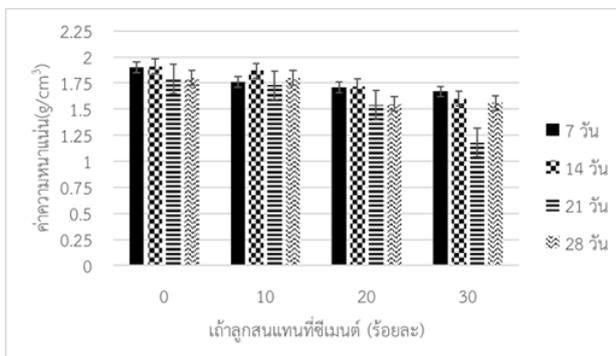
ผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเถ้าลูกสนด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลการทดสอบโครงสร้างภายในของเถ้าลูกสน ดังรูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าลูกสนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็ก รูปร่างละเอียด และมีผิวสัมผัสขรุขระ จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่มีปฏิสัมพันธ์กับสารซีเมนต์ในมอร์ตาร์ ส่งผลให้อัตราการไฮเดรตของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อปูนมีความหนาแน่นขึ้น และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ไฮเดรต (C-S-H) ที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ [9]

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าลูกลินด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของมอร์ตาร์



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกลินด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 หลังบ่มที่ระยะเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน

จากรูปที่ 2 การคำนวณค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกลินด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกลินแทนที่ร้อยละ 0 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ

1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่า มอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การแทนที่ของเถ้าลูกลินที่มากขึ้นสามารถเพิ่มการดูดซึมน้ำภายในคอนกรีตมากขึ้นส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง [1] โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานหรือเถ้าลูกลินที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีรูพรุนมากกว่าจะลดความหนาแน่นรวมของเนื้อปูน ระยะเวลาการบ่มนานขึ้นมีผลต่อความหนาแน่นไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับผลของสัดส่วนการแทนที่เถ้าลูกลิน ซึ่งมีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าลูกลิน ค่าความหนาแน่นจะไม่เพิ่มขึ้นมากหลังช่วง 7-14 วัน แต่โครงสร้างภายในแน่นขึ้นและกำลังอัดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [10] โดยเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 มีแนวโน้มค่าความหนาแน่นต่ำกว่า อาจมาจากการลดปริมาณซีเมนต์ (ทำให้เนื้อเจล C-S-H น้อยลง) และการที่อนุภาคเถ้าลูกลินมีรูพรุน ส่งผลให้เนื้อปูนมีช่องว่างมากขึ้นและค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย [11]

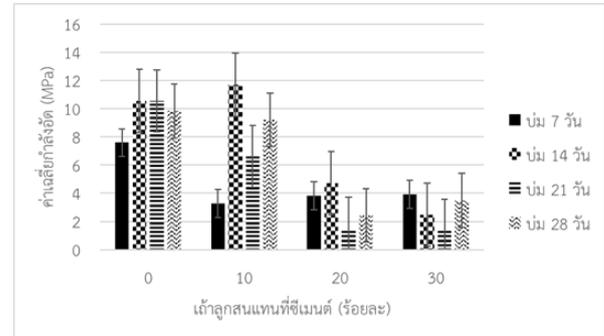
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้านความต้านทานกำลังอัด

มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 7.59, 3.26, 3.82 และ 3.94 เมกะปาสคาล ตามลำดับ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกลินแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10 20 และ 30 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 10.56, 11.72, 4.71 และ 2.47 เมกะ

บทความวิจัย (Research Article)

ปาสคาล ตามลำดับ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้า
ลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30
ที่ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย
เท่ากับ 10.55, 6.62, 1.50 และ 1.38 เมกะปาสคาล
ตามลำดับแม้ค่าความหนาแน่นจะต่างกันแต่หากการ
กระจายรูพรุนดีส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่ต่างกันมาก
ในบางอายุบ่ม [12]

มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทน
ที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาใน
การบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 9.85, 9.21,
2.43 และ 3.49 เมกะปาสคาล ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์
ที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดสูงสุดคือมอร์ตาร์ที่มี
อัตราส่วนของเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10
ที่ผ่านการบ่มด้วยระยะเวลา 14 วัน มีค่ากำลังอัด
เท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล เนื่องจากคอนกรีตผสม
เถ้าลูกสนในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะ
เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และเถ้าลูกสนมีอัตราส่วนสูงเมื่อ
เปรียบเทียบกับซีเมนต์ ทำให้เถ้าลูกสนบางส่วนยังอยู่
ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะเวลาบ่ม
เวลานาน [13] อนุภาคเล็กของเถ้าลูกสนจะเข้าไปเติม
เต็มช่องว่างระหว่างเกล็ดซีเมนต์และเม็ดทรายในมอร์ตาร์
ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้น
ลดปริมาณรูพรุน และเพิ่มกำลังอัด เพราะความ
หนาแน่นสูงทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น [14] อย่างไรก็ตาม
เถ้าลูกสนเป็นวัสดุเบา เมื่อเพิ่มปริมาณมากจะ
ลดปริมาณซีเมนต์ แม้ว่าจะเพิ่มความแน่นจากการเติม
ช่องว่างบางส่วน แต่ความหนาแน่นปริมาตรรวม
(Bulk Density) ลดลง อีกทั้งความถ่วงจำเพาะต่ำ
ถ้ามีรูพรุนภายในมากไม่เกิดไฮเดรชัน เมื่อผสมในมอร์ตาร์
จะทำให้เกิดความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการ
ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทำให้กำลังอัดเฉลี่ยลดลง
เมื่อแทนที่เถ้าลูกสนร้อยละ 20-30 [15][16] แสดง
ผลได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดเฉลี่ยของ
มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์
ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7,
14, 21 และ 28 วัน

4.5 ผลของระยะเวลาการบ่มเมื่อเทียบกับค่าความ หนาแน่นและค่ากำลังอัด

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นสูงสุดในแต่ละกลุ่ม
การทดลอง

เถ้าลูกสน (ร้อยละ)	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ค่าความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
0	14	1.91
10	14	1.87
20	7	1.71
30	21	1.18

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดสูงสุดในแต่ละกลุ่มการ
ทดลอง

เถ้าลูกสน (ร้อยละ)	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
0	14	10.56
10	14	11.72
20	14	4.71
30	28	3.49

บทความวิจัย (Research Article)

จากผลของระยะเวลาการบ่มเมื่อเทียบค่าความหนาแน่น และค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนทะเลแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, และ 30 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 21, และ 28 วัน สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 พบว่า มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ร้อยละ 10 มีความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม (ร้อยละ 0) ความหนาแน่นของมอร์ตาร์สูงสุดในช่วง 7-14 วันแรกของการบ่ม โดยหลัง 14 วัน ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นมากในทุกกลุ่ม ความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้าลูกสน การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลูกสนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีรูพรุนมากกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 30 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม ความหนาแน่นสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ในการแทนที่เถ้าลูกสนร้อยละ 0 และ ร้อยละ 10 ซึ่งสะท้อนถึงการก่อตัวไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้นและมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเล็กน้อยในช่วง 14 วัน ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงหลังเป็นการปรับปรุงโครงสร้างภายในให้แน่นขึ้นมากกว่าการเพิ่มมวลรวมของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ [12] เถ้าลูกสนอาจเพิ่มการดูดซึมน้ำภายในมอร์ตาร์และลดความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตโดยรวม

มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล และมีการพัฒนาค่ากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 7 ถึง 14 วันของการบ่ม การเพิ่มสัดส่วนเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์มอร์ตาร์ร้อยละ 0 และร้อยละ 10 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มจะเห็นว่าระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์แทนที่เถ้าลูกสน ร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่าต่ำกว่า

มอร์ตาร์ควบคุม (ร้อยละ 0) แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ซีเมนต์ทำให้ความแข็งแรงเริ่มต้นต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการพัฒนา เมื่อระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มอร์ตาร์เถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลูกสนทะเลมีการพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าระดับความแปรปรวนที่สูง บ่งชี้ว่ากระบวนการพัฒนาความแข็งแรงผ่านปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) อาจเกิดไม่สม่ำเสมอในตัวอย่างแต่ละก้อน ซึ่งอาจมาจากความแตกต่างเล็กน้อยในการกระจายตัวของเถ้าลูกสนในเนื้อปูน หรือความแตกต่างของระดับรูพรุนเริ่มต้น ค่ากำลังอัดลดลงหลังจากระยะเวลาการบ่มมากกว่า 14 วัน ซึ่งขัดแย้งกับหลักการพัฒนาความแข็งแรงระยะยาวของวัสดุปอซโซลาน การลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลงอย่างมาก (โดยเฉพาะร้อยละ 30) ทำให้โครงสร้างความแข็งแรงที่ได้มีความไม่เสถียรและความสม่ำเสมอลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [13]

4.6 ราคาต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตขึ้นของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิตซึ่งราคาวัสดุแต่ละชนิดต่อมอร์ตาร์ 1 ก้อน และราคาต้นทุนรวมมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ราคา มอร์ตาร์ 1 ก้อน (บาท)

วัสดุ	ราคา : มอร์ตาร์ 1 ก้อน (บาท)			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 10	ร้อยละ 20	ร้อยละ 30
ซีเมนต์	5.10	4.20	3.50	2.95
ดิน	0.91	0.91	0.91	0.91
เถ้าหนัก	-	1.00	1.62	1.85
น้ำ	0.02	0.02	0.02	0.02
รวม	6.03	6.13	6.05	5.73

บทความวิจัย (Research Article)

ราคาจะสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ถ้าลูกสนช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล เช่น กำลังอัดหรือความทนทานของมอร์ตาร์ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในระยะยาว เช่น ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา และยืดอายุการใช้งานของงานก่อสร้าง การใช้เถ้าลูกสนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ [14] ช่วยลดการใช้ซีเมนต์ที่มีต้นทุนสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต การลดปริมาณซีเมนต์มีผลดีต่อความยั่งยืนและลดต้นทุนโดยรวม จากตาราง หากพิจารณาต้นทุน การใช้เถ้าลูกสนอัตราร้อยละ 0 (ราคาต่ำสุด) จะประหยัดต้นทุนสุด แต่ถ้าการเพิ่มเถ้าลูกสนส่งผลเพิ่มกำลังอัดและคุณภาพของมอร์ตาร์ [16] การเพิ่มเถ้าลูกสนร้อยละ 10-20 อาจให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจที่ดีกว่าด้วยสมดุลระหว่างราคาต้นทุนและประสิทธิภาพเชิงกล [17] [18]

5. อภิปรายและสรุปผล

1) ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดและหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า มอร์ตาร์ที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุด คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนที่ผ่านการบ่ม 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 11.72 เมกะปาสคาล และมอร์ตาร์ที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ร้อยละ 0 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลูกสนแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2) ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลูกสนแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าลูกสนในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 10

และระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์มากกว่า 14 วัน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าเฉลี่ยของกำลังอัดเพิ่มขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรมีการทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลูกสนทะเล เช่น การทดสอบความทนทาน (Durability) หรือความทนทานต่อสารเคมี เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

6.2 ควรมีการศึกษาการใช้เถ้าลูกสนทะเลร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ เช่น ซิลิกาฟูม หรือเถ้าลอย ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตเบา

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและเครื่องทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชิมวิชญ์ วัชรชินธ์ และ ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, “การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากเถ้าชีวมวลไม้ยางพาราและใยผักตบชวา,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 3*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, 2561, หน้า 1–10.
- [2] ปิยนุช ม่วงทอง, อธิษฐ์ คงพันธ์, และ บวรกิตต์ เนคมานูรกิจ, “อิทธิพลของวัสดุปอซโซลานประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,*

บทความวิจัย (Research Article)

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2557.
- [3] จรรย์พร หลู่จิ่ง, ภคมน ปินตานา, นิกราน หอมดวง, และ ธเนศ ไชยชนะ, “การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากเสาโรงไฟฟ้าชีวมวล,” *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 139–155, 2566.
- [4] T. G. L. J. Bikoko, “A Cameroonian study on mixing concrete with wood ashes: Effects of 0–30% wood ashes as a substitute of cement on the strength of concretes,” *Revue des Composites et Matériaux Avancés*, vol. 31, no. 5, pp. 275–282, 2021.
- [5] H. Shams, Y. Qiu, H. Abdrhman, H. Ullah, and A. Khan, “Experimental study on properties of green concrete containing wood ash, silica fume, fly ash, and plastic waste,” *SAGE Journals*, vol. 108, no. 4, pp. 1–15, 2025.
- [6] Z. Feng, Z. Jian, H. Guangping, and L. V. Wei, “Influence of water-to-binder ratios on the performance of limestone calcined clay cement-based paste for mining application,” *Green and Smart Mining Engineering*, vol. 1, pp. 262–272, 2024.
- [7] E. R. Teixeira et al., “Valorisation of wood fly ash on concrete,” *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 145, pp. 292–310, 2019.
- [8] R. S. Rafat, “Utilization of wood ash in concrete manufacturing,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 67, pp. 27–33, 2012.
- [9] S. Turkel, B. Felekoglu, and S. Dulluc, “Influence of various acids on the physico–mechanical properties of pozzolanic cement mortars,” *Sadhana*, vol. 32, no. 6, pp. 683–691, 2007.
- [10] K. S. Ranatunga, E. del Rey Castillo, and C. L. Toma, “Evaluation of the optimal concrete mix design with coconut shell ash as a partial cement replacement,” *Construction and Building Materials*, vol. 401, p. 132978, 2023.
- [11] S. A. Shah, M. A. Tantray, and A. R. Bhat, “Wood ash as an eco-friendly alternative for sustainable cement replacement in concrete,” *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 12, no. 2, p. 100178, 2025.
- [12] N. M. Sigvardsen, M. R. Geiker, and L. M. Ottosen, “Phase development and mechanical response of low-level cement replacements with wood ash and washed wood ash,” *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121234, 2021.
- [13] M. Abdullahi, “Characteristics of wood ash/OPC concrete,” *Journal of Practices and Technologies*, issue 8, pp. 9–16, 2006.
- [14] M. J. Michael, Y. Hamza, and C. Laszlo, “Fly ash from modern coal-fired power technologies: Chloride ingress and carbonation of concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 72, no. 10, pp. 486–498, 2020.
- [15] H. Gharibi, D. Mostofinejad, and M. Teymouri, “Impacts of conifer leaves

บทความวิจัย (Research Article)

- and pine ashes on concrete thermal properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 377, p. 131144, 2023.
- [16] M. N. Luc Leroy, K. T. J. Hermann, E. R. Atangana Nkene, J. Ndop, F. M. C. Dupont, and J.-M. B. Ndjaka, “Density and strength of mortar made with the mixture of wood ash, crushed gneiss and river sand as fine aggregate,” *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 109–120, 2018.
- [17] A. F. Hashmi, M. Shariq, A. Baqi, and M. Haq, “Optimization of fly ash concrete mix – a solution for sustainable development,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, no. 2, pp. 3250–3256, 2020.
- [18] กิตติ์สุธี แดงช่วย, ชาศริต หมดาทัง, วิชัยรัตน์ แก้วเจือ, และ ธนียา เกาศล, “การผลิตคอนกรีตด้วยเถ้าหนักจากไม้ยางพาราแทนที่มวลรวมละเอียด,” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30*, ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย, 2568, หน้า 1–6.

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

วีระพล ทับทิมดี¹, ปวีร์วรรต นาสวาสดี² และ ประเวศ เชื้อวงษ์^{2,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
² สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: pravate@techno.rru.ac.th โทรศัพท์: 081-7158999
(รับบทความ: 26 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 16 ธันวาคม 2568; ตอรับบทความ: 7 มกราคม 2569)

บทคัดย่อ

การตัดวัสดุด้วยเลเซอร์ CO₂ เป็นกระบวนการตัดที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ความแม่นยำและความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความกว้างรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ในการตัดวัสดุ PMMA ด้วยเลเซอร์ CO₂ ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัด เพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ ผลแสดงให้เห็นว่า กำลังเลเซอร์และความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อขนาดความกว้างรอยตัด โดยความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะโฟกัสที่ห่างจากชิ้นงานมากเกินไป ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีค่ามากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองพื้นผิวตอบสนองชี้ให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่เด่นชัดระหว่างกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด ซึ่งส่งผลต่อความกว้างรอยตัดอย่างชัดเจน ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่าพารามิเตอร์การตัดที่เหมาะสมเพื่อยกระดับคุณภาพการตัดชิ้นงาน PMMA และประยุกต์ใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: เลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ การตัดวัสดุ PMMA ความกว้างรอยตัด

การอ้างอิงบทความ: วีระพล ทับทิมดี, ปวีร์วรรต นาสวาสดี และ ประเวศ เชื้อวงษ์, "การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 87-102, 2569.

Investigation of the Effects of CO₂ Laser Cutting Parameters on Kerf Width in PMMA based on Box–Behnken Design and Response Surface Methodology

Weerapol Taptimdee¹, Pariwat Nasawat² and Prawach Chourwong^{2,*}

¹ Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

² Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

*Corresponding Author: pravate@techno.rru.ac.th โทรศัพท์: 081-7158999

(Received: September 26, 2025; Revised: December 16, 2025; Accepted: January 7, 2026)

Abstract

CO₂ laser cutting is widely used for polymer processing applications because it provides high precision and flexibility. However, the difference in kerf width between the top and bottom surfaces remains an important factor affecting the quality of the workpiece. This research focuses on investigating the effects of laser power, cutting speed, and focal distance in cutting PMMA with a CO₂ laser, which affect the kerf width, in order to determine the most suitable cutting conditions. The experimental design in this research employed the Box–Behnken Design (BBD) and Response Surface Methodology (RSM), and the results were analyzed using statistical techniques. The experimental results showed that laser power and cutting speed were the main factors that affected kerf width. The kerf widths of the top kerf (TK) and bottom kerf (BK) tended to decrease as cutting speed increased, while higher laser power caused the kerf widths of TK and BK to increase. In addition, a high focal distance resulted in higher kerf widths of TK and BK. The response surface modeling indicated a clear interaction between laser power and cutting speed, which significantly affected kerf width. The findings of this research can serve as a guideline for selecting appropriate cutting parameters to improve the cutting quality of PMMA workpieces, and they can be further applied at the industrial level in the future.

Keywords: CO₂ Laser, PMMA Cutting, Kerf Widths

Please cite this article as: W. Taptimdee, P. Nasawat and P. Chourwong, “ Investigation of the Effects of CO₂ Laser Cutting Parameters on Kerf Width in PMMA based on Box–Behnken Design and Response Surface Methodology,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 87-102, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โพลีเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate; PMMA) เป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความสำคัญและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายอุตสาหกรรม มันมีสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีความโปร่งแสงสูง น้ำหนักเบา ความแข็งแรงทางกลที่ดี ทนต่อสภาพอากาศรังสียูวี และมีความสามารถในการแปรรูปที่หลากหลาย เป็นต้น [1] ด้วยสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้วัสดุ PMMA จัดเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งมีความต้องการวัสดุประสิทธิภาพสูงเพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดในด้านต่างๆ วัสดุ PMMA จึงถูกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบสำคัญในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ โดยการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระจกในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การผลิตแผงหน้าปัดรถยนต์ คอมพิวเตอร์-หลังเลนส์แว่นตา ป้ายโฆษณา และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น [2-4] ชิ้นส่วนเหล่านี้ไม่เพียงแต่ต้องมีรูปลักษณะที่สวยงาม แต่ยังคงทนทานต่อสภาวะการใช้งานที่หลากหลายและสภาพแวดล้อมที่ท้าทายตลอดอายุการใช้งานของยานยนต์อีกด้วย อีกทั้งยังต้องมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย และมีความเสถียรทางเคมี เพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและความทนทาน

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ได้รับความนิยมอย่างสูงในการตัดวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีคาร์บอเนต (PC) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีน (PE) และ โพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นต้น [5,6] เนื่องจากมันมีความแม่นยำและความเร็วในการตัดสูง สามารถตัดงานที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างรวดเร็ว [7] นอกจากนี้ PMMA เป็นหนึ่งในเทอร์โมพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตัดเฉือนด้วยเลเซอร์ CO₂ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงและมีค่าการดูดซับความยาวคลื่นเลเซอร์ CO₂ ที่สูง

อีกด้วย [8] ส่งผลให้ PMMA มีโครงสร้างที่สะอาดและมีการเสื่อมสภาพจากความร้อนเพียงเล็กน้อย [9] แม้ว่า PMMA จะเป็นที่ยอมรับในด้านความแข็งแรงเชิงกลที่ดีและมีคุณสมบัติด้านทานการขีดข่วนที่ดี [10] แต่อย่างไรก็ตามในการตัดวัสดุ PMMA ด้วยเลเซอร์ CO₂ ยังคงพบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพพื้นผิวที่ได้ เช่น การเปียงเบนของความกว้างรอยตัด ขนาดความกว้างรอยตัด ความแข็งที่ผิว ความหยابผิว และพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เป็นต้น [11] การตัดที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อความถูกต้องและความสมบูรณ์ด้านขนาดของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย ตัวชี้วัดคุณภาพการตัดที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ความกว้างรอยตัด ซึ่งนิยามว่าเป็นร่องที่เกิดจากการนำเนื้อวัสดุออก [12,13] ความกว้างรอยตัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญในกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ เนื่องจากมันส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของขนาดชิ้นส่วนที่ตัดและคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงของความกว้างรอยตัดอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากขนาดที่ต้องการ ซึ่งส่งผลต่อความพอดีและการนำผลิตภัณฑ์ไปเป็นส่วนประกอบกับงานอื่นๆ ดังนั้นการควบคุมและการคาดการณ์ความกว้างรอยตัดจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้มั่นใจถึงความแม่นยำ ความพอดี และความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการศึกษาถึงพารามิเตอร์การตัด เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และแรงดันแก๊ส ที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดของ PMMA ทั้งในส่วนของมุมเอียง ความกว้างรอยตัด ความหยابผิว เป็นต้น โดยบางงานวิจัยใช้วิธีการทางสถิติที่หลากหลายเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังงานวิจัยของ Safari และคณะ [14] ได้ศึกษาถึงการตัดแผ่น PMMA ด้วยเลเซอร์ โดยนำวิธีพื้นผิวดูตอบสนองมาใช้ในการวิเคราะห์ผล พบว่า การเพิ่มกำลังเลเซอร์นำไปสู่การเพิ่มความหยابผิวและมุมเอียงลดลง ในขณะที่ความกว้างรอยตัดที่ผิวด้านบน

บทความวิจัย (Research Article)

และด้านล่างจะลดลงก่อนจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเลเซอร์สูงกว่า 90 W

Khoshaim และคณะ [15] ได้ศึกษาถึงผลของปัจจัยกระบวนการต่อลักษณะรอยตัดแผ่น PMMA ด้วยเลเซอร์ พบว่า รอยตัดมีการเบี่ยงเบนมากขึ้นเมื่อความเร็วตัด กำลังเลเซอร์และแรงดันแก๊สเพิ่มขึ้น การใช้กำลังเลเซอร์ต่ำและความเร็วในการตัดสูงจะช่วยลดพื้นที่ ๆ ได้รับความกระทบจากความร้อนและความขรุขระของพื้นผิวได้ Kurt และคณะ [16] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจุดโฟกัสต่อความกว้างของรอยตัด โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) แสดงให้เห็นว่า ความกว้างของรอยตัดได้รับผลกระทบอย่างมากจากจุดโฟกัส รวมถึงความเร็วและกำลังเลเซอร์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่ายังขาดการศึกษาเชิงลึกที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อสมบัติของ PMMA อย่างเป็นระบบ การศึกษาที่เจาะจงลงไปในด้านผลกระทบหรือพฤติกรรมของระยะห่างความกว้างรอยตัดต่อสมบัติทางกลของ PMMA ยังคงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประเมินประสิทธิภาพภายใต้สภาพการใช้งานจริงและเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรมที่กำหนด

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพการตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ บนวัสดุ PMMA และลดปัญหางานตัดที่อาจเกิดขึ้นได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA และระบุปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของชิ้นงานเพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดที่สำคัญ

เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัสต่อขนาดความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA ได้อย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้คาดว่าจะให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับศักยภาพของ PMMA ในฐานะวัสดุทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ และเป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนาและออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ในอนาคตให้มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดียิ่งขึ้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วัสดุโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ชนิดแผ่นเรียบที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร (มม.) ซึ่งเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติโดดเด่นในด้านความโปร่งแสงและความแข็งแรงทางกลที่ดี วัสดุ PMMA จะถูกตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Laser Cutter Machine) ชื่อทางการค้า LINTCNC รุ่น LT-1390 ผลิตในประเทศจีน ในงานวิจัยนี้จะใช้คำว่า “การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂” แทน “การตัดด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์” รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ แสดงไว้ในตารางที่ 1 และลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ และหัวตัดแสดงไว้ในรูปที่ 1 เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ชนิด 2 หัวตัด โดยหัวตัดที่หนึ่ง สามารถตัดวัสดุประเภทโลหะ ได้ที่ความหนาไม่เกิน 1 มม. กำลังของหลอดเลเซอร์ขนาด 100 W และหัวตัดที่สอง สามารถใช้ในการตัดวัสดุประเภทโลหะ ได้แก่ ไม้ อะคริลิก ยาง เป็นต้น กำลังของหลอดเลเซอร์ขนาด 130 W หัวตัดทั้งสองไม่สามารถตัดงานพร้อมกันได้ ในงานวิจัยนี้ใช้หัวตัดที่สองในการตัดวัสดุ PMMA หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี [17]

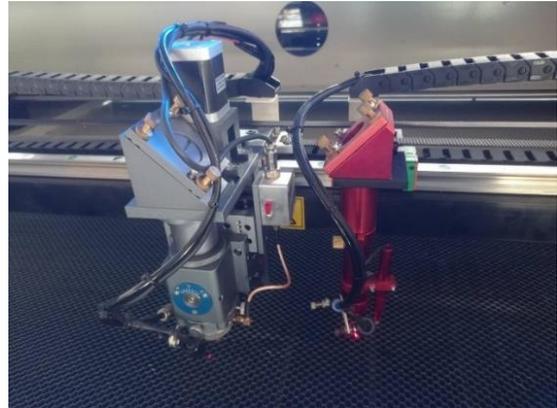
บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ รุ่น LT-1390

Description	Parameter
Model	LT-1390
Laser Medium	CO ₂
Working Area	1300 × 900 mm
Laser Power	100 W/130 W
Position Accuracy	0.01 mm
Repetition Accuracy	0.02 mm
Cutting Speed	150 mm/s
Control System	Ruida (USB interface)
Drive System	3-Phase Stepper Motor and Driver
Cooling System	Water-Cooling



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ (b) หัวตัดเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้เขียนได้ใช้การออกแบบการทดลอง (DOE) แบบ Box-Behnken Design (BBD) และพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ กำลังเลเซอร์ (P) ความเร็วในการตัด (S) และระยะไฟกัส (mm) ต่อขนาดความกว้างของรอยตัดบนแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) หนา 3 มม. การศึกษาที่ใช้ซอฟต์แวร์ Minitab v.19 ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติและหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อระบุพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ขนาดความกว้างรอยตัดน้อยที่สุด ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับ (Factors & Levels)

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+1)
กำลังเลเซอร์ (%)	P	50	60	70
ความเร็วตัด (mm/min)	S	5	7.5	10
ระยะไฟกัส (mm)	F	12	14	16

วิระพล ทับทิมดี และคณะ, การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

บทความวิจัย (Research Article)

2.3 การวัดความกว้างรอยตัด

ในการวัดขนาดของความกว้างรอยตัดที่เกิดจากการตัดด้วยเครื่องเลเซอร์ CO₂ บนวัสดุ PMMA นั้น ดำเนินการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ชื่อทางการค้า Leica รุ่น DM4 M ผลิตในประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3 (a) เป็นเครื่องมือหลัก เนื่องจากสามารถถ่ายภาพของความกว้างรอยตัดได้อย่างชัดเจน โดยเริ่มต้นจากการตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3 (b) จากนั้นถ่ายภาพความกว้างรอยตัดทั้งด้านบน (Top Kerf: TK) และ ด้านล่าง (Bottom Kerf: BK) ด้วยกล้อง OM โดยใช้กำลังขยายที่ 5x เพื่อให้สามารถสังเกตรูปร่างของความกว้างรอยตัดได้อย่างครบถ้วน ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกล้อง OM แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นวัดขนาดของความกว้างรอยตัดด้วยโปรแกรม ImageJ การวัดจะทำการสุ่มวัดในหลายตำแหน่ง (5 จุด/ชิ้นงาน) ตลอดความยาวของรอยตัด เพื่อลดอคติจากความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการตัด และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (b) ตัวอย่างชิ้นงาน



4 (a) ความกว้างรอยตัดด้านบน (TK)



4 (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง (BK)

รูปที่ 4 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกล้อง OM กำลังขยาย 5x บนเงื่อนไข P60 S7.5 F14

2.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตัด PMMA ด้วยเลเซอร์ CO₂ ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อประเมินผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่ส่งผลต่อความกว้างของความกว้างรอยตัดของชิ้นงาน โดยใช้

บทความวิจัย (Research Article)

ANOVA ในการตรวจสอบว่าปัจจัยหรือปฏิสัมพันธ์ใด มีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบสนอง ส่วน RSM นั้นใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบพหุนามกำลังสองเพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลผ่านกราฟ Surface Plot และ Contour Plot เพื่อตีความผลเชิงภาพ หลังจากได้สมการพยากรณ์แล้ว จะใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อระบุชุดค่าพารามิเตอร์ที่ให้คุณภาพการตัดดีที่สุด โดยพิจารณาถึงค่าความกว้างของความกว้างรอยตัดน้อยที่สุด

3. ผลการทดลอง (Results)

3.1 ผลการวัดขนาดความกว้างรอยตัดบน TK และ BK

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design โดยการใช้การทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 Run หลังการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ชิ้นงานจะถูกถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากนั้นวัดขนาดความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวัดความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK

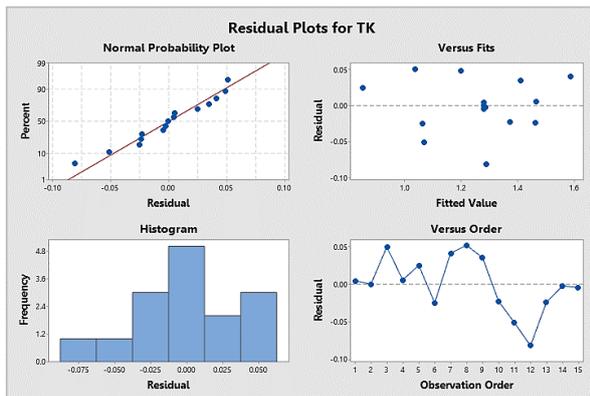
Run Order	Laser Power (%)	Cutting Speed (mm/s)	Focus (mm)	Top Kerf (mm)	Bottom Kerf (mm)
1	60	7.5	14	1.287	0.326
2	60	7.5	14	1.129	0.337
3	50	10.0	14	1.248	0.189
4	60	5.0	12	1.471	0.381
5	50	7.5	12	0.878	0.330
6	70	7.5	16	1.040	0.515
7	60	5.0	16	1.629	0.350
8	70	7.5	12	1.089	0.350
9	60	10.0	16	1.447	0.190
10	50	5.0	14	1.351	0.205
11	50	7.5	16	1.020	0.292
12	60	10.0	12	1.209	0.242
13	70	5.0	14	1.439	0.255
14	70	10.0	14	1.286	0.234
15	60	7.5	14	0.890	0.324

บทความวิจัย (Research Article)

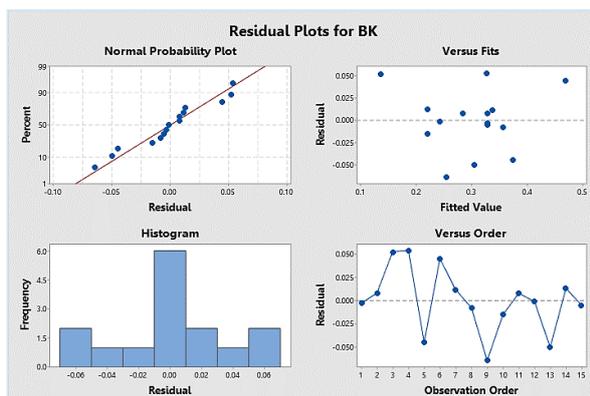
3.2 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.2.1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

หลังจากถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้อง OM จึงทำการวัดขนาดความกว้างของรอยตัดทั้งด้าน TK และด้าน BK จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ก่อนดำเนินการวิเคราะห์ ANOVA จำเป็นต้องตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองและสมมติฐานทางสถิติให้เป็นไปตามเงื่อนไข ผลการวิเคราะห์ Residual Plot ของความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK แสดงดังรูปที่ 5



5 (a)



5 (b)

รูปที่ 5 กราฟ Residual ของ (a) ความกว้างรอยตัดด้านบนและ (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง

จากรูปที่ 5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองผ่านกราฟ Residual แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสำหรับ TK และ BK ผ่านเกณฑ์ตรวจสอบทั้งสามเงื่อนไข ได้แก่ รูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งช่วยยืนยันว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและเป็นไปตามสมมติฐานทางสถิติอย่างเพียงพอ โดยไม่พบสัญญาณของการเบี่ยงเบนจากความเป็นปกติ (Non-Normality) หรือความแปรปรวนไม่คงที่ (Heteroscedasticity) ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลชุดนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK ที่ออกแบบการทดลองโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ BBD แสดงดังตารางที่ 4 ผลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า $R^2 = 96.41\%$ และ $R^2 (\text{Adj}) = 92.81\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างเพียงพอ [14] โดยปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเร็วตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อขนาดความกว้างรอยตัดด้าน TK เมื่อเทียบกับกำลังเลเซอร์และระยะโฟกัส โดยพิจารณาจากค่า P-Value น้อยที่สุดและค่า F-Value สูงสุด ในด้านปัจจัยยกกำลังสอง พบว่ากำลังเลเซอร์² ความเร็วตัด² และระยะโฟกัส² แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงโค้งระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับตัวแปรตอบสนอง โดยเฉพาะความเร็วตัด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์โค้งมากที่สุดในบรรดาปัจจัยทั้งหมด การปรับค่าความเร็วให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการได้คุณภาพรอยตัดที่ดี รองลงมาคือ กำลังเลเซอร์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากำลังเลเซอร์สูงหรือต่ำเกินไป คุณภาพรอยตัดจะลดลง ขณะที่ปฏิสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) ระหว่างกำลังเลเซอร์และระยะโฟกัสไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.522196	0.074599	26.83	0.000
Linear	3	0.107116	0.035705	12.84	0.003
Laser power	1	0.015913	0.015913	5.72	0.048
Speed	1	0.061215	0.061215	22.02	0.002
focus distance	1	0.029988	0.029988	10.79	0.013
Square	3	0.405997	0.135332	48.68	0.000
Laser power*Laser power	1	0.135735	0.135735	48.83	0.000
Speed*Speed	1	0.213416	0.213416	76.77	0.000
focus distance*focus distance	1	0.025919	0.025919	9.32	0.018
2-Way Interaction	1	0.009082	0.009082	3.27	0.114
Laser power*focus distance	1	0.009082	0.009082	3.27	0.114
Error	7	0.019460	0.002780		
Lack-of-Fit	5	0.019421	0.003884	200.08	0.005
Pure Error	2	0.000039	0.000019		
Total	14	0.541655			
S = 0.0527251		R-sq = 96.41%		R-sq (adj) = 92.81%	

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า $R^2 = 83.69\%$ และ R^2 (Adj) = 67.39% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างเพียงพอ โดยกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยตัดด้าน BK ในขณะที่ระยะโฟกัสไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งสาม พบว่า กำลังเลเซอร์และความเร็วตัด เป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมความกว้างรอยตัดด้าน BK ในส่วนของปัจจัยยกกำลังสอง พบว่า ความเร็วตัด² ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้าน BK มากที่สุด ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงโค้งระหว่างความเร็วตัด

และความกว้างรอยตัด กล่าวคือ หากความเร็วต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป อาจทำให้รอยตัดกว้างขึ้นได้ ส่วนระยะโฟกัส² และกำลังเลเซอร์² ไม่ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้าน BK อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของคุณค่า Lack-of-Fit ของ TK และ BK จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 พบว่า Lack-of-Fit ของทั้ง TK และ BK มีค่า P-value < 0.05 ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลนี้อาจเกิดจากจำนวนการทำซ้ำของจุดกึ่งกลาง (Center-Point Replications) ที่มีจำกัด ส่งผลให้การทดสอบมีความไวต่อความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมากขึ้นกว่าปกติ อย่างไรก็ตาม โมเดลยังคงสามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากแผนภาพอิทธิพลหลัก (Main Effects Plot) ของทั้ง TK และ BK ยังคงแสดงแนวโน้มของปัจจัยได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.087400	0.012486	5.13	0.023
Linear	3	0.028452	0.009484	3.90	0.063
Laser power	1	0.014179	0.014179	5.83	0.046
Speed	1	0.014028	0.014028	5.77	0.047
focus distance	1	0.000244	0.000244	0.10	0.761
Square	3	0.048687	0.016229	6.67	0.018
Laser power*Laser power	1	0.000678	0.000678	0.28	0.614
Speed*Speed	1	0.033183	0.033183	13.64	0.008
focus distance*focus distance	1	0.011745	0.011745	4.83	0.064
2-Way Interaction	1	0.010262	0.010262	4.22	0.079
Laser power*focus distance	1	0.010262	0.010262	4.22	0.079
Error	7	0.017028	0.002433		
Lack-of-Fit	5	0.016930	0.003386	69.10	0.014
Pure Error	2	0.000098	0.000049		
Total	14	0.104428			
S = 0.0493206		R-sq = 83.69%		R-sq (adj) = 67.39%	

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความกว้างรอยตัด

ผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK แสดงดังรูป 6 (a, b) แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อขนาดความกว้างรอยตัดที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน จากรูป 6 (a) พบว่า ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดด้าน TK มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก การเพิ่มกำลังเลเซอร์ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ผิววัสดุสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณรอยตัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดการหลอมและการระเหยของ

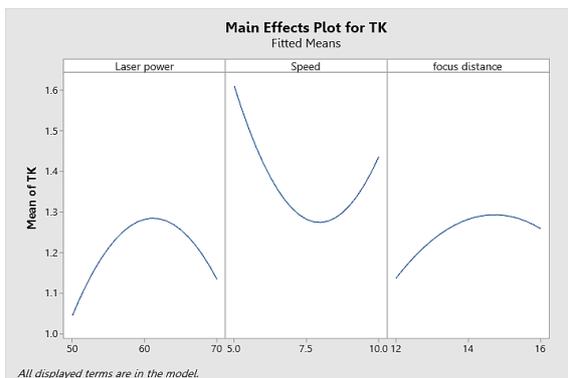
PMMA มากขึ้น จึงทำให้ความกว้างรอยตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มจาก 60% เป็น 70% พบว่าความกว้างรอยตัดมีแนวโน้มลดลงขณะที่ความเร็วตัดส่งผลอย่างชัดเจนในทางตรงข้ามกับกำลังเลเซอร์ กล่าวคือ การใช้ความเร็วตัดที่ต่ำเกินไปส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดมีค่าสูงมาก และเมื่อเพิ่มความเร็วจาก 5.0 เป็น 7.5 mm/min ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนและจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความเร็วตัดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความเร็วตัดที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดลดลงได้ ทั้งนี้เมื่อความเร็ว

บทความวิจัย (Research Article)

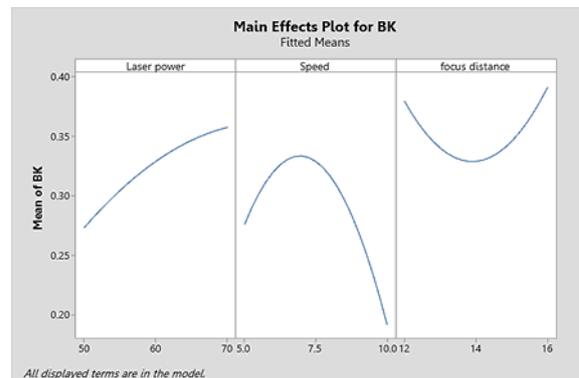
ในการตัดสูงขึ้น อัตราการส่งผ่านพลังงานไปสู่ชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างลำแสงกับพื้นผิวลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิที่พื้นผิวต่ำลง ตลอดจนการถ่ายเทพลังงานได้แพร่กระจายในทิศทางความลึก ส่งผลให้ TK มีขนาดเล็กลง [11,18] ส่วนของระยะโฟกัส พบว่า มีผลต่อความกว้างรอยตัดในลักษณะโค้งเช่นกัน โดยระยะโฟกัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยตำแหน่งโฟกัสที่เหมาะสมจะช่วยให้การรวมพลังงานของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยตัดสม่ำเสมอและความกว้างรอยตัดแคบลง [19] เพิ่มขึ้นของความกว้างของรอยตัดเมื่อระยะโฟกัสเพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการโฟกัสของลำแสงและการกระจายพลังงานเมื่อลำแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ระยะต่างกันออกไป หากระยะตัดสูงขึ้นการกระจายตัวของลำแสงจะเพิ่มขึ้น ขนาดจุดเลเซอร์จึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และการกำจัดวัสดุมีมากขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดกว้างขึ้น [13]

ในส่วนของผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดด้านล่าง ดังรูป 6 (b) พบว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัดด้านล่าง

แตกต่างจากความกว้างรอยตัดด้านบน กล่าวคือ เมื่อตัดด้วยกำลังเลเซอร์ 50% ทำให้ค่าความกว้างรอยตัดต่ำที่สุด แต่เมื่อกำลังเพิ่มเลเซอร์ให้สูงขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับความเร็วตัด พบว่า เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 7.5 mm/min ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุด ก่อนจะลดลงเมื่อความเร็วตัดเป็น 10 mm/min สำหรับความเร็วในการตัด ความกว้างของรอยตัดจะลดลงเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้เกิดจากเวลาในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างลำแสงเลเซอร์และวัสดุที่ลดลง ซึ่งเป็นการจำกัดปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าและจำกัดบริเวณจุดหลอมเหลวและการระเหย ดังนั้น ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้การกำจัดวัสดุน้อยลงและความกว้างของรอยตัดแคบลง ความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความเร็วในการตัดและความกว้างของรอยตัดนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการปรับพารามิเตอร์การตัดให้เหมาะสมที่สุด [13] ในด้านระยะโฟกัสนั้น ค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ความกว้างรอยตัดต่ำที่สุดคือ 14 mm หากระยะโฟกัสใกล้หรือไกลเกินไปจะทำให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักของ (a) ความกว้างรอยตัดด้านบน และ (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง

บทความวิจัย (Research Article)

3.2.3 Contour Plot และ Surface Plot

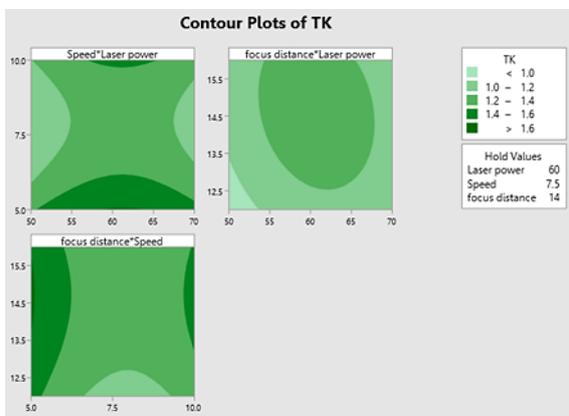
รูปที่ 7 แสดง Contour Plot ของความกว้างรอยตัดบนพื้นผิวด้าน TK และด้าน BK ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นการแสดงผลในรูปแบบภาพ 2D และรูปที่ 8 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์เชิงพื้นผิว (Surface Plot) ซึ่งเป็นการแสดงผลเป็นแบบภาพ 3D ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยการตัดทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่มีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK ของวัสดุ PMMA ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องเลเซอร์ CO₂ สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK ดังรูปที่ 6 (a) และรูปที่ 7 (a) พบว่า กำลังเลเซอร์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดมากที่สุด เมื่อกำลังเลเซอร์สูง

ความเร็วตัดต่ำ ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดด้านบนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายพลังงานความร้อนในกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ การเพิ่มกำลังเลเซอร์และการลดความเร็วในการตัดให้ต่ำลง ให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่า TK จึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หลอมละลายของวัสดุมีขนาดใหญ่ขึ้น [15,20] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระยะโฟกัส พบว่า เมื่อระยะโฟกัสต่ำ ส่งผลให้ค่า TK แคลบลง ในทางกลับกัน เมื่อระยะโฟกัสสูง กำลังเลเซอร์จะกระจายไปทั่วพื้นที่ผิวที่กว้างขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่กระทำกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ TK เพิ่มขึ้น [20] สมการเชิงพหุนามในการหาความกว้างรอยตัดที่แคบที่สุดบนพื้นผิวด้านบน แสดงดังสมการที่ 1

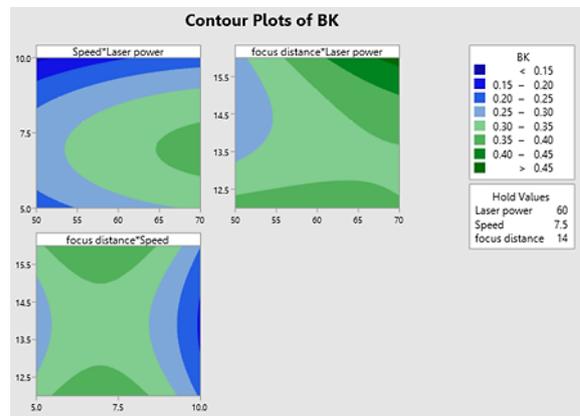
$$TK = 10.00 + 0.2679 \text{ Laser Power} - 0.6120 \text{ Speed} + 0.760 \text{ Focus Distance} - 0.001917 \text{ Laser Power}^2 + 0.03847 \text{ Speed}^2 - 0.02095 \text{ Focus Distance}^2 - 0.00238 \text{ Laser Power} * \text{Focus Distance} \dots \dots \dots (1)$$

สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK ดังรูปที่ 6 (a) และรูปที่ 7 (a) พบว่า เมื่อตัดชิ้นงานโดยใช้กำลังเลเซอร์ต่ำ ความเร็วตัดสูง จะทำให้ความกว้างรอยตัดแคบลง ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) น้อย ส่งผลให้วัสดุหลอมละลายลดลง จึงทำให้ความกว้างรอยตัดลดลง [15,20] ในทาง

กลับกัน เมื่อใช้กำลังเลเซอร์สูง ความเร็วตัดต่ำ ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น ในส่วนของระยะโฟกัสจะไม่ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดมากนักเมื่อใช้ความเร็วในการตัดสูง สมการเชิงพหุนามในการหาความกว้างรอยตัดที่แคบที่สุดบนพื้นผิวด้านล่าง แสดงดังสมการที่ 2



(a)



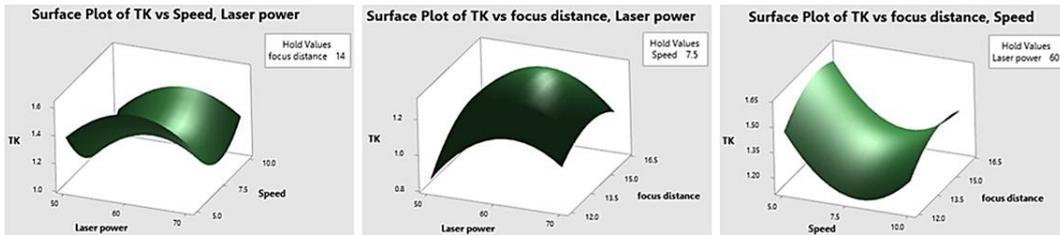
(b)

รูปที่ 7 Contour Plots ของ (a) ความกว้างรอยตัดด้าน TK และ (b) ความกว้างรอยตัดด้าน BK

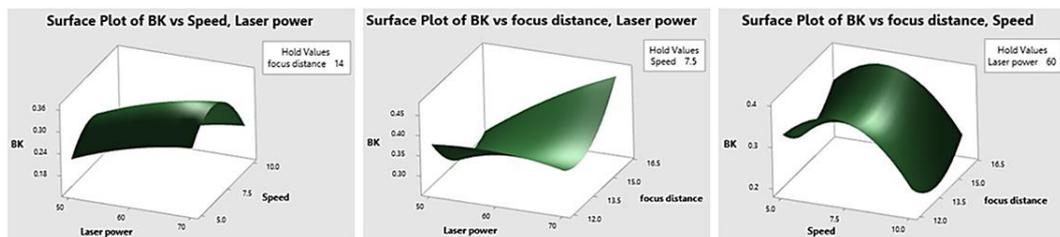
วิระพล ทับทิมดี และคณะ, การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวด้านบน

บทความวิจัย (Research Article)

$$BK = 3.71 - 0.0150 \text{ Laser Power} + 0.2108 \text{ Speed} - 0.544 \text{ Focus Distance} - 0.000135 \text{ Laser Power}^2 - 0.01517 \text{ Speed}^2 + 0.01410 \text{ Focus Distance}^2 + 0.00253 \text{ Laser Power} * \text{Focus Distance} \dots \dots \dots (2)$$



(a)



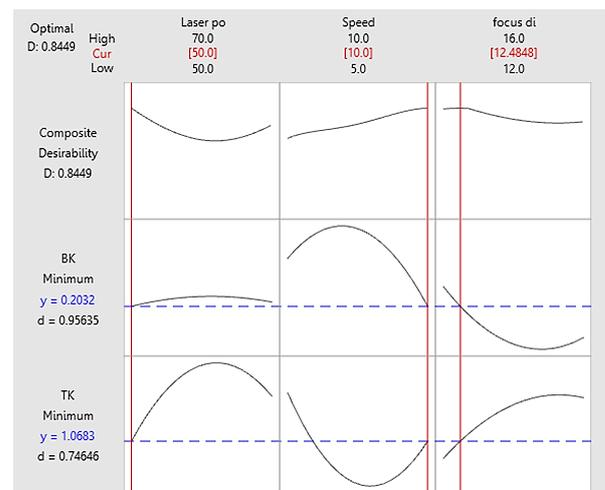
(b)

รูปที่ 8 Surface Plots ของความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK

3.3 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

รูปที่ 9 แสดงผลระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK ที่ส่งผลให้ค่าความกว้างมีค่าต่ำที่สุด โดยกำหนดให้น้ำหนัก (Weight) ของผลตอบสนองแต่ละตัว (Responses) มีค่าเท่ากัน เพื่อแสดงว่าความกว้างรอยตัดด้านบนและด้านล่างมีความสำคัญในระดับเดียวกันต่อคุณภาพชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขการตัดเดียวกัน ผลแสดงค่า Composite Desirability เท่ากับ 0.8449 ซึ่งถือว่ามีความอยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อเป้าหมายที่ตั้งไว้ อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อใช้กำลังเลเซอร์ 50% ความเร็วตัด 10 mm/min และระยะโฟกัสเท่ากับ 12.48 mm จะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้ความกว้างรอยตัดมีค่าต่ำ

ที่สุด คือ ค่า TK มีค่าต่ำสุดที่ 1.068 mm และค่า BK มีค่าต่ำสุดที่ 0.203 mm



รูปที่ 9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความกว้างรอยตัดด้านบนและด้านล่าง

บทความวิจัย (Research Article)

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตัดวัสดุ PMMA ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัด ด้านบนและด้านล่าง ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ BBD ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยด้านกำลังเลเซอร์และความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัด โดยความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK เพิ่มขึ้น

2. ระยะโฟกัสส่งผลต่อความกว้างรอยตัด โดยระยะโฟกัสที่ห่างจากชิ้นงานมากเกินไป ทำให้ลำแสงเลเซอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น พื้นที่ที่ได้รับความร้อนจึงกว้างขึ้น ส่งผลให้รอยตัดบน TK และ BK มีลักษณะกว้างและไม่คม ระยะโฟกัสที่ใกล้กับชิ้นงานมากกว่าส่งผลต่อความกว้างรอยตัดที่ดีกว่า

3. ผลการวิเคราะห์ Contour และ Surface plot แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยเฉพาะกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดอย่างชัดเจน

4. ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการตัดวัสดุ PMMA หนา 3 มม. คือ การตัดโดยใช้กำลังเลเซอร์ 50% ความเร็วตัด 10 มม./นาที และระยะโฟกัส 12.48 มม. ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดบน TK และ BK มีค่าต่ำที่สุด

5. ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. การทดลองของงานวิจัยนี้ พิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส โดยยังไม่ได้รวมปัจจัยอื่น เช่น แรงดัน

ลมตัด ความหนาของวัสดุ หรือชนิดของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมรอยตัด จึงควรศึกษาปัจจัยเหล่านี้เพิ่มเติม

2. ในงานวิจัยต่อไป หากต้องการอธิบายกลไกของการเกิดรอยตัดในเชิงลึกขึ้น ควรผนวกการวิเคราะห์เชิงความร้อนหรือการจำลองการถ่ายเทพลังงานของเลเซอร์ร่วมด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ให้กับทีมงานวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sudarsono et al., “Design and fabrication of optical waveguide as directional coupler using CO₂ laser cutting on acrylic substrate,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, vol. 1153, 2019, pp. 1–6.
- [2] R. N. Hwayyin and A. S. Hammood, “Improving the properties of acrylic by creating crack using laser beam,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, vol. 579, 2019, pp. 1–10.

บทความวิจัย (Research Article)

- [3] J. D. Kechagias et al., “A generalised approach on kerf geometry prediction during CO₂ laser cut of PMMA thin plates using neural networks,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, pp. 372–393, 2021.
- [4] A. H. Elsheikh, W. Deng, and E. A. Showaib, “Improving laser cutting quality of polymethyl methacrylate sheet: Experimental investigation and optimization,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1325–1339, 2020.
- [5] R. T. Mushtaq et al., “State-of-the-art and trends in CO₂ laser cutting of polymeric materials—A review,” *Materials*, vol. 13, pp. 1–23, 2020.
- [6] P. Khatak et al., “Laser cutting technique: A literature review,” in *Materials Today: Proceedings*, 2022, pp. 2484–2489.
- [7] S. S. Wangikar et al., “Parametric influence study for laser cutting on acrylic,” in *Proceedings of the National Conference on Relevance of Engineering and Science for Environment and Society*, AIJR Publisher, 2021, pp. 104–107.
- [8] M. Hashemzadeh and M. Mohammadi, “The effect of power and maximum cutting speed on the material removal rate and cutting volume efficiency in CO₂ laser cutting of polycarbonate sheets,” *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, vol. 9, no. 1, pp. 5–23, 2020.
- [9] A. M. Varsi and A. H. Shaikh, “Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO₂ laser cutting of thermoplastic material,” *Journal of Laser Applications*, vol. 31, no. 3, 2019.
- [10] S. Ürgün et al., “Optimization of laser cutting parameters for PMMA using metaheuristic algorithms,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 9, pp. 12333–12355, 2024.
- [11] K. Aydın and L. Uğur, “Prediction of kerf and groove widths in CO₂ laser cutting process of PMMA using experimental and machine learning methods,” *Experimental Techniques*, vol. 49, pp. 873–886, 2025.
- [12] E. Vasileska, M. Pacher, and B. Previtali, “In-line monitoring of focus shift by kerf width detection with coaxial thermal imaging during laser cutting,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, no. 7, pp. 2587–2600, 2022.
- [13] E. Vasileska et al., “Statistical analysis and machine learning-based modelling of kerf width in CO₂ laser cutting of PMMA,” *Manufacturing Technology Engineering Science and Research Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 960–968, 2024.
- [14] M. Safari, J. Joudaki, and M. Rezaei, “Investigation of laser cutting of thin polymethyl methacrylate sheets by

บทความวิจัย (Research Article)

- response surface methodology,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 37, no. 3, pp. 484–495, 2024.
- [15] A. B. Khoshaim et al., “Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 235–246, 2021.
- [16] E. Kurt, U. E. Karaçay, and M. Tutar, “Investigation of the effect of process parameters in CO₂ laser cutting of PMMA material by response surface method,” *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 523–536, 2023.
- [17] W. Taptimdee, B. Meesa, and P. Chourwong, “Optimal value of factors affecting surface roughness and workpiece dimension on acrylic cutting with a CO₂ laser cutter machine using the Taguchi method,” *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 1–16, 2024.
- [18] M. Moradi et al., “Effect of the focal plane position on CO₂ laser beam cutting of injection molded polycarbonate sheets,” in *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016)*, SPIE, 2016, pp. 56–65.
- [19] M. Moradi et al., “Capability enhancing of CO₂ laser cutting for PMMA sheet using statistical modeling and optimization,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 23, pp. 1–17, 2023.
- [20] A. M. Alhawsawi et al., “Kerf characteristics during CO₂ laser cutting of polymeric materials: Experimental investigation and machine learning-based prediction,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 46, pp. 1–11, 2023.



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร

"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"
"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

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

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