

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 (2026)

พฤษภาคม – มิถุนายน 2569

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)





กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม – มิถุนายน 2569)

Vol. 4 No. 3 (May – June 2026)

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

วัตถุประสงค์

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

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

เงื่อนไขการตีพิมพ์

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

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดี ด้านวิชาการ การวิจัย การบริการวิชาการ

และการประกันคุณภาพและมาตรฐานการศึกษาทุกระดับ

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดร.วิจิตรา โพธิสาร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สฤติพงศ์ เสี่ยงมศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล

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.สฤตลดา วรรณปะเช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจาจาก จอมโนนเขว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.สินาค โกศลนันท์

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ 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 ศรีบุญรัมย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมเอกสารและการประสานงาน

ดร.สวลี อุดรา

นางนศร สุดสนธิ์

นางสาวนภัทรธิดา พรหมดีราช

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

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 3 เดือนพฤษภาคม – เดือนมิถุนายน ปีพุทธศักราช 2569 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความมาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านคงได้รับประโยชน์จากผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิจัย	
Adaptive Transmission Strategies for Energy-Efficient Long-Term Outdoor IoT Monitoring	1-21
Jaratpong Tepmanee, Dumrongsak Wongta, Satawat Muangchuen and Kittikom Nontprasat	
การออกแบบและพัฒนาเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว	22-35
ศิริพงษ์ ตีร์รัตน์, ฤทธิชัย บุญทาศรี และ กิตติคม นนท์ประสาท	
การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	36-47
สามารถ จันทนา, จุฑาทิพย์ นามวงษ์, นาวิ เปี้ยวจิตร, เข้มชาติ เขยชม และ วิมลสิน สันตจิต	
การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อดูดซับวัสดุพูนสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	48-57
สุรเดช สิมจะโป๊ะ, จตุพล ป้องกัน, ไพสิน หาญขุนทด และ นิวัฒน์ เกตุชาติ	
การอบแห้งฟักทองด้วยความร้อนแบบฮีตปั๊มสำหรับเกษตรกร	58-69
ธีรศาสตร์ คณาศรี และ บุญลิริ ปีตตาแสง	
การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลงกำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF	70-85
ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา, ศตวรรษ เมืองขึ้น, จรัสพงศ์ เทพมณี, สมชาย สัมพันธ์ศรี และ กิตติคม นนท์ประสาท	
การออกแบบบรรทัดอ้อยต้นแบบที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	86-99
ชัยธูมาจณ์ ชูดวงเกียรติกุล, จามร วสุรัตน์มณี, ศุภโชค กลัษติ, ศิริพร สุขกุล, ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์	

Adaptive Transmission Strategies for Energy-Efficient Long-Term Outdoor IoT Monitoring

Jaratpong Tepmanee^{1,*}, Dumrongsak Wongta¹, Satawat Muangchuen¹ and Kittikom Nontprasat²

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

² Department of Industrial Management, Graduate School, Chiangrai College

*Corresponding Author: jaratpong.tepmanee@crc.ac.th, Tel: 080-3595889

(Received: February 12, 2026; Revised: March 31, 2026; Accepted: April 7, 2026)

Abstract

Continuous high-resolution data transmission in Internet of Things (IoT)-based environmental monitoring systems leads to significant communication overhead and energy consumption, particularly in long-term outdoor deployments. This study aims to evaluate and compare energy-efficient data transmission strategies for long-term outdoor IoT environmental monitoring systems under real-world conditions. A system-level evaluation was conducted using a real-world environmental sensing platform deployed in Chiang Rai, Thailand. The system, built on an ESP32 microcontroller with SHT20 and PMS3003 sensors, collected temperature, humidity, and PM2.5 data at 30-second intervals from March 2024 to May 2025, resulting in 1,048,406 transmission events under the baseline configuration. Two transmission reduction strategies were evaluated: fixed downsampling and adaptive sampling based on signal variability. Performance was assessed using Data Reduction Ratio (DRR) and Event Preservation Ratio (EPR), including both PM-only and multi-parameter event detection. The fixed downsampling approach achieved the highest data reduction (90.00%) but preserved only 15.91% of multi-parameter environmental events. In contrast, adaptive sampling reduced transmission by 78.89% while preserving 56.76% of combined environmental events. The results demonstrate that maximizing transmission reduction alone is not suitable for dynamic environmental monitoring. Variability-aware adaptive transmission provides a more balanced trade-off between energy efficiency and event preservation. This study proposes a practical evaluation framework for designing energy-constrained IoT monitoring systems under real long-term outdoor conditions.

Keywords: Internet of Things, Adaptive Sampling, Data Reduction, PM2.5 Monitoring, Energy-Efficient Transmission, Environmental Sensing, ESP32, Edge Computing

Please cite this article as: J. Tepmanee, D. Wongta, S. Muangchuen and K. Nontprasat, "Adaptive Transmission Strategies for Energy-Efficient Long-Term Outdoor IoT Monitoring," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 1-21, 2026.

กลยุทธ์การส่งข้อมูลแบบปรับตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน สำหรับระบบตรวจวัด IoT กลางแจ้งระยะยาว

จรัสพงศ์ เทพมณี^{1,*}, ดำรงค์ศักดิ์ วงศ์ตา¹, ศตวรรษ เมืองชื่น¹ และ กิตติคม นนทบุรีประสาท²

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

² สาขาการจัดการอุตสาหกรรม คณะบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเชียงราย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: jaratpong.tepmanee@crc.ac.th, โทรศัพท์: 080-3595889

(รับบทความ: 12 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 31 มีนาคม 2569; ตอรับบทความ: 7 เมษายน 2569)

บทคัดย่อ

การส่งข้อมูลความละเอียดสูงอย่างต่อเนื่องในระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อมที่ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ก่อให้เกิดภาระด้านการสื่อสารและการใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะในระบบที่ติดตั้งใช้งานกลางแจ้งระยะยาว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบกลยุทธ์การส่งข้อมูลที่ประหยัดพลังงาน สำหรับระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อมแบบ IoT ในสภาพการใช้งานจริงระยะยาว การศึกษานี้ดำเนินการในระดับระบบโดยใช้แพลตฟอร์มตรวจวัดสิ่งแวดล้อมจริงที่ติดตั้งในจังหวัดเชียงราย ประเทศไทย โดยระบบพัฒนามาบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ SHT20 และ PMS3003 ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่น PM2.5 ทุก ๆ 30 วินาที ระหว่างเดือนมีนาคม 2567 ถึงเดือนพฤษภาคม 2568 รวมทั้งสิ้น 1,048,406 ครั้ง ภายใต้การตั้งค่าพื้นฐาน ได้ทำการประเมินกลยุทธ์การลดการส่งข้อมูล 2 วิธี ได้แก่ การลดความถี่แบบคงที่ และการสุ่มตัวอย่างแบบปรับเปลี่ยนตามความแปรปรวนของสัญญาณ โดยประเมินผลด้วยตัวชี้วัด ได้แก่ อัตราการลดข้อมูล (Data Reduction Ratio: DRR) และอัตราการคงอยู่ของเหตุการณ์ (Event Preservation Ratio: EPR) ครอบคลุมทั้งเหตุการณ์จากฝุ่น PM เพียงอย่างเดียวและหลายพารามิเตอร์ร่วมกัน ผลการทดลองพบว่า วิธีการลดความถี่แบบคงที่ สามารถลดข้อมูลได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 แต่มีความสามารถในการคงอยู่ของเหตุการณ์หลายพารามิเตอร์เพียงร้อยละ 15.91 ในขณะที่การสุ่มตัวอย่างแบบปรับเปลี่ยนสามารถลดการส่งข้อมูลได้ร้อยละ 78.89 และยังคงเหตุการณ์สำคัญได้ถึงร้อยละ 56.76 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการมุ่งเน้นการลดการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมกับการตรวจวัดสิ่งแวดล้อมที่มีความเปลี่ยนแปลงสูง โดยกลยุทธ์แบบปรับตัวตามความแปรปรวนให้สมดุลที่ดีกว่าระหว่างประสิทธิภาพพลังงานและการคงข้อมูลเหตุการณ์ งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบการประเมินเชิงปฏิบัติสำหรับการออกแบบระบบ IoT ที่มีข้อจำกัดด้านพลังงานภายใต้สภาพแวดล้อมจริงในระยะยาว

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง การสุ่มตัวอย่างแบบปรับตัว การลดข้อมูล การตรวจวัด PM2.5 การส่งข้อมูลประหยัดพลังงาน การตรวจวัดสิ่งแวดล้อม ESP32 เอ็ดจ์คอมพิวเตอร์

การอ้างอิงบทความ: จรัสพงศ์ เทพมณี, ดำรงค์ศักดิ์ วงศ์ตา, ศตวรรษ เมืองชื่น และ กิตติคม นนทบุรีประสาท, "กลยุทธ์การส่งข้อมูลแบบปรับตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานสำหรับระบบตรวจวัด IoT กลางแจ้งระยะยาว," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 1-21, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

1. Introduction

In recent years Internet of Things (IoT)-based environmental monitoring systems have been widely deployed to continuously observe temperature, humidity, and air quality parameters over long periods of time. High-resolution temporal sensing enables the detection of rapid environmental changes and abnormal events which is particularly important in real-world deployments such as air pollution monitoring and environmental risk assessment. However continuous high-frequency data transmission from resource-constrained IoT devices introduces significant challenges in terms of energy consumption, communication overhead, and system sustainability [1,2].

Several studies have identified data transmission as one of the dominant contributors to energy depletion in long-term IoT deployments, especially for field-installed sensor nodes powered by batteries or renewable energy sources [3]. Fixed-rate sampling and continuous data uploading, although simple to implement, often result in unnecessary transmission of redundant or low-information data thereby reducing network lifetime and increasing operational costs [4].

To address these limitations existing research has proposed various data reduction strategies including adaptive sampling event-based transmission, local aggregation, and edge-level processing. Systematic reviews have shown that data reduction techniques can be broadly categorized into compression-

based, sampling-based, and event-driven approaches each with distinct trade-offs between energy efficiency and data fidelity. Among these approaches adaptive sampling and event-based transmission have gained increasing attention due to their ability to dynamically adjust sensing and communication behavior according to environmental dynamics [5,6].

In parallel advances in edge computing have further emphasized the importance of system-level decision making at or near the sensor nodes. By performing lightweight processing and transmission control at the edge, IoT systems can significantly reduce communication load while maintaining acceptable monitoring performance [4,7]. Nevertheless, prior studies often focus on algorithmic design or simulation-based evaluations with limited validation using long-term high-resolution environmental datasets collected from real deployments.

Recent works on adaptive sampling for environmental monitoring demonstrate promising results in reducing data volume and energy consumption [8,9]. However, the majority of these studies are evaluated on short-term datasets or controlled experimental settings. As highlighted in multiple surveys there remains a lack of comprehensive engineering evaluations that quantify the trade-off between data reduction and event preservation when adaptive transmission strategies are applied to real-world long-duration environmental data. Despite the

บทความวิจัย (Research Article)

extensive development of data reduction and adaptive transmission techniques a clear research problem remains. There is a lack of systematic engineering evaluation that quantifies how transmission reduction strategies affect both energy efficiency and the preservation of critical environmental events when applied to long-term high-resolution real-world datasets.

Therefore, this study addresses an important research gap by investigating energy-efficient data transmission strategies for IoT-based environmental monitoring systems using long-term high-frequency field data. Rather than proposing a new sensing algorithm this work focuses on the engineering evaluation of adaptive and event-aware transmission strategies examining how data reduction impacts system efficiency and the ability to preserve meaningful environmental events. The findings of this study aim to provide practical design guidelines for resource-constrained IoT deployments operating under real environmental conditions.

2. Literature Review

2.1 Data Transmission and Energy Constraints in IoT Systems

Energy consumption has long been recognized as a critical constraint in IoT-based monitoring systems, particularly for long-term field deployments where sensor nodes rely on limited power sources such as batteries or

energy harvesting devices. Several studies have shown that wireless data transmission dominates the overall energy budget of IoT nodes often exceeding the energy required for sensing and local computation [1,3].

As a result, continuous high-frequency data transmission significantly reduces system lifetime and increases maintenance costs. Traditional IoT deployments commonly adopt fixed-rate sampling and periodic data uploading due to their simplicity. However systematic reviews indicate that such approaches lead to substantial redundancy in transmitted data especially in environmental monitoring scenarios where sensed variables often exhibit slow temporal variations interspersed with occasional abrupt changes [1,2]. These findings highlight the necessity of designing transmission strategies that are adaptive to environmental dynamics rather than relying on static configurations.

2.2. Data Reduction Techniques for IoT-Based Monitoring

To mitigate energy and communication constraints a wide range of data reduction techniques have been proposed in the literature. According to comprehensive surveys, data reduction methods for IoT systems can be broadly classified into compression-based, sampling-based, and event-driven approaches [1,2]. Compression techniques aim to reduce payload size while sampling-based methods reduce the number of transmitted data

บทความวิจัย (Research Article)

points. Event-driven approaches on the other hand, selectively transmit data only when predefined conditions or anomalies are detected.

Among these categories sampling-based and event-driven techniques have been identified as particularly suitable for resource-constrained IoT nodes as they avoid the computational overhead associated with complex compression algorithms [2]. Reviews further suggest that these approaches are more compatible with real-time monitoring requirements and low-power communication technologies such as LoRa and NB-IoT [3,10].

Recent studies have proposed predictive and adaptive data reduction techniques to minimize redundant transmissions in IoT systems [11].

2.3 Adaptive Sampling and Event-Based Transmission

Adaptive sampling has emerged as an effective strategy for balancing data fidelity and energy efficiency in IoT systems. Instead of using a fixed sampling interval, adaptive approaches dynamically adjust the sampling rate based on signal characteristics, environmental variability or energy availability [6,9]. Event-based transmission extends this concept by triggering data transmission only when significant changes or predefined events occur in the sensed data. A survey [5] categorizes event detection mechanisms into threshold-based, statistical, and lightweight machine learning approaches. For environmental

monitoring applications threshold-based and statistical methods are often preferred due to their simplicity, transparency, and low computational cost. Empirical studies demonstrate that adaptive and event-driven strategies can significantly reduce data volume while preserving key features such as peaks and abrupt transitions [6,8]. However existing works primarily evaluate these techniques using short-term datasets or controlled laboratory experiments. As noted in multiple reviews there is limited evidence demonstrating how adaptive sampling and event-based transmission perform when applied to long-term high-resolution environmental data collected under real-world conditions [1,5,6]. Recent studies have proposed adaptive sensing frameworks to improve energy efficiency in IoT systems, particularly in WSN-assisted environments [12].

2.4 Edge Computing and System-Level Design Considerations

Recent advances in edge computing have further reinforced the importance of system-level design in IoT deployments. By enabling local data processing and decision-making at or near the sensor nodes, edge computing architectures can reduce communication latency and network traffic while improving energy efficiency [4,7]. Surveys in this area emphasize that intelligent data transmission strategies should be considered an integral component of edge-enabled IoT systems. Nevertheless, much of

บทความวิจัย (Research Article)

the existing literature focuses on architectural frameworks or algorithmic innovations with limited emphasis on quantitative engineering evaluation. In particular the interaction between adaptive transmission strategies and long-term data characteristics such as seasonal variations and sensor noise remains underexplored [2,4]. This gap is especially relevant for environmental monitoring systems where data patterns may vary significantly over extended deployment periods.

Recent advancements in Edge-AI have further enhanced the capability of IoT systems by enabling intelligent decision-making at the network edge, improving latency, energy efficiency, and scalability. These approaches integrate artificial intelligence directly into edge devices to reduce communication overhead and improve real-time responsiveness [13].

A comparative analysis of existing studies reveals several key differences in methodological focus and evaluation scope. Prior works on adaptive sampling and event-based transmission primarily emphasize algorithmic design and simulation-based validation, often using short-term or synthetic datasets. While these approaches demonstrate significant potential in reducing data volume and energy consumption, they frequently lack evaluation under long-term real-world environmental conditions. In contrast some studies address system-level implementation but do not systematically quantify the trade-off between data reduction and event preservation. Furthermore, limited attention has been given

to multi-parameter environmental event analysis in practical deployments. These limitations highlight the need for a comprehensive engineering evaluation framework that integrates long-term field data, transmission efficiency and event preservation performance.

2.5 Research Gap and Motivation

Based on the reviewed literature, several key gaps can be identified. First although numerous data reduction and adaptive transmission techniques have been proposed, most studies lack validation using long-term high-frequency environmental datasets obtained from real deployments [1,6,8]. Second, prior work often reports data reduction ratios or energy savings without systematically evaluating the impact on event preservation and monitoring effectiveness [5,9]. Finally, there is a need for practical engineering guidelines that quantify the trade-offs between data reduction, energy efficiency, and information loss in real-world IoT monitoring systems [2,4]. Motivated by these gaps this study focuses on the engineering evaluation of energy-efficient data transmission strategies using long-term environmental monitoring data. By analyzing adaptive and event-based transmission schemes under realistic conditions the study aims to provide insights that bridge the gap between theoretical approaches and practical IoT system design.

บทความวิจัย (Research Article)

While prior studies have reported transmission reduction benefits most evaluations focus primarily on energy metrics without quantifying event preservation performance. Comparative trade-off analysis using long-term real-world outdoor datasets remains limited. Therefore, a structured quantitative framework is required to systematically evaluate both transmission efficiency and monitoring reliability.

3. Research Objectives and Contributions

This study aims to address the limitations identified in existing literature regarding energy-efficient data transmission in IoT-based environmental monitoring systems. While previous studies and surveys have extensively discussed data reduction techniques such as adaptive sampling and event-based transmission most of them rely on short-term experiments, simulations, or controlled laboratory data. Consequently, there is a lack of engineering-level evaluation that demonstrates how these strategies perform when applied to long-term high-frequency environmental data collected from real-world deployments. The primary objective of this research is therefore to systematically evaluate energy-efficient data transmission strategies using long-term field data with a focus on system-level performance rather than algorithmic novelty. Specifically, this study seeks to analyze the characteristics of high-resolution environmental monitoring data including temporal

redundancy, variability, and event-like behaviors that influence data transmission decisions.

Based on these characteristics adaptive sampling and event-based transmission strategies suitable for resource-constrained IoT sensor nodes are designed and implemented. The performance of these strategies is evaluated by comparing them with conventional fixed-rate transmission in terms of data reduction rate transmission frequency and estimated energy savings. In addition, this study investigates the extent to which reduced data transmission schemes are able to preserve significant environmental events which is a critical requirement for maintaining the effectiveness of environmental monitoring systems.

The contributions of this study are threefold. First, it provides an engineering evaluation of energy-efficient data transmission strategies using one-year high-frequency environmental monitoring data obtained from a real deployment thereby addressing a key gap in prior research that predominantly focuses on short-term or synthetic datasets. Second the study presents a systematic comparison of multiple transmission strategies under a unified evaluation framework enabling a clear analysis of trade-offs between data reduction and information preservation. Third the findings of this work offer practical insights and design guidelines for long-term IoT deployments operating under energy and communication constraints contributing empirical evidence that bridges the gap

บทความวิจัย (Research Article)

between survey-based research and real-world system design.

4. Methodology

4.1 Dataset & System Description

The environmental monitoring dataset used in this study was collected using an outdoor IoT sensing system deployed in Chiang Rai province, Thailand. The sensing node was built on an ESP32 microcontroller platform and equipped with an SHT20 sensor for temperature and relative humidity measurements, as well as a PMS3003 sensor for PM2.5 concentration monitoring. The system was designed for continuous outdoor operation and data acquisition under real environmental conditions. Environmental data were collected at a fixed sampling interval of 30 seconds from March 2024 to May 2025, resulting in a long-term high-resolution time-series dataset. All sensed data were transmitted to a cloud-based database using the ThingSpeak platform for storage and further analysis. The data acquisition and transmission architecture follow a typical IoT-based environmental monitoring workflow and has been previously validated in a related outdoor sensing application [14]. This dataset provides a realistic foundation for evaluating energy-efficient data transmission strategies, as it exhibits natural environmental variability noise characteristics associated with low-cost sensors and long-term temporal patterns

relevant to adaptive sampling and event-based transmission.

4.2 System Overview



Figure 1. Block diagram of the proposed IoT-based environmental monitoring system.

The Figure 1 shows the overall architecture of the IoT-based environmental monitoring system used in this study. The system consists of three main components: environmental sensors an ESP32-based microcontroller unit (MCU) and a cloud-based server. The sensing unit includes sensors for PM2.5 concentration temperature and relative humidity which continuously measure outdoor environmental conditions. The ESP32 MCU is responsible for data sampling preliminary processing and wireless data transmission using an integrated Wi-Fi module. All sensed data are transmitted to a remote server where they are stored in a cloud database for long-term logging and offline analysis.

This system architecture represents a typical IoT-based environmental monitoring workflow and serves as the baseline configuration for evaluating energy-efficient

บทความวิจัย (Research Article)

data transmission strategies. In the conventional operation mode sensor data are sampled and transmitted at a fixed interval of 30 seconds. In this study the same system architecture is maintained while different data transmission strategies are evaluated at the MCU level to reduce transmission frequency without modifying sensor hardware or cloud infrastructure.

The architecture shown in Figure 1 provides a practical foundation for investigating system-level energy efficiency in long-term IoT deployments. Rather than introducing additional hardware or complex processing modules this study focuses on modifying the data sampling and transmission logic implemented on the ESP32 MCU. By adjusting when and how sensor data are transmitted to the server the impact of data reduction strategies on transmission load energy consumption and event preservation can be systematically evaluated under realistic operating conditions.



Figure 2. Actual device used for environment data acquisition.

Figure 2. Photograph of the actual data acquisition device installed in the field. The enclosure is made of a plastic box designed for outdoor deployment. A small protective hood is installed to shield the PMS3003 particulate matter sensor from direct rain and sunlight while allowing proper air intake. The SHT20 temperature and humidity sensor is mounted below the enclosure to enable accurate ambient environmental measurements.

4.3 System Operation and Baseline Configuration

Under normal operation the environmental sensing system shown in Figure 1 collects temperature, humidity and PM2.5 data at a fixed interval of 30 seconds. Each sampled data point is immediately transmitted to the cloud database via Wi-Fi using the ESP32 module. This fixed-rate transmission strategy serves as the baseline configuration in this study. Let N baseline denote the total number of transmitted samples under fixed 30-second [14] sampling over the entire monitoring period. Since data are transmitted at every sampling instant, the number of transmissions is equal to the number of samples collected.

This configuration represents the maximum transmission load and is used as the reference case for evaluating data reduction and energy-saving performance. Energy consumption associated with data transmission is assumed to be proportional to the number of transmission events. Therefore, reducing transmission

บทความวิจัย (Research Article)

frequency directly contributes to energy savings, as suggested in prior studies on energy-aware IoT communication [3,9].

4.4 Transmission Strategies and Evaluation Metrics

To evaluate the effectiveness of energy-efficient data transmission in the proposed IoT-based environmental monitoring system several transmission strategies are implemented and compared against the baseline fixed-rate transmission described in the previous section. The objective is to quantify the trade-offs between transmission reduction, energy savings, and preservation of significant environmental events.

Transmission Strategies In the baseline configuration environmental data are sampled and transmitted every 30 seconds without any filtering or adaptation. Let N baseline denote the total number of transmitted samples over the entire monitoring period. Since every sampled data point is transmitted the number of transmission events is equal to the number of collected samples. This configuration represents the maximum transmission load and serves as the reference case for performance comparison.

Fixed-Interval Downsampling, the first reduction strategy is fixed-interval downsampling where data are sampled at 30-second intervals but transmitted only every $k - th$ sample. For example, when $k = 10$ one data point is transmitted every 5 minutes.

$$N_{reduced} = \frac{N_{baseline}}{k} \quad (1)$$

This approach provides a simple mechanism for reducing transmission frequency without requiring signal analysis.

Adaptive Sampling Strategy In the adaptive sampling strategy transmission frequency is dynamically adjusted based on environmental variability. The change in PM2.5 concentration is calculated.

$$\Delta PM(t) = PM(t) - PM(t - \Delta t) \quad (2)$$

$$\Delta PM_{(t)} > 0 \quad (3)$$

the current data point is transmitted immediately otherwise transmission is deferred or aggregated. The threshold parameter θ controls system sensitivity. Lower values increase event responsiveness but reduce data reduction efficiency.

Event-Based Transmission In the event-based strategy transmission occurs only when predefined environmental conditions are satisfied. PM2.5 event.

$$PM_{(t)} - \overline{PM}_{window} > \alpha \quad (4)$$

$\overline{PM}_{window}$ represents the moving average over a predefined window. A multi-parameter event condition can also be defined.

บทความวิจัย (Research Article)

$$E(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } PM \uparrow \wedge Temp \uparrow \wedge RH \downarrow \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Transmission occurs only when $E(t) = 1$. This strategy aims to preserve significant environmental fluctuations while minimizing redundant transmissions during stable periods.

PM_{2.5} concentration is selected as the primary triggering parameter for adaptive transmission due to its higher short-term variability compared to temperature and relative humidity in outdoor environments. Several studies have reported that air pollution parameters exhibit abrupt fluctuations and dynamic behavior making them suitable for event-driven monitoring strategies [5,6,15,16]. In contrast meteorological variables such as temperature and humidity typically show smoother temporal variations over short intervals. Therefore, using PM_{2.5} as the main adaptive trigger allows the system to respond to significant environmental changes while minimizing unnecessary transmissions.

Evaluation Metrics To quantify system performance three key evaluation metrics are defined.

Data Reduction Ratio (DRR) The Data Reduction Ratio measures the percentage of transmission reduction relative to the baseline configuration.

Multi-Parameter Adaptive Sampling Formulation To extend the adaptive transmission mechanism beyond single-parameter triggering

a multi-parameter variability model is formulated. The normalized variability index.

$$V(t) = w_1 \frac{\Delta PM(t)}{\alpha PM} + w_2 \frac{\Delta Temp(t)}{\alpha Temp} + w_3 \frac{\Delta Hum(t)}{\alpha Hum} \quad (6)$$

The weighting coefficients satisfy.

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (7)$$

αPM , $\alpha Temp$, and αHum are normalization factors used to scale the relative influence of each parameter. The adaptive sampling interval is then,

$$Ts(t) = T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{1 + \gamma V(t)} \quad (8)$$

$$DDR = 1 - \frac{N_{transmitted}}{N_{baseline}} \quad (9)$$

Where $N_{transmitted}$ is the number of transmissions under a given strategy. higher DRR indicates greater transmission reduction.

Event Preservation Ratio (EPR) To ensure that significant environmental events are not lost due to transmission reduction the Event Preservation Ratio is defined.

$$EPR = \frac{N_{reduce\ event}}{N_{baseline\ event}} \quad (10)$$

บทความวิจัย (Research Article)

N_{baseline event} = number of detected events using full 30-second data.

N_{reduce event} = number of detected events under reduced transmission.

An EPR close to 1 indicates that the transmission strategy successfully preserves important environmental events.

The parameters used in the adaptive sampling and event detection mechanisms were selected based on empirical analysis of the dataset and practical considerations for real-world deployment. The PM2.5 change threshold ΔPM was determined by analyzing short-term variability patterns to ensure sensitivity to significant fluctuations while avoiding excessive triggering due to noise.

For event detection the threshold parameter (α) and moving average window were chosen to balance responsiveness and stability ensuring that only meaningful environmental changes are captured. The weighting coefficients (w_1 , w_2 , w_3) in the multi-parameter model were assigned to prioritize PM2.5 due to its higher variability compared to temperature and humidity, as observed in the dataset. The adaptive sampling parameters, including minimum and maximum sampling intervals (T_{min} , T_{max}) and the scaling factor (γ) were configured to maintain a balance between transmission reduction and responsiveness to dynamic environmental conditions. These values were selected through iterative testing to achieve

stable performance across the full-year dataset.

All algorithms were implemented at the microcontroller (ESP32) level, where transmission decisions were made in real time based on incoming sensor data without requiring additional hardware or cloud-side processing.

4.5 Energy Saving Estimation

Since wireless transmission is a dominant energy-consuming operation in IoT nodes [3,9,16] energy consumption is assumed to be proportional to the number of transmission events. The relative energy saving is therefore estimated.

$$Energy_{saving} = 1 - \frac{N_{tx}^{reduce}}{N_{tx}^{baseline}} \quad (11)$$

Where N_{tx} represents the number of transmission events. Under this assumption energy saving is directly equivalent to transmission reduction.

4.6 Experimental Design

The evaluation is conducted using the complete dataset collected between March 2024 and May 2025. The baseline transmission count is first determined under the 30-second sampling configuration to establish a reference scenario. Subsequently each transmission

บทความวิจัย (Research Article)

strategy is simulated offline within a numerical computing environment by applying the corresponding decision rules to the original dataset. For each strategy, key performance metrics are calculated including the total number of transmissions, Data Reduction Ratio (DRR), Event Preservation Ratio (EPR), and estimated energy savings. A comparative analysis is then carried out to identify the optimal trade-off between energy efficiency and the preservation of significant environmental events.

The fixed downsampling interval (every 5 minutes) was selected to represent a commonly used periodic transmission configuration in practical IoT deployments and to demonstrate the upper bound of transmission reduction performance. While this configuration results in a higher reduction rate compared to the adaptive sampling method, the objective of this study is not to match reduction levels but to evaluate the trade-off between transmission efficiency and event preservation. Therefore, comparing a high-reduction baseline with an adaptive strategy provides a clearer insight into the limitations of uniform downsampling and the advantages of variability-aware transmission.

5. Results and Discussion

5.1 Baseline Transmission Characteristics

Under the baseline configuration, environmental data were sampled and transmitted every 30 seconds throughout the

monitoring period from March 2024 to May 2025. This resulted in a total of 1,048,406 transmission events, representing the maximum communication load of the deployed IoT system.

Figure 3 show the baseline PM2.5 time-series over the entire monitoring period. The data exhibit significant temporal variability including multiple high-concentration spikes and seasonal patterns. In particular extreme PM2.5 peaks exceeding several thousand micrograms per cubic meter were observed during specific periods, indicating abrupt environmental fluctuations.

The statistical characteristics of the monitored parameters are summarized in Table 1. Among the variables PM2.5 demonstrates substantially higher variability standard deviation = $478.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ compared to temperature (6.47°C) and relative humidity (22.55%). This confirms that PM2.5 exhibits stronger short-term dynamics and greater amplitude variations relative to the other environmental parameters.

The high frequency of transmission in the baseline configuration combined with the dynamic behavior of PM2.5 highlights the communication intensity associated with continuous high-resolution environmental monitoring. Previous studies have reported that wireless transmission is a dominant contributor to energy consumption in IoT sensor nodes [3,9,16].

บทความวิจัย (Research Article)

Therefore, reducing transmission frequency without compromising critical environmental

information becomes essential for improving long-term system sustainability.

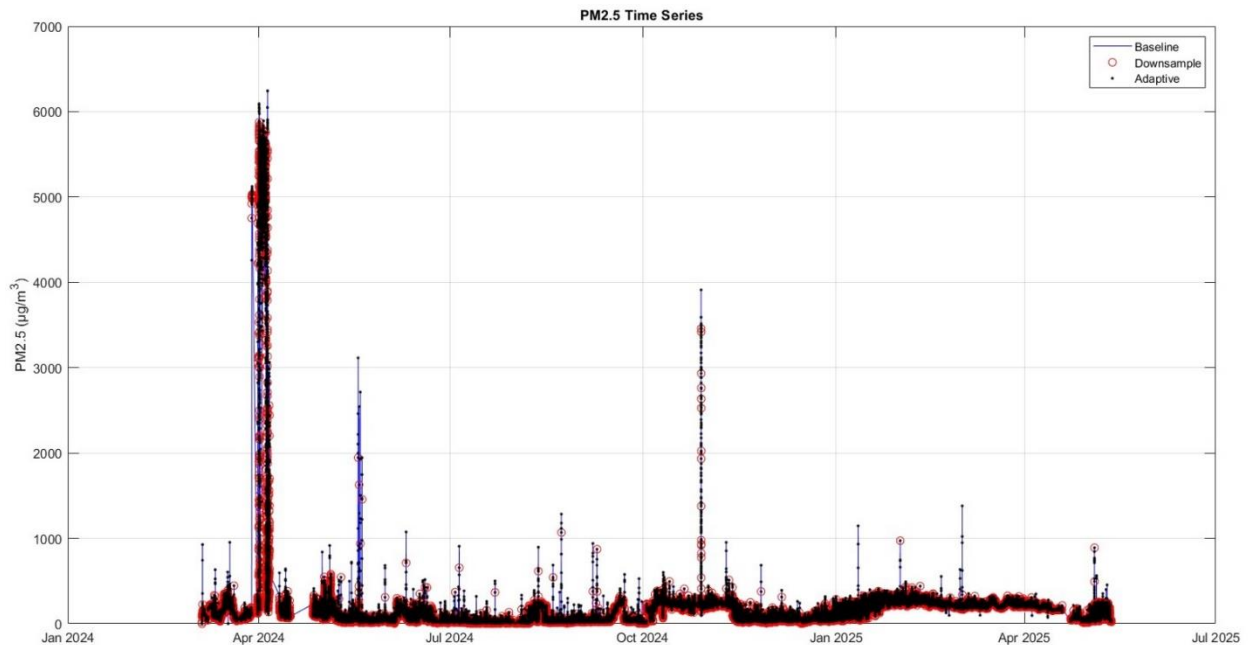


Figure 3. Full-Year PM2.5 Time Series.

Table 1: Statistical Characteristics.

Parameter	Mean	Std Dev
PM2.5	165	478.94
Temperature	27	6.47
Humidity	72	22.55

5.2 Data Reduction Performance

The effectiveness of the proposed transmission reduction strategies was evaluated by comparing the total number of transmission events relative to the baseline configuration. As described in Section 4.1, the baseline system generated 1,048,406

transmission events during the monitoring period.

Table 2: Statistical Characteristics.

Parameter	Baseline	Down sampling	Adaptive
Total Transmissions	1,048,406	104,841	221,256
Data Reduction (%)	0	90.00	78.89

Table 2 summarizes the transmission statistics under each strategy. The fixed downsampling approach which transmits data every 5 minutes, reduced the total number of

บทความวิจัย (Research Article)

transmission events by 90.00% resulting in a substantial decrease in communication load. In contrast, the adaptive sampling strategy achieved a Data Reduction Ratio (DRR) of 78.89% representing a significant reduction while still allowing transmission during dynamic environmental changes.

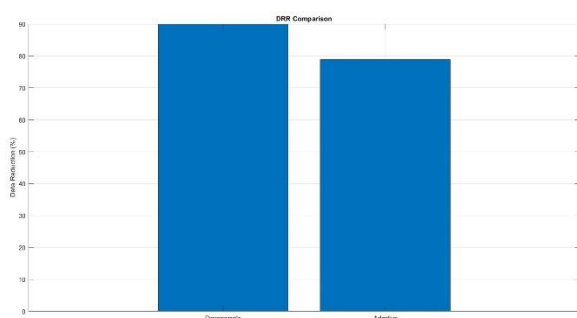


Figure 4. Data Reduction Ratio (DRR) comparison between fixed downsampling and adaptive transmission strategies.

Figure 4 further show the DRR comparison between the two strategies. While periodic downsampling achieves the highest reduction rate adaptive sampling maintains a lower but still substantial transmission reduction.

The observed reduction levels are consistent with previous studies that report significant energy savings when transmission frequency is reduced in IoT systems [9,16].

Since wireless transmission is widely recognized as one of the dominant contributors to energy consumption in sensor nodes,

reducing transmission events directly translates to improved energy efficiency.

However, data reduction alone does not guarantee monitoring effectiveness. Therefore, event preservation performance must also be analyzed, which is discussed in the following section.

5.3 PM-Only Event Preservation Performance

While transmission reduction improves energy efficiency it may degrade the system's ability to detect significant environmental events. To evaluate this effect event preservation performance was assessed based on PM_{2.5} deviations from a moving average threshold The Event Preservation Ratio (EPR) was computed by comparing the number of detected events under each transmission strategy relative to the baseline configuration.

The results indicate a substantial difference between the two reduction strategies. Fixed downsampling achieved a PM-EPR of only 12.74% meaning that nearly 87% of PM-related events detected in the baseline data were not preserved in the reduced dataset. This result demonstrates that periodic reduction severely compromises the detection of short-term pollution spikes.

In contrast, the adaptive transmission strategy achieved a PM-EPR of 49.65% preserving nearly half of the baseline-detected events while still achieving a 78.89% reduction in transmission frequency.

บทความวิจัย (Research Article)

Figure 5 show the comparison of PM-EPR values between the two strategies. The significant improvement observed in adaptive sampling confirms that variability-based triggering mechanisms are more effective in maintaining environmental signal dynamics compared to uniform interval reduction.

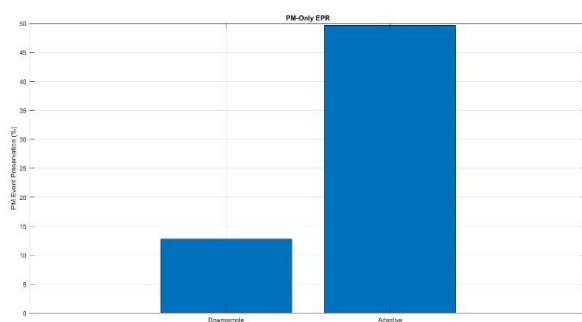


Figure 5. PM-only Event Preservation Ratio (EPR) comparison between transmission strategies.

These findings are consistent with previous studies that emphasize the importance of event-aware transmission mechanisms in IoT-based monitoring systems [6,9,16]. In particular, adaptive approaches that respond to signal variability are better suited for dynamic environmental conditions where abrupt fluctuations carry meaningful information.

5.4 Multi-Parameter Event Preservation Performance

To further evaluate system robustness under more complex environmental dynamics, a combined event detection mechanism incorporating PM2.5, temperature, and relative

humidity was implemented. Unlike the PM-only evaluation in Section 5.3 this approach considers multi-parameter environmental fluctuations through a weighted index, allowing a more comprehensive representation of environmental anomalies.

The combined event preservation results reveal a clear distinction between the two transmission strategies. Fixed downsampling achieved a Combined-EPR of only 15.91% indicating that most multi-parameter environmental events were not preserved under periodic reduction. In contrast, the adaptive sampling strategy achieved a Combined-EPR of 56.76% preserving more than half of the baseline-detected multi-parameter events while still reducing transmission frequency by nearly 79%.

Figure 6 presents the comparison of Combined-EPR values. The substantial improvement observed under adaptive transmission suggests that variability-aware triggering mechanisms are more suitable for complex environmental monitoring scenarios where multiple parameters jointly contribute to event formation. The results further confirm that aggressive periodic reduction strategies may oversimplify environmental dynamics, leading to significant loss of contextual information. Adaptive strategies by responding to dynamic changes, provide a more balanced compromise between energy efficiency and environmental awareness.

บทความวิจัย (Research Article)

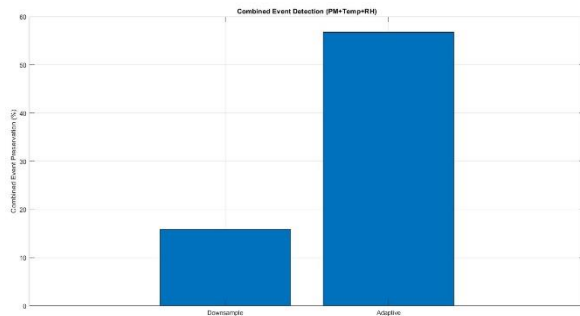


Figure 6. Multi-parameter PM, Temperature, Humidity Event Preservation Ratio comparison.

Table 3: Performance comparison of transmission strategies.

Strategy	DRR (%)	PM-EPR (%)	Combine d-EPR (%)
Downsampling	90.00	12.74	15.91
Adaptive	78.89	49.65	56.76

Table 3 summarizes the overall performance of the evaluated transmission strategies. Although fixed downsampling achieves the highest transmission reduction its event preservation capability is significantly limited. In contrast adaptive transmission provides a more balanced performance across all evaluation metrics.

5.5 Trade-Off Analysis

While Sections 5.2 – 5.4 independently evaluate transmission reduction and event preservation performance, practical IoT system design requires balancing both

objectives simultaneously. Therefore, a trade-off analysis was conducted by jointly considering Data Reduction Ratio (DRR) and Combined Event Preservation Ratio Combined-EPR.

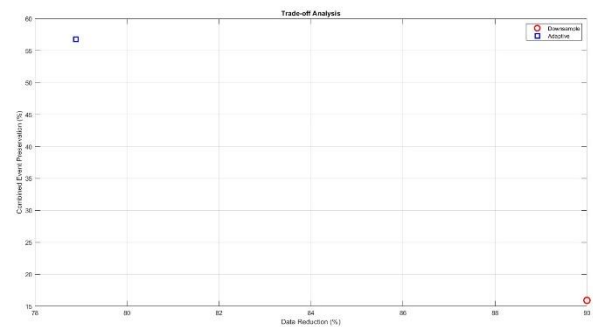


Figure 7. Trade-off analysis between data reduction.

Figure 7 show the relationship between transmission reduction and multi-parameter event preservation for the evaluated strategies. The fixed downsampling approach achieved the highest transmission reduction (90.00%) but preserved only 15.91% of combined environmental events. This indicates that aggressive periodic reduction significantly compromises monitoring effectiveness. In contrast the adaptive sampling strategy achieved a slightly lower transmission reduction (78.89%) but preserved 56.76% of combined events. Although adaptive transmission does not maximize data reduction it provides a substantially better balance between communication efficiency and environmental awareness.

บทความวิจัย (Research Article)

From a system-level perspective, the results demonstrate that maximizing transmission reduction alone is not an optimal design objective for dynamic environmental monitoring applications. Instead, transmission strategies should consider signal variability and event significance to maintain monitoring reliability while improving energy efficiency.

These findings align with prior studies emphasizing the importance of adaptive and event-aware communication mechanisms in IoT-based monitoring systems [1,5,9,16]. The proposed evaluation framework demonstrates that adaptive transmission strategies offer a practical compromise for long-term outdoor IoT deployments operating under communication and energy constraints.

The goal of this study is not to maximize reduction performance but to provide a structured evaluation framework for balancing communication efficiency and monitoring reliability in real-world IoT deployments.

To further support the robustness of the results, the large sample size (over one million data points) provides strong statistical reliability in the observed performance trends. Although formal significance testing was not the primary focus of this study the consistent differences observed between fixed downsampling and adaptive transmission across multiple evaluation metrics (DRR and EPR) indicate a clear and stable performance gap.

Future work may incorporate formal statistical hypothesis testing and confidence

interval analysis to further quantify the uncertainty and significance of these results.

6. Conclusion

This study investigated energy-efficient data transmission strategies for long-term IoT-based environmental monitoring using real outdoor data collected in Chiang Rai, Thailand. A baseline configuration with 30-second transmission intervals resulted in 1,048,406 transmission events over the monitoring period highlighting the communication intensity of high-resolution sensing systems.

The novelty of this study lies in the use of a real-world long-term dataset, the development of a clearly defined system-level evaluation methodology, and the application of quantitative performance metrics to systematically assess the trade-off between energy efficiency and event preservation.

Fixed downsampling achieved the highest data reduction (90.00%), but significantly degraded event preservation performance, preserving only 15.91% of multi-parameter environmental events. In contrast, the adaptive sampling strategy achieved a balanced performance, reducing transmission by 78.89% while preserving 56.76% of combined environmental events.

The results demonstrate that maximizing transmission reduction alone is not an optimal strategy for dynamic environmental monitoring. Instead, adaptive transmission mechanisms

บทความวิจัย (Research Article)

that respond to signal variability provide a more effective trade-off between energy efficiency and environmental awareness.

Despite the promising results, several practical limitations should be considered. The use of low-cost sensors such as SHT20 and PMS3003 may introduce measurement uncertainties over long-term deployment, including sensor drift and sensitivity to environmental factors such as temperature fluctuations, humidity, and particulate accumulation. Additionally, the ESP32-based system, while cost-effective and widely adopted, may be affected by extreme outdoor conditions such as high temperature, humidity, and power instability which could impact long-term system reliability. In terms of scalability the proposed transmission strategies are designed to operate at the sensor node level and can be extended to large-scale IoT deployments with multiple distributed nodes. However, network-level factors such as bandwidth limitations, synchronization, and cloud infrastructure performance may influence system behavior in large deployments. From a deployment perspective, the proposed approach is particularly suitable for long-term outdoor environmental monitoring scenarios where energy constraints and communication efficiency are critical. Nevertheless, different application contexts may require parameter tuning and adaptation to specific environmental dynamics. Future work will focus on incorporating more robust statistical validation, adaptive parameter optimization,

and integration with edge-based intelligent decision mechanisms to enhance system scalability and long-term reliability.

The proposed evaluation framework offers practical insights for designing energy-constrained IoT monitoring systems operating under real outdoor conditions. Future work may explore sensitivity analysis of adaptive thresholds and integration with real-time edge-based decision mechanisms to further enhance system performance.

7. Acknowledgments

AI-assisted tools were used for language editing purposes only. The authors retain full responsibility for all technical content and conclusions.

8. References

- [1] A. A. Sadri, A. M. Rahmani, M. Saberikamarposhti, and M. Hosseinzadeh, "Data reduction in fog computing and Internet of Things: A systematic literature survey," *Internet of Things*, vol. 20, Art. no. 100629, Nov. 2022. doi: 10.1016/j.iot.2022.100629.
- [2] L. Pioli Jr., C. F. Dorneles, D. D. J. de Macedo, and M. A. R. Dantas, "An overview of data reduction solutions at the edge of IoT systems: A systematic mapping of the literature," *Computing*, vol. 104, no. 8, pp. 1867–1889, Mar. 2022. doi: 10.1007/s00607-022-01073-6.

บทความวิจัย (Research Article)

- [3] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, Y. Zhang, M. Robert, and J.-P. Koskinen, “Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13,” in *Proc. 2016 IEEE Conf. on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2016, doi: 10.1109/CSCN.2016.7785170.
- [4] P. Bellavista, J. Berrocal, A. Corradi, S. K. Das, L. Foschini, and A. Zanni, “A survey on fog computing for the Internet of Things,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 52, pp. 71–99, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.pmcj.2018.12.007.
- [5] M. Kumar, P. K. Singh, M. K. Maurya, and A. Shivhare, “A survey on event detection approaches for sensor-based IoT,” *Internet of Things*, vol. 22, Art. no. 100720, Jul. 2023. doi: 10.1016/j.iot.2023.100720.
- [6] H. Zhang, J. Na, and B. Zhang, “Autonomous Internet of Things (IoT) data reduction based on adaptive threshold,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, Art. no. 9427, Nov. 2023, doi: 10.3390/s23239427.
- [7] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, “Edge computing: Vision and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
- [8] C. Rodriguez-Pabon, G. Riva, C. Zerbini, J. Ruiz-Rosero, G. Ramirez-Gonzalez, and J. C. Corrales, “An adaptive sampling period approach for management of IoT energy consumption: Case study approach,” *Sensors*, vol. 22, no. 4, Art. no. 1472, 2022, doi: 10.3390/s22041472.
- [9] R. M. Willett, A. M. Martin, and R. D. Nowak, “Adaptive sampling for wireless sensor networks,” in *Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory (ISIT)*, Chicago, IL, USA, Jun.–Jul. 2004, doi: 10.1109/ISIT.2004.1365555.
- [10] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, Art. no. 1466, 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [11] D. Kreković, M. Kušek, I. Podnar Žarko, and D. Le-Phuoc, “Edge-Based Predictive Data Reduction for Smart Agriculture: A Lightweight Approach to Efficient IoT Communication,” in *Proc. 2025 IEEE Annual Congress on Artificial Intelligence of Things (AIoT)*, Osaka, Japan, Dec. 2025, doi: 10.1109/AIoT66900.2025.00062.
- [12] R. Bensaid, A. Ben Mnaouer, and H. Boujemaa, “Energy Efficient Adaptive Sensing Framework for WSN-Assisted IoT Applications,” *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3423706.
- [13] R. K. Baliyar Singh, J. K. Dash, and K. H. K. Reddy, “The role of Edge-AI in edge enabled IoT systems: A comprehensive

บทความวิจัย (Research Article)

- performance analysis,” *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 19, no. 1, 2026, doi: 10.1007/s12083-025-02182-7.
- [14] J. Tepmanee et al., “Automatic fire detection and positioning system for outdoor lac cultivation,” in *Proc. 2024 8th Int. Conf. on Information Technology (InCIT)*, 2024, doi: 10.1109/InCIT63192.2024.10810640.
- [15] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, May 2009, doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003.
- [16] P. Lou, L. Shi, X. Zhang, Z. Xiao, and J. Yan, “A data-driven adaptive sampling method based on edge computing,” *Sensors*, vol. 20, no. 8, Art. no. 2174, 2020, doi: 10.3390/s20082174.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แฉก

ศิริพงษ์ ตรีรัตน์^{1,*}, ฤทธิชัย บุญทาศรี¹ และ กิตติคม นนทประสา²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

² สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: siripong.tr21@gmail.com โทรศัพท์: 063-7942288

(รับบทความ: 29 ธันวาคม 2568; แก้ไขบทความ: 27 มีนาคม 2569; ตอรับบทความ: 17 เมษายน 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินสมรรถนะเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แฉก เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนแรงงานและต้นทุนการผลิตของเกษตรกรรายย่อย ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนหลักคือ ชุดส่งกำลัง หัวปักดำแบบกลไก 4 บาร์ (Four-Bar Linkage) และชุดตะขอร้งข้าว ผลการทดสอบการทำงานในภาคสนาม โดยแปรผันมุมเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุมกับสกีที่ 40, 45, 50 และ 55 องศา พบว่าที่มุม 50 องศา ให้สมรรถนะดีที่สุด โดยมีอัตราความผิดพลาดในการปักดำต่ำสุดเพียงร้อยละ 8 ความลึกในการปักดำเฉลี่ย 3 - 5 เซนติเมตร และจำนวนต้นกล้าเฉลี่ย 3.86 ต้นต่อกอ เครื่องมีความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่ 0.25 ไร่ต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการทำงานร้อยละ 92 ในด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า เครื่องต้นแบบมีต้นทุนการสร้าง 5,000 บาท สามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้ 700 บาทต่อไร่ เมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคน และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1.76 ไร่ต่อปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องดำนที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์และเกษตรกรรายย่อย

คำสำคัญ: เครื่องดำน 4 แฉก กลไก 4 บาร์ สมรรถนะการทำงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การอ้างอิงบทความ: ศิริพงษ์ ตรีรัตน์, ฤทธิชัย บุญทาศรี และ กิตติคม นนทประสา, "การออกแบบและพัฒนาเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แฉก," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 22-35, 2569.

Design and Development of a 4 Row Mechanical Rice Transplanter

Siripong Treerat^{1,*}, Rittichai Buntrasee¹ and Kittikom Nontapasard²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

² Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

*Corresponding Author: siripong.tr21@gmail.com, Tel: 063-7942288

(Received: December 29, 2025; Revised: March 27, 2026; Accepted: April 17, 2026)

Abstract

This research aims to design, develop, and evaluate the performance of a 4-row mechanical rice transplanter to address labor shortages and reduce production costs for small farmers. The primary components include a power transmission system a four-bar linkage planting mechanism and a seedling supporting hook. Field performance was tested by varying the inclination angles of the seedling hook at 40, 45, 50 and 55 degrees. The results indicated that the 50-degree angle achieved the optimum performance with a minimum missing hill rate of 8%. The average planting depth ranged from 3 to 5 cm with an average of 3.86 seedlings per hill. The machine demonstrated a field capacity of 0.25 rai/hr and a field efficiency of 92%. Economic analysis showed that the prototype cost 5,000 THB to construct and reduced production costs by 700 THB per rai compared to manual transplanting, the break-even point at 1.76 rai per year. This mechanical rice transplanter proves to be a cost effective and viable solution for small rice farming.

Keywords: Rice Transplanter, Four-Bar Linkage, Field Performance, Economic Analysis

Please cite this article as: S. Treerat, R. Buntrasee and K. Nontapasard, "Design and Development of a 4 Row Mechanical Rice Transplanter," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 22-35, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การทำนาหรือการปลูกข้าวปัจจุบันชาวนาสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบริบทของแต่ละพื้นที่ เช่น การทำนาแบบหยอด การทำนาแบบหว่าน การทำนาแบบปักดำ หรือการทำนาแบบโยนการดำนาในฤดูฝน [1,2] ชาวนาตามชนบทที่มีแปลงนาขนาดเล็ก นิยมทำนาด้วยการปักดำด้วยมือ พื้นที่โดยส่วนมากจะมีลักษณะเป็นแปลงนาขนาดเล็ก เพื่อง่ายต่อการจัดการเรื่องน้ำให้เหมาะสมกับแปลงนา และขณะทำการปลูกข้าวด้วยมือจะมีการกำจัดวัชพืชไปพร้อมขณะทำการปักดำ ในการทำนาแบบปักดำด้วยมือของชาวนาตามชนบทจะมีการจ้างคนงาน เป็นต้นทุนที่เจ้าของนาต้องรับผิดชอบ ซึ่งทำให้ส่งผลกระทบต่อวิธีการในการทำนาของชาวนาเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการทำนา ชาวนาบางรายมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนวิธีการทำนาเป็นแบบนาหว่านแล้วไถกลบ ซึ่งต้นทุนในการทำนาแบบนาหว่านแล้วไถกลบนั้นต่ำกว่าวิธีปักดำด้วยมือเพื่อช่วยประหยัดต้นทุนแต่ก็ส่งผลกระทบต่อระยะกอกของต้นกล้าที่ชิดหรือห่างเกินไป ควบคุมคุณภาพไม่ได้ ส่งผลให้ผลผลิตตกต่ำและยังเผชิญกับความท้าทายหลายประการที่เกี่ยวกับสภาพดินและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ [3] การใช้เครื่องดำนาจะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ ปลูกแบบดำนากล้าข้าวหรือเรียกว่านาตม และการปลูกแบบหว่าน ในการใช้เครื่องปลูกข้าวแบบดำนากล้าข้าวนาตมจะต้องมีการเตรียมกล้าข้าวก่อน โดยการเพาะกล้าในถาดปลูกซึ่งพอกกล้ามีอายุได้ 10-15 วัน ก็สามารถนำไปปลูกได้ การนำเทคโนโลยีเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับการปลูกข้าวแบบนาตมเพื่อเพิ่มศักยภาพของชาวนาพบว่าต้นทุนการผลิตลดลงเหลือ 2,550 บาทต่อไร่ สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 970 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 27 การลดต้นทุนการทำนาของเกษตรกรที่ใช้เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับนาตมจะประหยัดเมล็ดพันธุ์กว่าวิธีหว่านพ่น โดยแต่ละวิธีก็จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพพื้นที่นั้น ๆ [4,5]

เครื่องปลูกข้าวที่ใช้กำลังเครื่องยนต์เบนซินขนาด 4-21 แรงม้า สามารถปลูกข้าวได้จำนวน 4-8 แถว อัตราการทำงานได้ 6-30 ไร่ต่อวัน แต่ในการใช้เครื่องปลูกข้าวจะต้องมีการเตรียมดินที่ดีและดินต้องมีลักษณะโครงสร้างของเนื้อดินค่อนข้างเหนียวจึงจะใช้งานเครื่องได้ดี ส่วนเครื่องปลูกข้าวแบบนาหว่านมี 2 รูปแบบ คือ หว่านแบบแห้งและหว่านนาตม โดยการทำนาแบบนาหว่านแห้งจะทำก่อนที่ฝนตก ส่วนนาหว่านตมทำในฤดูฝนสามารถปลูกได้ 6-8 แถว สำหรับปักดำต้นกล้าข้าวแบบลำรางปักดำได้ครั้งละ 2 แถว ผลพบว่าการปักดำที่ใช้ต้นกล้าอายุ 30 วัน จะมีความผิดพลาดในการปักดำต่ำสุด สามารถปักดำได้ 2.34 ไร่ต่อวัน ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการทำงานของเครื่องยนต์และการเตรียมต้นกล้า ระยะห่างของต้นกล้าที่ปักดำ 23.17 – 23.85 เซนติเมตร (cm) เป็นระยะที่ต้นกล้าแตกกอได้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ สมพร หงส์ก และคณะ [6] โดยได้สร้างเครื่องปักดำนาที่ใช้แรงงานจากผู้ปฏิบัติ 1 คน เครื่องดังกล่าวประสบปัญหาเรื่องขนาดของตัวอุปกรณ์มีน้ำหนักมากเกินไปและเครื่องปักดำนาปักต้นกล้าไม่ตรงทำให้ต้นกล้าล้ม เครื่องดำนาสามารถปักดำนาได้ 2 แถวและใช้เวลามากในการปักดำนา ลักษณะการทำงานของเครื่องดำนาจะใช้คนเดินลากเครื่องถอยหลังทำให้น้ำข้าวเป็นหลุมจากรอยเท้าและถาดที่ใส่กล้าเพาะข้าวมีขนาดใหญ่จึงทำให้เกิดน้ำหนักกดทับที่พื้นแปลงนา ทำให้เครื่องดำนาดังกล่าวจมในแปลงนาบ่อยครั้ง [7] การปักดำด้วยมือเป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน เหมาะสำหรับพื้นที่ที่เครื่องจักรเข้าถึงยากหรือเกษตรกรรายย่อย อัตราการทำงานเฉลี่ยต่อ 1 คนสามารถดำนาได้ประมาณ 0.5 – 1 งานต่อวัน หรือประมาณ 200 – 400 ตารางวา 1 ไร่ต้องใช้แรงงานคนประมาณ 4 – 8 คน ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วมาจากการถอนกล้าและมัดกล้า หากคนงานถอนกล้าเองจะเสียเวลาไปเกือบครึ่งวัน ทำให้พื้นที่ปักด้าลดลงเหลือเพียง 0.2 – 0.3 งานต่อวัน

บทความวิจัย (Research Article)

จากการศึกษาพบว่า การทำนาในฤดูฝนนั้นเป็น การทำนาที่ให้ผลผลิตมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทำนาปรังในฤดูแล้งหรือการทำนาด้วยวิธีอื่น ๆ เครื่องยนต์ที่มีการรับจ้างปักดำนาจะได้รับ ความนิยมจากชาวนาที่มีลักษณะของแปลงนาขนาดใหญ่ ซึ่งต้นกล้าที่ใช้ก็มีขนาดเล็กอายุ 15 – 20 วัน ทำให้ การดูแลค่อนข้างยาก สำหรับชาวนารายย่อยที่มีพื้นที่ แปลงนาขนาดเล็กจะไม่นิยมใช้เครื่องดำนาแบบ เครื่องยนต์ เนื่องจากมีความยุ่งยากในการใช้งาน เพราะเมื่อทำการปักดำแปลงนาขนาดเล็กเสร็จแต่ละ แปลงแล้ว ต้องได้เคลื่อนย้ายเครื่องดำนาไปแปลงใหม่ เนื่องจากน้ำหนักของตัวเครื่องดำนาค่อนข้างสูง และ จำเป็นต้องมีการย้ายเครื่องดำนาข้ามคันนากันน้ำ บ่อยครั้งทำให้คันนาพัง และค่าจ้างค่อนข้างสูง

จากข้อมูลวิจัยที่ได้กล่าวทำให้ทราบปัญหาการใช้เครื่องดำนา แม้มีเครื่องหยอดเมล็ดหรือการไถกลบ แต่การปักดำในฤดูฝนยังให้ผลผลิตดีกว่า แต่เครื่อง ดำนาขนาดเล็กราคาประหยัดและคล่องตัว สำหรับ เกษตรกรรายย่อยยังมีน้อย ผู้วิจัยจึงได้ทำการ ออกแบบและสร้างเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้น กล้าแบบ 4 แถวที่มีน้ำหนักเบาโดยมีเกดสกีรองรับ ตัวเครื่องไม่ให้เครื่องจมน้ำขณะทำงาน ในส่วนของราง ใส่ต้นกล้าจะถูกออกแบบเป็นชุดตะขอรั้งข้าวที่มี น้ำหนักเบาสามารถปรับความเอียงได้เหมาะสมกับความ ยาวของต้นกล้า เพื่อลดปัญหาต้นกล้าล้มและต้นกล้า ไม่ไหลลงรางตะขอรั้งข้าว จึงทำการสร้างชุดตะขอรั้ง ข้าวที่ทำมุมองศากับสกี คือ 40°, 45°, 50° และ 55° เพื่อใช้ในการทดสอบหามุมเอียงที่เหมาะสม และใน การศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์และคำอธิบายดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และคำอธิบาย

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
m ²	ตารางเมตร
hr	ชั่วโมง

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และคำอธิบาย (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
m ² /hr	ตารางเมตรต่อชั่วโมง
cm	เซนติเมตร
m	เมตร
mm	มิลลิเมตร
N/mm ²	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
mm ²	ตารางมิลลิเมตร
°	มุมองศา

2. ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ออกแบบเครื่องดำนาปักดำกล้าได้ครั้งละ 4 แถว ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยกลไก
- 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของมุมเอียงของชุด ตะขอรั้งข้าวที่ทำมุมกับสกี 40°, 45°, 50° และ 55°

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง [8,9]

ประสิทธิภาพในการทำงานเชิงพื้นที่ (Field Efficiency, Eff) เป็นอัตราส่วนระหว่างความสามารถ ในการทำงานเชิงพื้นที่ ของเครื่อง เทียบกับ ความสามารถในการทำงานทางทฤษฎี สามารถ คำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$Eff = \frac{C}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

C คือ ความสามารถทำงานเชิงพื้นที่

$$= \frac{A}{T}, (m^2/hr)$$

บทความวิจัย (Research Article)

A คือ พื้นที่ปัดดำ, (m²)

T คือ เวลารวม, (hr)

C₀ คือ ความสามารถทำงานในทางทฤษฎี

= W x V, (m²/hr) [10]

W คือ ความกว้างในการทำงานของเครื่อง, (m)

V คือ ความเร็วในการลากเครื่องปัดดำ, (m/hr)

โกที่ไม่ได้รับการปัดดำ (Percent Missing Hill, P₀) โกที่ไม่ได้รับการปัดดำมีสาเหตุมาจากการทำงานของกลไกของอุปกรณ์ปัดดำและการกระจายของต้นกล้าหรือมีความหนาแน่นของต้นกล้ามากเกินไป ส่งผลให้จำนวนต้นกล้าในแต่ละโกไม่เท่ากัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$P_o = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{M} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ

P₀ คือ ร้อยละของโกที่ไม่ได้รับการปัดดำ (ร้อยละ)

M คือ จำนวนโกที่ปัดดำทั้งหมด

M₁ คือ จำนวนโกที่ผิดพลาดในการปัดดำ ได้แก่ ตำแหน่งที่ไม่มีต้นกล้าและต้นกล้ามีจำนวนมากกว่า 5 ต้น

M₂ คือ จำนวนโกต้นกล้าที่จมน้ำ

M₃ คือ จำนวนโกต้นกล้าที่ลอยหรือล้ม

อัตราการทำงาน (Working Rate, WR) คือ พื้นที่ทำงานจริงต่อหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$WR = \frac{A}{T_1 + T_2 + T_3} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ

A คือ พื้นที่ปัดดำ, (m²)

T₁ คือ เวลาที่ใช้ในการปัดดำจริง, (hr)

T₂ คือ เวลาที่ใช้ในการใส่ต้นกล้า, (hr)

T₃ คือ เวลาที่ใช้ในการปรับแต่งเครื่อง, (hr)

วิเคราะห์การคืนทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$CR = (P - SV)(A/P, i, n) + i.SV \quad (4)$$

เมื่อ

CR คือ การคืนทุน

SV คือ มูลค่า 10% ของราคาเครื่อง

i คือ อัตราดอกเบี้ย 10%

n คือ จำนวนปี (5 ปี)

A/P คือ เงินรายปีที่อัตราดอกเบี้ย 10% ของ 5 ปี เท่ากับ 0.2638

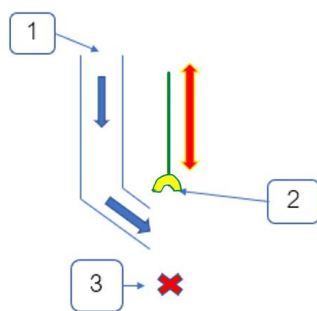
P คือ เงินปัจจุบัน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

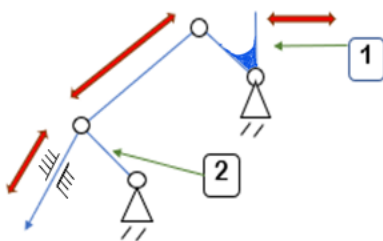
1) ออกแบบและสร้างเครื่องดำนแบบใช้กลไกปัดดำต้นกล้าแบบ 4 แถว โดยกำหนดหลักเกณฑ์ต้องมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการใช้งาน มีขนาดที่เหมาะสม น้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก รวมถึงการซ่อมบำรุงรักษาง่าย และมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน โครงสร้างของตัวเครื่อง

บทความวิจัย (Research Article)

ดำนากลับแบบโดยใช้เหล็กชนิด AISI 1020 สีเหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่ 20 mm x 20 mm หนา 1.2 mm โดยการออกแบบเครื่องจะต้องปักดำต้นกล้าได้ครั้งละ 4 แถว และวัสดุที่ใช้ต้องมีน้ำหนักเบา รองรับน้ำหนักของตัวเครื่องดำนาด้วยแผ่นสกี ใช้ต้นกล้าพันธุ์ข้าว กข 6 ที่มีอายุต้นกล้าประมาณ 30 วัน ทำการออกแบบชุดตะขอร้งข้าวที่ปรับมุมเอียงได้ 40°, 45°, 50° และ 55°



รูปที่ 1 แผนภาพจลนศาสตร์ของกลไกปักดำ

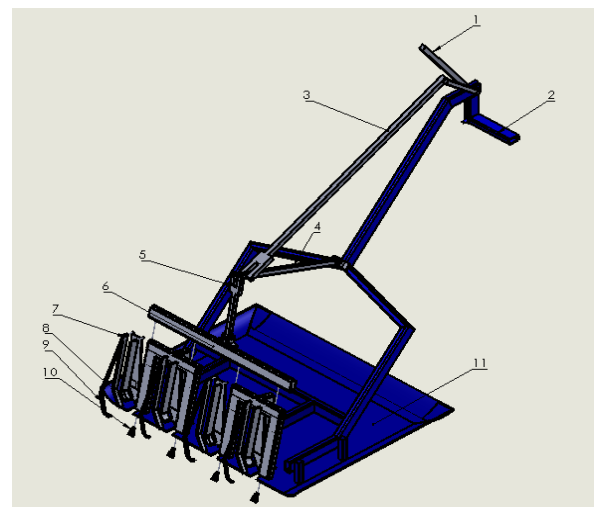


รูปที่ 2 โครงสร้างทางกายภาพของกลไกปักดำ

กลไกปักดำถูกออกแบบโดยใช้หลักการ Four-Bar Linkage เพื่อควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ของปลายตะขอ ดังแสดงแผนภาพจลนศาสตร์ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย (1) ช่องใส่ต้นกล้า (2) หัวปักดำต้นกล้า (3) ตำแหน่งการปักดำ หลักการทำงานของเครื่องดำนากลับแบบใช้กลไกปักดำ เริ่มจากการนำต้นกล้ามาวางในช่องใส่ต้นกล้าหมายเลข 1 ต้นกล้าจะไหลลงตามรางด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ตามความเอียงของชุดตะขอร้งข้าว ที่กำหนดไว้ 40°, 45°, 50° และ 55°

จากนั้นกลไกหมายเลข 2 หัวปักดำต้นกล้าก็ทำการเลื่อนขึ้น – ลง ตามจังหวะของคันโยกหมายเลข 1 ทำให้ต้นกล้าถูกหัวปักดำหมายเลข 2 ดันต้นกล้าลงทำให้เกิดการปักดำในตำแหน่งหมายเลข 3

จากรูปที่ 2 แสดงลักษณะทางกายภาพของเครื่องดำนากลับแบบที่พัฒนาขึ้น โดยชุดปักดำถูกติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กเหนียว (AISI 1020) ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ชิ้นต่อโยงที่ 1 จานเหวี่ยงส่งกำลัง (Input Crank) ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนกันต่อ (Coupler) และมีการติดตั้งชุดตะขอร้งข้าวไว้ที่ส่วนปลาย ทั้งนี้ ในการทดสอบได้กำหนดให้ชุดตะขอร้งข้าวทำมุมเอียง 40°, 45°, 50° และ 55° กับสกีเพื่อทดสอบหามุมเอียงที่เหมาะสมสอดคล้องกับวิธีการเคลื่อนที่ทางจลนศาสตร์และช่วยให้ต้นกล้าไหลลงสู่จุดปักดำได้อย่างแม่นยำ



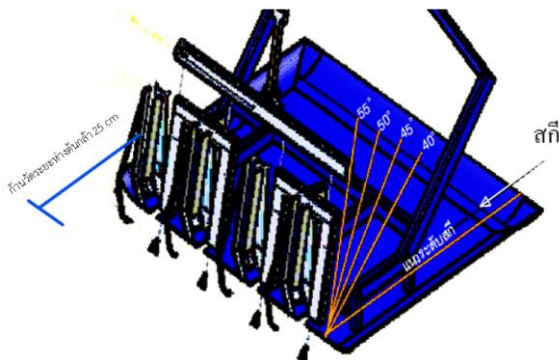
รูปที่ 3 ส่วนประกอบเครื่องปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว

ส่วนประกอบของเครื่องดำนากลับแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ดังแสดงใน รูปที่ 3 ประกอบด้วยหมายเลข 1 คันโยก, หมายเลข 2 คันบังคับทิศทาง, หมายเลข 3 แขนส่งกำลังตัวที่ 1, หมายเลข 4 แขนส่งกำลังตัวที่ 2, หมายเลข 5 แขนส่งกำลังตัวที่ 3, หมายเลข 6 ชุดส่งกำลังหัวปักดำ,

บทความวิจัย (Research Article)

หมายเลข 7 ช่องใส่ต้นกล้า, หมายเลข 8 ขาส่งต้นกล้า, หมายเลข 9 ตะขอร้งข้าว, หมายเลข 10 หัวปักดำ, หมายเลข 11 ถาดสีก

การทำงานของเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวใช้คนงาน 1 คน เมื่อนำต้นกล้าที่เตรียมไว้ใส่ในช่องใส่ต้นกล้าหมายเลข 7 เริ่มการปักดำโดยโยกคันโยกหมายเลข 1 ไปข้างหน้า หัวปักดำหมายเลข 10 จะเกาะเอาต้นกล้าปักลงไปในพื้นที่ปลูกความลึกประมาณ 3 – 5 cm แล้วดึงคันโยกกลับพร้อมกับลากเครื่องดำนถอยหลัง โดยดึงคันบังคับทิศทางหมายเลข 2 ไปในตำแหน่งที่ต้องการ ระยะห่างของต้นกล้าประมาณ 25 cm โดยดูตำแหน่งการปักดำครั้งต่อไปที่ก้านวัดระยะห่างของต้นกล้าหน้าเครื่องปลูก ดังรูปที่ 4

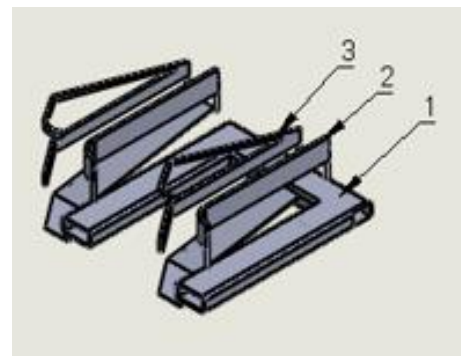


รูปที่ 4 ตำแหน่งมุมเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุมกับสีก

ตำแหน่งการติดตั้งชุดตะขอร้งข้าวที่สามารถปรับมุมเอียงกับระนาบสีกได้ มุมเอียงของชุดตะขอร้งข้าวสามารถปรับมุมเอียงได้ โดยทำการปรับมุมเอียงของชุดตะขอร้งข้าวกับสีก 4 ระดับ ที่มุม 40° 45° 50° และ 55°

ส่วนประกอบของชุดตะขอร้งข้าว ประกอบด้วย หมายเลข 1 ฐานตัวยู ในการออกแบบฐานตัวยูใช้เหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดพื้นที่หน้าตัด 25.4 mm x 50.8 mm ยาว 250 mm เป็นส่วนหนึ่งของฐาน

โครงสร้างของแผ่นประคองต้นกล้าและใช้รับน้ำหนักของต้นกล้า หมายเลข 2 แผ่นประคองต้นกล้าในการออกแบบแผ่นประคองต้นกล้า ใช้เหล็กแผ่นหนา 1.2 mm ขนาด 270 mm x 25 mm ใช้ประคองต้นกล้าให้ไหลลงไปตามแนว หมายเลข 3 ตะขอร้งข้าว ในการออกแบบตะขอร้งต้นกล้าใช้เหล็กเส้นกลมขนาดพื้นที่หน้าตัด 10 mm² ยาว 320 mm ชุดตะขอร้งข้าวสามารถปรับมุมเอียง 40° 45° 50° และ 55° แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของชุดตะขอร้งข้าว

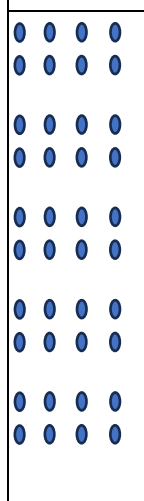
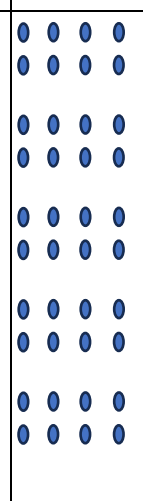
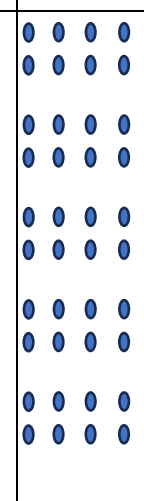
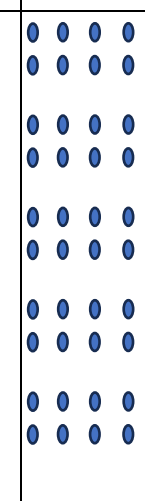
2) ทำการเตรียมต้นกล้า กข 6 ให้อายุได้ประมาณ 30 วัน และทำการเตรียมแปลงนาเพื่อใช้ในการทดลองปลูก โดยการเตรียมแปลงนานั้นขั้นแรกทำการไถกลับหน้าดินก่อน แล้วใช้เครื่องเตรียมดินแบบจอบหมุนติดท้ายรถไถเดินให้มีความลึกประมาณ 15 cm – 20 cm ใช้พื้นที่ในการทดลองปลูก 80 m²

3) ทดสอบหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมทำการทดสอบหามุมเอียงที่เหมาะสมของชุดตะขอร้งข้าวทำมุมกับสีก ของเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ในแปลงนาจริง โดยทดลองที่ความชื้นของชุดตะขอร้งข้าวแต่ละแถวปลูกทำมุมกับสีก โดยแถวที่ 1 ทำมุม 40°, แถวที่ 2 ทำมุม 45°, แถวที่ 3 ทำมุม 50° และแถวที่ 4 ทำมุม 55° ตามลำดับ ปักดำครั้งละ 4 กอ ใน 1 แถวปักดำ 10

บทความวิจัย (Research Article)

ครั้ง ได้จำนวนกอข้าว 40 กอ ทำการเก็บผลในการปักดำ เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ดังรูปที่ 6

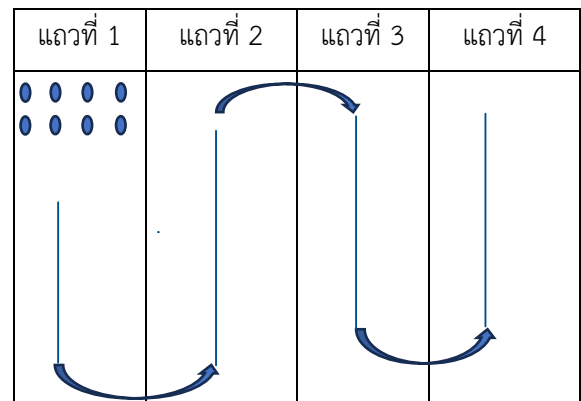
นำสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ได้มาทำการทดสอบในภาคสนามดังรูปที่ 7 เพื่อหาค่าชี้วัดผลทางด้านสมรรถนะและคุณภาพการปลูกของเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ได้แก่วิธีการทดสอบจะมิลักษณะเนื้อดินร่วนปนทราย

แถวที่ 1	แถวที่ 2	แถวที่ 3	แถวที่ 4
40°	45°	50°	55°
			

รูปที่ 6 การทดสอบหามุมเอียงที่เหมาะสมของชุดตะขอร้งข้าวทำมุมกับสกี

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเตรียมต้นกล้าข้าวพันธุ์ กข6 ซึ่งขาวนาในพื้นที่ได้มีการปลูกในฤดูกาลนาปีเป็นส่วนใหญ่ในการทดสอบการทำงานของเครื่อง [11] การเตรียมต้นกล้าโดยทำการเพาะกล้าจะทำในแปลงนาแบบเปียก โดยให้ต้นกล้าในวัยทดสอบมีอายุ 30 วัน ความสูงของต้นกล้าอยู่ในช่วง 30 cm – 40 cm จำนวนใบ 3 – 5 ใบ ขณะทำการ

ถอนต้นกล้าจำเป็นต้องมีการล้างและฉีกแยกต้นกล้าออกจากกันก่อนเพื่อไม่ให้ต้นกล้าติดกัน แปลงนาที่ใช้ทำการทดสอบจะมีลักษณะเนื้อดินร่วนปนทราย



รูปที่ 7 แปลงนาใช้ในการทดสอบ

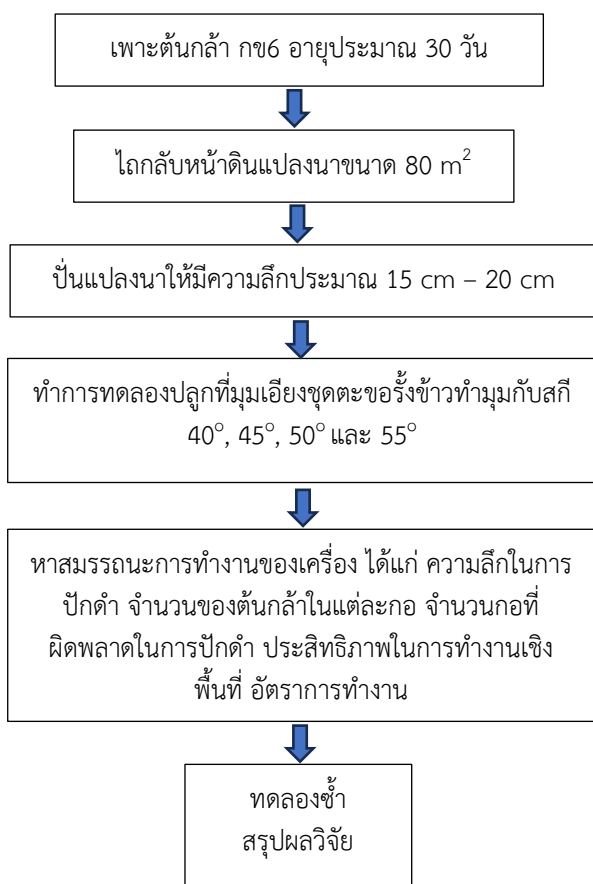
เส้นทางในการทดสอบเครื่องดำนแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ดังรูปที่ 7 เมื่อได้สภาวะการทำงานของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุมกับสกีที่เหมาะสม เริ่มทดสอบโดยนำต้นกล้าใส่ในช่องชุดตะขอร้งข้าวทั้งหมด 4 ช่อง ใช้แรงงานคนในการปลูก 1 คน วิธีการทดสอบการใช้เครื่อง โดยเริ่มจากทำการปรับมุมชุดตะขอร้งข้าวให้ทำมุมกับสกีที่เหมาะสม ทำการปลูกโดยลากเครื่องตามเส้นทางรูปที่ 8 โดยแต่ละแถวมีความยาว 10 m ปักดำ 40 ครั้ง ๆ ละ 4 กอ รวม 160 กอ ปักดำทั้งหมด 4 แถว รวม 640 กอ

5. ขั้นตอนการทดลอง

วิธีดำเนินการทดสอบเก็บข้อมูลการทำงานของเครื่อง เริ่มจากการเตรียมพื้นที่เพาะต้นกล้าข้าวพันธุ์ กข6 เมื่ออายุต้นกล้าประมาณ 30 วัน ให้ทำการเตรียมแปลงทดสอบ โดยวิธีปักดินในแปลงนาที่น้ำยังปล่อยทิ้งไว้ 1 คืนให้น้ำตกตะกอนแล้วทำการระบายน้ำออกจากแปลงนาให้เหลือระดับน้ำท่วมดินระดับน้ำไม่เกิน 5 cm ทำการถอนต้นกล้าและทำการ

บทความวิจัย (Research Article)

ฉีกรากแยกต้นกล้าออกจากกัน เพื่อป้องกันไม่ให้รากต้นกล้าติดกันขณะปลูก การทดสอบใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว แปลงนาที่ใช้ทดสอบ ได้ทำการเตรียมแปลงนาขนาดพื้นที่ประมาณ 80 m^2 โดยทำการไถกลับหน้าดินแล้วบ่มแล้วใช้เครื่องเตรียมดินแบบจอบหมุนติดท้ายรถไถตีดินให้มีความลึกประมาณ $15 \text{ cm} - 20 \text{ cm}$ [10] มีระยะห่างระหว่างกอถูกกำหนดที่ 25 cm การเก็บตัวอย่างจะเก็บที่จำนวน 4 แถว เครื่องดำนามีลักษณะการทำงานเคลื่อนที่แบบ ไป – กลับ ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลการปักดำในแปลงนาที่เตรียมไว้ ความกว้างของรอบการปลูก 1 m ยาว 10 m จำนวน 4 แถว ๆ ละ 40 กอ รวม 160 กอ ในการทดสอบเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว แสดงได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว



รูปที่ 9 ทดสอบปลูกข้าวในแปลงนา

6. การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกในการปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว คือการวิเคราะห์ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay Back Period, PBP) [12,13] เป็นการคาดคะเนว่าระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ (Net Benefits) ของการใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกในการปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว มีค่าเท่ากับการลงทุน แล้วคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุนต่อพื้นที่การทำงานต่อปีของการใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกในการปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ทำการวิเคราะห์การคืนทุนด้วยสมการที่ (4)

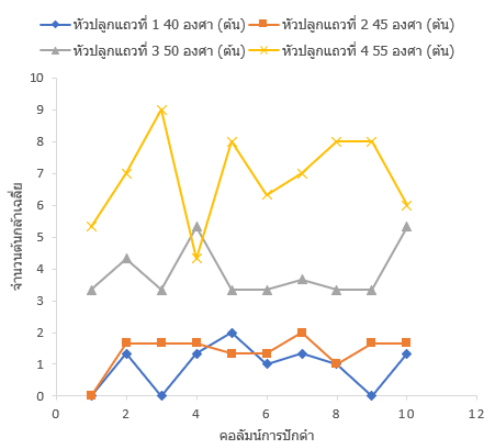
7. ผลการวิจัย

7.1 การทดสอบหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

การทดสอบการทำงานของเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ระยะห่างของต้นกล้าที่ปักดำ $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ และจำนวนต้นกล้าที่ใช้ในการปักดำเหมาะสมที่สุดคือ 3 -5 ต้นต่อกอ เป็นระยะที่ต้นกล้าแตกกอได้ดี โดยเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวมีขนาดความกว้างของเครื่องเท่ากับ 1 m ขนาดของแปลงนาที่ใช้ทดสอบมีความยาว 10 m กว้าง 4

บทความวิจัย (Research Article)

แถว ๆ ละ 1 m โดยเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว ที่มีระยะห่างระหว่างกอถูกกำหนดที่ 25 cm ดังรูปที่ 4 การเก็บตัวอย่างจะเก็บที่จำนวน 40 แถว ๆ ละ 40 กอ รวม 160 กอ เครื่องดำนามีลักษณะการทำงานเคลื่อนที่แบบ ไป – กลับ ดังรูปที่ 10 ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลการปักดำในแปลงนาที่เตรียมไว้



รูปที่ 10 ผลการทดลองปลูกที่มุมเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุมกับสกี 40° 45° 50° และ 55°

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 10 ที่องศาความเอียงของชุดตะขอร้งข้าว ความเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุม 40° 45° 50° และ 55° ทำการทดลองปลูก 4 แถว ๆ ละ 40 กอ เพื่อหาองศาที่เหมาะสมของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุมกับสกี โดยแถวที่ 1 ทำมุม

40°, แถวที่ 2 ทำมุม 45°, แถวที่ 3 ทำมุม 50°, และแถวที่ 4 ทำมุม 55° พบว่าองศาความเอียงของชุดตะขอร้งข้าว ช่องที่ 3 ทำมุม 50° กับสกีมีจำนวนต้นกล้าเฉลี่ย 3.86 ต้นต่อกอ กอข้าวไม่ล้ม ซึ่งเป็นการเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่เหมาะสม แรงเสียดทานระหว่างต้นกล้าน้อย ทำให้ต้นกล้าไหลลงตามรางได้ดีส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการปักดำต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับแถวที่ 1 ทำมุม 40° จำนวนต้นกล้าเฉลี่ย 0.93 ต้นต่อกอ แถวที่ 2 ทำมุม 45° จำนวนต้นกล้าเฉลี่ย 1.40 ต้นต่อกอ แถวที่ 1 และแถวที่ 2 เกิดความผิดพลาดในการปักดำสูงเนื่องจากต้นกล้าไหลลงไปหาหัวปลูกทำให้มีจำนวนต้นกล้าที่หัวปักดำลดลงแปลงนามีจำนวนต้นน้อยหรือไม่มีต้นกล้าไหลมาที่หัวปลูกเลย และแถวที่ 4 ซึ่งทำมุม 55° กับสกี เนื่องจากชุดตะขอร้งข้าวมีความชันมากเกินไปทำให้ต้นกล้าไหลมาแออัดที่ชุดตะขอร้งข้าวทำให้จำนวนต้นกล้าที่ปักดำมีจำนวนมากเฉลี่ยถึง 7 ต้นต่อกอ

7.2 ความลึกและจำนวนต้นกล้าหลังการปักดำ

จากการสุ่มตรวจวัดระดับความลึกของต้นกล้าและจำนวนกอต้นกล้าในแปลงนาดังรูปที่ 8 ที่ทำการทดสอบที่ระดับความลึกของน้ำไม่เกิน 5 cm ความเอียงของชุดตะขอร้งข้าวที่ทำมุม 50° กับสกีจำนวน 4 แถว ๆ ละ 40 กอ รวม 160 กอ น้ำหนักของเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำมีน้ำหนักของตัวเครื่องรวม 28 kg

ตารางที่ 2 จำนวนของต้นกล้าและความลึกในการปักดำที่ชุดตะขอร้งข้าวทำมุมกับสกี 50°

ค่าสถิติ	หัวปลูกช่องที่ 1		หัวปลูกช่องที่ 2		หัวปลูกช่องที่ 3		หัวปลูกช่องที่ 4	
	D (cm)	N (ต้น)	D (cm)	N (ต้น)	D (cm)	N (ต้น)	D (cm)	N (ต้น)
Mean	5.9	3.1	5.0	5.5	5.2	3.1	5.0	3.0
SD	0.6	1.4	0.5	1.4	0.7	1.9	0.9	1.5
CV (%)	11.3	26.8	11.5	31.0	10.9	31.1	32.4	25.5

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 2 ทำการทดสอบเก็บผลจำนวน ต้นกล้าและความลึกในการปักดำที่ระดับความเอียงของชุดตะขोरั้งข้าวท่ามูมกับสกี 50° โดยที่ D คือ ความลึกเฉลี่ยของต้นกล้าที่ถูกปักดำ และ N คือ จำนวนเฉลี่ยต้นกล้าที่ถูกปักดำในแต่ละกอ จากการทดสอบสมรรถนะ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน (CV) ของความลึกในการปักดำและจำนวน ต้นกล้าต่อกอ มีค่าเท่ากับ 10.9% และ 13.9% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับมาตรฐานเครื่องจักรกลเกษตรทั่วไป โดยปกติไม่ควรเกิน 20% สำหรับกลไกการปักดำ แสดงให้เห็นว่าชุดตะขอรั้งและกลไกสกีบาร์มีความแม่นยำในการคืบแยกต้นกล้าที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ค่า CV ของระยะห่างระหว่างกอมีค่าสูงถึง 32.4% ซึ่งสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องปักดำนาที่พัฒนาขึ้นอาศัยแรงจูงจากคนงานขับที่มีทักษะการลาก ทำให้ความเร็วในการก้าวเดินไม่คงที่ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องปักดำนาประเภทขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ที่มีการควบคุมความเร็วสัมพันธ์กับรอบการปักดำอย่างคงที่ ปัจจัยจากมนุษย์ส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของระยะปลูกในเครื่องจักรขนาดเล็ก

7.3 สมรรถนะของเครื่องดำนา

จากข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 3 ที่ความชันของชุดตะขอรั้งข้าว 50° ผลการปักดำพบว่ามีความเหมาะสมและมีความผิดพลาดน้อยเมื่อใช้ต้นกล้าในการทดสอบที่มีอายุประมาณ 30 วัน ซึ่งความสามารถของการทำงานของเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวสามารถทำงานได้ 2 ไร่ต่อวันใช้แรงงานคนจำนวน 1 คน ใช้เวลาในการทำงานที่ 8 hr ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการลากเครื่องปักดำ การโยกคันโยกของคนงานจะเป็นการกำหนดระยะห่างของกอข้าวซึ่งมีก้านซี่ระยะห่างของแถวต้นกล้า 25 cm ติดที่ตำแหน่งปลูก ส่งผลทำให้ได้ระยะห่างของกอข้าวในแต่ละแถวอยู่ในช่วงระยะ 20.25 – 35.23 cm

ตารางที่ 3 ทดสอบการทำงานของเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว

ลำดับ	ค่าการวัด	
1	ความสามารถทำงานเชิงพื้นที่ (m ² /hr)	400
2	ความเร็วเฉลี่ยของแขนปักดำ (ครั้ง/hr)	160
3	ประสิทธิภาพในการทำงานเชิงพื้นที่ (ร้อยละ)	92
4	ความผิดพลาดในการปักดำ (ร้อยละ)	8
5	อัตราการทำงาน (ไร่/hr)	0.25

จากการทดสอบสมรรถนะในภาคสนามพบว่าเครื่องดำนาแบบ 4 แถวต้นแบบ มีความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ย 0.25 ไร่ต่อชั่วโมง โดยใช้คนงานเพียง 1 คนในการลากจูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องดำนาด้วยแรงงานคนในวิธีดั้งเดิม พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้มากกว่า 16 เท่า ในส่วนของความแม่นยำ พบว่าเครื่องดำนาที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการปักดำผิดพลาดเพียงร้อยละ 8 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบกลไกชุดตะขอรั้งที่มีความแม่นยำในการคืบแยกต้นกล้า โดยประสิทธิภาพการปักดำที่ร้อยละ 92 นี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานในระดับเกษตรกรรายย่อย เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องดำนาแบบเดินตามทั่วไปที่มักมีอัตราความผิดพลาดในช่วงร้อยละ 5-10 อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างกอที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น ผู้ปฏิบัติงานควรได้รับการฝึกฝนให้รักษาความเร็วในการเดินลากให้คงที่ที่ประมาณ 0.25 m/s

7.4 ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว เปรียบเทียบจากข้อมูลการทำนาตามฤดูกาลจนถึงการเก็บเกี่ยวของพื้นที่ มีการปลูกข้าวแบบนาหว่าน นาหยอด ปักดำด้วยคน ปักดำด้วย

บทความวิจัย (Research Article)

เครื่องยนต์ดำนามีค่าใช้จ่ายดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า การทำนาโดยการปักดำด้วยมือจะมีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด แต่ให้ผลผลิตสูง เพราะในแปลงมีการปรับเตรียมดินทำให้ไม่มีวัชพืชในแปลงนา โดยเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวมีต้นทุนค่าเครื่อง 5,000 บาท ทำการวิเคราะห์การคืนทุนด้วยสมการที่ 4

$$CR = (P - SV)(A/P, i, n) + i.SV \quad (4)$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} CR &= (5,000 - 500) (0.2638) + (0.1) (500) \\ &= 1,237.1 \end{aligned}$$

การคำนวณหาจุดคุ้มทุน หากชาวนาทำนาด้วยวิธีปักดำด้วยมือค่าใช้จ่ายเท่ากับ 3,075 บาทต่อไร่ หากชาวนาเปลี่ยนวิธีการทำนาเป็นการใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวที่มีค่าใช้จ่าย 2,375 บาทต่อไร่ ซึ่งถือเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึงไร่ละ 700 บาทต่อไร่ การคืนทุนต้องใช้เครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถว เท่ากับ $1,237.1/700 = 1.76$ ไร่ต่อปี ความสามารถของเครื่องสามารถทำงานได้ 2 ไร่ต่อวัน หากชาวนามีพื้นที่ 10 ไร่ จะประหยัดค่าใช้จ่าย 7,000 บาทใช้เวลาในการปักดำด้วยเครื่องดำนาเป็นระยะเวลา 5 วัน หรือจะคืนทุนในปีนั้นชาวนาจะต้องทำนาด้วยเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4 แถวประมาณ 2 ไร่

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายของแต่ละวิธีการปลูกข้าว (บาท/ไร่)

รายการ	ค่าใช้จ่ายของแต่ละวิธีการปลูกข้าว (บาท/ไร่)				
	หว่าน	หยอด	คนปักดำด้วยมือ	เครื่องดำนาแบบ 4 แถว	เครื่องยนต์ดำนา
ต้นทุนค่าเครื่อง	-	-	-	5,000	450,000
ไถและปรับดินเตรียมแปลง	500	500	600	600	600
เมล็ดพันธุ์ข้าว	300	90	175	175	220
ค่าแรงคนงานเตรียมกล้า	-	-	400	400	-
ค่าแรงคนงาน	400 (1 คน)	400 (1 คน)	1,200 (4 คน)	400 (1 คน)	1,400 (2 คน)
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	40	40	-	-	150
ค่าเก็บเกี่ยว	700	700	700	700	700
ผลผลิต (kg/ไร่)	430	500	520	500	530
รวมราคาค่าใช้จ่ายไม่รวมเครื่อง (บาท/ไร่)	1,940	1,730	3,075	2,375	3,600

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 4 ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการปักดำด้วยแรงงานคนและอัตราค่าจ้างรถดำนาในท้องถิ่นอ้างอิงตามฐานข้อมูลราคาตลาดปี พ.ศ. 2567 และสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ คณิศร์ เจียรนัยกุล [7] และ นัย บำรุงเวช [11] อัตราค่าจ้างรถดำนาและแรงงานคนเป็นราคาประเมินจากการสำรวจในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ปี พ.ศ. 2567

8. สรุปผลการวิจัย

เครื่องดำนาที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่เฉลี่ย 0.25 ไร่/ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าการใช้แรงงานคนปลูกถึง 16 เท่า ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ตามมาตรฐานเครื่องจักรกลเกษตร จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เครื่องต้นแบบมีต้นทุนการผลิตเพียง 5,000 บาท เมื่อเทียบกับราคาเครื่องดำนาที่ราคาสูงกว่า โดยมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1.76 ไร่ต่อปี ภายในฤดูการผลิต เมื่อคิดจากการรับจ้างหรือใช้ในพื้นที่ของตนเอง ทำให้เครื่องนี้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรรายย่อยที่มีงบประมาณจำกัด ผลการทดสอบยืนยันว่า การปรับมุมชุดตะขอรั้งข้าวที่ 50 องศา เป็นจุดที่สร้างความสมดุลสูงสุดระหว่างความเร็วในการป้อนต้นกล้าและความแม่นยำในการปักดำ ลดอัตราการปักดำพลาดเหลือเพียง 8% ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าการออกแบบกลไกนี้มีความเหมาะสมทางเทคนิคในการนำไปใช้งานจริงในพื้นที่แปลงนาขนาดเล็ก

9. แนวทางการพัฒนาต่อ

แม้ว่าเครื่องจะทำงานได้ดี แต่พบว่าค่าความแปรปรวนของระยะห่างระหว่างกอยังค่อนข้างสูง (CV = 32.4%) ดังนั้น งานวิจัยในระยะถัดไปควรพัฒนากลไกวัดระยะ ชุดเกียร์ทดรอบ หรือระบบกำหนดจังหวะการตกของต้นกล้าให้สัมพันธ์กับความเร็วในการลากเครื่องดำนาแบบใช้กลไกปักดำต้นกล้าแบบ 4

แถว เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอในการปักดำให้ได้มาตรฐาน

10. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงรายที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมพล อุซชิน, นงลักษณ์ มาเที่ยง, และ สาลี บุญญาวิวัฒน์. “การทำน่าน้ำฝน” สถาบันวิจัยข้าวกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2539.
- [2] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, “ผลการผลิตข้าว,” [ออนไลน์]. Available: <http://www.thaiceeexporters.or.th/production.htm> [เข้าถึงเมื่อ 30 มิถุนายน 2568]
- [3] ไพโรจน์ นะเที่ยง, “ผลการใช้เทคโนโลยีเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับการปลูกข้าวแบบนาตาม,” *journal of community development research*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 15-30, 2557.
- [4] สมพร หงษ์กง, และวัชรายุทธ ลำดวน, “เครื่องดำนาขนาดเล็กแบบเดินตามสำหรับปักดำต้นกล้าข้าวแบบล้งรากในการปลูกข้าวหน้าน้ำฝน,” *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 19, 2561.
- [5] IRRI, “Transplanting,” [online]. Available: <http://www.knowledgebank.irri.org/training/fact-sheets/crop-establishment/item/transplanting>. [Accessed: March 2, 2024]

บทความวิจัย (Research Article)

- [6] สมพร หงษ์ก่ง, ณรงค์ หุชัยภูมิ, และบัญชา ล้าเลิศ, “ชุดปักดำแบบพ่วงติดรถไถนาเดินตาม,” *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร* ปีที่ 5 ฉบับที่ 9, หน้า 97–108, 2556.
- [7] คณิศศักดิ์ เจียรนัยกุล, “ทดสอบและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้เครื่องดำนา” *รายงานการวิจัยการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการกองเกษตรวิศวกรรม, กรมวิชาการเกษตร*, 2540.
- [8] Y. Mori, “Performance evaluation of rice transplanters evaluated by national test,” *JARQ*, vol. 9, no. 3, pp. 152-155, 1975. [Online]. Available: <https://www.jircas.go.jp/en/publication/jarq/9/3/152>. [Accessed: March 2, 2025].
- [9] RNAM, *Test Codes & Procedures for Farm Machinery, Technical Series No. 12*, Regional Network for Agricultural Machinery Economic and Social Commission for Asia and Pacific, 1983.
- [10] B. K. Behera, B. P. Varshney, A. K. Goel, “Effect of Puddling on Puddled Soil Characteristics and Performance of Self-propelled Transplanter in Rice Crop,” *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Vol. XI. Manuscript PM 08 020. September, 2009.
- [11] นัย บำรุงเวช, “เครื่องดำนา,” *ม.ป.ท. 2546*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง, 2546.
- [12] ไพบุลย์ แยมเฟื่อน, *การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม*, พิมพ์ครั้งที่ 25. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2542.
- [13] วันชัย วิจิรวนิช, และ ช่อม พลอยมีค่า, “เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม,” กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบ บรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

สามารถ จันทนา^{1,*}, จุฑาทิพย์ นามวงษ์¹, นาวิ เป็ลยวจิตร¹, เข้มชาติ เขยชม¹ และ วิมลสิน สันตจิต¹

¹สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: samart.c@rbru.ac.th โทรศัพท์: 089-5413984

(รับบทความ: 8 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 2 เมษายน 2569; ตอรับบทความ: 17 เมษายน 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุชีวภาพจากกากเส้นกกเหลือทิ้งจากการทอเสื่อในจังหวัดจันทบุรี เพื่อสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยผสมผสานแนวทางเชิงวิทยาศาสตร์วัสดุกับการออกแบบเชิงนิเวศ (Eco-Design) ในกระบวนการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ วัสดุถูกพัฒนาโดยนำเส้นกกบดละเอียดผสมกับแป้งมันสำปะหลัง น้ำแป้ง น้ำมันพืช และขี้ผึ้ง เพื่อปรับสมบัติความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการกันน้ำ ก่อนนำไปอัดขึ้นรูปและอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการทดสอบพบว่าวัสดุมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเฉลี่ย 3.2 MPa สามารถขึ้นรูปได้ร้อยละ 85 และย่อยสลายได้กว่าร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 8 เดือน ในขั้นตอนการออกแบบ ได้ประยุกต์แนวทางการสื่อสารด้วยสีเขียวและการออกแบบอย่างยั่งยืนเพื่อสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องของฝากและภาควางสินค้า พร้อมประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment QFD) ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าวัสดุและรูปแบบบรรจุภัณฑ์มีความเหมาะสมทั้งด้านความสวยงาม ความปลอดภัย และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการบูรณาการองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมวัสดุและการออกแบบเชิงสร้างสรรค์ เพื่อนำของเสียในท้องถิ่นกลับมาใช้ประโยชน์อย่างมีคุณค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ: เสื่อกก การออกแบบบรรจุภัณฑ์ การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้ง บรรจุภัณฑ์รักษ์โลก เศรษฐกิจหมุนเวียน

การอ้างอิงบทความ: สามารถ จันทนา, จุฑาทิพย์ นามวงษ์, นาวิ เป็ลยวจิตร, เข้มชาติ เขยชม และ วิมลสิน สันตจิต, "การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 36-47, 2569.

Development of Composite Material from Sedge Mat Weaving Waste for Environmentally Friendly Packaging Design

Samart Chantana^{1,*}, Jutathip Namwong¹, Nawee Pliaojit¹, Khemchat Cheychom¹ and Wimonlin Santajit¹

¹ Department of Industrial Art, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

*Corresponding Author: samart.c@rbru.ac.th, Tel: 089-5413984

(Received: October 8, 2025; Revised: April 2, 2026; Accepted: April 17, 2026)

Abstract

This research aimed to develop a bio-based material from sedge waste generated during the traditional mat-weaving process in Chanthaburi Province, Thailand, to create environmentally friendly packaging prototypes under the concept of a circular economy. The study integrated material science and eco-design approaches in both material formulation and product design. The sedge waste was ground and blended with cassava starch, starchy water, vegetable oil, and beeswax to enhance tensile strength, flexibility, and water resistance. The mixture was molded into bioplastic sheets and dried using solar energy. The mechanical tests showed an average tensile strength of 3.2 MPa, 85% recovery after bending, and over 80% biodegradation within eight months. In the design stage, the developed material was applied to create eco-friendly packaging prototypes such as souvenir boxes and display trays, emphasizing sustainable aesthetics and green communication. The evaluation using Quality Function Deployment (QFD) indicated high satisfaction in terms of safety, natural appearance, and environmental friendliness. The study demonstrates the integration of scientific experimentation and creative design to transform local waste into sustainable bio-materials, supporting community-based production and promoting circular economy development.

Keywords: Sedge Mat, Packaging Design, Waste Material Processing, Eco-Friendly, Packaging, Circular Economy

Please cite this article as: S. Chantana, J. Namwong, N. Pliaojit, K. Cheychom and W. Santajit, "Development of Composite Material from Sedge Mat Weaving Waste for Environmentally Friendly Packaging Design," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 36-47, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ปัญหาขยะจากบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว (Single-Use Plastic) ได้กลายเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกต้องเผชิญ เพราะเป็นวัสดุที่มีความคงทนต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมและสร้างผลกระทบต่อระบบนิเวศ ทั้งในด้านคุณภาพดิน น้ำ และอากาศ [1] การเผาหรือการฝังกลบซึ่งเป็นวิธีการจัดการขยะหลักที่ใช้กันมานานนั้นกลับยิ่งสร้างผลกระทบทางลบ ไม่ว่าจะเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม กระแสการรณรงค์เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติกและหันไปสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly Packaging) จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง [2,3] ภายใต้กรอบแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่เน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-Product Design) ที่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ [2,4,5]

ประเทศไทยเองถือเป็นหนึ่งในประเทศที่ต้องเผชิญกับปริมาณขยะพลาสติกจำนวนมากจากอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐและองค์กรสิ่งแวดล้อมสะท้อนว่าขยะพลาสติกกลายเป็นหนึ่งในตัวการหลักของมลพิษทางทะเลและทำลายความหลากหลายทางชีวภาพ ดังนั้นการสร้างทางเลือกใหม่จากวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Materials) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยหลายชิ้นได้มุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงพลาสติก เช่น การใช้เส้นใยสับปะรดผสมแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ภายใน 60 วัน และยังคงความแข็งแรงในการใช้งาน [6] หรือนำขานอ้อยมาพัฒนาเป็นเยื่อกระดาษเพื่อผลิตเป็นภาชนะบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้เองในสภาพแวดล้อม

[7,8] สิ่งเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้งสามารถช่วยลดการพึ่งพาพลาสติกและสร้างผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์ทั้งด้านการใช้งานและการรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างแท้จริง

จังหวัดจันทบุรีเป็นพื้นที่ที่มีชื่อเสียงด้านภูมิปัญญาท้องถิ่นและหัตถกรรม โดยเฉพาะการทอเสื่อกก (Sedge Mat Weaving) ที่ถือเป็นอาชีพสำคัญและสะท้อนถึงอัตลักษณ์ของท้องถิ่น [9] แต่ในกระบวนการผลิตกลับก่อให้เกิดเศษเสี้ยนกกจำนวนมากที่ไม่สามารถนำไปทอหรือใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากมีขนาดไม่สม่ำเสมอหรือผ่านการย้อมด้วยสารเคมี เศษเสี้ยนกกเหล่านี้จึงกลายเป็นกากอุตสาหกรรม (Industrial Waste) ที่ไม่เพียงแต่สร้างภาระในการจัดการ แต่ยังเป็นมลพิษหากไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี [1] การแปรรูปวัสดุเหล่านี้เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นมูลเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อหาทางออกที่ยั่งยืนให้กับปัญหาทั้งในมิติสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการใช้ประโยชน์จากเศษเสี้ยนกกเหลือทิ้งให้กลายเป็นวัสดุใหม่ที่สามารถนำไปผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีกระบวนการสำคัญ ได้แก่ การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเสี้ยนกก เช่น โครงสร้างเส้นใย สี และความสามารถในการย่อยสลาย [3] การพัฒนากระบวนการบดและผสมกับสารธรรมชาติเพื่อเสริมสมบัติด้านความแข็งแรง การขึ้นรูปเป็นวัสดุแผ่น และการออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ เช่น กล่องของฝาก ถาดวางสินค้า และภาชนะต้น [6,7] ผลลัพธ์ที่คาดหวังคือ ได้บรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติแข็งแรงเพียงพอใช้งานได้จริง ผลิตได้ด้วยต้นทุนต่ำ และที่สำคัญคือสามารถถ่ายทอดให้กับชุมชนในรูปแบบของการผลิตระดับวิสาหกิจชุมชน (Community Enterprise) เพื่อสร้างรายได้และเพิ่มมูลค่าจากทรัพยากรท้องถิ่น

การทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมยังชี้ให้เห็นว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

Product Design) เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนานวัตกรรมที่เชื่อมโยงสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมเข้าด้วยกัน [4,10], Charter and Tischner [11] ได้เสนอแนวคิด Sustainable Solutions ที่มุ่งพัฒนาผลิตภัณฑ์และบริการที่ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ขณะที่ Ellen MacArthur Foundation [2] เน้นย้ำถึงความสำคัญของการเปลี่ยนผ่านไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนที่สามารถลดการใช้ทรัพยากรใหม่และเพิ่มการใช้ซ้ำ ยังได้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุทางเลือกที่สามารถย่อยสลายได้และนำไปใช้แทนพลาสติกแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ งานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาได้สะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment QFD) ในกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ สามารถช่วยจัดลำดับความสำคัญของความต้องการทางเทคนิคได้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะในประเด็นด้านลักษณะการใช้งาน วัสดุที่ใช้ และความสะดวกในการบำรุงรักษา ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ในภาพรวม [12] นอกจากนี้ การใช้แผนภูมิ House of Quality ยังมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงความต้องการของผู้ใช้ (Voice of Customer) เข้ากับคุณลักษณะทางวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ ทำให้กระบวนการออกแบบมีความชัดเจน ลดความคลาดเคลื่อน และสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างตรงจุดมากยิ่งขึ้น [13]

ในขณะเดียวกัน แนวคิดทฤษฎีการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์ (Theory of Inventive Problem Solving: TRIZ) ถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการแก้ไขข้อขัดแย้งเชิงวิศวกรรมที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยมุ่งเน้นการสร้างแนวทางเชิงนวัตกรรมที่สามารถพัฒนาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านลบในมิติอื่น เช่น การเพิ่ม

ความแข็งแรงของวัสดุโดยไม่เพิ่มน้ำหนัก หรือการยกระดับประสิทธิภาพโดยไม่เพิ่มต้นทุน [14]

ดังนั้น การบูรณาการ QFD ร่วมกับ TRIZ จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงนวัตกรรมอย่างเป็นระบบ กล่าวคือ QFD ทำหน้าที่ในการถ่ายทอดและจัดลำดับความต้องการของผู้ใช้ ขณะที่ TRIZ ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์และแก้ไขข้อจำกัดเชิงเทคนิค ส่งผลให้กระบวนการออกแบบสามารถเชื่อมโยงระหว่าง “ความต้องการของผู้ใช้” กับ “ความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม” ได้อย่างสมดุล และนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ตอบโจทย์การใช้งาน และสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนในบริบทปัจจุบัน [11]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ผสมผสานกับการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research) เพื่อพัฒนาวัสดุชีวภาพจากกากของเสียในกระบวนการทอเสื้อกอก และแปลงผลสู่ต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ข้อมูลทั้งจากภาคสนามและเอกสารวิชาการ [15] (Primary–Secondary Data) ในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบให้สอดคล้องกับบริบทการผลิตจริงของชุมชนผู้ทอเสื้อกอกในพื้นที่

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื้อกอก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีขั้นตอนการดำเนินงานที่เชื่อมโยงอย่างเป็นระบบ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื้อกอก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

2.1.1 การเก็บและคัดแยกวัสดุ (Raw Material Collection and Sorting)

ผู้วิจัยลงพื้นที่เพื่อเก็บเศษเส้นกกเหลือทิ้งจากกลุ่มช่างทอเสื่อในจังหวัดจันทบุรี โดยคัดเลือกเฉพาะเส้นที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ในการทอได้ เช่น เส้นที่สั้นเกินไป สีไม่สม่ำเสมอ หรือผ่านการย้อมด้วยสารเคมี จากนั้นนำมาทำความสะอาดเพื่อลดสิ่งเจือปนและตากแห้งให้มีค่าความชื้นคงที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการบดและการผสมกับสารยึดเกาะในขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุชีวภาพต่อไป

2.1.2 การเตรียมเส้นใยและการผสมสารเสริมธรรมชาติ (Fiber Preparation and Compounding)

เศษเส้นกกที่ตากแห้งแล้วถูกนำไปบดด้วยเครื่องบดเส้นใย (Fiber Grinder) ให้ได้ขนาดสม่ำเสมอ ก่อนผสมเข้ากับสารเสริมธรรมชาติ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca Starch) และน้ำแป้ง (Starch Solution) ซึ่งใช้เป็นตัวประสาน (Binder) และขี้ผึ้ง (Beeswax) ซึ่งใช้สำหรับการเคลือบเพื่อเพิ่มความทนทานต่อความชื้น โดยการทดลองได้กำหนดสัดส่วนผสมของวัสดุในรูปแบบอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (weight ratio) ระหว่างเส้นใย กก แป้งมันสำปะหลัง และขี้ผึ้ง จำนวน 3 สูตร ได้แก่ 70:25:5, 60:30:10 และ 50:40:10 ตามลำดับ ขณะเดียวกันน้ำแป้ง (starch solution) ถูกเตรียมในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำที่ 1:5 โดยให้ความร้อนเพื่อให้เกิดกระบวนการเจลลิตไนซ์ (Gelatinization) ก่อนนำไปผสมร่วมกับเส้นใย กก เพื่อให้เกิดการยึดประสานที่เหมาะสม ทั้งนี้ วัสดุผสมในแต่ละสูตรถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ความแข็งแรงเชิงกล ความสามารถในการยึดเกาะ ความเหมาะสมต่อการขึ้นรูป และความทนทานต่อความชื้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาเป็นต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.3 การขึ้นรูปและการอบแห้ง (Forming and Drying)

ส่วนผสมที่เตรียมไว้ถูกนำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ไม้ (Wooden Mould) ให้ได้เป็นวัสดุแผ่นชีวภาพ (Biodegradable Sheet) โดยใช้เครื่องกดร้อน (Hot Press) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดันประมาณ 3–5 เมกะปาสคาล (MPa) เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการยึดประสานระหว่างเส้นใยและสารยึดเกาะอย่างสมบูรณ์ และได้แผ่นวัสดุที่มีความหนาแน่นและความสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปอบในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 60–70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6–8 ชั่วโมง โดยมีการกลับด้านวัสดุทุก ๆ 2 ชั่วโมง เพื่อให้การอบแห้งสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เพื่อให้วัสดุแห้ง คงรูป และได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยการพิจารณาว่าวัสดุแห้งสมบูรณ์นั้น ใช้เกณฑ์น้ำหนักคงที่ (Constant Weight) โดยทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง หากน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 0.01 กรัม ถือว่าวัสดุแห้งสนิท

2.1.4 การปรับปรุงสมบัติผิว (Surface Finishing)

หลังจากอบแห้ง วัสดุถูกนำมาปรับปรุงสมบัติผิวโดยการเคลือบด้วยสารธรรมชาติ เช่น การทาขี้ผึ้งหรือน้ำมันพืชบาง ๆ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความชื้นและช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุ โดยเคลือบให้เป็นฟิล์มบางความหนาประมาณ 0.1–0.2 มม. จำนวน 2 รอบ และทิ้งให้แห้งระหว่างรอบประมาณ 30 นาที ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานความชื้นและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น

2.1.5 การทดสอบคุณสมบัติ (Testing and Evaluation)

วัสดุชีวภาพที่ได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ความหนา (Thickness) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) ความสามารถในการป้องกันน้ำ และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อ เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

(Biodegradability) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ การวัดความหนาตาม ASTM D374 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลตาม ASTM D882 การทดสอบการดูดซึมน้ำตาม ASTM D570 และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพตาม ASTM D6400

2.1.6 การสร้างบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ (Prototyping)

เมื่อนำสูตรวัสดุที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ จึงออกแบบและสร้างบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ ได้แก่ กล่องของฝาก ถาดวางสินค้า และภาชนะต้น พร้อมทั้งออกแบบกราฟิกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และหมึกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly Ink) เพื่อสื่อสารคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

2.1.7 การประเมินด้วย QFD (Quality Function Deployment)

ผู้วิจัยได้จัดทำแผนภูมิ House of Quality เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้ (Voice of Customer) กับคุณสมบัติทางเทคนิคของวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเศษเส้นกกเหลือทิ้ง ผลการประเมินสามารถสรุปเป็นจุดแข็งและจุดอ่อน

2.1.8 การถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน (Knowledge Transfer)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ผู้ผลิตและชุมชนในรูปแบบการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตวัสดุชีวภาพและต้นแบบบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้จริง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากากของเสียจากการทอเสื่อกกสามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพสำหรับการสร้างบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติทั้งด้านความ

แข็งแรง การย่อยสลายได้ และมีศักยภาพเชิงเศรษฐกิจสำหรับการผลิตในระดับชุมชน

3.1 ผลการพัฒนาวัสดุชีวภาพจากเศษเส้นกก

เศษเส้นกกเหลือทิ้งจากกระบวนการทอเสื่อของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดจันทบุรี ถูกนำมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพ โดยผ่านกระบวนการบดละเอียดและผสมกับสารเสริมธรรมชาติ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง น้ำแป้ง น้ำมันพืช และขี้ผึ้ง เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและความคงรูปของวัสดุ ผลการทดลองพบว่า สูตรที่มีสัดส่วนเส้นใยกก : แป้งมันสำปะหลัง : ขี้ผึ้ง เท่ากับ 50 : 40 : 10 และใช้น้ำแป้งในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1 : 5 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใย ทำให้วัสดุที่ได้มีความหนาแน่นสม่ำเสมอและคงรูปได้ดีหลังผ่านการอบด้วยเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตาม วัสดุบางสูตรยังคงมีลักษณะเปราะ จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติโดยเติมน้ำมันพืชและเคลือบขี้ผึ้ง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความทนต่อความชื้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Narayan [3] ที่ระบุว่าวัสดุชีวภาพจำเป็นต้องมีสารปรับปรุงสมบัติเพื่อทดแทนคุณสมบัติของพลาสติกสังเคราะห์

เศษเส้นกกที่นำมาใช้มีลักษณะเป็นเส้นใยธรรมชาติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5–2.5 มิลลิเมตร และความยาวเฉลี่ย 5–20 เซนติเมตร พื้นผิวเส้นใยมีความหยาบและมีร่องผิวชัดเจน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าโครงสร้างเส้นใยประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินในสัดส่วนสูง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุในระดับปานกลาง แต่มีความไม่สม่ำเสมอของเส้นใยที่อาจส่งผลต่อความคงตัวของวัสดุชีวภาพที่ผลิตได้ เศษเส้นกกเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการทอเสื่อของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดจันทบุรี มีลักษณะเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5–2.5 มิลลิเมตร และความยาวเฉลี่ย

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

5–20 เซนติเมตร พื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระและหยาบ ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินในสัดส่วนสูง ซึ่งให้สมบัติทางกลที่ีระดับหนึ่ง แต่มีความไม่สม่ำเสมอของเส้นใยสูง การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นโครงสร้างเส้นใยที่ซับซ้อนและมีร่องผิวชัดเจนดังแสดงใน ภาพที่ 1 การส่องกล้องจุลทรรศน์โครงสร้างเส้นใย



รูปที่ 1 แสดงการส่องกล้องจุลทรรศน์โครงสร้างเส้นใย

เส้นใยส่วนใหญ่ผ่านกระบวนการย้อมสีเคมี เช่น สีดำ แดง เขียว และฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดสารเคมีตกค้าง ทำให้การย่อยสลายตามธรรมชาติล่าช้าและไม่เหมาะสมต่อการผลิตวัสดุที่ต้องการสีสม่ำเสมอ จากการทดสอบสมบัติทางกล เส้นใยมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเฉลี่ย 2.5–4.0 MPa และค่าการยืดตัวก่อนขาดเพียงร้อยละ 1.2–1.5 บ่งชี้ถึงความเปราะและความยืดหยุ่นต่ำด้านการย่อยสลาย เส้นใยธรรมชาติย่อยสลายภายใน 5–7 เดือน ขณะที่เส้นใยที่ผ่านการย้อมสีใช้เวลานานขึ้น 12–18 เดือน เนื่องจากสารเคมีเคลือบผิวเส้นใยยับยั้งกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

เศษเส้นกกเหลือทิ้ง มีลักษณะเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5–2.5 มิลลิเมตร และความยาว 5–20 เซนติเมตร พื้นผิวมีความหยาบและไม่สม่ำเสมอ องค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งให้ความแข็งแรงเชิงกลระดับปานกลางแต่มีความเปราะสูง เส้นใยส่วนใหญ่ผ่านการ

ย้อมสีเคมีหลากหลาย ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนสารเคมีและย่อยสลายได้ช้ากว่าเส้นใยธรรมชาติทั่วไป โดยมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเฉลี่ย 2.5–4.0 MPa และค่าการยืดตัวก่อนขาดร้อยละ 1.2–1.5 ทั้งนี้ เศษเส้นกกมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ผลิตวัสดุใหม่ได้ หากได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและลดสารตกค้างจากสีเคมี แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเศษเส้นกกเหลือทิ้ง

คุณสมบัติ	ค่าหรือรายละเอียด	ข้อสังเกต
ลักษณะเส้นใย	Ø 0.5–2.5 มิลลิเมตร ยาว 5–20 เซนติเมตร	พื้นผิวหยาบ ไม่สม่ำเสมอ
องค์ประกอบหลัก	เซลลูโลส ลิกนิน	แข็งแรงปานกลาง แต่เปราะ
สีและสารเคมีตกค้าง	สีดำ แดง เขียว ฟ้า (ย้อมเคมี)	ปนเปื้อนสารเคมี ย่อยสลายยาก
แรงดึง (MPa)	2.5–4.0	รับแรงดึงได้ปานกลาง
การยืดตัว (%)	1.2–1.5	ยืดหยุ่นต่ำ หักง่าย
การย่อยสลาย	ธรรมชาติ 5–7 เดือน ย้อมสี 12–18 เดือน	สีเคมีหน่วงการสลาย
ศักยภาพใช้ซ้ำ	ใช้ผลิตวัสดุใหม่ได้	ต้องปรับปรุงคุณสมบัติ

กระบวนการแปรรูปเศษเส้นกกให้เป็นวัสดุชีวภาพ โดยเริ่มจากการคัดแยกและตัดแต่งเส้นกกให้ได้ขนาดที่เหมาะสม นำไปบดและตากให้แห้ง จากนั้นผสมกับสารยึดเกาะธรรมชาติ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและน้ำแป้ง ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นวัสดุและอบให้แห้งด้วยเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ ขั้นตอนสุดท้ายคือ

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อจาก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

การเคลือบด้วยซีเมนต์หรือน้ำมันพืช เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความทนความชื้น และคงทนต่อการใช้งาน วัสดุที่ได้มีลักษณะเรียบ แข็งแรง น้ำหนักเบา และมีสีธรรมชาติสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกระบวนการแปรรูปเศษเสี้ยนที่เหมาะสม

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ชีวภาพจากเศษเสี้ยนดังกล่าวแสดงใน ตารางที่ 1 พบว่าวัสดุมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเฉลี่ย 3.2 MPa จัดอยู่ในระดับปานกลาง เหมาะสำหรับการใช้งานในบรรจุภัณฑ์สินค้าน้ำหนักเบา โดยผลการทดสอบดังกล่าวอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D882 สำหรับวัสดุแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับวัสดุบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ วัสดุสามารถ

ขึ้นรูปได้ร้อยละ 85 หลังการโค้งงอที่มุม 30 องศา แสดงถึงความยืดหยุ่นและความเหนียวพอสมควร ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับแนวทางการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์ตาม ASTM D790 (Flexural Properties)

วัสดุสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 14 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการรองรับสินค้าประเภทกล่องบรรจุภัณฑ์ทั่วไป ด้านความทนความชื้นพบว่าโครงสร้างยังคงรูปได้ดีหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนแปลงของผิววัสดุเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้วัสดุสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 8 เดือน และไม่พบสารเคมีตกค้างเกินค่ามาตรฐานสิ่งแวดล้อม โดยค่าการตกค้างของสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และปรอท (Hg) มีค่าไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลและทางเคมีของวัสดุ

สมบัติที่ทดสอบ	ผลลัพธ์
ความแข็งแรง	3.2 MPa ระดับปานกลาง เหมาะกับบรรจุภัณฑ์สินค้าน้ำหนักเบา
ความยืดหยุ่น	ขึ้นรูปได้ 85% หลังโค้งงอ 30° แสดงถึงความยืดหยุ่นที่ดี
ความทนทานต่อแรงกระแทก	ไม่แตกหักจากการตกสูง 50 ซม. มีเพียงรอยบุบเล็กน้อย
ความสามารถในการรับน้ำหนัก	รับได้สูงสุด 14 กก./ตร.ม. เหมาะสำหรับสินค้าเบา
ความทนความชื้น	หลังแช่น้ำ 24 ชม. ผิวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่โครงสร้างยังคงรูป
การย่อยสลาย	ย่อยสลายได้ 80% ภายใน 8 เดือน
ความปลอดภัย	ไม่พบสารตกค้างเกินมาตรฐานสิ่งแวดล้อม ใช้งานได้ปลอดภัย

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 3 แสดงแผ่นตัวอย่างวัสดุชีวภาพจากเศษเส้นกกเพื่อเตรียมขึ้นกล่อง

3.3 ผลการสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์

วัสดุชีวภาพถูกนำไปขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ ได้แก่ กล่องของฝาก (Souvenir Box) ถาดวางสินค้า (Product Tray) และภาชนะตื้น (Shallow Container) โดยผลการประเมินพบว่า กล่องของฝากเป็นต้นแบบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความสวยงาม แข็งแรง และสื่อคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมได้อย่างชัดเจน การออกแบบกราฟิกด้วยโทนสีธรรมชาติ และสัญลักษณ์รักษ์โลกช่วยสร้างภาพลักษณ์เชิงบวกและเสริมศักยภาพทางการตลาด แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงภาพ Sketch ต้นแบบบรรจุภัณฑ์

3.4 ผลการประเมินจากชุมชน

ผลการประเมินจากผู้ผลิตในชุมชนพบว่า วัสดุมีศักยภาพในการต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้เครื่องมือพื้นฐาน และสามารถผลิตได้ในระดับวิสาหกิจชุมชน โดยการประเมินดำเนินการจากผู้ผลิตในชุมชนจำนวน 15 คน จาก 3

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ จังหวัดจันทบุรี ข้อเสนอแนะที่ได้รับ ได้แก่ การปรับปรุงกระบวนการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน และการสร้างมาตรฐานการผลิตให้มีความต่อเนื่องเพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในตลาด



รูปที่ 5 แสดงกระบวนการผลิตวัสดุบรรจุภัณฑ์จากเศษเส้นกกเหลือทิ้ง

3.5 ผลการประเมินจากการประเมินด้วย QFD (Quality Function Deployment)

การประเมินคุณภาพวัสดุบรรจุภัณฑ์จากเศษเสือกด้วยเทคนิค QFD มีวัตถุประสงค์เพื่อเชื่อมโยง “ความต้องการของผู้ใช้ (Voice of Customer)” [12,13] กับ “คุณลักษณะทางเทคนิคของวัสดุ (Technical Characteristics)” ผลการวิเคราะห์พบว่า ความต้องการของผู้บริโภคส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับ ความแข็งแรงทนทาน ความปลอดภัยจากสารเคมี ความสวยงามและเอกลักษณ์ท้องถิ่น การย่อยสลายได้ และราคาที่เหมาะสม ตามลำดับ

ในส่วนของคุณลักษณะทางเทคนิคที่ตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว พบว่า “ความหนาแน่นของเส้นใยและการอัดแน่นของแผ่นวัสดุ” มีความสัมพันธ์สูงสุดกับความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ รองลงมาคือ

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสือก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

“สัดส่วนของสารเสริมธรรมชาติ (แป้งมันสำปะหลัง และซีฟู้ด)” ซึ่งมีอิทธิพลต่อความยืดหยุ่นและความทนขึ้นของวัสดุ และ “การเคลือบผิววัสดุด้วยสารธรรมชาติ” ที่ช่วยเพิ่มความคงทนและลดการซึมผ่านของน้ำ โดยภาพรวม ผลการประเมินแบบ QFD ชี้ให้เห็นว่าวัสดุบรรจุภัณฑ์จากเศษเสื้อมีจุดแข็งด้าน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอัตลักษณ์ของวัสดุธรรมชาติ ขณะที่จุดที่ควรพัฒนาเพิ่มเติมคือ การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและการปรับปรุงสมบัติการกันความชื้น เพื่อยกระดับการใช้งานเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบเชิงนิเวศ (Eco-Design) และการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่มุ่งเน้นความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์และชุมชนในระยะยาว [16-18]

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินจากการประเมินด้วย QFD (Quality Function Deployment)

ความต้องการของผู้ใช้ (VOC)	ระดับความสำคัญ (1-5)	ความหนาแน่น/การอัดแน่น	สัดส่วนแป้งและซีฟู้ด	การเคลือบผิว	การออกแบบรูปทรง	คะแนนรวม
ความแข็งแรงทนทาน	5	●●●	●●	●	●	13
ความปลอดภัยจากสารเคมี	5	●	●●●	●●	●	14
ความสวยงาม/อัตลักษณ์	4	●	●	●●●	●●●	15
การย่อยสลายได้	5	●	●●●	●	●	13

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินจากการประเมินด้วย QFD (Quality Function Deployment) (ต่อ)

ความต้องการของผู้ใช้ (VOC)	ระดับความสำคัญ (1-5)	ความหนาแน่น/การอัดแน่น	สัดส่วนแป้งและซีฟู้ด	การเคลือบผิว	การออกแบบรูปทรง	คะแนนรวม
ราคาที่เหมาะสม	5	●●	●●	●	●	12



รูปที่ 6 แสดงบรรจุภัณฑ์ที่แก้ปัญหาด้วยแนวทางด้วย QFD (Quality Function Deployment)

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการใช้ประโยชน์จากเศษเสื้อมากเหลือทิ้งจากการทอเสื้อในจังหวัดจันทบุรี โดยนำมาผสมกับสารเสริมธรรมชาติ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและน้ำแป้งที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน น้ำมันพืชช่วยเพิ่มความเหนียวและลดความเปราะและซีฟู้ดใช้เคลือบผิวเพื่อเพิ่มความทนขึ้น กระบวนการขึ้นรูปทำด้วยแม่พิมพ์ไม้และอบด้วยเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ ผลที่ได้คือวัสดุชีวภาพที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื้อ เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพชี้ว่าวัสดุมีความแข็งแรงเชิงกลเฉลี่ย 3.2 MPa ยึดหยุ่นคืนรูปได้ร้อยละ 85 เมื่อโค้งงอ มีความทนแรงกระแทกจากการตกที่ความสูง 50 เซนติเมตรโดยไม่แตกหัก และสามารถรองรับน้ำหนักได้สูงสุด 14 กิโลกรัมต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร วัสดุยังคงรูปได้แม้สัมผัสน้ำต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง และสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 8 เดือน นอกจากนี้ การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีไม่พบสารตกค้างเกินมาตรฐาน จึงถือเป็นวัสดุที่ปลอดภัยต่อการใช้งานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ ได้แก่ กล่องของฝาก ถาด และภาชนะขึ้น พบว่ากล่องของฝากมีความเหมาะสมที่สุดทั้งด้านความแข็งแรง ความสวยงาม และการสื่อสารคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อม โดยผลการประเมินยืนยันถึงศักยภาพในการผลิตระดับวิสาหกิจชุมชนด้วยต้นทุนต่ำและสามารถต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้

โดยสรุป งานวิจัยนี้ช่วยลดของเสียจากเสื่อกก สร้างมูลค่าเพิ่มให้ทรัพยากรท้องถิ่น และสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน สามารถเป็นต้นแบบในการพัฒนาวัสดุและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณและสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะวิทยากร ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้เชี่ยวชาญด้านวัสดุและการออกแบบบรรจุภัณฑ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันมีคุณค่า นอกจากนี้ยังขอขอบคุณกลุ่มช่างทอเสื่อกกในจังหวัดจันทบุรี ที่ให้ความร่วมมือในการจัดหาวัสดุ เผยแพร่ความรู้และภูมิปัญญาท้องถิ่น ตลอดจนมีส่วนร่วมในการทดสอบและประเมินต้นแบบผลิตภัณฑ์ การวิจัย

ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือจากทุกภาคส่วนที่กล่าวมา ผู้วิจัยขอแสดงความซาบซึ้งใจและขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations Environment Programme, *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2021.
- [2] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy Vol. 1: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Isle of Wight, U.K.: Ellen MacArthur Foundation, 2013.
- [3] R. Narayan, "Biobased and biodegradable polymer materials: Rationale, drivers, and technology exemplars," in *Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice*, ACS Symposium Series, vol. 939. Washington, DC: American Chemical Society, 2006, pp. 282–306, doi: 10.1021/bk-2006-0939.ch018.
- [4] European Commission, "Ecodesign requirements," *Your Europe*, 2024. [Online]. Available: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/compliance/ecodesign/index_en.htm. [Accessed: 12 December 2025].
- [5] C. Favi, and M. Marconi, "Product eco-design in the era of the circular

สามารถ จันทนา และคณะ, การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความวิจัย (Research Article)

- economy,” *Sustainability*, vol. 17, no. 1, art. no. 213, 2025.
- [6] สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, “ภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเศษเส้นใยใบสับปะรด,” 2565. [ออนไลน์]. Available: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=77114>. [เข้าถึงเมื่อ: 10 ธันวาคม 2568]
- [7] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, *แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566–2570)*, กรุงเทพฯ: สศช., 2566.
- [8] ปิยณัฐ โตอ่อน, รัชดา แต่งผักเขียว, อามิน ละวอง และ มัลลิกา ชีระกุล, “การออกแบบและพัฒนาเครื่องบรรจุดินปลูกอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ,” *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 42–57, 2568.
- [9] Tourism Authority of Thailand, “วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีทอเสื่อกกบ้านเสม็ดงาม,” TAT STAR. [Online]. Available: <https://www.tatstar.org/company/STAR-J00042>.
- [10] พิษญาภา ศรีสมบัติ, กนกพร บุญช่วย, และ ศุภศักดิ์ ไชยวัฒน์, “การพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากเส้นใยสับปะรดผสมกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อทดแทนการใช้พลาสติก,” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, ปีที่ 53, ฉบับที่ 2, หน้า 101–112, 2565.
- [11] M. Charter and U. Tischner, *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*, Sheffield: Greenleaf Publishing, 2001.
- [12] สมพงษ์ พงษ์พิศ, *การพัฒนาที่ยั่งยืน: แนวคิดและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบ*, กรุงเทพฯ: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2551.
- [13] เสาวลักษณ์ บุญรอด และคณะ, “ทัศนคติของผู้บริโภคและส่วนประสมทางการตลาดที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อหมู้อู๋พราในจังหวัดนครศรีธรรมราช,” *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 45–56, ม.ค.–มิ.ย. 2564.
- [14] อดุลย์ จาตุรงค์กุล, *กลยุทธ์การตลาด*, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2541.
- [15] จตุรงค์ หลู่หะเพ็ญ, “การออกแบบการสอนแบบบูรณาการร่วมกับเทคนิค QFD และ TRIZ40,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 620, pp. 93–99, 2557.
- [16] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation, 2556.
- [17] SCG Packaging, “นวัตกรรมเพื่อความยั่งยืน,” SCGP ESG. [Online]. Available: <https://sustainability.scgpackaging.com/th/sustainability-approaches/innovative-product-for-sustainability>. [Accessed: 12 December 2025].
- [18] J. H. Song et al., “Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 2127–2139, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0289.

สามารถ จันทนา และคณะ, *การพัฒนาวัสดุจากกากของเสียการทอเสื่อกก เพื่อประยุกต์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม*

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อดูดซับวัสดุพรุนสำหรับ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

สุรเดช สินจะโป๊ะ¹, จัตุพล ป้องกัน², ไพสิน หาญขุนทด² และ นิวัฒน์ เกตุชาติ^{3,*}

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

² สาขากระบวนกร คณะระบบรางและการขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

³ สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: niwat.ke@rmuti.ac.th โทรศัพท์: 084-4776972

(รับบทความ: 3 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 25 มีนาคม 2569; ตอรับบทความ: 20 เมษายน 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ถูกจัดทำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุพรุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อดูดซับวัสดุพรุน การทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 2) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบท่อดูดซับวัสดุพรุน โดยใช้ตาข่ายสแตนเลสเกรด 304 ที่มีจำนวนขนาดช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (PPI) มี 4 ค่า คือ 12, 16, 20 และ 24 ถูกติดตั้งโดยใส่ภายในท่อโดยอัตราส่วนความสูงของแผ่นวัสดุพรุน เท่ากับ 1 อัตราส่วนระยะพิทช์ของแผ่นวัสดุพรุน เท่ากับ 2 ความเข้มข้นของรังสีตกกระทบ เท่ากับ 600, 800 และ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ มี 3 ค่า คือ 0.01, 0.015 และ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที ผลการทดลองพบว่า แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อดูดซับวัสดุพรุนให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบในทุกสภาวะ โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ค่าสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 54.96 ที่ PPI เท่ากับ 12 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มข้นของรังสีตกกระทบ เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร นอกจากนี้ยังสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นว่าวัสดุพรุนมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานต่ำ

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพเชิงความร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์ ท่อดูดซับวัสดุพรุน

การอ้างอิงบทความ: สุรเดช สินจะโป๊ะ, จัตุพล ป้องกัน, ไพสิน หาญขุนทด และ นิวัฒน์ เกตุชาติ, "การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อดูดซับวัสดุพรุนสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 48-57, 2569.

Thermal Efficiency Enhancement in Solar Collectors Using Porous Duct Absorbers for a Solar Dryer

Suradech Sinjapo¹, Jattupon Pongkun², Pilin Hankhantod² and Niwat Ketchat^{3,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² Department of Railway Systems, Faculty of Railway Systems and Transportation,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

³ Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

*Corresponding Author: niwat.ke@rmuti.ac.th, Tel: 084-4776972

(Received: February 3, 2026; Revised: March 25, 2026; Accepted: April 20, 2026)

Abstract

The objective of this research was to investigate the influence of porous media on the thermal efficiency of solar collectors using porous duct absorbers. The experiments were conducted under two configurations: 1) a flat-plate solar collector and 2) a collector equipped with porous duct absorbers. SUS 304 stainless steel wire mesh was used as the porous medium. Four pore densities of 12, 16, 20, and 24 pores per inch (PPI) were examined. The height ratio and pitch ratio were fixed at 1 and 2, respectively. The incident solar radiation intensities were set at 600, 800, and 1,000 W/m². Three mass flow rates of air consisting of 0.010, 0.015 and 0.020 kg/s were investigated. The experimental results revealed that the collector integrated with porous duct absorbers exhibited significantly higher thermal efficiency than the flat-plate collector under all operating conditions. Thermal efficiency increased with increasing air mass flow rate due to enhanced convective heat transfer. The maximum thermal efficiency of 54.96% was achieved at PPI = 12 and an air mass flow rate of 0.02 kg/s and an incident radiation intensity of 1,000 W/m². In addition, the porous duct absorbers effectively reduced the moisture content of the dried product. These findings indicate that porous duct absorbers have strong potential for improving solar drying systems and low-temperature heat exchange applications.

Keywords: Thermal Efficiency, Solar Collectors, Porous Duct Absorbers

Please cite this article as: S. Sinjapo, J. Pongkun, P. Hankhantod and N. Ketchat, "Thermal Efficiency Enhancement in Solar Collectors Using Porous Duct Absorbers for a Solar Dryer," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 48-57, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการนำมาใช้ในการผลิตพลังงานความร้อนผ่านแผงรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานรังสีและถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลภายในระบบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการผลิตน้ำร้อน การให้ความร้อน และกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อย่างไรก็ตาม แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบซึ่งนิยมใช้งานทั่วไปยังคงมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกมาได้อย่างเต็มประสิทธิภาพการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์จึงเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานต่ำ งานวิจัยที่ผ่านมาเสนอแนวทางการปรับปรุงหลายรูปแบบ เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและการปรับเปลี่ยนลักษณะการไหลของอากาศให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน [1] หนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องคือการประยุกต์ใช้วัสดุพรุน เนื่องจากวัสดุพรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สามารถเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและส่งเสริมการพาความร้อนของอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยของ Bashria and Nor [2] รวมถึง Yousef and Adam [3] พบว่าการติดตั้งวัสดุพรุนภายในแผงรับรังสีอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแผงรับรังสีแบบไม่ใช้วัสดุพรุน นอกจากนี้ Saravanakumar and Mayilsamy [4] และ Lalji et al. [5] พบว่าวัสดุพรุนหรือวัสดุสะสมความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ ขณะที่ Velmurugan and Ramesh [6] รวมถึง Kapardar and Sharma [7] พบว่าการใช้หลอดตาข่ายเป็นวัสดุพรุนสามารถเพิ่มอุณหภูมิของตัวดูดกลืนรังสีและประสิทธิภาพโดยรวม

ของระบบได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความพรุนอาจส่งผลให้ความต้านทานการไหลและการสูญเสียความดันในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่กันในการประยุกต์ใช้งาน งานวิจัยของ สังวาลย์ บุญจันทร์ และคณะ [8] พบว่าวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสมีศักยภาพสูงในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน แต่ต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านความดันสูญเสียเหมือนกัน ธนกร หอมจำปา และคณะ [9] พบว่าการติดตั้งวัสดุพรุนในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบและลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ ยุธนา ศรีอุดม และคณะ [10] ศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพริกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้หินภูเขาไฟเป็นตัวสะสมความร้อนกับเครื่องอบแห้งพริกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีตัวสะสมความร้อนพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้หินพัมมิสเป็นตัวสะสมความร้อน จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องอบแห้งพริกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีตัวสะสมความร้อน

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษาแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบหรือช่องทางไหลพื้นฐาน ขณะที่การศึกษาแผงรับรังสีอาทิตย์แบบท่อดูดซับความร้อนร่วมกับวัสดุพรุน โดยเฉพาะอิทธิพลของจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (PPI) และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}$) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ (η_{coll}) และค่าความชื้นในวัสดุ (M_d) ยังมีการรายงานค่อนข้างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุพรุนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์และประเมินศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานต่ำ

บทความวิจัย (Research Article)

2. ทฤษฎีและการคำนวณ

2.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ (Collector Efficiency, η_{coll}) จำเป็นต้องคำนวณประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์คืออัตราส่วนระหว่างอัตราของความร้อนที่มีประโยชน์ที่ถ่ายโอนโดยการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{coll} = \frac{\text{Heat energy out}}{\text{Heat energy in}} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

เมื่ออัตราความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ ($\dot{Q}_{out}$) [11] สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

จากสมการ (2) แสดงค่าความร้อนถูกดึงออกมาจากแผงรับรังสีอาทิตย์ในอัตราที่สามารถวัดได้โดยใช้ปริมาณความร้อนที่ส่งไปยังของอากาศที่ไหลผ่านแผงรับรังสีอาทิตย์และมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับความร้อนที่แผงรับรังสีอาทิตย์ได้รับ ($\dot{Q}_{in}$) [12] สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$\dot{Q}_{in} = G_T A_c \quad (3)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ [13] สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{G_T A_c} \quad (4)$$

เมื่อ

η_{coll} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, (%)

$\dot{Q}_{out}$ คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์, (W)

$\dot{Q}_{in}$ คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์, (W)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, (kg/s)

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, (J/kg K)

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้า, (K)

T_o คือ อุณหภูมิทางออก, (K)

A_c คือ พื้นที่ของแผงเก็บรังสี, (m²)

G_T คือ ค่าความเข้มของพลังงาน, (W/m²)

2.2 การหาความชื้นในผลิตภัณฑ์

ความชื้นในผลิตภัณฑ์ คือ ตัวบ่งชี้ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับมวลของผลิตภัณฑ์ขึ้นหรือแห้ง สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ 2 แบบ ดังสมการที่ (5) และ (6)

ความชื้นมาตรฐานเปียก [14]

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \quad (5)$$

บทความวิจัย (Research Article)

ความชื้นมาตรฐานแห้ง [14]

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \quad (6)$$

เมื่อ

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง,
(% wet basis)

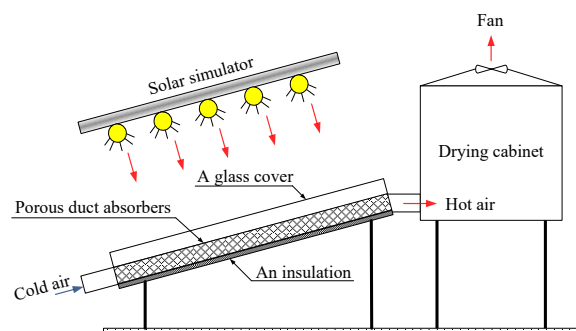
M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก,
(% dry basis)

d คือ มวลวัสดุแห้ง, (kg)

w คือ มวลวัสดุเปียก, (kg)

3. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงลักษณะของชุดทดลองแผงรับรังสีอาทิตย์ มีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ ชุดทดลองแผงรับรังสีอาทิตย์ ชุดแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมและพัดลมดูดอากาศ โดยประยุกต์ใช้กับห้องอบแห้งขนาดพื้นที่ 0.5 m² ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการวิจัย คือ เนื้อหมูมวล 0.250 kg ขนาดเนื้อหมูที่ใช้ในการทดลองมีความกว้าง 1.5 cm ยาว 10 cm หนา 1.5 cm การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การทดลองเครื่องอบแห้งกรณีแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ และแบบท่อดูดซับวัสดุพรุน ตามลำดับ ซึ่งวัสดุพรุนจะถูกใส่เข้าไปในท่อดูดซับความร้อน เพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์แล้วทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศจากทางเข้าเครื่องอบแห้ง ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (ṁ) เท่ากับ 0.01, 0.015 และ 0.02 kg/s ตามลำดับ การทดลองเริ่มต้นด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าต่าง ๆ ให้ครบทุกจุด จากนั้นทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 1 ชุดทดลองแผงรับรังสีอาทิตย์

โครงสร้างของแผ่นเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาดความกว้าง 0.65 m และความยาว 1 m ตามลำดับ ทำมาจากอลูมิเนียมพร้อมทั้งหุ้มฉนวนหนา 5 mm เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ดังรูปที่ 2 คือ ก) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ข) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบท่อดูดซับวัสดุพรุน โดยแผ่นหยักแบบฟันเลื่อยจะติดตั้งในท่อดูดซับความร้อนที่มีขนาด กว้าง 100 mm สูง 70 mm ยาว 1,000 mm ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่แผงรับรังสีอาทิตย์จะถูกติดตั้งท่อดูดซับวัสดุพรุนภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ทั้งหมดจำนวน 6 ท่อ โดยวัสดุพรุนแผ่นหยักแบบฟันเลื่อยทำจากตาข่ายสแตนเลสเกรด 304 ที่มีจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (Pores per inch, PPI) เท่ากับ 12, 16, 20 และ 24 โดยที่คุณสมบัติของตาข่ายสแตนเลส เกรด SUS304 ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่มีสัดส่วนระยะพิทช์ (Pitch ratios, p/H = PR) คือ 2 และอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (High ratio, h/H = HR = 1) และการกำหนดชื่อเรียกของแผงรับรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 2

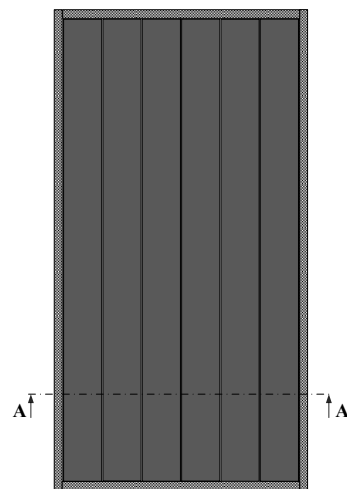
บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตาข่ายสแตนเลส เกรด SUS304

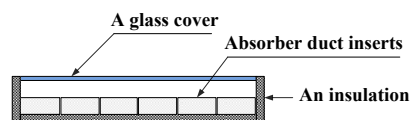
Pores per inch (PPI)	Wire-mesh diameter (mm)	Porosity (f)
12	0.61	0.77
16	0.61	0.70
20	0.61	0.62
24	0.61	0.55

ตารางที่ 2 การกำหนดชื่อเรียกของแผงรับรังสีอาทิตย์

ชื่อเรียก	รูปแบบ	PPI
FP	Flat plate	-
DA	Duct absorber	-
PDA12	Porous duct absorber	12
PDA16	Porous duct absorber	16
PDA20	Porous duct absorber	20
PDA24	Porous duct absorber	24



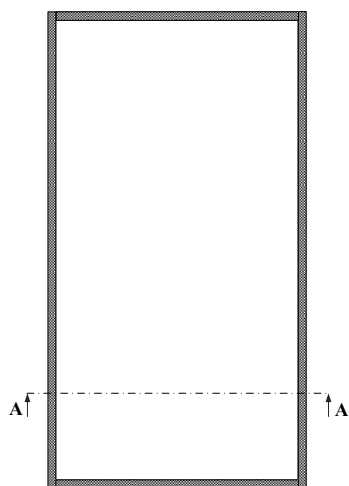
Top view



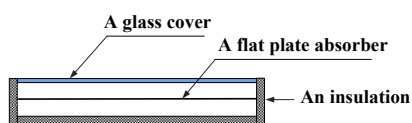
Section A - A

ข) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบท่อดูดซับวัสดุพรุน

รูปที่ 2 แผงรับรังสีอาทิตย์

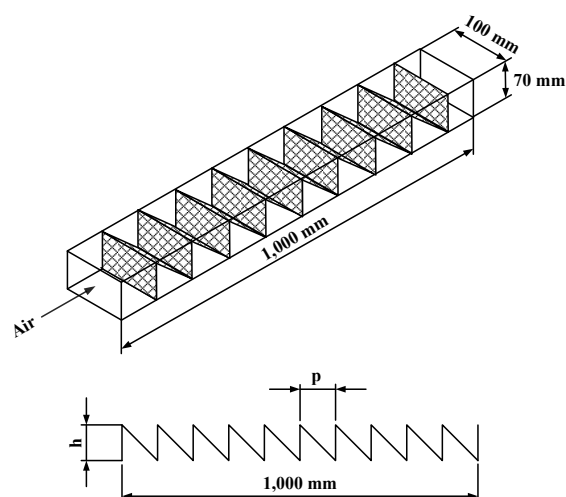


Top view



Section A - A

ก) แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 3 ท่อดูดซับวัสดุพรุนที่ติดตั้งแผ่นหยักแบบฟันเลื่อย

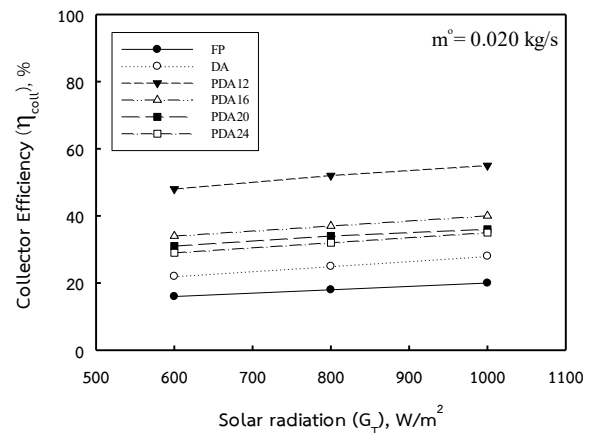
สุรเดช สีนจะโป๊ะ และคณะ, การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อดูดซับวัสดุพรุนสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการทดลอง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ (η_{coll}) กับค่าความเข้มของพลังงาน (G_T)

ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ G_T ที่สภาวะ $\dot{m}$ เท่ากับ 0.02 kg/s จากการทดลองพบว่าเมื่อ G_T เพิ่มขึ้นจาก 600 - 1,000 W/m² ค่า η_{coll} เพิ่มขึ้นในทุกกรณี เนื่องจาก G_T ที่สูงขึ้นทำให้พลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยแผงรับรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายในระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งวัสดุพรุนที่มีค่า PPI ต่ำให้ค่าของ η_{coll} สูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างที่มีค่าความพรุนสูงและช่องว่างขนาดใหญ่ช่วยส่งเสริมการผสมของการไหลและเพิ่มการสัมผัสระหว่างอากาศกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุน ขณะที่การเพิ่มค่า PPI แม้จะเพิ่มพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน แต่โครงสร้างช่องว่างที่เล็กลงอาจลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมเมื่อเทียบกับวัสดุที่มี PPI ต่ำ ซึ่งเหมาะกับการทำงานในช่วงอัตราการไหลต่ำมากกว่า แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bashria and Nor [2] และ Yousef and Adam [3] ที่รายงานว่า การติดตั้งวัสดุพรุนสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและส่งเสริมการผสมของการไหลภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุพรุน PDA12 ให้สมรรถนะสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการเลือกค่าความพรุนที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมากกว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 4



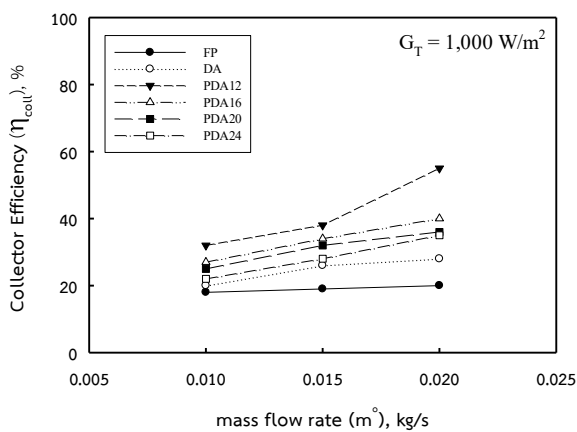
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ G_T

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ (η_{coll}) กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}$)

ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $\dot{m}$ ที่สภาวะ G_T เท่ากับ 1,000 W/m² ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อ $\dot{m}$ เพิ่มขึ้นจาก 0.01 - 0.02 kg/s ค่า η_{coll} เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกกรณี เนื่องจาก $\dot{m}$ เพิ่มขึ้นจะทำให้การพาความร้อนแบบบังคับเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สามารถดึงความร้อนออกจากผิวท่อดูดซับความร้อนได้มากขึ้น และลดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมสำหรับกรณีวัสดุพรุนพบว่าเมื่อ $\dot{m}$ เพิ่มขึ้นยังช่วยการผสมของการไหลที่ดีขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำงานในช่วงอัตราการไหลต่ำถึงปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saravanakumar and Mayilsamy [4] รวมถึง Lalji et al. [5] ซึ่งรายงานว่า $\dot{m}$ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์ โดยการเพิ่มอัตราการไหลช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับและลดการสะสมความร้อน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับแผงรับรังสีอาทิตย์

บทความวิจัย (Research Article)

แบบแผ่นเรียบ พบว่าการติดตั้งท่อดูดซับวัสดุพรุนให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าในทุกช่วงของอัตราการไหลเนื่องจากโครงสร้างวัสดุพรุนช่วยกระตุ้นการไหลแบบปั่นป่วนและเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในช่องทางไหล ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นว่าการผสมผสานระหว่างโครงสร้างวัสดุพรุนและอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ แสดงได้ดังรูปที่ 5

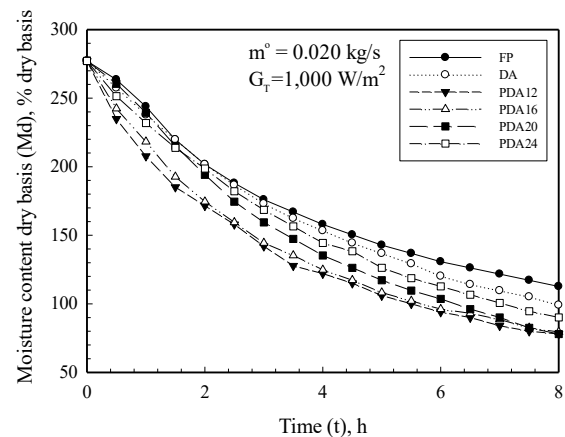


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $\dot{m}$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นในผลิตภัณฑ์ (M_d) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t)

ความสัมพันธ์ระหว่าง M_d กับ t ที่สภาวะ $\dot{m}$ เท่ากับ 0.02 kg/s และ G_T เท่ากับ 1,000 W/m² ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าแผงรับรังสีอาทิตย์แบบท่อดูดซับวัสดุพรุนสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วกว่ากรณีแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบและแบบท่อดูดซับที่ไม่ใช้วัสดุพรุน โดยกรณีที่ใช้วัสดุพรุนที่มีค่า PPI = 12 (PDA12) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงเร็วที่สุด สามารถอธิบายได้จากอุณหภูมิของอากาศร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นตามผลการทดลองด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทมวล

ระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการระเหยของความชื้นเกิดขึ้นได้รวดเร็ว นอกจากนี้การไหลของอากาศผ่านโครงสร้างวัสดุพรุนยังช่วยเพิ่มการพาความร้อนออกจากผิวผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในทางตรงกันข้ามวัสดุพรุนที่มีค่า PPI สูงให้การลดลงของความชื้นช้ากว่า เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ธนกร หอมจำปา และคณะ [9] และ ยุธนา ศรีอุดม และคณะ [10] ที่รายงานว่า การใช้วัสดุพรุนเป็นตัวสะสมความร้อนในการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง M_d กับ t

5. สรุปผลการทดลอง

แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อดูดซับวัสดุพรุนจะมีค่า η_{coll} สูงกว่าแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบและท่อดูดซับที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรุนอย่างชัดเจนทุกกรณี โดยที่ค่า η_{coll} จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม $\dot{m}$ และ G_T ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่โครงสร้างของวัสดุพรุนที่มีค่า PPI ต่ำ

บทความวิจัย (Research Article)

จะมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า โดยค่า η_{coll} สูงสุดเท่ากับ 54.96% เกิดขึ้นที่ค่า $PPI = 12$, $\dot{m} = 0.020$ kg/s และ $G_T = 1,000$ W/m² ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งวัสดุพรุนในท่อดูดซับความร้อนสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนและส่งเสริมการพาความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาแผงรับรังสีอาทิตย์และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพลังงานต่ำ รวมทั้งมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ตามคำรับรองการปฏิบัติตามเงื่อนไขของการอนุมัติงบประมาณโครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 เลขที่ FF68/NKR/134

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Promvong and S. Skullong, "Thermal characteristics in solar air duct with V-shaped flapped-baffles and chamfered-grooves," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 172, Art. no. 121220, Jun. 2021. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121220
- [2] A. A. Y. Bashria and M. A. Nor, "Analysis of single and double passes V-grooves solar collector with and without porous media," *Int. J. Eng. Environ.*, vol. 1, no. 2, pp. 109–114, 2007.
- [3] B. A. A. Yousef and N. M. Adam, "Performance analysis for flat plate collector with and without porous media," *J. Energy South. Afr.*, vol. 19, no. 4, pp. 32–42, Nov. 2008.
- [4] P. T. Saravanakumar and K. Mayilsamy, "Forced convection flat plate solar air heaters with and without thermal storage," *J. Sci. Ind. Res.*, vol. 69, no. 12, pp. 966–968, Dec. 2010.
- [5] M. K. Lalji et al., "Experimental investigations on packed bed solar air heater," *Curr. World Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 151–157, Nov. 2011. DOI: 10.12944/CWE.6.1.22
- [6] P. Velmurugan and P. Ramesh, "Evaluation of thermal performance of wire mesh solar air heater," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 12–14, Jan. 2011.
- [7] A. K. Kapardar and R. P. Sharma, "Experimental investigation of solar air heater using porous medium," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 387–396, May–Aug. 2012.
- [8] สัจวาฬย์ บุญจันทร์ และคณะ, "ผลกระทบของความพรุนตาข่ายสแตนเลสต่อการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ที่มีอากาศไหลผ่านในช่วงปั่นป่วน," ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2565, หน้า 1118–1128.

บทความวิจัย (Research Article)

- [9] ชนกร หอมจำปา และคณะ, “สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับรังสีอาทิตย์แบบผสมด้วยวัสดุพูน: กรณีศึกษาอบตะไคร้,” *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 3, หน้า 105–116, ก.ย.-ธ.ค. 2564.
- [10] ยุธนา ศรีอุดม และคณะ, “การศึกษาเชิงทดสอบอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้หินภูเขาไฟเป็นตัวกักเก็บความร้อน,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 21–33, ม.ค.-เม.ย. 2567.
- [11] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 7th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [12] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed., Oxford, U.K.: Academic Press, 2014.
- [13] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [14] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007.

การอบแห้งฟักทองด้วยความร้อนแบบฮีตปั๊มสำหรับเกษตรกร

ธีรศาสตร์ คณาศรี^{1,*} และ บุญสิริ ปิตตาแสง²

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

*ผู้ประสานงานบทความฉบับนี้: teerasad@windowslive.com โทรศัพท์: 095-6632774

(รับบทความ: 18 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 21 เมษายน 2569; ตอรับบทความ: 5 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เครื่องอบแห้งแบบฮีตปั๊มความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้า 5.5 กิโลวัตต์ กำลังไฟฟ้าชุดคอยล์ร้อน 7.8 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของอากาศไม่น้อยกว่า 12,800 – 23,600 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ขนาดห้องอบแห้ง 200×400×200 เซนติเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) โครงสร้างเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วย ห้องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ ถาดวางวัสดุ และระบบชุดฮีตปั๊มร่วมกับชุดลดความร้อน ช่วงการควบคุมอุณหภูมิอบแห้งสูงสุด 75 องศาเซลเซียส ทดสอบอบแห้งฟักทองแผ่นปริมาณ 300 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยพิจารณาข้อมูลการใช้พลังงาน เวลาการอบแห้ง ความชื้น อัตราการระเหยน้ำ และตรวจสอบคุณภาพสีฟักทองแผ่นอบแห้ง ผลการทดลองพบว่า ผลการอบแห้งระบบฮีตปั๊มความร้อน สำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ของเกษตรกร ผลการทดสอบเตรียมการอบแห้งฟักทองในปริมาณมาก เครื่องอบแห้งนี้ระบบฮีตปั๊ม จะดึงความร้อนที่คอยล์เย็นมาใช้ร่วมกับพลังงานคอมเพรสเซอร์ไปที่คอยล์ร้อน ขณะที่คอยล์เย็นดึงความร้อนก็สามารถดึงความชื้นจากตู้อบทิ้งด้วย โดยไม่ต้องมีการระบายอากาศจึงสามารถควบคุมสภาวะภายในตู้อบได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาพอากาศนอกตู้ การอบแห้งฟักทองแผ่นบางที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ลดความชื้นได้เหมาะสมกับฟักทองแผ่นบางให้ได้ตามมาตรฐานโดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง การอบแห้งใช้พลังงานเท่ากับค่าพลังงานไฟฟ้า 85.16 กิโลวัตต์ชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 1.51 MJ/kg_{water}

คำสำคัญ: ฟักทองอบแห้ง การอบแห้งฮีตปั๊ม พลังงานแสงอาทิตย์

การอ้างอิงบทความ: ธีรศาสตร์ คณาศรี, และ บุญสิริ ปิตตาแสง, "การอบแห้งฟักทองด้วยความร้อนแบบฮีตปั๊มสำหรับเกษตรกร," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 58-69, 2569.

Pumpkin Slices Using Heat Pump Dryer for Farmers

Teerasad Kanasri^{1,*} and Bunsiri Pitasang²

¹ Faculty of Liberal Arts and Science, Roi Et Rajabhat University

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

*Corresponding Author: teerasad@windowslive.com, Tel: 095-6632774

(Received: September 18, 2025; Revised: April 21, 2026; Accepted: May 5, 2026)

Abstract

This research aimed to investigate the use of a heat pump drying system powered by a 5.5 kW electric compressor and a 7.8 kW heating coil. The system delivered an air flow rate of 12,800 – 23,600 m³/h within a drying chamber sized 200×400×200 cm (W×L×H). The dryer structure included a drying chamber, product trays, and a heat pump system integrated with an electric heating coil. The maximum controllable drying temperature was 75 °C. Drying experiments of 300 kg were conducted using sliced pumpkin, evaluating parameters such as energy consumption, drying time, moisture content, water evaporation rate, and color quality of the dried product. The system efficiently transferred heat from the evaporator to the condenser using compressor energy, while also removing moisture from the chamber without requiring external ventilation. This allowed for stable drying conditions independent of ambient temperature drying at 60 °C effectively reduced moisture content in thin pumpkin slices to the required standard within 7 hours. The energy consumption was recorded at 85.16 kWh, with a specific energy consumption of 1.51 MJ/kg of evaporated water.

Keywords: Dried Pumpkin, Heat Pump Drying, Solar Energy

Please cite this article as: T. Kanasri, and B. Pitasang, "Pumpkin Slices Using Heat Pump Dryer for Farmers," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 58-69, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ฟักทองเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งนิยมาทำการแปรรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่า [1] การอบแห้งฟักทองแบบลมร้อนจึงถูกนิยมใช้แปรรูปผลิตภัณฑ์ เนื่องจากใช้ลดระยะเวลาอบแห้งฟักทองอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากวิธีนี้ส่งผลต่อคุณภาพการสูญเสียด้านสารอาหารของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบแห้งฟักทอง เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิฐ และคณะ [2] ได้ศึกษาคุณภาพของฟักทองในสภาวะลมร้อนอบแห้งแตกต่างกัน พบว่ากระบวนการอบแห้งแบบใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนลดเวลาในการอบแห้งให้เร็วขึ้นได้ นอกจากนี้ภายหลังจากการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศสามารถรักษาสารเบต้าแคโรทีนของฟักทองได้ในปริมาณเหมาะสมมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน Nawirska et al. [3] ได้ศึกษาการอบแห้งของฟักทองแผ่นบางด้วย ความร้อนแตกต่างกันในสภาวะต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยความร้อนไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศลดระยะเวลาผลลัพธ์ที่ดีกว่าการอบแห้งจากลมร้อน นอกจากนี้ Alibas [4] ศึกษาการอบแห้งชิ้นบางฟักทองด้วยวิธีการอบแห้ง 3 วิธีได้แก่ การอบแห้งความร้อนจากไมโครเวฟ การอบแห้งจากลมร้อน และการอบแห้งจากลมร้อนร่วมกับความร้อนจากไมโครเวฟ ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยความร้อนจากไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งจากลมร้อน เป็นการอบแห้งที่ได้ต่อผลลัพธ์ประสิทธิภาพสูงของผลิตภัณฑ์ฟักทองชิ้นบาง เมื่อพิจารณาจากการลดระยะเวลาของการอบแห้ง ค่าสี และค่าการใช้พลังงานต่อครั้ง

ตัวอย่างกลุ่มเกษตรกรในชุมชนบ้านหนองคู ตำบลธงธานี อำเภอรวิชัยบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด เป็นกลุ่มเกษตรกรที่ประกอบอาชีพการทำอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรจำหน่ายเสริมรายได้ และกลายเป็นสินค้า OTOP ของชุมชน ยกตัวอย่างเช่น ฟักทองตากกล้วยตาก แก้วมังกรตาก ต่อมา มีการทดสอบใช้

โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงพาราโบลาปิดหลังคาด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหลังมีช่องสำหรับการระบายอากาศนำมาใช้อบแห้ง พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถึง 15 องศาเซลเซียส การกระจายอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากหลังคาที่มีลักษณะโค้ง [5] ถึงแม้ว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติรูปทรงพาราโบลาสามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ได้แต่กลับพบว่าเมื่อต้องการปริมาณผลผลิตอบแห้งเพิ่มขึ้นไม่สามารถทำได้ตามต้องการ

จากการศึกษารายงานวิจัย ผู้วิจัยพบว่าลักษณะเฉพาะที่เป็นจุดเด่นของการอบแห้งด้วยลมร้อน คือการใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อย และการอบแห้งด้วยระบบความร้อนจากฮีตปั๊มสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งได้ดีกว่า เนื่องจากฮีตปั๊มดึงความร้อนที่ คอยล์เย็นมาใช้ร่วมกับพลังงานคอมเพรสเซอร์ไปที่คอยล์ร้อน ขณะที่คอยล์เย็นดึงความร้อนก็สามารถดึงความชื้นจากเตาอบทิ้งด้วยโดยไม่ต้องมีการระบายอากาศจึงสามารถควบคุมสภาวะภายในตู้อบได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาพอากาศนอกตู้ และสามารถใช้ก๊าซเฉื่อยหลายชนิดทดแทนอากาศได้ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพดีทั้งสี รสชาติ และรสชาติ ผู้วิจัยได้นำกระบวนการนำพาลมร้อนตามระดับความดันที่เพิ่มขึ้น โดยการอาศัยเทคนิคการปรับเพิ่มความดันปริมาณอากาศภายในห้องอบแห้งให้สูงขึ้น เพื่อปรับให้อากาศร้อนกลับเข้ามาหมุนเวียนภายในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการอบแห้งฟักทองด้วยลมร้อนแบบฮีตปั๊ม โดยศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งจากอุณหภูมิค่าคงที่การอบแห้ง 3 ระดับ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวม และเพื่อการศึกษาคุณภาพของฟักทองแผ่นบางหลังอบแห้งในแง่ของ ค่าสี ค่าการหดตัว ค่าการคืนตัว ค่าความแข็ง และค่าความกรอบ

บทความวิจัย (Research Article)

2. วิธีการวิจัย

2.1 การทดลองวิธีการหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง

1) ทำความสะอาดผิวเปลือกเปลือกกล้วยน้ำให้สะอาด เตรียมวัสดุทดลอง ดังรูปที่ 1 นำตัวอย่างฟักทองที่เตรียมไว้หั่นขึ้นก่อนนำไปหั่นเป็นแผ่นให้ได้ขนาดตามความกว้าง×ยาว เท่ากับ 5×7 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุทดสอบฟักทองก่อนนำไปอบแห้ง



รูปที่ 2 ฟักทองแผ่นก่อนนำไปอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2) นำฟักทองใส่ในภาชนะที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปใส่ในตู้อบตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำฟักทองออกจากตู้อบพักไว้ 40 นาที เพื่อให้ความชื้นเข้ากับสภาพแวดล้อมพอประมาณ นำฟักทองที่ออก

จากตู้อบมาทำการทดลองโดยการแบ่งฟักทองออกเป็น 2 ส่วน คือ ฟักทองส่วนแรกนำไปอบหาความชื้นเครื่องอบหาความชื้นแบบหลอดฮาโลเจนให้ความร้อน เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากการลดลงของน้ำหนัก ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การอบหาความชื้นแบบฮาโลเจน

3) เพื่อหาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC, 2005 ซึ่งคำนวณหาค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (Association of Official Analytical Chemists, 1970) ตามสมการ (1) [6]

$$Md = \frac{w-d}{d} \quad (1)$$

เมื่อ

Md คือ ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง, (%db)

w คือ มวลของวัสดุเปียก, (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง, (kg)

4) จากนั้นนำฟักทองส่วนที่สองไปอบแห้งวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพพลังงานความร้อนแบบฮีตปั๊ม

ค่าสมรรถนะของระบบอบแห้งได้จากปริมาณความร้อนที่ใช้ระเหยน้ำออกจากวัสดุทั้งหมดต่อปริมาณความร้อน ของอากาศในห้องอบแห้ง โดย

บทความวิจัย (Research Article)

สมรรถนะเชิงความร้อนของการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และสมการที่ 3 เป็นสมการคำนวณสำหรับการทำงานแบบร่วมกันของความร้อนจากแสงอาทิตย์และความร้อนที่ได้จากพลังงานไฟฟ้า คำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ SEC (Specific Energy Consumption) ตามสมการ (2) และค่าประสิทธิภาพตามสมการ (3) [7,8]

$$SEC = 3.6EP_{in-m_f} \quad (2)$$

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, (MJ/kgH₂O_{evap})

EP คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้เป็น, (kw - hr)

3.6 คือ แฟคเตอร์การแปลงหน่วยจาก (kw - hr) เป็น MJ/kgH₂O_{evap}

m_{in} คือ มวลของวัสดุก่อนอบแห้ง, (kg)

m_f คือ มวลของวัสดุหลังอบแห้ง, (kg)

$$\eta_{Total} = \frac{M_W H_{fg}}{Q_S + Q_E} \quad (3)$$

เมื่อ

η_{Total} คือ ประสิทธิภาพห้องอบแห้ง, (%)

M_W คือ มวลของน้ำระเหยออกจากวัสดุ, (kg)

H_{fg} คือ สัมประสิทธิ์การระเหยของน้ำ, (MJ/kg)

Q_S คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการใช้ไอน้ำ, (MJ)

Q_E คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้รวมทั้งหมด, (MJ)

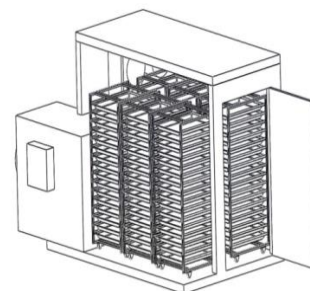
2.2 วิธีการทดลอง

1) ในการทดลองอบแห้งฟักทองเตรียมตัวอย่างฟักทองสายพันธุ์อำไพ ตลอดการทดสอบ มีขนาดประมาณผลละ 3 กิโลกรัม หั่นเป็นชิ้นตามแนวยาวไว้สำหรับการทดลองแต่ละครั้งปริมาณอบแห้ง 300 กิโลกรัม ตัวอย่างวางบนถาดในชั้นบาง ๆ แบบรกรงเข็มเรียง 6 ชั้น ดังรูปที่ 4 อบแห้งจนฟักทองมีความชื้นสุดท้ายเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห่งอ้างอิงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4 ถาดชั้นวางฟักทองเตรียมนำไปอบแห้ง

2) โครงสร้างเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานลมร้อนฮีตปั๊มมีขนาดตู้อบ ดังรูปที่ 5 มีขนาดความกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 200×400×200 เซนติเมตร มีกำลังงานไฟฟ้า 9 กิโลวัตต์ ใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ และแสดงผลรายงานด้วยหน้าจอดิจิทัล



รูปที่ 5 โครงสร้างเครื่องอบแห้งแบบด้วยพลังงานลมร้อนฮีตปั๊ม

บทความวิจัย (Research Article)

3) เปรียบเทียบวิธีอบแห้งด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเกษตรกร การทดลองแต่ละครั้งปริมาณอบแห้ง 300 กิโลกรัม ใช้ปริมาณการอบเท่ากันกับด้วยเครื่องอบแห้ง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การอบแห้งฟักทองแผ่นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

4) วัดความชื้นของวัสดุตัวอย่างแล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ฟักทองแผ่นที่ผ่านการอบแห้งนำทดสอบหาคุณภาพสี ค่าการหดตัว (L^* , a^* , b^*) อัตราส่วนค่าคืนตัว และเนื้อสัมผัสของความแข็งและความกรอบ ด้วยเครื่องวัดค่าสี Color meter FRU รุ่น WR18

5) ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นด้วยการปรับอุณหภูมิทดลองที่อุณหภูมิการทำให้แห้งแบบถาด (Tray Drying) 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลการทดสอบอบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้าย จากนั้นทดสอบอีกครั้งจนครบทุกช่วงอุณหภูมิ ปรับความดันและอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเหมือนในขั้นตอนแรกจนครบทุกช่วงอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้

6) ผลลัพธ์ทั้ง 3 ชุด ทดสอบประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9 Point Hedonic Scale ทางด้านสี กลิ่นรสชาติ และความชอบรวม ใช้ผู้ทดสอบชิม เพื่อหาสูตรที่ผู้บริโภคทั่วไปให้คะแนนทางประสาทสัมผัสสูงสุด วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบ

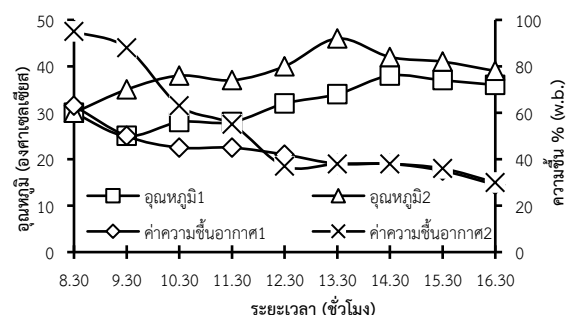
ความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองด้วยวิธี Dan Cans New Multiple Range Test (DMRT) คัดเลือกอัตราส่วนที่ได้รับคะแนนด้านความชอบรวมสูงสุดไปใช้ในข้อต่อไป

3. ผลการวิจัย

การวิจัยมีวัตถุประสงค์การศึกษาและเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของเกษตรกร และเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนใต้พิภพสำหรับการอบแห้งฟักทอง และหาประสิทธิภาพทางความร้อน และการศึกษาคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งในแง่ของ สีการหดตัว การคืนตัว ค่าความแข็ง และค่าความกรอบ การทดลองรายละเอียดมีได้ดังนี้

3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิอบแห้งฟักทองพลังงานแสงอาทิตย์

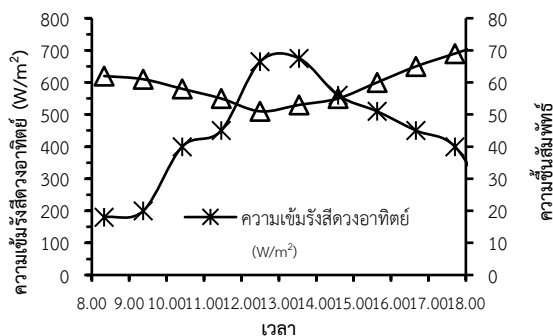
ผลการศึกษากระบวนการตากฟักทองพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมวัสดุการตากฟักทองด้วยการตากวิธีแบบธรรมชาติของเกษตรกร นำมาปรับเทคนิคการอบแห้งอบแห้งหาประสิทธิภาพของความร้อนจากเครื่องอบแห้งลมร้อนระบบฮีตปั๊มผลการทดลองดังนี้



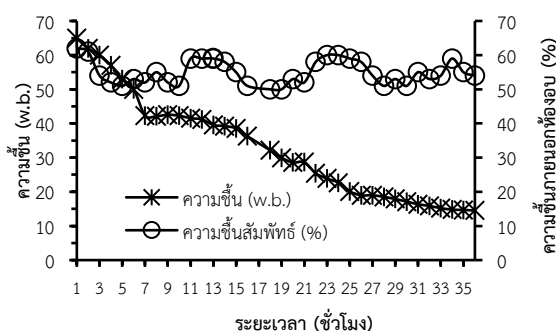
รูปที่ 7 อุณหภูมิ และความชื้นการตากแห้งโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของเกษตรกร

บทความวิจัย (Research Article)

จากรูปที่ 7 ผลการทดลองพบว่าโรงเรือนอบแห้งสภาพอากาศในวันที่ 10 มิถุนายน 2568 ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน ตั้งแต่เวลา 08:30 น. สภาพอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีในเวลา 13.30 น. อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลง 36 องศาเซลเซียส จนถึงเวลา 16.30 น. ส่งผลต่อสภาพความชื้นสัมพัทธ์ทั้งภายในและภายนอกโรงเรือนตากเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ลดลง ดังภาพที่ 8 ภายหลังช่วงเวลาตั้งแต่ 18.00 น. เป็นต้นไปพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับ 70-80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ฟักทองแผ่นมีความชื้นย้อนกลับทำให้เกิดเชื้อราภายหลังการเก็บรักษา



รูปที่ 8 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กับความชื้นสัมพัทธ์

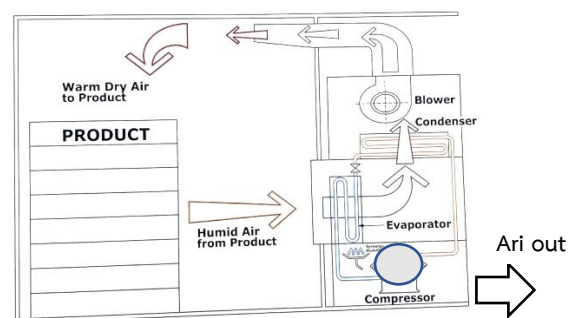


รูปที่ 9 ความชื้นการตากแห้งฟักทองแผ่นด้วยวิธีธรรมชาติของเกษตรกร

ความชื้นฟักทองเริ่มต้นที่ 65 %w.b. เมื่อเริ่มทำการตากโดยค่าความชื้นของฟักทองจะลดลงต่อเนื่องจนฟักทองแห้งที่ค่าความชื้น 24%w.b. (มาตรฐานเปียก) ที่เวลา 16:30 น. วิธีการตากด้วยวิธีธรรมชาตินี้ใช้ระยะเวลาในการตากยาวนาน 8 ชั่วโมงต่อวัน และเกษตรกรจะตากซ้ำอีกครั้งของวันต่อมา จึงจะได้ความชื้นตามต้องการใช้ระยะเวลาตากนาน 35 ชั่วโมง ดังรูปที่ 9

3.2 ผลทดสอบสมรรถนะประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานลมร้อนระบบฮีตปั๊ม

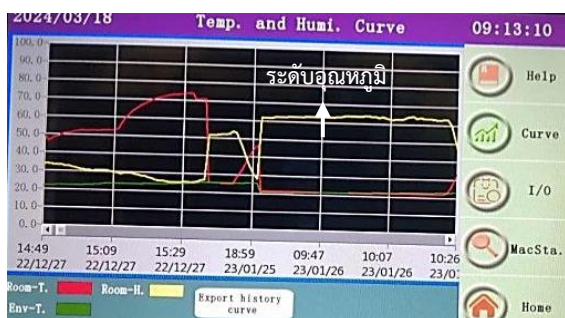
เครื่องอบแห้งพลังงานลมร้อนระบบฮีตปั๊มเป็นเทคโนโลยีระบบพร้อมใช้งาน เป็นเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเด่นของการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลาน้อย และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบฮีตปั๊มสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งได้ดีกว่า เนื่องจากฮีตปั๊มดึงความร้อนที่คอยล์เย็นมาใช้ร่วมกับพลังงานคอมเพรสเซอร์ไปที่คอยล์ร้อน ขณะที่คอยล์เย็นดึงความร้อนก็สามารถดึงความชื้นจากตู้อบทิ้ง (Air Out) ด้วยระบบการทำงานโดยไม่ต้องมีการระบายอากาศจึงสามารถควบคุมสภาวะภายในตู้อบได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาพอากาศนอกตู้อบ และสามารถใช้อากาศเย็นหลายชนิดทดแทนอากาศได้ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนภาพระบบทำงานเครื่องอบแห้งพลังงานลมร้อนระบบฮีตปั๊ม

บทความวิจัย (Research Article)

ผลการทดลองอบแห้งผักทองแผ่นครั้งนี้ใช้ตัวอย่างผักทองในการอบแห้งมีการเตรียม ภายในห้องอบจะมีตะแกรงวางถาดที่ใช้สำหรับวางผักทอง ใช้ผักทองในการอบต่อครั้ง ครั้งละ 300 กิโลกรัม ไปด้วยอุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการอบในแต่ละครั้งใช้เวลาในการอบวันละ 11, 8 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ จนได้ความชื้นมาตรฐานประมาณ 14.00 %w.b ขณะทำการอบแห้งตรวจสอบด้วยจอแสดงผลแบบดิจิทัลตรวจเช็คระดับอุณหภูมิทุกช่วงเวลาเปรียบเทียบกับกราฟสีแตกต่างกัน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 จอแสดงผลแบบดิจิทัลเครื่องอบแห้ง

หลังการทดลองการอบแห้งผักทองด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนระบบฮีตปั๊ม พบว่าจากการทดลองการอบแห้งผักทอง เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปัจจัยที่ช่วยในการระเหยของความชื้นได้สูงสุดตามที่ผู้วิจัยกำหนด โดยมาตรฐานความชื้นของผักทอง 65.87 %w.b. แสดงในตารางที่ 1 สามารถลดความชื้นอย่างรวดเร็วจนได้ความชื้นสุดท้าย 14.19 %w.b. การทดสอบใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงต่อวัน ใช้พลังงานไฟฟ้าขณะทดสอบรวมเป็น 85.16 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 1.51 MJ/kg_{water} ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี พบว่าเนื้อผักทองแห้งปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 25.10±1.20 องศาบริกซ์

ตารางที่ 1 การทดสอบความชื้นต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานลมร้อนแบบฮีตปั๊ม

เวลา (น.)	ความชื้นผักทองแผ่นอบแห้ง (%w.b.)		
	อุณหภูมิ ห้องอบ (50 °C)	อุณหภูมิ ห้องอบ (55 °C)	อุณหภูมิ ห้องอบ (60 °C)
09.00	65.88	68.27	65.87
10.00	64.64	60.17	55.23
11.00	60.90	52.23	43.34
12.00	52.60	43.50	31.49
13.00	45.00	35.72	24.15
14.00	30.82	30.47	16.87
15.00	25.17	24.44	14.19
16.00	22.95	15.82	13.55
17.00	19.15	14.82	13.05
18.00	16.56	13.23	12.53
19.00	14.35	13.12	12.02
20.00	14.20	13.07	12.53

3.3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสีของผักทอง

การทดสอบคุณภาพด้านสีโดยใช้กรรไกรตัดตัวอย่างผักทองแผ่นบางเป็นชิ้นๆ ให้สามารถวางบนแผ่นวางตัวอย่างของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan EZ. จากนั้นทำการวัดค่าสีวัสดุตัวอย่าง 3 ซ้ำ การวัดสีกำหนดค่าสีของชิ้นตัวอย่างสด และแห้ง กำหนดหน่วยวัดสีมีสัญลักษณ์ $L^* a^* b^*$ ในแง่ของ L^* บ่งบอกถึง ความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว a^* แสดงถึง สีเขียว ($-a^*$) จนถึง สีแดง ($+a^*$) และ b^* แสดงจากสีน้ำเงิน ($-b^*$) จนถึงสีเหลือง ($+b^*$) ในระบบสี Hunter Lab การเปลี่ยนแปลงสีจากตัวอย่าง [7] คำนวณโดยสมการ 4 สมการที่ 5 และสมการที่ 6 ดังนี้

$$\Delta L = (L - L_0) / L_0 \quad (4)$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$\Delta a = (a - a_0) / a_0 \quad (5)$$

$$\Delta b = (b - b_0) / b_0 \quad (6)$$

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์สถิติคุณภาพด้านสีของฟักทองแผ่นอบแห้ง

เงื่อนไข	L* (ns)	a* (ns)	b*
ตากแดดธรรมชาติ	31.77±4.61	2.89±0.29a	7.68±2.32
เครื่องอบแห้งฮีตปั้ม	37.54±3.73	2.97±0.25b	6.95±1.53

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของชิ้นตัวอย่างหลังอบแห้งฟักทอง เมื่อพิจารณาที่วิธีการตากเดียวกัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นทำให้สีของชิ้นฟักทองอบแห้ง มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างเพิ่มขึ้น มีค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากเอนไซม์ [8] ผลจากอุณหภูมิความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะเปลี่ยนสีของฟักทองให้เป็นสีแดง เมื่อระยะเวลาอบแห้งนานมากขึ้นทำให้เป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นจนอาจเปลี่ยนเป็นสีดำ

วัดค่าการหดตัวของฟักทองอบแห้ง จากนั้นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์จากปริมาตรของตัวอย่าง โดยทดสอบจากการแทนที่ด้วยน้ำมันพืชเป็นของเหลวจากการสุ่มตัวอย่าง จำนวน 10 ชิ้น จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{(V_0 - V_f) \times 100}{V_0} \quad (7)$$

เมื่อ

V_0 คือ ปริมาตรเริ่มต้น

V_f คือ ปริมาตรสุดท้ายของชิ้นตัวอย่าง,
(ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

การคืนสภาพ (Rehydration Ratio) ความสามารถในการคืนสภาพของชิ้นตัวอย่างฟักทองแผ่นแห้งทดสอบแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสใช้เวลา 10 นาที ซับความชื้นกำจัดน้ำส่วนเกินบนพื้นผิวชิ้นฟักทอง มวลที่คืนสภาพแล้วจะถูกวัดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียดแม่นยำ ± 0.001 กรัม คำนวณอัตราส่วนค่าการคืนตัวของวัสดุตัวอย่างจากสมการที่ 8 ดังนี้

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{m_{\text{after}}}{M} \quad (8)$$

เมื่อ

M คือ มวลของตัวอย่างที่แห้ง

m_{after} คือ มวลตัวอย่างที่คืนสภาพหลังจากแช่น้ำ

การทดสอบวัดค่าเนื้อสัมผัสจากตัวอย่างฟักทองทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro System) วางตัวอย่างวัสดุทดสอบวางบนฐานระนาบใช้แรงกดหัวกดลงที่ชิ้นตัวอย่าง ถูกตั้งค่าให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแตกหรือหักแรงสูงสุดของการทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกและความชื้นเริ่มต้นของการเสียรูปถูกระบุว่าเป็นความแข็งและความกรอบของตัวอย่างตามลำดับ [9]

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยอุณหภูมิด้านต่าง ๆ ของแผ่นฟักทองอบแห้ง

อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	ตราส่วน ค่าคืนตัว	ค่าความแข็ง (นิวตัน)	ค่าความกรอบ (นิวตันต่อตารางเมตร)
50	95.82 ± 1.36^{def}	3.78 ± 0.075^{bc}	18.40 ± 1.17^{cd}	5.20 ± 1.59^{ab}
55	91.09 ± 0.78^{efgh}	3.35 ± 0.037^{ab}	30.11 ± 1.48^{hi}	7.80 ± 1.81^{abc}
60	85.39 ± 1.28^b	3.05 ± 0.080^a	31.08 ± 2.70^{gh}	9.41 ± 1.98^{bcd}

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบการหดตัวของ ฟักทองอบแห้ง พบว่า ผลการอบแห้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีผลต่อค่าการหดตัวของตัวอย่าง ฟักทองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิความร้อนของอากาศในห้องอบแห้งส่งผลให้น้ำภายในเซลล์ ฟักทองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงมีเกิดการระเหยน้ำ เกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำในเนื้อฟักทองไปยังอากาศ แวดล้อมในห้องอบแห้งทำให้โครงสร้างภายในเนื้อ ฟักทองมีปริมาตรลดลง

ผลการทดลองค่าเนื้อสัมผัสของวัสดุตัวอย่าง ฟักทองหลังอบแห้งค่าความแข็ง และค่าความกรอบ พบว่าที่อุณหภูมิต่างกันในระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่างลดลง และค่าความ กรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่แห้งรูปทรงมีขนาดใหญ่มากขึ้น พบว่า ความกรอบของตัวอย่างที่อบแห้งนั้นมีการแปรผกผัน กับความแข็ง

4. สรุปผลการวิจัย

การทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งความร้อน แบบ ฮีตปั๊มควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ ประกอบด้วย ตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์ถาดวางวัสดุ และระบบชุดฮีตปั๊ม ร่วมกับขดลวดความร้อนไฟฟ้า เป็นการใช้พลังงาน ความร้อนจากใช้พลังงานไฟฟ้า 5.5 กิโลวัตต์ กำลังไฟฟ้าชุดคอยล์ร้อน 7.8 กิโลวัตต์ อัตราการไหล ของ อากาศไม่น้อยกว่า 12,800 – 23,600 ลูกบาศก์ เมตรต่อชั่วโมง ผู้วิจัยเปรียบเทียบผลที่ได้ศึกษาการ

ตากฟักทองของเกษตรกรด้วยวิธีธรรมชาติ จะเห็นได้ ว่ากรณีใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า ให้ค่า อุณหภูมิภายในตู้อบสูงกว่ากรณีใช้ตู้อบพลังงาน แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และกรณีการตากด้วย วิธีทางธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ บา กา และคณะ [10] งานวิจัยเรื่อง ตู้อบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ ในประเด็นเปรียบเทียบพลังงานความร้อนภายในตู้อบกับภายนอกตู้อบซึ่งปัญหานี้ พบว่ามี ปัจจัยที่ส่งผลทำให้ฟักทองที่ตากตามวิธีธรรมชาติไม่ได้ คุณภาพ เช่น มีสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยฝุ่นละออง มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาทดสอบด้วย เทคโนโลยีพร้อมใช้งานเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนแบบฮีตปั๊มควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ และใช้ เครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์เข้าร่วมเพื่อลดสาเหตุและ ปรับปรุงแก้ไขแทนการตากแดดด้วยวิธีธรรมชาติ เพื่อ ลดปัญหาระยะเวลาในการตาก และสิ่งเจือปนต่าง ๆ

จากผลการทดลองเครื่องอบแห้งความร้อน แบบ ฮีตปั๊มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการ อบแห้งฟักทองนั้นแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาการในการ อบ 6 ชั่วโมงต่อวัน ใช้ฟักทองแผ่นบางขนาด 1 มิลลิเมตร ทำการอบแต่ละครั้งปริมาณมาก 300 กิโลกรัม การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพโดยการ ระเหยของน้ำตลอดทั้งวัน พบว่ามีอัตราการระเหย 68% ฟักทองสด 1 กิโลกรัม เมื่ออบแห้งจนได้ความชื้น 14 % (w.b.) การอบแห้งใช้พลังงานเท่ากับค่าพลังงาน ไฟฟ้า 85.16 กิโลวัตต์ชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงาน จำเพาะเท่ากับ $1.51 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ดังนั้นการแปรรูป ผลิตภัณฑ์อบแห้งฟักทองเป็นการควบคุมการลด

บทความวิจัย (Research Article)

ระยะเวลา สอดคล้องกับ แส่นแปง และคณะ [11] รายงานผลการศึกษการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าจากการลดระยะเวลาหลังการอบแห้งสามารถรักษาคุณภาพมีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดีที่สุด และปราศจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำผลทดสอบการศึกษาเครื่องอบแห้งความร้อนแบบฮีตปั๊มแบบปิดสำหรับฟักทอง ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอัตโนมัติ พบว่าในสภาวะอุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส สามารถอบแห้งฟักทองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

ผลความรู้และรู้จักใช้เทคโนโลยีที่อยู่รอบตัวให้เป็นประโยชน์ และเพิ่มความสะดวกให้กับเกษตรกร ผู้สนใจเรื่องการอบแห้งฟักทองในระบบความร้อนแบบ ฮีตปั๊มแบบปิดเป็นตู้อบที่ป้องกันการรบกวนจากแมลงมีความปลอดภัย ควรมีการเผยแพร่ผลงานไปยังสถานศึกษา และตามหมู่บ้านชุมชนที่สนใจ เพื่อเป็นการให้เพิ่มอัตราการผลิตขยายผลความรู้ต่อไป

การศึกษานี้เป็นแนวทางให้แก่เกษตรกร และนักศึกษาหรือผู้สนใจการแปรรูปฟักทองที่ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ สามารถรวมกลุ่มเพื่อสร้างหรือพัฒนาต่อยอดพัฒนาผลิตภัณฑ์ยกตัวอย่าง ผงขงต้ม ฟักทองบดละเอียดให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้ เพื่อลดข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณ การทำวิจัยสำหรับอาจารย์ กองทุนส่งเสริมของ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 จากสำนัก

ส่งเสริมวิชาการและการจัดการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด ขอขอบคุณกลุ่มชุมชน เกษตรกร ตำบลธงธานี อำเภอธวัชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด และขอขอบคุณนักศึกษาหลักสูตร ค.อ.บ. สาขาวิชา ไฟฟ้า ที่ช่วยเก็บข้อมูลทดสอบในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจการเกษตร, “ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร,” [ออนไลน์]. Available: <http://www.oae.go.th>. [เข้าถึงเมื่อ: 1 มกราคม 2565].
- [2] วิฐู ชูศรี, พรทิพย์ วิริยะวัฒนา, พันธุ์เลิศ พรหมสาขา ณ สกลนคร และ ธัชพงศ์ ชูศรี, “ผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสมบัติของกล้วยหอมสุกและฟักทองอบแห้ง,” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, ม.ค. - มิ.ย. หน้า 37-52, 2563.
- [3] A. Nawirska, A. Figiel, A. Z. Kucharska, A. Sokół-towska, and A. Biesiada, “Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods,” *Journal of Food Engineering*, vol. 94, no.1, pp. 14-20, 2009.
- [4] I. Alibas, “Microwave, air and combined microwave - air drying parameters of pumpkin slices,” *LWT-Food Science and Technology*, vol. 40, no.1, pp. 1445 - 1451, 2007.
- [5] วสันต์ จินธาดา และพรชัย เพชรสงคราม, “ลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลอบแห้งตัวอย่างพาราแผ่น” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร*

บทความวิจัย (Research Article)

- เหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, ม.ค.-มิ.ย. หน้า 89-99, 2560.
- [6] อีรเดช ใหญ่บัก, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, จอมภพ แวศักดิ์, มาริษา มะหิ และภรพนา บัวเพชร, “ การพัฒนากระบวนการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า ภายใต้สภาพภูมิอากาศภาคใต้ของประเทศไทย” *Thaksin University Journal วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 3, ต.ค.-ม.ค. หน้า 109-118, 2553.
- [7] สุภวรรณ ภูริวงษ์กุล, สลิลลา ช่างเขียว และยุทธนา ภูริวงษ์กุล, “การอบแห้งใบบัวบกแห้งซึ่งดื่มด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด จนผลศาสตร์ ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพ” *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 311-324, 2556.
- [8] ภักดี สิทธิฤทธิกริน, “การศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพฟักทองอบแห้ง ด้วยสุญญากาศรวมกับลมร้อน” *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, ก.ย. - ธ.ค. หน้า 121-140, 2562.
- [9] J. M. Aguilera, L. Castro, and L. Cadoche, “Structure property relationships in starch amorphous model,” *Proceedings of The 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, Sao Paulo, Brazil, 2004, pp. 1468-1472.
- [10] ฮาติมี บากา, รอกีเยาะ อาแว, ชุลกิปลี กาซอ และสุนิตย์ โรจนสุวรรณ, “การศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งของปลาช่อน ด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้า” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี YRU Journal of Science and Technology*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, ม.ค. - มิ.ย. หน้า 13-24, 2559.
- [11] ปุณยพร แสนแปง, หยาดฝน ทะนงการกิจ และปริญ คงกระพันธ, “ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน” *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร : สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, ก.ค. - ธ.ค. หน้า 15-27, 2566.

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลง กำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา^{1,*}, ศตวรรษ เมืองชื่น¹, จรัสพงศ์ เทพมณี¹, สมชาย สัมพันธ์ศรี¹ และ กิตติคม นนทบุรีประสาท²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

² สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเชียงราย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: dumrongsak.wongta@crc.ac.th โทรศัพท์: 084-1727780

(รับบทความ: 3 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 29 เมษายน 2569; ตอรับบทความ: 8 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงของหม้อแปลงกำลังขนาด 25 MVA ที่ใช้ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับความแม่นยำในการประเมินอุณหภูมิภายใต้สภาวะโหลดที่แปรผันตามเวลา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นการบูรณาการระหว่างแนวคิดของแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต เพื่อให้สามารถคำนวณทั้งอุณหภูมิสมมูลปลายทางและลักษณะการตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างสอดคล้องกัน ในการจำลองได้กำหนดอุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 องศาเซลเซียส และกำหนดช่วงเวลาการคำนวณทุก ๆ 15 นาที ครอบคลุมระยะเวลา 24 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 96 จุดข้อมูล โดยใช้อัตราส่วนกระแสโหลดที่แปรผันในช่วง 0.3 – 1.8 ต่อหน่วย ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้สอดคล้องกับพฤติกรรมการทำงานจริงมากกว่าแบบจำลองสถานะคงที่ และแบบจำลองเชิงพลวัต นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 3 ระดับโหลด ได้แก่ โหลดต่ำ โหลดปานกลาง และโหลดสูง ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวดตั้งแต่ 0 ถึง 57.39 kW ตามพิกัดกำลังสูญเสียของหม้อแปลง ผลการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแต่ละช่วงโหลดพบว่า แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6, 8 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.80, 2.57 และ 3.31 และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.24, 0.66 และ 2.35 ตามลำดับ ผลการทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์โหลดรวมถึงการพัฒนาระบบติดตามอุณหภูมิของหม้อแปลงในงานปฏิบัติจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

การอ้างอิงบทความ: ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา, ศตวรรษ เมืองชื่น, จรัสพงศ์ เทพมณี, สมชาย สัมพันธ์ศรี และ กิตติคม นนทบุรีประสาท, "การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลงกำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 70-85, 2569.

A Hybrid Dynamic Thermal Modeling Approach for Tank Temperature Estimation of a 25-MVA ONAF Power Transformer

Dumrongsak Wongta^{1,*}, Satawat Muangchuen¹, Jaratpong Tepmanee¹, Somchai Sumpansri¹
and Kittikom Nontprasat²

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

² Department of Industrial Management, Graduate School, Chiangrai College

*Corresponding Author: dumrongsak.wongta@crc.ac.th, Tel: 084-1727780

(Received: March 3, 2026; Revised: April 29, 2026; Accepted: May 8, 2026)

Abstract

This research presents the development of a hybrid dynamic thermal model for estimating the tank temperature of a 25 MVA power transformer equipped with an Oil Natural Air Forced (ONAF) cooling system. The primary objective is to enhance the accuracy of temperature prediction under time-varying load conditions. The proposed model integrates the principles of steady-state thermal modeling and dynamic thermal modeling, enabling the simultaneous determination of both the final steady-state temperature and the transient thermal response. In the simulation, the ambient temperature was assumed constant at 28 °C, and the computation was performed at 15-minute intervals over a 24-hour period, yielding a total of 96 data points. The load current was varied within a range of 0.3 to 1.8 per unit (p.u.). The comparative results indicate that the hybrid dynamic thermal model more accurately captures the temperature variation trends in accordance with actual operating behavior than either the steady-state or conventional dynamic thermal model. Furthermore, the model performance was validated against the Finite Element Method (FEM). The evaluation was conducted across three load levels conditions: low, medium, and high, with copper losses ranging from 0 to 57.39 kW, consistent with the transformer's rated loss specifications. The mean absolute percentage error (MAPE) for the steady-state model was found to be 6%, 8%, and 10% for low, medium, and high load conditions, respectively. In comparison, the dynamic thermal model yielded MAPE values of 1.80%, 2.57%, and 3.31%, while the hybrid dynamic thermal model achieved lower errors of 1.24%, 0.66%, and 2.35%, respectively. The results demonstrate that the hybrid dynamic thermal model provides the lowest average temperature estimation error among the considered approaches. This confirms that the proposed model achieves an acceptable level of engineering accuracy and shows strong potential for practical applications in load analysis and real-time transformer temperature monitoring systems.

Keywords: Steady-State Thermal Model, Dynamic Thermal Model, Hybrid Dynamic Thermal Model

Please cite this article as: D. Wongta, S. Muangchuen, J. Tepmanee, S. Sumpansri and K. Nontprasat, "A Hybrid Dynamic Thermal Modeling Approach for Tank Temperature Estimation of a 25-MVA ONAF Power Transformer," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 70-85, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

อุณหภูมิถังหม้อแปลงเป็นปัจจัยที่เกิดจากการทำงานโดยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิผ่านแกนเหล็กไปขดลวดทุติยภูมิในการเหนี่ยวนำส่งผลทำให้เกิดความร้อนที่หม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการทำงานของหม้อแปลงภายใต้สภาวะโหลดที่แปรผันจะก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายใน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลง (Top Oil Temperature) และที่อุณหภูมิจุดร้อนขดลวด (Hot-Spot Temperature) จากความร้อนภายในส่งกระทบไปที่อุณหภูมิภายนอก โดยเฉพาะอุณหภูมิถังหม้อแปลง (Tank Temperature) ที่จะสะท้อนสมมูลของการถ่ายเทความร้อนของทั้งระบบอุณหภูมิถังหม้อแปลงที่สูงเกินไป จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน อายุการใช้งานลดลง และเพิ่มความเสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า การประเมินและติดตามอุณหภูมิถังหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการบริหารจัดการโหลดและการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง [1-4] งานวิจัยที่ผ่านมาและมาตรฐาน IEEE C57.91 ให้ความสำคัญอย่างมากกับการประเมินอุณหภูมิน้ำมันชั้นบน และอุณหภูมิจุดร้อนขดลวด เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับการเสื่อมสภาพของฉนวน สำหรับงานวิจัยที่ศึกษามุ่งเน้นอุณหภูมิถังหม้อแปลง (Tank Temperature) ยังมีจำนวนจำกัด ทั้งที่ช่วยเป็นตัวแปรที่สะท้อนสมมูลการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อนทั้งหมด และมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนแบบ ONAF (Oil Natural Air Forced) มีโครงสร้างของถังหม้อแปลงแบบคืบ และพัดลมช่วยเป่าอากาศเพื่อระบายความร้อนจากความร้อนภายในหม้อแปลง

แบบจำลองความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย [5-7] สามารถแบ่งออกเป็นแบบจำลองสถานะคงที่ (Steady-State Model) และแบบจำลองเชิงพลวัต

(Dynamic Model) แบบจำลองสถานะคงที่สามารถประเมินค่าอุณหภูมิสมมูลได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดแปรผันตามเวลาได้ ขณะที่แบบจำลองเชิงพลวัตสามารถอธิบายพฤติกรรม การสะสมและการคายความร้อนผ่านค่าคงที่เวลาความร้อนได้ดีกว่า อีกด้านหนึ่งวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ Finite Element Method (FEM) สามารถจำลองการกระจายอุณหภูมิได้อย่างละเอียดเชิงพื้นที่ [8] แต่ต้องใช้คอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณเชิงลึกมาก และไม่เหมาะสมสำหรับการประเมินแบบออนไลน์หรือการวิเคราะห์โหลดระยะยาว

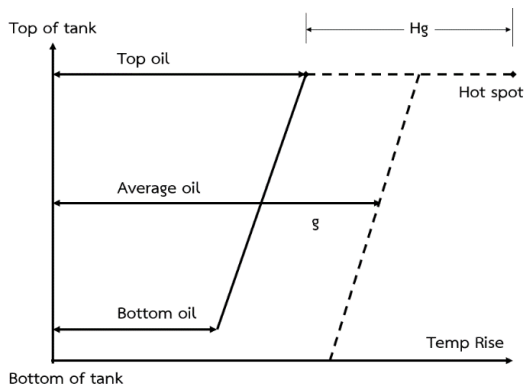
ดังนั้นแนวทางงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม (Hybrid Dynamic Thermal Model) โดยใช้ข้อมูลทั่วไปจากผู้ผลิตหม้อแปลงกำลังขนาด 25 MVA ที่มีระบบการระบายความร้อนแบบ ONAF โดยใช้หลักการของแบบจำลองสถานะคงที่และแบบจำลองเชิงพลวัตผสมเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมมูลปลายทางและพฤติกรรม การตอบสนองเชิงเวลาได้พร้อมกัน นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เข้ากับวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้การทดสอบที่มีการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวดและวิเคราะห์อุณหภูมิถังจากการระบายความร้อน [9,10] เพื่อสามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์โหลดและนำไปขยายสู่การติดตามสถานะความร้อนของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้าจริง

2. แบบจำลองอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังให้แก่โหลด ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการคำนวณค่าพิกัดกระแสใช้งานเท่านั้น แต่ยังต้องประเมินสภาพการทำงานโดยรวมอย่างรอบด้าน โดยเฉพาะกรณีการเดินเครื่องเกินพิกัดกำลัง

บทความวิจัย (Research Article)

(Overloading) แม้ว่าหม้อแปลงอาจสามารถรองรับการจ่ายกำลังที่สูงกว่าค่าพิกัดได้ในเวลาสั้น ๆ แต่การใช้งานลักษณะดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน อายุการใช้งาน ความปลอดภัย ตลอดจนเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในระยะยาว [11] การอ้างอิงตามแนวทางมาตรฐาน IEEE C57.91 ได้มีการกำหนดหลักเกณฑ์สำหรับการบริหารจัดการโหลด ร่วมกับการวิเคราะห์อุณหภูมิหม้อแปลง และระบบการระบายความร้อน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบชนิดจุ่มน้ำมัน

เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ภายใต้ขอบเขตที่ไม่กระทบต่อความเชื่อถือได้และความปลอดภัยของระบบ ในด้านความร้อน พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเป็นอีกประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญ การเพิ่มขึ้นอุณหภูมิ (Temperature Rise) ทำให้อุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นและมีการกระจายตัวในแนวดิ่ง โดยบริเวณน้ำมันส่วนล่างของถังจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนบน ขณะที่อุณหภูมิจุดร้อนของขดลวด จะมีค่าสูงกว่าน้ำมันชั้นบนอีกระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนและอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยตรงจากแบบจำลองความร้อนที่ศึกษาเปรียบเทียบ

2.1 แบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดจุ่มน้ำมันขนาดใหญ่ส่วนมากจะมีระบบระบายความร้อนแบบ ONAF มีอุณหภูมิถังหม้อแปลงภายใต้สภาวะที่น้ำมันไหลเวียนโดยใช้หลักการพาความร้อนตามธรรมชาติ และในขณะที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศยังต้องอาศัยพัดลมช่วยบังคับการไหลของอากาศผ่านเข้าสู่แผงระบายความร้อน แนวคิดสำคัญของแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมดุลพลังงานความร้อน คือความร้อนที่เกิดจากแกนเหล็กและขดลวดจะถูกถ่ายเทสู่น้ำมันฉนวน จากนั้นน้ำมันร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง และไหลผ่านครีปเพื่อถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายนอก โดยพัดลมจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบลดลงเมื่อเทียบกับระบบ ONAN (Oil Natural Air Natural)

แบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงมุ่งเน้นการพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันในถังและอุณหภูมิถังเป็นหลัก [12] โดยถือว่าถังหม้อแปลงทำหน้าที่เสมือนตัวกลางถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันภายในกับอากาศภายนอก อุณหภูมิถังจึงเป็นผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมทั้งหมด และจากความสามารถในการคายความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบพัดลม ในเชิงพลวัตแบบจำลองพิจารณาค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถังหม้อแปลง (Tank Thermal Time Constant) สามารถสะท้อนความหน่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิถังจะค่อย ๆ สูงขึ้นตามลักษณะแบบเลขชี้กำลัง (Exponential) จนเข้าสู่สมดุลใหม่ และเมื่อโหลดลดลงอุณหภูมิจะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเช่นเดียวกัน [13,14] โครงข่ายความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance Network) อาศัยแนวคิดเทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้า เนื่องจากพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนมีลักษณะทางคณิตศาสตร์คล้ายกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรความต้านทาน

บทความวิจัย (Research Article)

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1)$$

$$\Delta T = Q \cdot R_{th} \quad (2)$$

เมื่อ

Q คือ การถ่ายเทความร้อน, (Joule)

Δt คือ อุณหภูมิร้อนที่เปลี่ยนไป, ($^{\circ}\text{C}$)

R_{th} คือ ความต้านทานความร้อน, ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

ค่าความต้านทานความร้อนขึ้นอยู่กับระบบกลไกการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

$$R_{th} = R_{\Theta TO} + R_{\Theta AF} + R_{cond} \quad (3)$$

$$R_{\Theta TO} = \frac{1}{h_{oil} \cdot A_{tank}} \quad (4)$$

$$R_{\Theta AF} = \frac{1}{h_{Air} \cdot A_{tank}} \quad (5)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{\kappa \cdot A_{tank}} \quad (6)$$

เมื่อ

$R_{\Theta TO}$ คือ การพาความร้อนของน้ำมัน

$R_{\Theta AF}$ คือ การพาความร้อนพัดลม

R_{cond} คือ การนำความร้อนวัสดุ

h_{oil} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมัน, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

h_{Air} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

κ คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

A_{tank} คือ พื้นที่ผิวตัวถังและครีป, (m^2)

2.2 แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่

อุณหภูมิถึงหม้อแปลงในสถานะคงที่ (Steady-State Thermal Model) คือค่าอุณหภูมิความร้อนถึงที่มีค่าคงตัว เมื่อหม้อแปลงทำงานภายใต้ระดับโหลดและสภาพแวดล้อม [15] ที่ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลานานพอจนเกิดสมดุลทางความร้อน ความร้อนภายในหม้อแปลงอุณหภูมิขดลวดและแกนเหล็ก มีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกสู่บรรยากาศผ่านผิวถังและอุปกรณ์ระบายความร้อน ในสถานะที่อุณหภูมิถึงจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลา แต่จะคงอยู่ที่ระดับหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียรวม ค่าความต้านทานความร้อนและอุณหภูมิแวดล้อมภายนอก หากโหลดเพิ่มขึ้น ค่ากำลังสูญเสียจะสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิถึงเข้าสู่สมดุลใหม่ที่สูงกว่าเดิม แต่ยังคงเป็นค่าคงที่เมื่อถึงจุดสมดุลอีกครั้ง

$$P_{loss} = P_{core} + P_{cu} K^2 \quad (7)$$

$$\Delta \Theta_{tank,ss} = P_{loss} \cdot R_{th} \quad (8)$$

$$\Theta_{tank,ss} = \Theta_A + P_{loss} \cdot R_{th} \quad (9)$$

เมื่อ

P_{loss} คือ กำลังสูญเสียรวม, (W)

P_{core} คือ กำลังสูญเสียแกนเหล็ก, (W)

P_{cu} คือ กำลังสูญเสียขดลวด, (W)

K คือ อัตราส่วนของกระแสโหลด

$K = (I_{Load} / I_{Rated})$, Per unit (pu)

บทความวิจัย (Research Article)

$\Delta\Theta_{\text{tank,ss}}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มของตัวถังสภาวะคงที่, ($^{\circ}\text{C}$)

$\Theta_{\text{tank,ss}}$ คือ อุณหภูมิถังสภาวะคงที่, ($^{\circ}\text{C}$)

Θ_A คือ อุณหภูมิแวดล้อมภายนอก, ($^{\circ}\text{C}$)

$$\frac{d\Theta_{\text{tank}}}{dt} = \frac{\Theta_{\text{tank,ss}} - \Theta_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}}} \quad (11)$$

$$\tau_{\text{tank}} = C_{\text{tank}} R_{th} \quad (12)$$

$$\Theta_{\text{tank}}(k) \frac{\tau_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \Theta_{\text{tank}}(k-1) + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (13)$$

2.3 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต

แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต (Dynamic Thermal Model) หมายถึง ค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลงที่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ขึ้นกับเวลาภายใต้สภาวะที่โหลดและสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่ได้พิจารณาเพียงแค่ว่าค่าคงที่ เมื่อมีค่าเข้าสู่สมดุล แต่คำนึงถึงพฤติกรรมตอบสนองทางความร้อนของถังที่มีความหน่วง [16-18]

เมื่อกำลังสูญเสียภายในหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มโหลด ความร้อนจะถ่ายเทจากขดลวดสู่น้ำมัน และจากน้ำมันสู่ผิวถัง จากนั้นจึงระบายออกสู่อากาศภายนอก แม้ว่าอุณหภูมิผิวถังจะไม่เพิ่มขึ้นทันทีตามกำลังสูญเสีย แต่จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงตามค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถัง (Tank Thermal Time Constant) ซึ่งสะท้อนความจุความร้อนของโครงสร้างเหล็ก น้ำมัน และมวลรวมของหม้อแปลง

ในเชิงคณิตศาสตร์ แบบจำลองเชิงพลวัตอาศัยการคำนวณอุณหภูมิถังในช่วงเวลาถัดไปจากค่าอุณหภูมิเดิม รวมกับผลของความแตกต่างระหว่างกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นและความสามารถในการระบายความร้อน ณ ช่วงเวลานั้น ทำให้สามารถจำลองพฤติกรรมอุณหภูมิเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได หรือแบบแปรผันรายชั่วโมงได้ คำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$C_{\text{tank}} \frac{d\Theta_{\text{tank}}}{dt} = P_{\text{loss}} - \frac{\Theta_{\text{tank}} - \Theta_A}{R_{th}} \quad (10)$$

เมื่อ

C_{tank} คือ ความจุของถัง, (kg)

τ_{tank} คือ ค่าคงที่เวลาความร้อนถัง, (min)

k คือ ลำดับเวลา

Δt คือ ช่วงเวลาความร้อน, (hour)

2.4 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม (Hybrid Dynamic Thermal Model) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการของสภาวะคงที่ พิจารณาร่วมกับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาหรือเชิงพลวัต เพื่อให้สามารถประเมินอุณหภูมิถังหม้อแปลงที่ผสมผสานหลักการของแบบจำลองชนิดนี้เริ่มจากการคำนวณค่าอุณหภูมิสมดุลปลายทางตามสภาวะคงที่ ซึ่งสะท้อนระดับอุณหภูมิของระบบภายใต้เงื่อนไขโหลดและสภาพแวดล้อมที่กำหนด จากนั้นจึงนำค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถังมาใช้กำหนดอัตราการเปลี่ยนผ่านของอุณหภูมิจากค่าปัจจุบันไปสู่อุณหภูมิค่าใหม่ ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไปของระบบความร้อนที่สามารถประเมินค่าอุณหภูมิปลายทาง และพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงผ่านได้พร้อมกัน ทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับโหลดจริงที่แปรผันตลอดเวลาที่สมการต่อไปนี้

บทความวิจัย (Research Article)

$$\Theta_{\text{tank}}(k) = \alpha\Theta_{\text{tank}}(k-1) + (1-\alpha)\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \quad (15)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม Hybrid Dynamic Thermal Model (Proposed) จะได้

$$\Theta_{T,\text{hyb}}(k) = \beta\Theta_{\text{tank,ss}}(k) + (1-\beta)A \quad (16)$$

โดยที่

$$A = \alpha\Theta_{T,\text{hyb}}(k-1) + (1-\alpha)\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (17)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} \Theta_{T,\text{hyb}}(k) = & [\beta + (1-\beta)(1-\alpha)]\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \\ & + (1-\beta)\alpha\Theta_{T,\text{hyb}}(k-1) \end{aligned} \quad (18)$$

เมื่อ

$\Theta_{T,\text{hyb}}(k)$ คือ ค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลง
เชิงพลวัตแบบผสม, ($^{\circ}\text{C}$)

β คือ สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก
 $0 \leq \beta \leq 1$

แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก (β) ถูกใช้เพื่อปรับสมดุลระหว่างผลลัพธ์ของแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต โดยค่า β ถูกกำหนดด้วยวิธีการปรับจูน (Parameter Tuning) ผ่านการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับข้อมูลอ้างอิงจากวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน จากนั้นทำการปรับ

ค่า β เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ (APE) มีค่าน้อยที่สุด

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดสอบแบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF [19] โดยกำหนดช่วงเวลาการจำลอง (Time Step) การคำนวณแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อแสดงถึงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดที่หลากหลาย ทั้งช่วงไม่เกิดพิกัด ช่วงระดับพิกัด และช่วงที่เกิดพิกัด โดยมีระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งประกอบด้วยค่าพิกัดทางไฟฟ้า ค่าการสูญเสีย และพารามิเตอร์ทางความร้อนที่จำเป็นสำหรับการคำนวณแบบจำลอง และตารางที่ 2 แสดงช่วงการทำงานของหม้อแปลงในรูปแบบของอัตราส่วนกระแสโหลด (Per Unit) และช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลอง เพื่อใช้เป็นอินพุตสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มพฤติกรรมอุณหภูมิภายใต้สภาวะโหลดแปรผันตามเวลาของแบบจำลองความร้อนทั้งสภาวะคงที่เชิงพลวัต และเชิงพลวัตแบบผสม

ตารางที่ 1 ข้อมูลหม้อแปลง 25 MVA

Feature	Value	Feature	Value
Power Rated	25 MVA	$\Delta\Theta_{TO,R}$	38.3 $^{\circ}\text{C}$
Voltage HV/LV	66/11 kV	$\Delta\Theta_{H,R}$	23.5 $^{\circ}\text{C}$
Current Rated	218.7 A	Time Constant: τ_w	7 min
No-Load Losses at 75 $^{\circ}\text{C}$	17,500 W	Oil Volume	10,800 kg
Load Losses at 75 $^{\circ}\text{C}$	57,390 W	Total Losses at Rated	107,633 W

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา และคณะ, การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลงกำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 ข้อมูลหม้อแปลง 25 MVA (ต่อ)

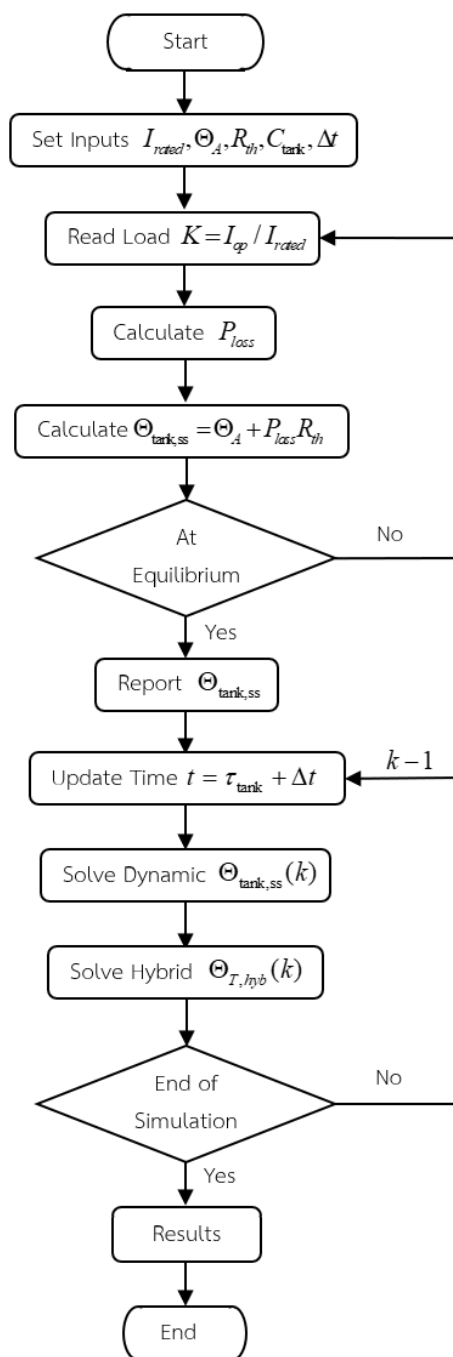
Feature	Value	Feature	Value
Cooling: Oil Natural Air Force (ONAF)	m = 0.8 n = 0.9	Ratio of load loss to no load loss (R)	5

ตารางที่ 2 ช่วงการทำงานหม้อแปลงในแบบจำลอง

ช่วงอัตราส่วน ของกระแสโหลด (K)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ช่วงเวลาการ เปลี่ยนแปลง (จำนวนข้อมูล)
1.0 pu	3	12
0.6 pu	3	12
1.5 pu	2	8
0.3 pu	3	12
1.0 pu	2	8
0.6 pu	3	12
0.8 pu	2	8
1.8 pu	1	4
1.3 pu	2	8
0.7 pu	3	12
รวม	24	96

แบบจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยเชื่อมโยงระหว่างกระแสโหลดกับการเกิดความร้อนและการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างถึงหม้อแปลงเพื่อหาค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลง ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงแนวทางจากมาตรฐาน IEEE C57.91 ได้มีการจำลองและเปรียบเทียบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่เหมือนกัน เพื่อประเมินความถูกต้องของวิธีการคำนวณตามสมการที่นำเสนอ ในการศึกษาขึ้น

กำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 °C และกำหนดช่วงการทำงานของหม้อแปลงในทั้งสองแบบจำลองให้สอดคล้องกัน



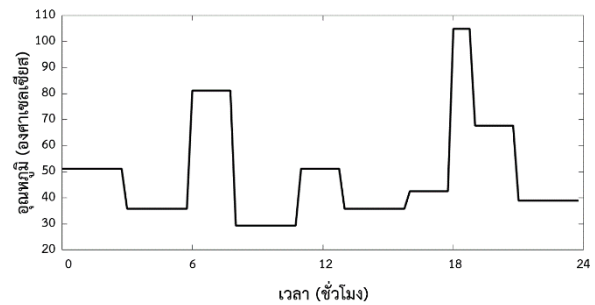
รูปที่ 2 แผนภาพกระบวนการจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้า

บทความวิจัย (Research Article)

ขั้นตอนการจำลองเชิงเวลาดังรูปที่ 2 ได้กำหนดช่วงเวลาในการคำนวณทุก ๆ 15 นาที ตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของโหลดในลักษณะกึ่งต่อเนื่อง และสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้า เวกเตอร์เวลาถูกกำหนดในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Vector) โดยอาศัยกระบวนการจำลองเชิงเวลาแบบขั้นบันได (Time-Stepping Simulation) ซึ่งกำหนดขนาดช่วงเวลาคงที่เท่ากับ 15 นาที ส่งผลให้ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง มีข้อมูลทั้งหมด 96 จุด ทั้งนี้เวกเตอร์เวลาดังกล่าวถูกจัดให้สอดคล้องกับจำนวนข้อมูลโหลด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตตามลำดับเวลา จากนั้นจึงใช้ค่าความต้านทานความร้อนรวมจากข้อมูลหม้อแปลงและค่าความจุความร้อนถึง ทำให้ได้ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน ผลลัพธ์ค่าอุณหภูมิถึงจะเริ่มที่การคำนวณอุณหภูมิถึงแบบสภาวะคงที่ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล แล้วจึงใช้วิธีการคำนวณอุณหภูมิถึงแบบพลวัต เพื่อสะท้อนพฤติกรรมตอบสนองเชิงเวลา เงื่อนไขการวนรอบสำหรับแต่ละช่วงเวลา ได้กำหนดเวกเตอร์เวลาให้สอดคล้องกับจำนวนข้อมูลโหลด [20,21] ตรวจสอบว่า k เท่ากับจำนวนข้อมูล N หรือไม่ หากไม่ใช่ระบบจะเพิ่มเวลาและทำซ้ำขั้นตอน แต่ถ้าหากใช่ ถือเป็นการสิ้นสุดการจำลอง

4. ผลเปรียบเทียบการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลง

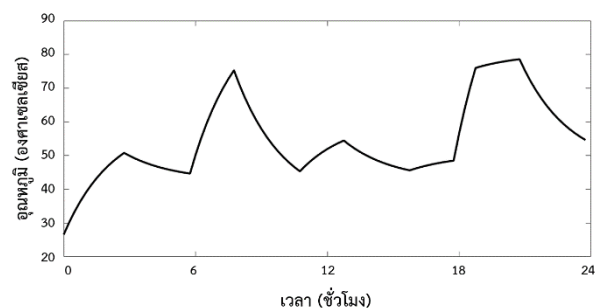
การจำลองหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดพิกัด 25 MVA ภายใต้สภาวะโหลดตามช่วงการทำงานหม้อแปลงในแบบจำลอง ซึ่งมีการแปรผันของโหลดอยู่ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ที่เปรียบดังการทำงานของหม้อแปลงที่มีลักษณะการจ่ายโหลดที่ต่ำสุด 0.3 pu และที่สูงสุด 1.8 pu ได้ผลการจำลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3 แบบจำลองความร้อนสภาวะคงที่

รูปที่ 3 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงแบบสภาวะคงที่ ซึ่งพิจารณากำลังสูญเสียรวมและความสามารถในการระบายความร้อนของระบบ จะเห็นว่าอุณหภูมิถึงจะเปลี่ยนค่าทันทีตามระดับโหลดที่เกิดขึ้น และเข้าสู่ค่าคงตัวใหม่โดยไม่พิจารณาพฤติกรรมของการเปลี่ยนผ่านตามเวลา ซึ่งแบบจำลองนี้สะท้อนแนวโน้มอุณหภูมิปลายทางของระบบเมื่อเข้าสู่ค่าความร้อน

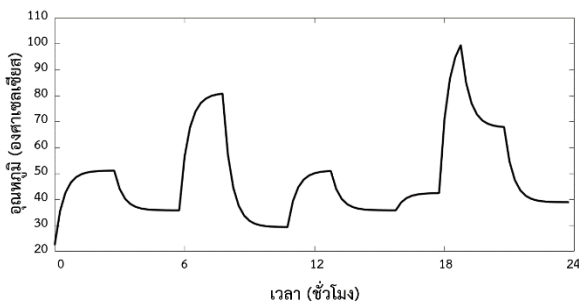
ผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงโดยใช้แบบจำลองเชิงพลวัต แบบจำลองนี้ได้พิจารณาผลของค่าคงที่เวลาความร้อนของถัง ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะแบบเลขชี้กำลัง เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นหรือลดลง แบบจำลองนี้สะท้อนพฤติกรรมการสะสมและการระบายความร้อนของถังหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต

บทความวิจัย (Research Article)

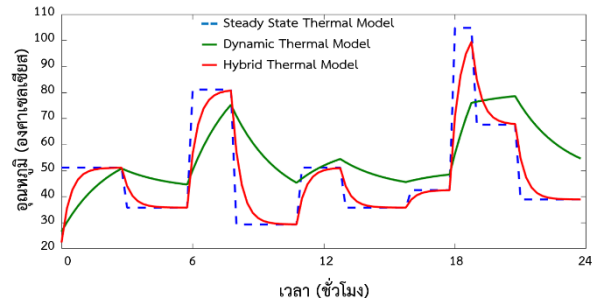
ผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงเชิงพลวัตแบบผสม ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของแบบจำลองสถานะคงที่ และแบบจำลองเชิงพลวัต โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักในการปรับสมดุลระหว่างค่าปลายทางและผลตอบสนองเชิงเวลา ทำให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมดุลและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงได้พร้อมกัน ส่งผลให้ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับลักษณะโหลดที่แปรผันตามเวลามากยิ่งขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 5



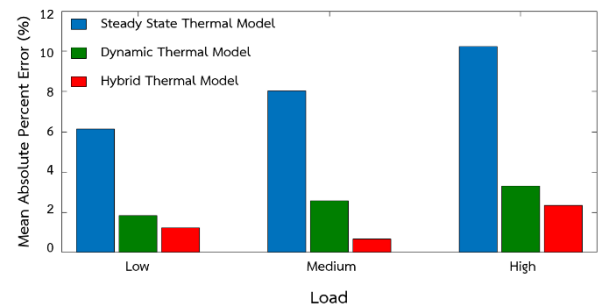
รูปที่ 5 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่ได้จากแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม ภายใต้สภาวะโหลดแปรผันตามเวลา พบว่าแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีตามระดับโหลด โดยไม่มีพฤติกรรมการสะสมความร้อน ขณะที่แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตมีลักษณะการเพิ่มและลดอุณหภูมิไปตามค่าคงที่เวลาความร้อนของระบบ ส่วนแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมให้ผลลัพธ์ที่อยู่ระหว่างสองแบบจำลอง โดยสามารถสะท้อนทั้งค่าอุณหภูมิปลายทางและมีลักษณะการตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างเหมาะสม โดยพบว่าแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมมีแนวโน้มสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงมากกว่า และช่วยลดค่า

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณแบบสภาวะคงที่เพียงอย่างเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงจากแบบจำลองความร้อนทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากแบบจำลองความร้อนในแต่ละช่วงโหลด

รูปที่ 7 เปรียบเทียบแบบจำลองที่ให้ผลลัพธ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำ และมีผลใกล้เคียงกันในการทดสอบแต่ละช่วงโหลด โดยเลือกแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม มาใช้ทดสอบเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิถึงหม้อแปลง กับวิธีการ Finite Element Method (FEM) โดยคำนวณจากการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper Losses) ตั้งแต่ 0 ถึง 57,390 W ตามพิกัดหม้อแปลง เป็นการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นใน

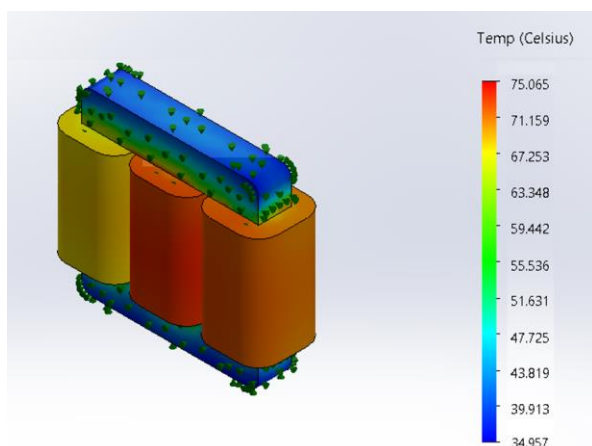
บทความวิจัย (Research Article)

ขดลวดถ้ายโอนไปน้ำมันและตัวถัง ภายใต้สภาวะ
อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ [22-25] คำนวณตามมาตรฐาน

IEEE C57.91 เพื่อทดสอบการคำนวณของแบบจำลอง
และลดปัจจัยผันผวนภายนอก แสดงผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงโหลด

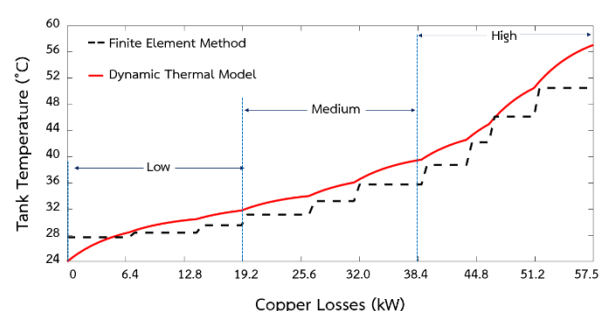
Mean Data	Copper Losses (kW)		
	Low 0.0 – 19.2	Medium 19.2 – 38.4	High 38.4 – 57.5
FEM (°C)	28.75	32.63	46.20
Dynamic (°C)	28.23	33.47	47.73
Hybrid (°C)	28.40	32.85	47.29
Dynamic APE (%)	1.83	2.57	3.31
Hybrid APE (%)	1.24	0.66	2.35



รูปที่ 8 การทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธี FEM

รูปที่ 8 เป็นวิธีการ Finite Element Method (FEM) เพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวด เพื่อความร้อนขดลวดจะถ้ายโอนไปน้ำมันและตัวถัง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมคงที่ จนถึงกำลังสูญเสียขดลวดสูงสุดที่ 57.5 kW ให้อุณหภูมิขดลวดตามพิกัดหม้อแปลง 75°C ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าความร้อนของ

ขดลวดเป็นการแผ่กระจายที่ขดลวดชุดกลางที่ร้อนที่สุดไปหาขดลวดสองชุดด้านข้าง เมื่อค่าขดลวดร้อนถึง 75°C แล้วจึงนำค่าอุณหภูมิถึงจากวิธี FEM ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Dynamic Model และ Hybrid Dynamic Model ที่นำเสนอ

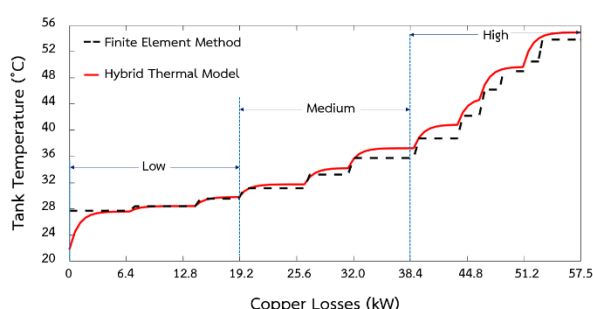


รูปที่ 9 การทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงระหว่าง Dynamic Model และ FEM

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่ได้จากวิธี FEM กับแบบจำลอง Dynamic Thermal Model ผลการทดสอบเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า

บทความวิจัย (Research Article)

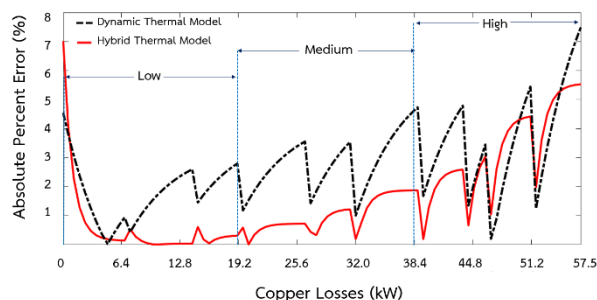
แบบจำลอง Dynamic Thermal Model ประมาณค่าอุณหภูมิถึงที่ยังไม่สะท้อนแนวโน้มของอุณหภูมิในช่วงสภาวะคงที่ และแบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่โหลดสูง จากการเพิ่มกำลังสูญเสียขดลวด ซึ่งยังไม่สอดคล้องกันกับวิธี FEM ที่มีอุณหภูมิแบบสภาวะคงที่และอุณหภูมิแบบสภาวะเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 การทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงระหว่าง Hybrid Model และ FEM

รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบพบว่าอุณหภูมิถึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบกึ่งเชิงเส้นตามระดับกำลังสูญเสีย โดยค่าที่ได้จาก Hybrid Dynamic Model มีแนวโน้มสอดคล้องกับ FEM ในช่วงกำลังสูญเสียต่ำถึงปานกลาง และเริ่มมีความแตกต่างเพิ่มขึ้นในช่วงกำลังสูญเสียสูง ทั้งนี้ความแตกต่างดังกล่าวแสดงว่า FEM ให้ผลลัพธ์ที่สะท้อนพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเชิงพื้นที่ได้อย่างละเอียด ขณะที่ Hybrid Dynamic Model มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากความร้อนที่สะสมก่อนหน้ามาใช้ในการคำนวณด้วย

งานวิจัยนี้ได้ประเมินค่าความคลาดเคลื่อน Absolute Percentage Error (APE) ของอุณหภูมิถึงแบบจำลอง Dynamic Model เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Hybrid Dynamic Model ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิถึง APE ระหว่าง Dynamic Model และ Hybrid Model

รูปที่ 11 การประเมินค่าความคลาดเคลื่อน APE ของอุณหภูมิถึงพบว่าช่วงโหลดต่ำ แบบจำลอง Dynamic Thermal Model ช่วงเริ่มต้นคำนวณมีค่า 4.5% จากการคำนวณที่ช่วงแรกค่าความคลาดเคลื่อนยังมีผลจากไม่คิดสภาวะคงที่ ทำให้มีช่วงเริ่มต้นแตกต่างเมื่อเทียบกับ Hybrid Dynamic Model ที่ช่วงเริ่มต้นคำนวณมีค่าสูง 7% จากการที่ต้องใช้ค่าอุณหภูมิสภาวะคงที่มาใช้คำนวณเริ่มต้น ถ้าหากไม่กำหนดค่านี้ก็จะใช้เวลาคำนวณช่วงเวลานึงจึงจะสามารถเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเป็นค่าเริ่มแรกแล้วจึงสามารถคำนวณหาอุณหภูมิช่วงต่อไปได้ และเมื่อเทียบที่ช่วงโหลดปานกลาง Hybrid Dynamic Model มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าและแม่นยำกว่าจนถึงช่วงค่ากำลังสูญเสียที่ทดสอบมีค่าสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกันบางช่วง

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองสภาวะคงที่แบบจำลองเชิงพลวัต และแบบจำลองเชิงพลวัตแบบ

บทความวิจัย (Research Article)

ผสม การทดสอบแบบจำลองได้กำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 °C เพื่อควบคุมตัวแปรภายนอกและมุ่งเน้นในส่วนการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดต่ออุณหภูมิถึงหม้อแปลงโดยตรง ทั้งนี้แม้ว่าในสภาวะการใช้งานจริงอุณหภูมิแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่การกำหนดค่าคงที่จะช่วยลดความซับซ้อนของแบบจำลองแต่ละแบบและทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการคำนวณแบบจำลองแต่ละวิธีได้ อย่างไรก็ตาม สามารถนำแบบจำลองที่นำเสนอขยายไปสู่กรณีที่วัดและเก็บผลอุณหภูมิแวดล้อมที่แปรผันตามเวลาจริงในงานวิจัยในอนาคตได้

ผลการจำลองพบว่า แบบจำลองสภาวะคงที่สามารถแสดงแนวโน้มค่าอุณหภูมิปลายทางได้ แต่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงผ่านตามเวลาได้อย่างเหมาะสม ขณะที่แบบจำลองเชิงพลวัตสามารถอธิบายลักษณะการสะสมและการระบายความร้อนของถังหม้อแปลงได้ดีขึ้น ซึ่งอย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงพลวัตแบบผสมสามารถผสานข้อดีของทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมดุลและพฤติกรรมตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของ Hybrid Dynamic Model กับวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้การเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวดตั้งแต่ 0 ถึง 57.39 kW พบว่าแนวโน้มอุณหภูมิถึงเพิ่มขึ้นตามกำลังสูญเสียอย่างต่อเนื่อง จากผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ (Absolute Percentage Error: APE) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการคำนวณมีค่าสูงกว่าช่วงเวลาที่ผ่านไป ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลอง ที่กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นจากสภาวะคงที่ หรือค่าการประมาณเบื้องต้นจะยังไม่สอดคล้องกับสภาวะสมดุลเชิงพลวัตของระบบ ส่งผลให้การตอบสนองของอุณหภูมิในช่วง

เริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนก่อนที่จะค่อย ๆ ลดเข้าสู่ค่าที่เสถียรขึ้น

ผลกระทบของความคลาดเคลื่อนในช่วงเริ่มต้นสามารถพิจารณาแนวทางการชดเชยได้หลายวิธี เช่น การกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น การใช้ข้อมูลจากช่วงเวลาก่อนหน้า หรือการละเว้นข้อมูลช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณในช่วงเวลาถัดไป พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ APE มีแนวโน้มลดลงและคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม (ไม่เกิน 5%) ซึ่งสะท้อนว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมทางความร้อนของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภายหลังจากช่วงเริ่มต้น โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระยะแรกไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องโดยรวมของแบบจำลอง อีกทั้งค่า APE ที่อยู่ภายในเกณฑ์ดังกล่าวยังยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้งานจริง

นอกจากนี้ รูปแบบโหลดที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปแบบที่กำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เงื่อนไขที่มีการควบคุม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมความร้อนของหม้อแปลงเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการวัดจริงในระบบไฟฟ้า เช่น อุณหภูมิแวดล้อมที่แปรผัน ความเร็วลม การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ และการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของแบบจำลองเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะจริง ดังนั้น ในการพัฒนาต่อในอนาคต ควรมีการนำข้อมูลจากการวัดจริงมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง และปรับเทียบแบบจำลอง โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขการใช้งานจริงของหม้อแปลง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของแบบจำลองใน

บทความวิจัย (Research Article)

การใช้งานภาคสนามต่อไปที่รวมอุณหภูมิแวดล้อม
และสภาพการทำงานจริงของหม้อแปลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำการวิจัยขอขอบคุณวิทยาลัย
เชียงราย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย และเอื้อเพื่อ
ช่วยเหลือในการดำเนินงานเพื่อให้การดำเนินงานวิจัย
ลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Jin, D. Kim, A. Abu-Siada, and S. Kumar, "Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: A review," *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3379, 2022.
- [2] P. Goscinski, Z. Nadolny, R. Nawrowski, and T. Boczar, "The tools and parameters to consider in the design of power transformer cooling systems," *Energies*, vol. 16, no. 24, p. 8000, 2023.
- [3] M. C. Nitu, I. D. Nicolae, L. A. Dina, and P. M. Mircea, "Power transformer inrush current analysis: Simulation, measurement and effects," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 10926, 2024.
- [4] M. S. Seddik, M. B. Eteiba, and J. Shazly, "Evaluating the harmonic effects on the thermal performance of a power transformer," *Energies*, vol. 17, no. 19, p. 4871, 2024.
- [5] I. Smolyanov, E. Shmakov, D. Butusov, and A. I. Khalyasmaa, "Review of modeling approaches for conjugate heat transfer processes in oil-immersed transformers," *Computation*, vol. 12, no. 5, p. 97, 2024.
- [6] M. Mukhammadjonov et al., "Modeling and predicting the thermal state of a transformer through an adaptive intelligent approach," *Vibroengineering Procedia*, vol. 60, pp. 626–633, Dec. 2025.
- [7] L. Yang, M. Wang, L. Chen, F. Zhang, S. Ma, Y. Zhang, and S. Yang, "Method for predicting transformer top oil temperature based on multi-model combination," *Electronics*, vol. 14, no. 14, p. 2855, 2025.
- [8] M. S. Seddik, J. Shazly, and M. B. Eteiba, "Thermal analysis of power transformer using 2D and 3D finite element method," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3203, 2024.
- [9] C. Gao, L. Huang, Y. Feng, E. Gao, Z. Yang, and K. Wang, "Thermal field modeling and characteristic analysis based on oil-immersed transformer," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, no. 1, 2023.
- [10] R. Sitar, I. Šulc, and Ž. Janić, "Prediction of local temperature rise in power transformer tank by FEM," *Procedia Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 231–239, 2017.

บทความวิจัย (Research Article)

- [11] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Std C57.91-2011, 2011.
- [12] M. Ishak and Z. Wang, “Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide,” in *Proceedings of International Conference Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2008)*, 2008, pp. 1017–1020.
- [13] L. H. Medeiros, M. M. Oliveira, C. E. G. Falcão, V. C. Bender, and T. B. Marchesan, “Thermal-hydraulic network model for steady-state thermal analysis and design of power transformer magnetic cores,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 64, 2024.
- [14] Y. Hu, L. Wang, J. Li, H. Weng, Z. Zheng, G. Wen, and F. Zhang, “Predicting the temperature rise in oil-immersed transformers based on the identification of thermal circuit model parameters,” *Energies*, vol. 18, no. 17, p. 4707, 2025.
- [15] S. A. Almohaimeed and S. Suryanarayanan, “Steady-state analysis of the impact of temperature variations on a distribution transformer,” in *Proceedings of North American Power Symposium. (NAPS)*, Morgantown, WV, USA, 2017, pp. 1–5.
- [16] L. Jauregui-Rivera and D. J. Tylavsky, “Acceptability of four transformer top-oil thermal models Part I: Defining metrics,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 860–865, Apr. 2008.
- [17] L. Jauregui-Rivera and D. J. Tylavsky, “Acceptability of four transformer top-oil thermal models Part II: Comparing metrics,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 866–872, Apr. 2008.
- [18] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, “Dynamic thermal modelling of power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, Jan. 2005.
- [19] O. Gouda, G. Amer, and W. A. A. Salem, “Predicting transformer temperature rise and loss of life in the presence of harmonic load currents,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 113–121, 2012.
- [20] D. Zou, H. Xu, H. Quan, J. Yin, Q. Peng, S. Wang, W. Dai, and Z. Hong, “Top-oil temperature prediction of power transformer based on long short-term memory neural network with self-attention mechanism optimized by improved whale optimization algorithm,” *Symmetry*, vol. 16, no. 10, p. 1382, 2024.
- [21] M. Novkovic, Z. Radakovic, F. Torriano, and P. Picher, “Proof of the concept of detailed dynamic thermal-hydraulic network model of liquid-immersed power transformers,” *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3808, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

- [22] M. Xu, B. Shang, N. Zhou, W. Wang, X. Dong, Y. Li, and J. Ruan, “Research on transformer hot-spot temperature inversion method under three-phase unbalanced conditions,” *Energies*, vol. 18, no. 16, p. 4422, 2025.
- [23] T. Orosz, “FEM-based power transformer model for superconducting and conventional power transformer optimization,” *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6177, 2022.
- [24] Q. Gao, Z. Zhang, and D. Liu, “Thermal behavior of a buoyancy-driven oil-immersed transformer and coolant performance assessment,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 2026.
- [25] D. Darzhanova and I. Iatcheva, “Investigation of the temperature field distribution in an EI type iron-cored coil using 3D FEM modeling at different load conditions,” *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4581, 2023.

การออกแบบรถตัดอ้อยต้นแบบที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชัยธูมาจณ์ ชูดวงเกียรติกุล¹, จามร วสุรัตน์มณี¹, ศุภโชค กลัสนิติ¹, ศิริพร สุขกุล², ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์^{1,*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศไทย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: songwit.s@cit.kmutnb.ac.th โทรศัพท์: 091-7787487

(รับบทความ: 21 มกราคม 2569; แก้ไขบทความ: 8 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 18 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำ โดยประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอย ร่วมกับการออกแบบสามมิติและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เพื่อเสนอแนวทางปรับปรุงโครงสร้างก่อนการผลิตจริง โดยใช้ข้อมูลจากรถต้นแบบเดิมมาสร้างแบบจำลองสามมิติ และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง มีการออกแบบชุดตัดอ้อยให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น เพื่อลดการสะสมของเศษวัสดุบริเวณพื้นที่ทำงาน ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างพบว่า ระบบสับยอดอ้อยแบบเดิม มีค่า Yield Strength เท่ากับ 2.83×10^8 Pa และมีค่า Von Mises Stress สูงสุดเท่ากับ 2.67×10^8 Pa ส่งผลให้มีค่าเผื่อความปลอดภัย (Factor of Safety: FoS) เท่ากับ 1.06 ซึ่งอยู่ในระดับใกล้เคียงต่อการครากของวัสดุ ภายหลังการปรับปรุงโครงสร้างพบว่าค่า Von Mises Stress สูงสุดลดลงเหลือ 140.50 MPa และทำให้ค่า FoS เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2.01 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มระดับความปลอดภัยเชิงโครงสร้างและความสามารถในการรองรับสภาวะโหลดผันผวนที่เกิดขึ้นจริงได้ดียิ่งขึ้น และแนวคิดระบบพิเศษใบอ้อยยังช่วยลดโอกาสการติดขัด ที่เกิดจากการสะสมของเศษใบอ้อย ส่งผลให้กระบวนการตัดอ้อยมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ : รถตัดอ้อย วิศวกรรมย้อนรอย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าความปลอดภัยในการออกแบบ

การอ้างอิงบทความ: ชัยธูมาจณ์ ชูดวงเกียรติกุล, จามร วสุรัตน์มณี, ศุภโชค กลัสนิติ, ศิริพร สุขกุล, ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์, "การออกแบบรถตัดอ้อยต้นแบบที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 86-99, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Optimal Design of a Prototype Sugarcane Harvester Using the Finite Element Method

Khanthamat Choodoungkattikul¹, Jamon Wasuratmanee¹, Supachok Klubsati¹,
Siriporn Sukkul², and Songwit Srijunruk^{1,*}

¹ Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research and Development Centre for Space and Aeronautical Science and Technology, Royal Thai Air Force

*Corresponding Author: songwit.s@cit.kmutnb.ac.th, Tel: 091-7787487

(Received: January 21, 2026; Revised: May 8, 2026; Accepted: May 18, 2026)

Abstract

This research aims to develop a prototype of a whole-stalk sugarcane harvester by applying reverse engineering in combination with three-dimensional design and analysis using the Finite Element Method (FEM) to propose structural improvements prior to actual fabrication. Data from the existing prototype were utilized to create a three-dimensional model and to evaluate structural strength. The sugarcane topper cutting unit was designed to enable more continuous operation, to reduce the accumulation of debris within the working area. The structural analysis results indicated that the original sugarcane topping system had a yield strength of 2.83×10^8 Pa and a maximum Von Mises stress of 2.67×10^8 Pa, resulting in a factor of safety (FoS) of 1.06, which is close to the yielding condition of the material. After structural improvement, the maximum Von Mises stress was reduced to 140.50 MPa, and the FoS increased to approximately 2.01, demonstrating an improvement in structural safety and an enhanced capability to withstand fluctuating loading conditions in actual operation. In addition, the concept of a leaf-clearing mechanism helps reduce clogging caused by the accumulation of sugarcane leaves, resulting in a more continuous and efficient harvesting process.

Keywords: Sugarcane Harvester, Reverse Engineering, Finite Element Method, Factor of Safety

Please cite this article as: K. Choodoungkattikul, J. Wasuratmanee, S. Klubsati, S. Sukkul, and S. Srijunruk, "Optimal Design of a Prototype Sugarcane Harvester Using the Finite Element Method," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 86-99, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน (PM2.5) ที่มีค่าสูงเกินกว่าค่ากำหนดมาตรฐาน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพ ปัญหาทางด้านสังคม การดำรงชีวิตและความเป็นอยู่ที่ดี ปราศจากสุขภาพที่ดีและชีวิตที่สุขสมบูรณ์ [1] ในทุกภูมิภาคของประเทศไทยแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน (PM2.5) ที่สำคัญเกิดมาจากการเผาวัสดุทางการเกษตร การเผาในที่โล่งแจ้ง การเผาไหม้ของยานพาหนะขนส่ง และกระบวนการอุตสาหกรรม

การลักลอบเผาไร่อ้อยเพื่อการเก็บเกี่ยวอ้อยไฟไหม้ที่ทำได้ง่ายอย่างต่อเนื่อง โดยการเผาไร่อ้อยก่อนเก็บเกี่ยวนั้นทำนียมเพื่อความสะดวกในการตัดอ้อยของแรงงาน [2] เนื่องจากประเทศไทยถือเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลเป็นอันดับที่ 2 ของโลก โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายประสบปัญหาในการตกเป็นจำเลยในประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมด้าน “การลักลอบเผาอ้อย” อันก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) [3] ทำให้ภาครัฐต้องมีการกำหนดแนวทางและมาตรการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรตัดอ้อยสดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเป็นทางออกสู่ความยั่งยืนของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายควบคู่กับการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดให้โรงงานน้ำตาลรับอ้อยไฟไหม้จากชาวไร่อ้อยทั้งฤดูกาลผลิตไม่เกิน 20% [4] และส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์ใบอ้อยและยอดอ้อยซึ่งส่งผลกับรายได้ของเกษตรกร ในส่วนของเศษซากใบอ้อยสดเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ตกค้างอยู่ในแปลงอ้อยช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้แกดิน รวมถึงเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่ออ้อย [5] โดยในเศษซากใบอ้อยมีปริมาณธาตุอาหารสำคัญ ดังนี้ ธาตุไนโตรเจน 0.49% ฟอสฟอรัส 2.10% โพแทสเซียม 5.80% มีการคลุกเคล้าเศษซากใบอ้อย 1-2 ตันต่อไร่ลงในดินจนมีการย่อยสลายแล้วจะช่วยเพิ่มธาตุไนโตรเจน 4.9-9.8 กิโลกรัมต่อไร่ ฟอสฟอรัส 2.1-4.2

กิโลกรัมต่อไร่ และโพแทสเซียม 5.8-11.6 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีอีกทางหนึ่ง การเผาอ้อยทำให้น้ำหนักหายไปและค่า C.C.S. สูงขึ้นเพียงชั่วคราวจากการควั่นของน้ำอ้อย และถ้าเกิดการขนส่งล่าช้าจะเกิดการเหี่ยวแห้งและน้ำตาลสลายตัวทำให้คุณภาพอ้อยตกต่ำลงอย่างรวดเร็วด้วย [6] ซึ่งการเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นกิจกรรมที่ต้องใช้แรงงานมากและต้องใช้แรงงานมาก คนงานเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นกลุ่มอาชีพผู้ปลูกผักและพืชไร่ อาจเหนื่อยล้าได้ง่ายเนื่องจากความเครียดที่มากเกินไปต่อข้อต่อกระดูกและกล้ามเนื้อ [7] และสัมผัสกับสัตว์รบกวนที่เป็นอันตรายจากสวน ทำให้เกิดข้อกังวลด้านความปลอดภัย ปัจจุบันเกษตรกรจึงเริ่มนำเทคโนโลยีหรือเครื่องจักรมาใช้แทนการจ้างแรงงานคน เพื่อแก้ปัญหาการจ้างแรงงานคนและสามารถอำนวยความสะดวกให้กับเกษตรกรให้สามารถทำงานได้เร็วและสะดวกสบายขึ้น โดยเฉพาะฤดูกาลเก็บเกี่ยวอ้อยจึงมีการแก้ปัญหาด้วยการนำรถตัดอ้อยเข้ามาใช้เพื่อทดแทนแรงงานคน การพัฒนาด้านประสิทธิภาพของการเลือกรถตัดอ้อยให้เหมาะสม [8] ทำให้สามารถตัดอ้อยได้เร็วและทันฤดูกาลเปิดหีบของโรงงานน้ำตาล [9] และการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องจักรยังทำให้สามารถเก็บเกี่ยวอ้อยได้ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้ก่อนการเก็บเกี่ยวซึ่งจำเป็นโดยการเก็บเกี่ยวด้วยมือ [10]

ปัจจุบันมีการนำรถตัดอ้อยเข้ามาใช้ในการเก็บเกี่ยวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดการใช้แรงงาน อย่างไรก็ตาม รถตัดอ้อยส่วนใหญ่เป็นเครื่องจักรที่มีราคาสูงและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ส่งผลให้เกษตรกรรายย่อยไม่สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีดังกล่าวได้ นอกจากนี้ปัญหาสำคัญของรถตัดอ้อยที่ใช้งานในปัจจุบัน คือ การสะสมของเศษใบอ้อยภายในระบบตัด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการติดขัดของระบบและเพิ่มภาระแรงต่อโครงสร้างเครื่องจักร

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องจักรกลก่อนการสร้างต้นแบบจริงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทความวิจัย (Research Article)

(Finite Element Method: FEM) เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของโครงสร้างที่มีรูปทรงซับซ้อน เนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างภายใต้สภาวะการทำงานได้อย่างแม่นยำ [11,12]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างของรถตัดอ้อยโดยใช้ FEM ยังมีจำกัด โดยเฉพาะการออกแบบรถตัดอ้อยต้นแบบที่เหมาะสมกับเกษตรกรรายย่อยในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของรถตัดอ้อยต้นแบบโดยใช้ FEM เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของระบบตัดอ้อยและระบบสับย่อยใบอ้อยให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำโดยประยุกต์วิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับการออกแบบสามมิติ และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความแข็งแรงของโครงสร้างและจุดวิกฤตของระบบตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุงโดยมุ่งลดปัญหาการสะสมเศษใบ และเพิ่มความต่อเนื่องในการทำงาน พร้อมรายงานตัวชี้วัดเชิงวิศวกรรมเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการออกแบบก่อนผลิตต้นแบบจริงซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์นำไปพัฒนาการผลิตรถตัดอ้อยให้กับกลุ่มเกษตรกรชาวไร่อ้อยในประเทศไทยได้อย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยจะใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เป็นกระบวนการ ร่วมกับหลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ หมายถึง การคิดค้น วางแผน เสนอแนะแนวทางในการสร้างสรรค์ (Creativity) [13] และพัฒนา (Development) สิ่งของเครื่องใช้ต่าง ๆ ให้มีประโยชน์ใช้สอย และความงามที่เหมาะสมขึ้น โดยการกระทำให้เกิดรูปแบบการมองเห็นได้ ซึ่งมีกระบวนการหรือขั้นตอนแตกต่างกันไปตามลักษณะ

ของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สอดคล้องกับหลักการการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 1 [14] หลังจากได้พัฒนาตามหลักการออกแบบแล้วจึงนำไปสู่ขั้นตอนการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพด้านการใช้งานที่ดีกว่าเดิม หรือเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abdulshaheed et al. [15] ได้ทำการออกแบบ 3 มิติ และใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยของใบพัดซึ่งเป็นวัสดุหนึ่งในปั้มน้ำรูปหอยโข่ง (Pump as Turbine) ซึ่งเป็นรูปแบบของการพัฒนาจากชิ้นส่วนเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยปกติจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือตัวผลิตภัณฑ์ จัดได้ว่าเป็นกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนเดิมที่มีอยู่โดยใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรมที่ได้รับความนิยมของนักวิศวกรการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์หาความแข็งแรงในส่วน of ระบบตัดอ้อย

2.1. กระบวนการวางแผนออกแบบโครงสร้างรถตัดอ้อย

รถตัดอ้อยที่ใช้อยู่โดยทั่วไป มีด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ รถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำ และรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นท่อน ซึ่งทั้ง 2 ประเภท มีลักษณะที่แตกต่างกันในส่วนของระบบการทำงาน แต่มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันทั้งวัสดุ และชิ้นส่วนอะไหล่ รวมถึงมาตรฐานการผลิตดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของรถตัดอ้อยให้มีประสิทธิภาพดี และเป็นไปตามกำลังของเครื่องยนต์ที่ได้รับการออกแบบ ซึ่งรถตัดอ้อยที่เหมาะสมกับการใช้งานจะเป็นรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำ เนื่องจากมีการใช้งานง่าย ค่าบำรุงรักษาในระยะยาวถูกกว่าแบบตัดเป็นท่อนค่อนข้างมาก การดูแลรักษาง่าย ไม่ซับซ้อน อีกทั้งเกษตรกรไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักอ้อยในระหว่างการเก็บเกี่ยวอีกด้วย ดังนั้นจึงเกิดการวิเคราะห์ต้นแบบของรถตัดเป็นลำเพื่อนำมาพัฒนา

บทความวิจัย (Research Article)

ระบบการทำงานให้มีประสิทธิภาพ สามารถทำงานได้ครบวงจร และนำเอาระบบบางส่วนจากแบบตัดเป็นท่อนมาพัฒนาเข้ากับรถตัดอ้อยชนิดนี้ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้เกิดแรงงูใจในการใช้งานของเกษตรกรในกลุ่มเป้าหมาย อีกทั้งยังส่งเสริมการผลิตและใช้งานอย่างแพร่หลายในกลุ่มเกษตรกรเป้าหมาย รวมไปถึงเชิงพาณิชย์ที่โรงงานน้ำตาลสามารถกระจายการใช้งานไปสู่เกษตรกรชาวไร่อ้อยได้อีกด้วย

2.2 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์รถตัดอ้อยแบบเดิม

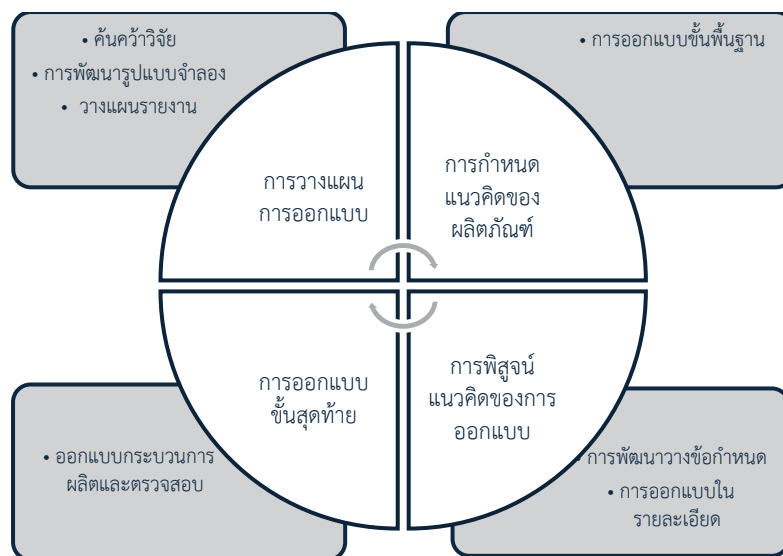
วิเคราะห์ความแข็งแรงทางวิศวกรรมทางโครงสร้างของรถ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sookramoon et al. [16] และ Khumwong and Boripatkosol [17] ในการออกแบบแชสซีสำหรับพาหนะการเกษตร โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างรถตัดอ้อยด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 โดยอ้างอิงข้อมูลจากการวัดขนาดชิ้นส่วนจริงและกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เพื่อให้ได้รูปแบบทางเรขาคณิตที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยโครงสร้างหลักของรถ ชุดตัดอ้อย ชุดขับเคลื่อน ชุดแชสซีชุดขับเคลื่อน ย่อยใบอ้อย และตำแหน่งติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยชิ้นส่วนที่ไม่ส่งผลโดยตรงต่อการรับแรงของโครงสร้างได้ถูกลดทอนรายละเอียดทางเรขาคณิต (Geometry Simplification) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองช่วยให้การคำนวณวิเคราะห์มีความเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันการ Simulation ประเภท Static Analysis พฤติกรรมเชิงโครงสร้างภายใต้สภาวะแรงคงที่ ที่เป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงเพื่อคำนวณหาความแข็งแรง โดยทำการวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ จากค่า Von Mises หรือค่าความเครียดที่กระทำในวัสดุ ซึ่งถ้าถึงจุด Yield Point จะทำให้ชิ้นงานเสียรูปและเสียหาย

ได้อย่างถาวร โดยมีหน่วยเป็น N/m^2 พบว่า โครงสร้างของรถสามารถรองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนอะไหล่ได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย ซึ่งมีค่าความเค้นแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ที่มากกว่าค่าความเค้นของวัสดุที่เกิดขึ้นจริง (Stress) ของโครงสร้างรถ ซึ่งมีค่าที่มากกว่า 1 ที่แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนั้นจะไม่เกิดความเสียหาย ในการกำหนด Boundary Conditions ของการ Simulation ได้กำหนดตำแหน่งจุดยึดโครงสร้างหลักของรถตัดอ้อยให้เป็นลักษณะ Fixed Geometry เพื่อจำลองสภาวะการยึดติดของโครงสร้างกับตัวรถจริง และลดการเคลื่อนที่ในทุกแกน ส่วนของการกำหนดแรงกระทำ External Load ได้กำหนด Force ที่กระทำบริเวณชุดแชสซีชุดขับเคลื่อนและตำแหน่งรองรับใบตัด ซึ่งเป็นบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการรับแรงสูงจากกระบวนการตัดและการลำเลียงต้นอ้อยเข้าสู่ระบบตัด โดยทิศทางของแรงถูกกำหนดให้สอดคล้องกับแนวแรงที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการทำงานของชุดตัดอ้อย นอกจากนี้ยังได้กำหนดแรงเพิ่มเติมบริเวณจุดติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อน เพื่อจำลองผลของแรงบิดและน้ำหนักที่ถ่ายเข้าสู่โครงสร้างหลักระหว่างการทำงาน โดยกำหนดให้วัสดุโครงสร้างหลักของรถตัดอ้อย แสดงในตารางที่ 1

2.3 ออกแบบจำลองรถตัดอ้อยแบบใหม่

จากที่โครงสร้างรถเดิมสามารถรองรับการเพิ่มของชิ้นส่วนเพื่อการพัฒนาที่มีประสิทธิภาพได้ จึงดำเนินการออกแบบและเขียนแบบรถตัดอ้อยสร้างแบบจำลองสามมิติของชิ้นส่วนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 เพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ของโครงสร้างต้นแบบเดิม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลทางวิศวกรรมระหว่างแบบเดิมและแบบที่ได้รับการปรับปรุงได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4 ในส่วนที่ได้รับการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่จะต้องทำการปรับปรุงพัฒนาคือส่วนของระบบรองรับการตัดอ้อย

บทความวิจัย (Research Article)

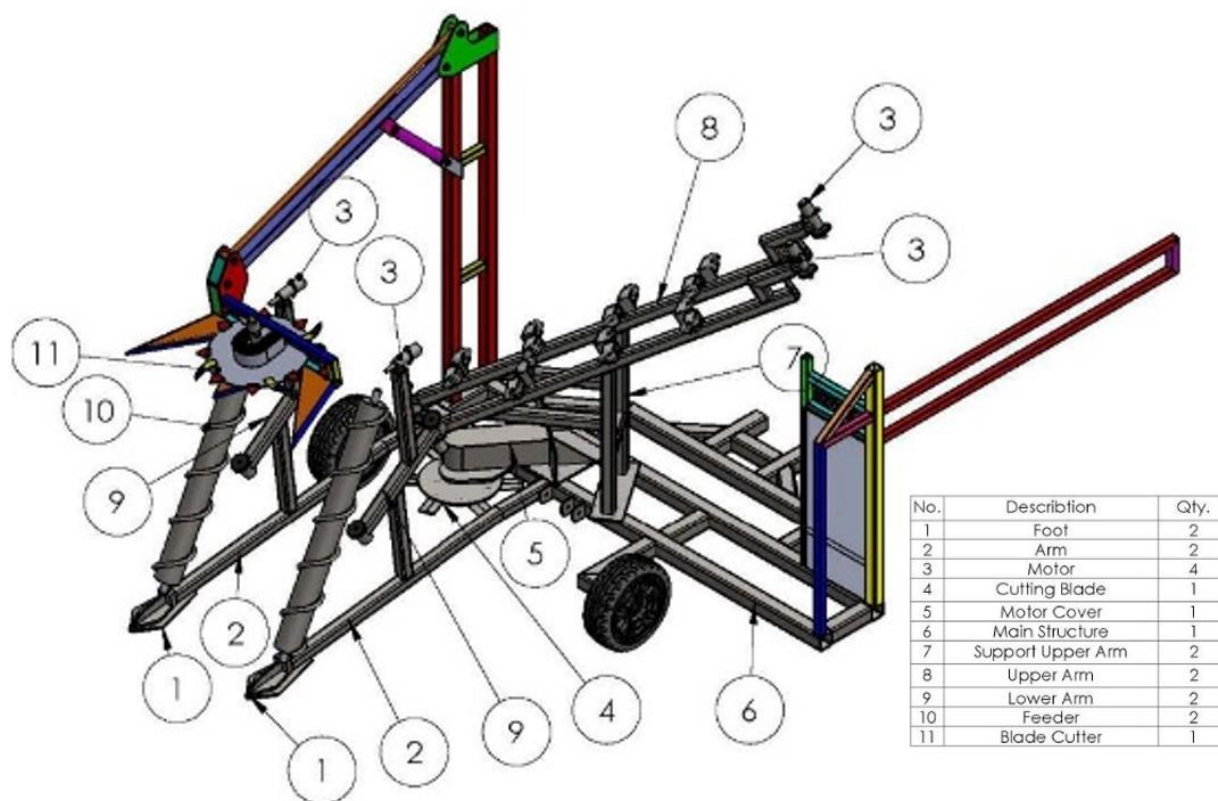


รูปที่ 1 ผังวงจรกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์

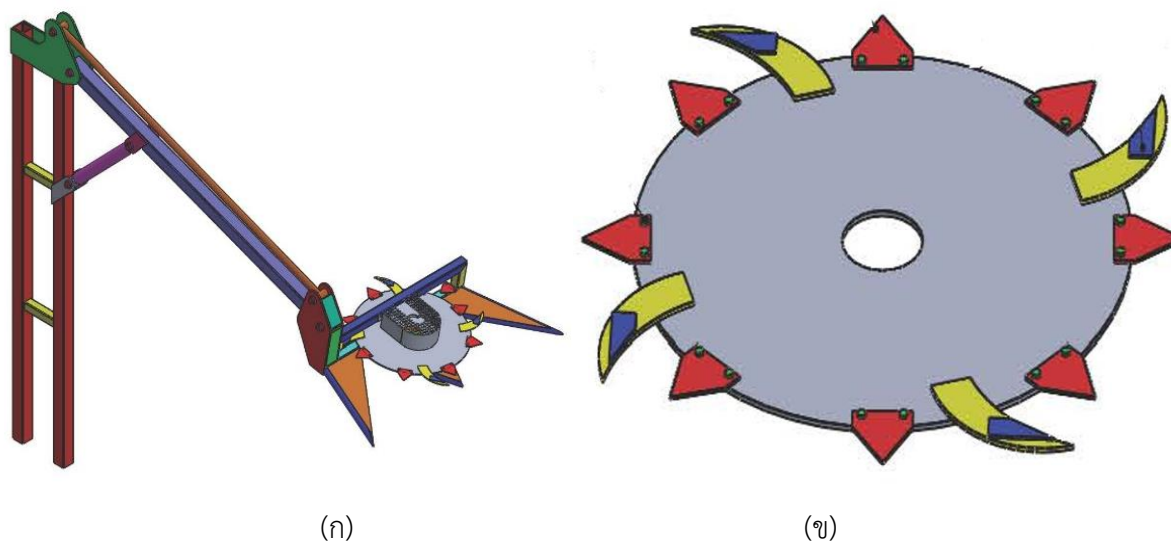
ตารางที่ 1 ข้อมูลกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

หมวดหมู่	พารามิเตอร์ (Parameter)	รายละเอียด (Specification)
Material Model	Material Name	SS400 (Structural Steel)
	Analysis Model Type	Linear Elastic Isotropic
	Modulus of Elasticity	200 GPa (2×10^{11} N/m ²)
	Poisson's Ratio	0.3
	Mass Density	7,850 kg/m ³
	Yield Strength	283 MPa (2.83×10^8 N/m ²)
Mesh Generation	Element Type	High-order Quadratic Solid Element
	Total Elements	88,206
	Total Nodes	177,942
	Max/Min Element Size	20 mm / 1.25076 mm
	Jacobian Points	16 points
Mesh Quality	Aspect Ratio (Average)	7.1635
	Aspect Ratio < 3 (%)	89.20%

บทความวิจัย (Research Article)

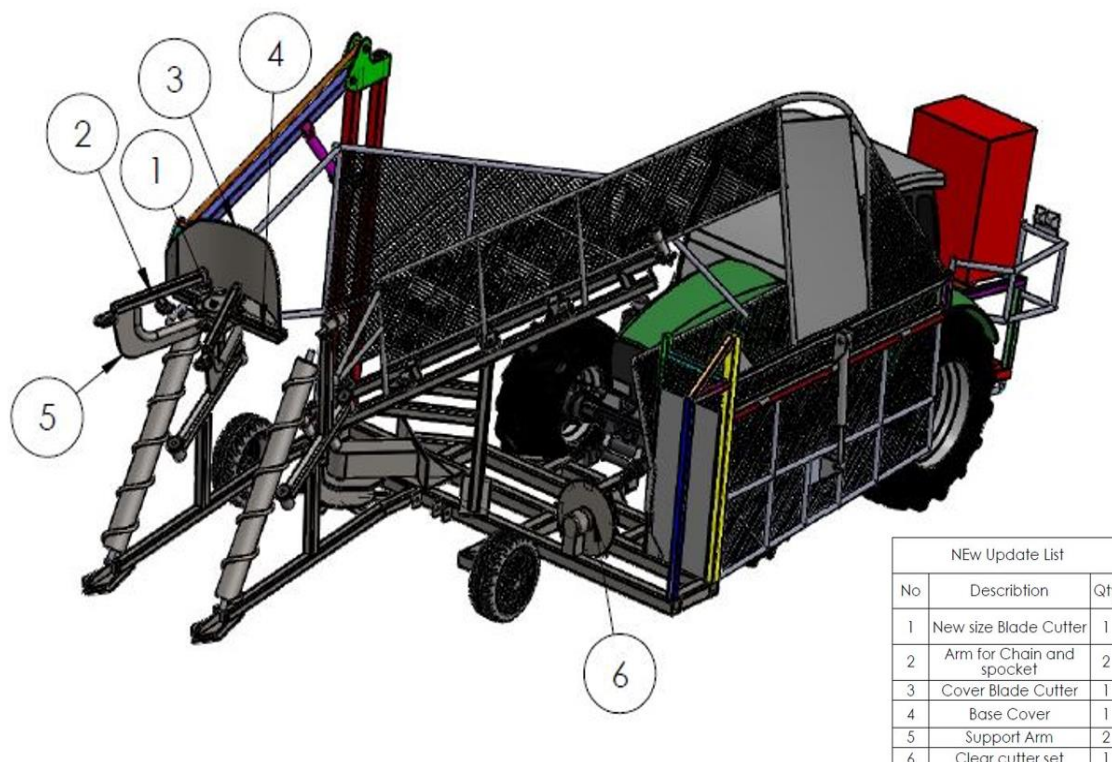


รูปที่ 2 การถอดแบบโครงสร้างส่วนประกอบรถตัดอ้อย

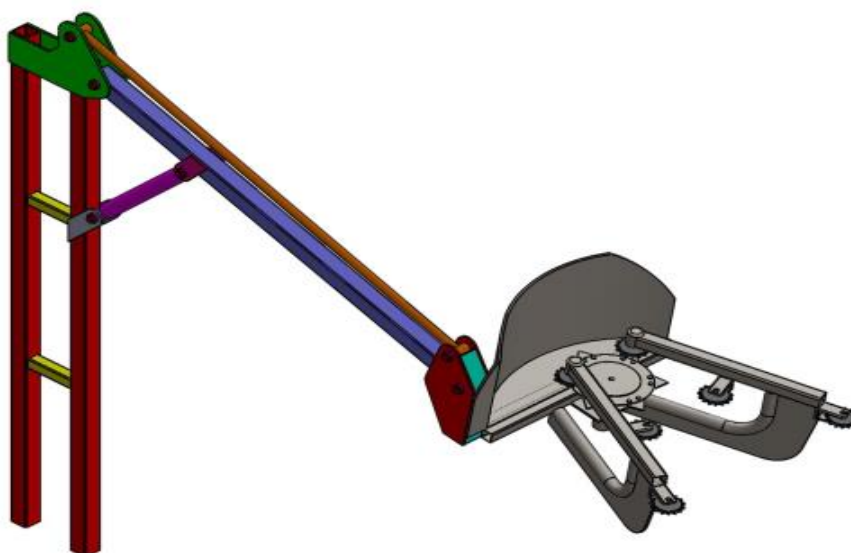


รูปที่ 3 ชิ้นส่วนอะไหล่ของ (ก) ระบบตัดอ้อย (ข) ใบมีดของระบบสับย่อยใบ

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 แบบจำลองรถตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง



รูปที่ 5 ชุดตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง

2.4 ระบบตัดอ้อย

จากรูปที่ 4 หมายเลขชิ้นส่วนหมายเลข 1-5 ออกแบบให้มีการปรับเปลี่ยนขนาดของใบตัดอ้อยและ

การพัฒนาลักษณะของตัวปากที่ใช้ลำเลียงตัวต้นอ้อยเข้าสู่ใบตัด ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นหลักปากกว้างปลายแคบเช่นเดิม แต่มีการเพิ่มใบตัดขนาดเล็ก (New Size Blade Cutter) ประกอบเข้าไปในส่วนของแขนใบตัดที่

บทความวิจัย (Research Article)

มีการพัฒนาใหม่ (Arm for Chain and Sprocket) เพื่อช่วยในการตัดย่อยใบอ้อย นอกจากนี้ได้มีออกแบบตัวฝาครอบ (Cover Blade Cutter) ที่มีหน้าที่ป้องกันเศษใบอ้อยไปสะสมที่ตัวเครื่องทั้งด้านบนและด้านล่างของสายพาน ซึ่งจากลักษณะโค้งงอของตัวฝาครอบจะบังคับและดันเศษใบอ้อยให้ออกไปทางด้านข้างของตัวเครื่องแทน ดังนั้นส่วนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นแสดงใน รูปที่ 5

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของรถตัดอ้อยที่ได้รับการพัฒนา

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาประเมินความเหมาะสมของการออกแบบโดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Equivalent Stress) ที่เกิดขึ้นกับค่าความเค้นแรงดึงที่จุดครากของวัสดุ (Yield Strength) ที่ใช้ในการผลิตโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ในโครงสร้างหลักของรถตัดอ้อยเป็นเหล็กโครงสร้าง ซึ่งมีค่าความเค้นครากประมาณ 283 MPa ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกล ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงต้องต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ เพื่อป้องกันการเสียรูปถาวรของโครงสร้าง [18,19] ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ในระบบตัดอ้อย พบว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุอย่างชัดเจน ส่งผลให้โครงสร้างสามารถทำงานได้ภายใต้ช่วงเขตการยอมรับได้ และมีค่าความปลอดภัยในการออกแบบ (Factor of Safety : FoS) มากกว่า 1 และในระบบสับย่อยใบ โดยมีวิธีการคำนวณค่า FoS ดังแสดงที่สมการที่ 1

$$FoS = Yield\ Strength / Von\ Mises\ Stress \quad (1)$$

เมื่อ ;

Yield Strength = ค่าความเค้นแรงดึงที่จุดคราก

Von Mises Stress = ค่าความเครียดที่กระทำในวัสดุ

โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังคงอยู่ต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ออกแบบสามารถรองรับแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำงานได้โดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร ดังนั้นผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถยืนยันได้ว่าโครงสร้างของระบบมีความแข็งแรงเพียงพอและอยู่ในช่วงเขตการยอมรับได้สำหรับการใช้งานจริงของรถตัดอ้อยต้นแบบ

3.2. ค่าความเค้นและความปลอดภัยในการทำงาน

การประเมินความปลอดภัยเชิงโครงสร้างของชุดตัดอ้อยโดยสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 และวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่กำหนด จากนั้นพิจารณาค่า Maximum Von Mises Stress เปรียบเทียบกับค่า Yield Strength และคำนวณค่า: FoS โดยผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 6 สำหรับแบบเดิม ผลการจำลองให้ค่า Yield Strength เท่ากับ 2.83×10^8 Pa และค่า Von Mises Stress สูงสุดเท่ากับ 2.67×10^8 Pa ทำให้ได้ค่า $FoS = 1.06$ ซึ่งพบว่าโครงสร้างมีระยะเผื่อก่อนถึงจุดครากมีค่าที่ต่ำกว่าประมาณ 6% โดยอาจส่งผลให้เกิดสภาวะโหลดผันผวนในงานจริง เช่น การติดขัดจากเศษใบอ้อยหรือแรงกระแทกช่วงเริ่มตัดอาจทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้การเสียรูปถาวรได้

หลังการปรับปรุงแบบรถตัดอ้อยใหม่โดยออกแบบเป็นหลักปากกว้างปลายแคบเช่นเดิม แต่มีการเพิ่มใบตัดขนาดเล็ก และส่วนฝาครอบ เพื่อช่วยลดภาระโหลดของใบมีดสับอ้อย พบว่าค่า Von Mises Stress สูงสุดลดลงเหลือ 140.50 MPa เมื่อ

บทความวิจัย (Research Article)

พิจารณาร่วมกับค่า Yield Strength ของวัสดุเดิม ที่ค่าประมาณ 283 MPa ส่งผลให้ค่า FoS เพิ่มขึ้นเป็น 2.01 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ FoS แสดงถึงความสามารถในการรองรับแรงที่สูงขึ้นและมีระยะเผื่อก่อนถึงจุดครากมีค่าที่เพิ่มขึ้น [20,21]

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองรถตัดอ้อยแบบดั้งเดิมและแบบที่ได้รับการปรับปรุง

Parameter	แบบเก่า	แบบปรับปรุง
ระบบตัดอ้อย	แบบเดิม ใบตัดของระบบสับย่อย ใบขนาดใหญ่	แบบปรับปรุง มีการเพิ่มใบตัดขนาดเล็กเข้าไปในส่วนของแกนใบตัด และมีตัวฝาครอบป้องกันเศษใบอ้อยไปสะสมที่ตัวเครื่อง
ค่า Von Mises Stress สูงสุด (MPa)	2.67×10^8 Pa	140.50
ค่า Yield Strength ที่ใช้คำนวณ (MPa)	2.83×10^8 Pa	283 (ฐานวัสดุเดียวกัน)
Factor of Safety, FoS	1.06	2.01
Margin to Yield	$\approx 6\%$	$\approx 101\%$
แนวโน้มการกระจุกตัวของความเค้น	กระจุกตัวบริเวณจุดยึด/แขนชุดตัด ทำให้เสี่ยงล้าตัวเร็ว	กระจายตัวดีขึ้นจากการจัดเส้นทางแรงและการเสริมโครงสร้าง
การสะสมเศษใบอ้อยในระบบตัด	มีการสะสมสูง ทำให้ติดขัด/หยุดเครื่อง	ลดลงจากฝาครอบป้องกันเศษใบอ้อย
เสถียรภาพการทำงาน (Operational stability)	มีโอกาสติดขัด ส่งผลต่อความต่อเนื่องการเก็บเกี่ยว	ทำงานต่อเนื่องดีขึ้น ลดการหยุดทำงาน

4. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

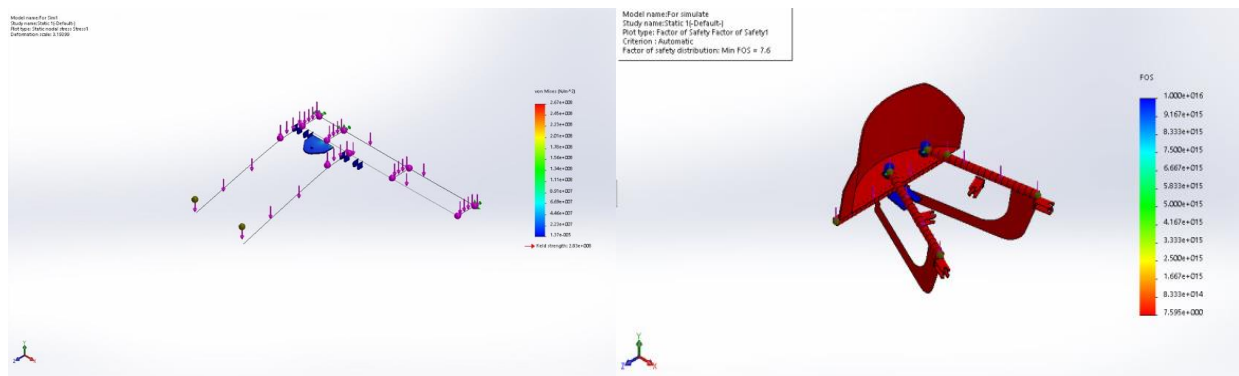
งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับการออกแบบสามมิติและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อใช้ผลเชิงโครงสร้างในการปรับปรุงชิ้นส่วนสำคัญของรถตัดอ้อยก่อนการผลิตต้นแบบจริง โดยแก้ปัญหาเชิงการใช้งาน ได้แก่ การสะสมเศษใบอ้อยในระบบตัดซึ่งนำไปสู่การติดขัดและการหยุดเครื่องระหว่างการทำงาน ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวช่วยให้การปรับปรุงแบบมีหลักฐานเชิงวิศวกรรมรองรับ และลดความเสี่ยงด้านความแข็งแรงของโครงสร้างเมื่อมีการเพิ่มและปรับองค์ประกอบของ

ระบบตัดอ้อยใบอ้อย ผลการวิเคราะห์ FEM ในส่วนชุดตัดอ้อยแสดงแนวโน้มชัดเจนว่าแบบเดิมมีระยะเผื่อความปลอดภัยต่อจุดครากค่อนข้างต่ำกว่าแบบที่มีการปรับปรุงใหม่ซึ่งมีความเค้นสะสมลดลงและค่าเผื่อความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ผลสรุปโครงสร้างหลังปรับปรุงมีความพร้อมรองรับสภาวะโหลดที่ผันผวนได้ดีกว่า เช่น โหลดกระชากจากการติดขัดของเศษใบอ้อยหรือแรงกระแทกช่วงเริ่มตัด การเปรียบเทียบผ่านรูปที่ 6–7 และตารางที่ 2 ช่วยให้เห็นความแตกต่างทั้งเชิงปริมาณและเชิงพฤติกรรมการกระจายความเค้นของโครงสร้างได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาเชิงกลศาสตร์การปรับปรุง

บทความวิจัย (Research Article)

ระบบตัดยอดโดยเพิ่มองค์ประกอบด้านการป้องกันการสะสมเศษใบ มีแนวโน้มช่วยลดโอกาสเกิดสภาวะอุดตันกับติดขัด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโหลดที่พุ่งสูงแบบฉับพลัน นอกจากนี้ การเพิ่มและปรับชิ้นส่วนในตำแหน่งสำคัญของชุดตัดยอดยังเอื้อต่อการกระจายเส้นทางการถ่ายแรง (Load Path) ให้เหมาะสมขึ้น ลด

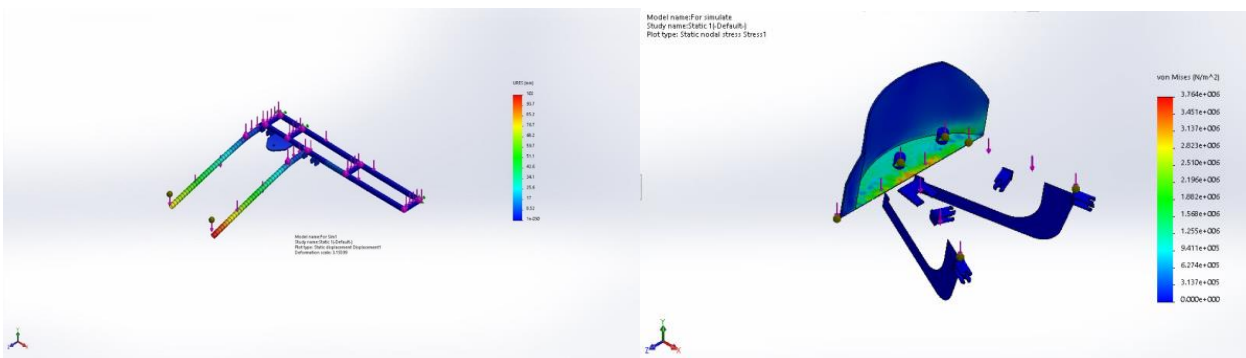
การกระจุกตัวของความเค้นบริเวณจุดยึดกับแขนชุดตัด และช่วยเพิ่มเสถียรภาพการทำงานต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานที่พัฒนาต้นแบบรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำ โดยวิเคราะห์ความปลอดภัยเชิงโครงสร้างของรถตัดอ้อยด้วยผล FEM เป็นเกณฑ์ยืนยันความเหมาะสมก่อนการผลิตจริง



(ก)

(ข)

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยในการทำงาน (ก) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหลักของรถตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง (ข) ผลการวิเคราะห์ระบบตัดยอดของรถตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง



(ก)

(ข)

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นเสียหายสูงสุด (ก) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหลักของรถตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง (ข) ผลการวิเคราะห์ระบบตัดยอดของรถตัดอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบรถตัดอ้อยแบบตัดเป็นลำโดยใช้วิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับการ

ออกแบบสามมิติและการวิเคราะห์ FEM เพื่อยืนยันความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของชิ้นส่วนสำคัญและสนับสนุนการตัดสินใจปรับปรุงแบบก่อนการผลิตจริง

บทความวิจัย (Research Article)

โดยมุ่งแก้ปัญหาการสะสมเศษใบอ้อยในระบบตัดซึ่งเป็นสาเหตุของการติดขัดและการหยุดเครื่องระหว่างการเก็บเกี่ยว ผลการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบชี้ว่าแบบปรับปรุงให้แนวโน้มความเค้นลดลงและค่าเพื่อความปลอดภัยสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแบบเดิมบ่งบอกถึงการยกระดับความปลอดภัยเชิงโครงสร้างและความพร้อมต่อสภาวะโหลตผันผวนในงานจริง โดยการปรับปรุงเชิงระบบประกอบด้วย (1) การพัฒนาระบบตัดย่อยด้วยการเพิ่มองค์ประกอบช่วยลดการสะสมเศษใบและเพิ่มความต่อเนื่องในการทำงาน และ (2) การเพิ่มชุดใบมีดในระบบสับย่อยใบอ้อยเพื่อลดการอุดตันจากเศษวัสดุ โดยงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและตรวจสอบเชิงวิศวกรรมสำหรับการพัฒนาเครื่องจักรกลการเกษตรภายในประเทศ นอกจากนี้เกษตรกรหรือหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมเครื่องจักรกลการเกษตรสามารถนำผลการศึกษานี้ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวอ้อยให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง ลดต้นทุนแรงงานและเพิ่มประสิทธิภาพในภาคการเกษตรต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ หจก.ภาวนายนต์ ที่ให้ออกเอกสารข้อมูลและการผลิตต้นแบบรถตัดอ้อยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wasuratmanee *et al.*, “Design and Fabrication of a Dust Extraction Interface for PM2.5 and PM10 Reduction in Wood Planers”, in *CreTech 2025*, Rayong, Thailand: Proceeding, Aug. 2025, pp. 141–152. (in Thai)
- [2] A. Srisuphatthanakul, and P. Phetcharat, “Expanding learning results on the process of solving problems to reduce sugarcane burning “Sa Kao Model” to sugarcane farmers in Mueang Kamphaeng Phet District Kamphaeng Phet Province”, *Phikun Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 1–22, 2024. (in Thai)
- [3] S. Khetjoi, W. Thasa, S. Raisa-nguan, and S. Khatjoi, “Impact of Burning Sugarcane Leaves Polluted PM 2.5 in Nai Mueang Sub-district, Wiang Kao District, Khon Kaen Province”, *Journal of Buddhist Education and Research*, vol. 7, no. 1, pp. 16–25, Jan. 2021. (in Thai)
- [4] Office of the Cane and Sugar Board (OCSB), “Regulation of the Cane and Sugar Board on Sugarcane Cutting and Delivery to Factories, Sugarcane Quality Inspection, and Receiving Sugarcane from Farmers or Farmer Group Leaders (No. 3) B.E. 2563 (2020)”, Bangkok, Mar. 2020. (in Thai)
- [5] P. Mingmit, C. Thongjoo, J. Roomkaew, S. Rungmekara, and T. Inboonchuay, “Effect of Fertilizer Management in Combination with Boron on Growth and Yield of Sugarcane”, *Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2018. (in Thai)
- [6] A. Boonthum, J. Arree, C. Lairungreung, and D. Sophanodora, “Effect of leaving burnt cane in the field on yield and quality of sugarcane”, *Agriculture and*

บทความวิจัย (Research Article)

- Natural Resources*, vol. 31, no. 2, pp. 224–231, 1997. (in Thai)
- 105278, May 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105278.
- [7] S. Kulwong, J. Mapakdee2, K. Umpaarat, P. Timsuwan, M. Sintipong, S. Chanopprakarn, I. Saelai, and N. Pattarabudha, “Factors Associated with Back Pain Symptom of Cassava Farmers”, *Safety & Environment Review*, vol. 32, no. 2, pp. 12–22, 2023. (in Thai)
- [8] P. Jitmun, R. Karoonboonyanan, and A. Wongtamee, “Performance Evaluation of Sugarcane Harvester in Lower North Region of Thailand”, *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 1–10, 2024. (in Thai)
- [9] K. Kosum, K. Suvanapa, and V. Whanguanklang, “A Study on Qualitative Losses in Sugarcane Harvester”, *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, vol. 12, no. 16, pp. 26–36, 2020. (in Thai)
- [10] O. Braunbeck, A. Bauen, F. Rosillo-Calle, and L. Cortez, “Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil”, *Biomass Bioenergy*, vol. 17, no. 6, pp. 495–506, 1999.
- [11] A. L. Saldaña-Robles, A. Bustos-Gaytán, J.A. Diosdado-De la Peña, A. Saldaña-Robles, V. Alcántar-Camarena, A. Balvantín-García, and N. Saldaña-Robles, “Structural design of an agricultural backhoe using TA, FEA, RSM and ANN”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 172, p. 105278, May 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105278.
- [12] H. Zhao, Y. Huang, Z. Liu, W. Liu, and Z. Zheng, “Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review”, *Agriculture*, vol. 11, no. 5, p. 425, May 2021, doi: 10.3390/agriculture11050425.
- [13] T. Phoungmanee, W. Yamyim, I. Chaikulap, K. Pumsin, K. Harakhun, and N. Keawongsa, “Souvenir Products from Identity of Loei Rajabhat University: Guidelines for Designing Prototype Products Based on Soft Power Concept”, *Research and Development Journal Loei Rajabhat University*, vol. 19, no. 69, pp. 15–23, 2024. (in Thai)
- [14] T. Keawpan, S. Itsaranuwat, and J. Plangnok, “Principles and concepts in product design”, *Journal of Humanities and Social Sciences, Surindra Rajabhat University*, vol. 22, no. 2, pp. 161–182, 2020. (in Thai)
- [15] A. Abdulshaheed, F. Mustapha, S. S. Dol, K. A. Ahmad, M. Mustapha, and M. Anuar, “Reverse engineering of impellers to reduce pipe network pressure and enable sustainable power generation using pumps as turbines (PATs)”, *Results in Engineering*, vol. 28, p. 108124, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108124.
- [16] K. Sookramoon, S. Bunchoowit, W. Permchart, C. Suetrong, and S. Kingthong, “Finite Element Investigation

บทความวิจัย (Research Article)

- on Chassis Design for Agricultural Vehicle”, *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, vol. 11, no. 1, pp. 94–106, 2023. (in Thai)
- [17] P. Khumwong and S. Boripatkosol, “Strength Analysis of Beams of a Tank Semi-trailer Using the Finite Element Method”, *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, vol. 22, no. 4, pp. 65–77, 2022. (in Thai)
- [18] A. Jahanbakhshi and K. Heidarbeigi, “Simulation and Mechanical Stress Analysis of the Lower Link Arm of a Tractor Using Finite Element Method”, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 6, pp. 1666–1672, Dec. 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00763-2.
- [19] V. Hruban, A. Drobitko, M. Khramov, and M. Tovpyha, “Strength analysis and optimisation of trailer agricultural machinery structures using finite element methods”, *Machinery & Energetics*, vol. 16, no. 2, pp. 117–130, Feb. 2025, doi: 10.31548/machinery/2.2025.117.
- [20] S. Bakshi, K. Ingale, A. Jain, and S. Karuppudiyani, “Design and Development of Bio-Sensitive Robotic Arm using Gesture Control”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 912, no. 3, p. 032062, Aug. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/912/3/032062.
- [21] E. Menacho-Mendoza, R. Cedamano-Cuenca, and A. Díaz-Suyo, “Stress analysis and factor of safety in three dental implant systems by finite element analysis”, *The Saudi Dental Journal*, vol. 34, no. 7, pp. 579–584, 2022, doi: 10.1016/j.sdentj.2022.08.006.

บทความวิจัย (Research Article)

รูปแบบการเขียนบทความวิจัยในวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์

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

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

³ สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

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

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

บทคัดย่อ

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

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

บทความวิจัย (Research Article)

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

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

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

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

ดังนั้น เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพและเพื่อให้การจัดทำเอกสารเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผู้ที่ส่งบทความควรพิมพ์บทความตามรูปแบบและแนวทางที่กำหนดจากทางวารสารอย่างเคร่งครัด

2. รูปแบบของบทความฉบับเต็ม

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

2.1 ขนาดและการตั้งค่าหน้ากระดาษ

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

ริมขอบกระดาษด้านบน	30 มม.
ริมขอบกระดาษด้านล่าง	20 มม.

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

ความยาวโดยรวมของบทความควรอยู่ในช่วง 7-12 หน้ากระดาษ แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ

2.2. ชื่อบทความและรายละเอียดของผู้เขียน

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

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

2.3 กรณียกเว้นบทความภาษาอังกฤษ

ผู้เขียนบทความเป็นภาษาอังกฤษ จะใช้รูปแบบและขนาดของตัวอักษร และรูปแบบของบทความแบบเดียวกันกับบทความที่เขียนเป็นภาษาไทย แต่ไม่ให้มีภาษาไทยแทรกอยู่ในบทความนั้นๆ ยกเว้นชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และบทคัดย่อ

บทความวิจัย (Research Article)

3. บทคัดย่อและคำสำคัญ

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

4. เนื้อหาของบทความ

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

4.1 หัวข้อหลัก

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

4.2 หัวข้อย่อยและหัวข้อย่อยรองลงมา

กำหนดให้ใช้ตัวอักษรตัวหนาขนาด 16pt ในการพิมพ์หัวข้อย่อยและหัวข้อย่อยรองลงมา และให้พิมพ์ชิดริมซ้ายของคอลัมน์

4.3 หลักเกณฑ์ในการเขียนหน่วยในบทความ

เพื่อให้บทความวิชาการมีความชัดเจนและเป็นมาตรฐาน ควรปฏิบัติตามหลักเกณฑ์การเขียนหน่วยดังนี้:

4.3.1. การเขียนหน่วยเต็มและสัญลักษณ์ในครั้งแรก

- ในครั้งแรกที่ใช้หน่วย ให้เขียนชื่อหน่วยเต็มพร้อมกับสัญลักษณ์ในวงเล็บ

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

4.3.2. การใช้สัญลักษณ์ในครั้งต่อไป

- หลังจากที่ได้อธิบายหน่วยเต็มในครั้งแรกแล้วสามารถใช้เฉพาะสัญลักษณ์ในครั้งต่อไป

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

4.3.3. การเขียนหน่วยที่มีการยกกำลัง

- ใช้สัญลักษณ์มาตรฐานของหน่วยนั้น ๆ และเขียนการยกกำลังในรูปแบบที่ถูกต้อง

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

4.3.4. การจัดทำตารางสัญลักษณ์

- ถ้าหน่วยที่ใช้มีจำนวนมากหรือซับซ้อน สามารถจัดทำตารางอธิบายสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทความในส่วนภาคผนวกหรือในบทนำ

- ตัวอย่าง:

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

4.3.5. การรักษาความสม่ำเสมอ

- ใช้สัญลักษณ์ที่ได้อธิบายไว้ในบทความให้สม่ำเสมอ ไม่ควรเปลี่ยนรูปแบบการเขียนในส่วนต่างๆ ของบทความ

5. รูปภาพ ตาราง และสมการ

5.1 รูปภาพและตาราง

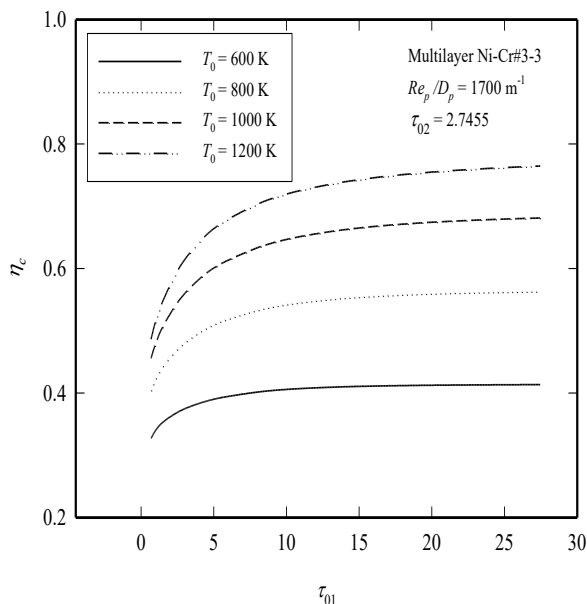
การนำเสนอรูปภาพและตารางสามารถนำเสนอต่อจากข้อความที่กล่าวถึงหรืออาจนำเสนอภายหลังจากจบหัวข้อหรือนำเสนอในหน้าใหม่ ขนาดของรูปภาพและตารางไม่ควรเกินกรอบของคอลัมน์ แต่หากรูปภาพและตารางมีขนาดใหญ่สามารถวางรูป

บทความวิจัย (Research Article)

และตารางให้ครอบคลุมพื้นที่ของทั้ง 2 คอลัมน์ได้ แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกินกรอบของการตั้งค่าน้ำกระดาษที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.1

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

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



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการแปลงรังสีความร้อนกับความหนาเชิงแสงของชั้นวัสดุพูน

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำมันปิโตรเลียมในแต่ละภาคเศรษฐกิจ ๆ ของประเทศไทย (หน่วย: ล้านลิตร)

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

5.2 สมการ

การเขียนสมการ มีหลักการใช้ font ดังนี้

ตัวแปร ใช้ตัวอักษรเอียง (p, β, v)

ข้อความ ใช้ตัวอักษรตรง (Constant)

ตัวเลข ใช้ตัวอักษรตรง (12345)

สมการให้เขียนไว้กึ่งกลางคอลัมน์และมีการระบุลำดับของสมการโดยใช้ตัวเลขที่พิมพ์อยู่ในวงเล็บ เช่น (1), (2) เป็นต้น

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

เมื่อ p คือ ความดัน, N/m²

v คือ ความเร็ว, m/s

z คือ ระดับความสูง, m

6. กิตติกรรมประกาศ

หากต้องการเขียนกิตติกรรมประกาศเพื่อขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเขียนได้ โดยให้อยู่หลังเนื้อหาหลักของบทความและก่อนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย (Research Article)

7. การเขียนเอกสารอ้างอิง

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

การเขียนชื่อผู้แต่ง

ภาษาไทย

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

ภาษาอังกฤษ

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

การอ้างอิงหนังสือ (Book)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงหนังสือที่มีบรรณาธิการ (Edited Book)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงบทจากหนังสือที่มีบรรณาธิการ (Chapter from an Edited Book)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

บทความวิจัย (Research Article)

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-book)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงบทความในวารสาร (Journal Article)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

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

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

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

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

การอ้างอิงเอกสารในงานประชุม (Conference Paper)

ภาษาไทย

บทความวิจัย (Research Article)

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

ตัวอย่าง:

- [15] ปองพล รูปทอง และ แก้วใจ อาภรณ์พิศาล, "ระบบจัดการข้อมูลซื้อขายอุปกรณ์ทางการเกษตร กรณีศึกษาร้านยางเจริญการค้า," ใน *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิชาการระดับชาติ UTCC Academic Day ครั้งที่ 2*, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2561, หน้า 1796-1809.
- [16] จิรพงษ์ แซ่ลิ้ม และคณะ, "การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่," ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 10*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2564, หน้า 101-109.

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

- [17] W.-K. Chen, "A mixed-signal approach for improving the accuracy of an RF power amplifier," in *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Orlando, FL, 1999, pp. 353-356.
- [18] A. Thompson, et al., "Smart health monitoring systems using IoT," in *Proceedings of the 2023 International Conference on Smart Health (ICSH)*, Boston, MA, 2023, pp. 89-97

การอ้างอิงวิทยานิพนธ์ (Thesis/Dissertation)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงรายงานทางเทคนิค (Technical Report)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงมาตรฐาน (Standard)

ภาษาไทย

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อมาตรฐาน, หมายเลขมาตรฐาน, ปีที่พิมพ์.

บทความวิจัย (Research Article)

ตัวอย่าง:

[23] สมาคมวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย, มาตรฐานไฟฟ้ากำลัง, 2563.

ภาษาอังกฤษ

รูปแบบ: [ลำดับ] ชื่อมาตรฐาน, หมายเลขมาตรฐาน, ปีที่พิมพ์.

ตัวอย่าง:

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

การอ้างอิงเว็บไซต์ (Website)

ภาษาไทย

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

ตัวอย่าง:

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

ภาษาอังกฤษ

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

ตัวอย่าง:

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

การใส่เลข DOI (Digital Object Identifier)

หากมีการใส่เลข DOI ในบทความสามารถทำได้ โดยเพิ่ม DOI ที่ส่วนท้ายของการอ้างอิงบทความ

รูปแบบ: ส่วนท้ายการอ้างอิงบทความตามด้วย DOI: หมายเลข DOI.

ตัวอย่าง:

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

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

8. การตรวจสอบก่อนการส่งบทความ

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

บทความวิจัย (Research Article)

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

(กรุณาส่งมาพร้อมกับบทความ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

1. ข้อมูลทั่วไป

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

2. ข้อมูลบทความต้นฉบับ

2.1 ประเภทของบทความ

☐ บทความวิชาการ (Academic Article)

☐ บทความวิจัย (Research Article)

2.2 ภาษาของบทความ

☐ ภาษาไทย (Thai Language)

☐ ภาษาอังกฤษ (English Language)

2.3 ชื่อบทความ

ชื่อบทความภาษาไทย

Title (in English)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

บทความวิจัย (Research Article)

2.4 รายชื่อและที่อยู่ของเจ้าของบทความ

ตำแหน่งทาง วิชาการ	ชื่อสกุลภาษาไทย	ชื่อสกุล ภาษาอังกฤษ	หน่วยงาน	เบอร์ติดต่อ	อีเมล

(สามารถเพิ่มได้ตามจำนวนของผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัย)

3. คำรับรอง

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า:

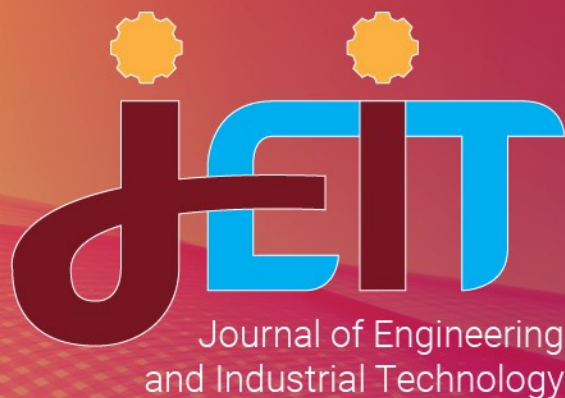
- บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง
- บทความนี้ไม่เคยลงพิมพ์ที่ไหนมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น หรือในงานประชุมวิชาการ ไม่ว่าจะเป็นบทคัดย่อ หรือฉบับเต็ม
- ในกรณีที่บทความนี้เป็นวิทยานิพนธ์/การค้นคว้าอิสระ หรือผลงานระดับบัณฑิตศึกษา ได้รับการอนุญาตจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว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

ลงนาม.....

(.....)

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

ผู้ส่งบทความ



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร
"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"
"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"
คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000
โทร: 088-574-2199 Email: jeit@ksu.ac.th