

Research Article

Design and Performance Evaluation of a Continuous Mixing–Pelletizing Machine for Animal Feed and Organic Fertilizer Production 1

*Wiroon Monatrakul Puntivar Keawmad Wasan Pinate
Taweasab Chaiyarak Kantapong Khaeso*

Strategic Factor Analysis and Weight Determination for Textile Industry Production Relocation Decisions in CLMV Countries 17

*Kowit Ponhan Pattanapong Praykaw Khumpirada Thepphithak
Bhanarunn Youngsook*

Development of an IoT-based Prototype for Water and Ice Scrap Recycling with Eco-Nudge Integration 40

*Anuwat Songphoklang Chawamin Chumwaengwapee Phatarapol Srisodaphol
and Apichan Kanjanavapastit*

Design and Performance Evaluation of a Hybrid Solar Dryer Integrated with Quartz Infrared Heaters for Banana Drying 52

Aphichon Mungchu Anuwat Saenpong Chailai Sasen and Sawanee Jansawang

Design and development of an automatic temperature-controlled cricket fryer 66

*Wuttiiphong Thonghaeo Chaiyan Junsiri Wiroon Monatrakul
and Jarupol Suriyawanakul*

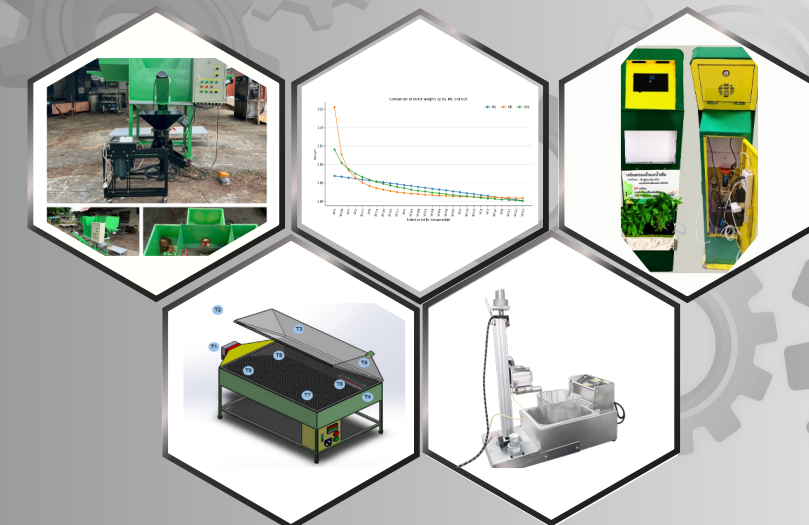


Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ เป็นแหล่งข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้ในระบบออนไลน์ และบทความทุกเรื่องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแบบ double blinded มีกำหนดตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม - ธันวาคม) โดยกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น รับผลงานทางวิชาการที่มีเนื้อหาครอบคลุมด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ และวารสารวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติตอบรับบทความวิจัย และบทความทางวิชาการที่เป็นต้นฉบับภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษซึ่งไม่เคยเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน ทุกๆ บทความได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ในสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประชาสัมพันธ์ เผยแพร่ความรู้ ผลงานทางวิชาการ และงานวิจัย ในด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

บรรณาธิการ

รศ.ดร.ชัยยันต์	จันทร์ศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อภิชาติ	ศรีชาติ	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ที่ปรึกษาบรรณาธิการ

รศ.ดร. รัชพล	สันติวารกร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
--------------	------------	-------------------	--------------------

กองบรรณาธิการ

รศ.ดร.กิตติพงษ์	ลาอุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.กานต์	จันทร์ระ	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
รศ.ดร.จักรมาส	เลาหวณิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.ศิวดล	กัญญาคำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ผศ.ดร.วิรุณ	โมนะตระกูล	คณะเทคโนโลยีการเกษตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ผศ.ดร.อดุลย์	จรรยาเลิศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.สุภกิจ	รูปจันทร์	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ปิยะพงษ์	สิงห์บัว	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ชาญวิทย์	สุวรรณพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ดร.คณิศร	ธนัฐพัฒน	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ดร.อภิวัตร	บุญทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.บัณฑิต	บุญขาว	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.อภิชน	มั่งชู	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.ดร.อภิมาณ	กาญจนาปสทิพย์	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ดร.กวีพงษ์	หงส์ทอง	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ดร.ศักรินทร์	วงศ์ฮาด	คณะวิทยาการจัดการ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร.ปิยะวัฒน์	ศรีธรรม	คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.สหสวรรษ	ภูจิระ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.ดร.พลเทพ	เวงสูงเนิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.จาริณี	จงปลื้มปิติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.กศิ์ภูฏ	ทองแกม	สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดอุดรธานี กระทรวงอุตสาหกรรม	

ฝ่ายจัดการวารสาร นางสาวฉัตรเกล้า มะชะศรี

สำนักงาน กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น
จ.ขอนแก่น 40002

กำหนดเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม

พิมพ์ที่ โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ISSN : 2408 - 0985

Farm Engineering and Automation Technology Journal is an open access and peer-reviewed (double blinded) journal published twice a year by Farm Engineering and Automation Technology Research Group, Khon Kaen University (January - June and July - December). We welcome submission from all fields of Farm Engineering and Automation Technology. The journal accepts Thai/English manuscripts of original research and review articles, which have never been published elsewhere. Every published manuscripts are reviewed by at least 3 experts in the relevant field. Our purpose in to promote and disseminate knowledge, academic work and research in Farm Engineering and Automation Technology.

Editor-in-chief

Assoc.Prof.Dr.Chaiyan Junsiri

Khon Kaen University

Assoc.Prof.Dr.Aphichat Srichat

Udon Thani Rajabhat University

Editorial Board

Assoc.Prof.Dr.Kittipong Laloon	Faculty of Engineering	Khon Kaen University
Asst.prof.Kan Jantara	Faculty of Industrial Technology	Loei Rajabhat University
Assoc.Prof.Dr.Juckamas Laohavanich	Faculty of Engineering	Maharakham University
Assoc.Prof.Dr.Siwadol Kanyakam	Faculty of Engineering	Rajabhat Maha Sarakham University
Asst.Prof. Dr.Wiroon Monatrakul	Faculty of Agricultural Technology	Rajabhat Maha Sarakham University
Asst.Prof.Dr.Adaual Junyalertadual	Faculty of Engineering	Ubon Ratchathani University
Assoc.Prof.Dr.Supakit Rooppakhun	Institute of Engineering	Suranaree University Of Technology
Mr.Piyapong Singbua	Faculty of Engineering and Architecture	Vongchavalitkul University
Asst.Prof.Dr.Chanwit Suwannapong	Faculty of Engineering	Nakhonphanom University
Dr. Kanitsorn Thanatwuttikorn	Faculty of Engineering	Nakhonphanom University
Dr.Apiwat Boonkong	Faculty of Engineering	Nakhonphanom University
Asst.Prof.Dr.Bundit Boonkhao	Faculty of Engineering	Nakhonphanom University
Asst.Prof.Aphichon Mungchu	Faculty of Engineering and Industrial Technology	Kalasin University
Asst.Prof.Dr.Apichan Kanjanavapastit	Faculty of Engineering and Technology	Udon Thani Rajabhat University
Dr.Kaweepong Hongtong	Faculty of Engineering and Technology	Udon Thani Rajabhat University
Dr.Sakkarin wangkahart	Faculty of Management Science	Udon Thani Rajabhat University
Asst.Prof.Dr.Piyawat Sritram	Faculty of Agriculture and Technology	
		Rajamangala University of Technology Isan
Asst.Prof.Dr.Sahassawat Poojeera	Faculty of Engineering	Rajamangala University of Technology Isan

Asst.Prof.Dr.Ponthep Vengsungnle	Faculty of Engineering and Technology	
		Rajamangala University of Technology Isan
Asst.Prof.Dr.Jarinee Jongpluempiti	Faculty of Engineering and Technology	
		Rajamangala University of Technology Isan
Dr.Kasiphat Thongkaem	Udon Thani Provincial Industry Office	Ministry of Industry

Production team Ms.Chatklaw Machasri

Editorial Office Farm Engineering and Automation Technology Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,123 Moo16 Mittraphap Road, Nai Mueang Sub-district, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen Province, 40002

Publication Frequency Biannual (Issue 1, January - June, Issue 2, July - December)

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หรือ FEAT JOURNAL (Farm Engineering and Automation Technology Journal) เป็นวารสารทางวิชาการ ซึ่งบทความทุกเรื่องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น (peer-reviewed journal) แบบ double blinded วารสารรับผลงานทางวิชาการที่เป็นต้นฉบับ (original) ในด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ เพื่อเผยแพร่เทคโนโลยีที่มีคุณค่าแก่นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป โดยวารสารเคร่งครัดในเรื่องผลงานวิชาการที่เป็นต้นฉบับ และไม่ใช้ผลงานที่คัดลอกโดยวารสารมีกำหนดออกทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีการเผยแพร่ในรูปแบบเล่มสำหรับจัดส่งให้หน่วยงานหรือผู้ที่สนใจ และเผยแพร่ผ่านเว็บไซต์ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

ขอบเขตของเนื้อหาที่ตีพิมพ์ในวารสาร ประกอบด้วยบทความที่เกี่ยวข้อง ในประเด็นดังต่อไปนี้

1. Farm Engineering and Technology
2. Automation Technology
3. Environmental Technology and Management
4. Energy Conservation and Alternative Energy Technology
5. Agricultural Machine Design
6. Material Engineering Technology
7. Innovation Technology for Farm and related Industries
8. Logistics
9. Farm and related Industries Management
10. Related Topics for Farm Engineering and Automation Technology

จัดทำและเผยแพร่โดย กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (Farm Engineering and Automation Technology: FEAT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002 โทร. 085-559-2669 Email: feat.kku@gmail.com

บทบรรณาธิการ

เรียน ท่านสมาชิกวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
และผู้อ่านทุกท่าน



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (Farm Engineering and Automation Technology Journal: FEAT Journal) ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม – มิถุนายน 2569 ฉบับนี้เป็นปีที่ 12 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 5 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารเล่มนี้จะเป็นแหล่งเรียนรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้แก่ผู้สนใจทั่วไปได้ และขอขอบพระคุณนักวิจัยที่ได้ส่งบทความมาลงตีพิมพ์ หากมีคำติชมหรือข้อเสนอแนะใดเกี่ยวกับวารสาร สามารถติดต่อได้โดยตรงที่กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผ่านเว็บไซต์ข้างต้น หรือ Email: feat.kku@gmail.com

รองศาสตราจารย์ชัยยันต์ จันทร์ศิริ

บรรณาธิการ

chaich@kku.ac.th

26 มิถุนายน 2569

จริยธรรมของการตีพิมพ์ (Publication Ethics)

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติจะแต่งตั้งผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาคุณภาพของบทความทุกบทความ อย่างน้อย 3 ท่าน ที่มีความเชี่ยวชาญหรือเกี่ยวข้องกับเนื้อหาของบทความและไม่ใช่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้แต่งบทความ โดยการประเมินผู้ทรงคุณวุฒิเป็นแบบ double blinded คือ มีการปกปิดชื่อเจ้าของบทความแก่ผู้ทรงคุณวุฒิ และเจ้าของบทความไม่ทราบชื่อของผู้ทรงคุณวุฒิ ผลการประเมินมี 5 แบบ คือ รับผิดชอบบทความ ให้ผู้แต่งแก้ไข โดยให้บรรณาธิการพิจารณาต่อ ให้ผู้แต่งแก้ไขโดยผู้ประเมินขอพิจารณาอีกครั้ง ให้ผู้แต่งส่งบทความให้วารสารอื่น และไม่รับผิดชอบบทความ ดังนั้น เพื่อให้การสื่อสารทางวิชาการเป็นไปอย่างถูกต้อง สอดคล้องกับมาตรฐานการตีพิมพ์นานาชาติ จึงได้กำหนดจริยธรรมของการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยไว้สำหรับการดำเนินงานของวารสาร โดยทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์อย่างเคร่งครัด ตามบทบาทหน้าที่ ดังนี้

บทบาทหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผลงานของผู้เขียนต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่น หากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของผู้เขียนเอง ผู้เขียนจะต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ
3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสาร
4. ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคนต้องเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัยจริง
5. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมานำเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง
6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่นๆ หลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว
7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์กับวารสารทุกบทความ โดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
2. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้ง โดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้เขียนในด้านเชื้อชาติเพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้เขียน
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียนหรือผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
4. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประโยชน์ของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียน
5. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่างๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องคำนึงถึงคุณภาพบทความเป็นหลักพิจารณาบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการ โดยปราศจากอคติหรือความคิดเห็นส่วนตัว และไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียน
2. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากผลงานทางวิชาการที่ตนเองได้ทำการประเมิน
3. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานวิชาการที่รับประเมินอย่างแท้จริง
4. หากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบพบว่าบทความที่รับประเมินเป็นบทความที่คัดลอกผลงานชิ้นอื่นๆ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
5. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาประเมินที่กำหนด รวมถึงไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้

บทความวิจัย

- การออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง
สำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ 1
วิรุณ โมณะตระกูล พันธิวา แก้วมาตย์ วสันต์ ปิณะเด ทวีทรัพย์ ไชยรักษ์
และ กันตพงษ์ แซ่โล
- การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงกลยุทธ์และการกำหนดค่าน้ำหนักสำหรับการตัดสินใจ
ย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV 17
โกวิทย์ พลหาญ พัฒนพงษ์ พลายแก้ว คัมภีร์ดา เทพพิทักษ์ และ พนรัญชน์ ยังสุข
- การพัฒนาระบบต้นแบบ IoT รีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็งร่วมกับการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ 40
อนุวัฒน์ สงค์โพธิ์กลาง ชวมิน ชุมแวงวาปี ภัทรพล ศรีโสดาพล
และ อภิमान กาญจนวาปสภิตย
- การออกแบบและสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด
แบบควอทซ์เพื่อการอบกล้วยน้ำว้า 52
เสาวนีย์ จันทร์สว่าง อนุวัช แสนพงษ์ ไชไล ชาเสน และ อภิชน มุ่งชู
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ 66
วุฒิพงศ์ ทองแก้ว ชัยยันต์ จันทร์ศิริ วิรุณ โมณะตระกูล
และ จารุพล สุริยวนากุล

Research Article

Design and Performance Evaluation of a Continuous Mixing–Pelletizing Machine for Animal Feed and Organic Fertilizer Production	1
<i>Wiroon Monatrakul Puntivar Keawmad Wasan Pinate Taweesab Chaiyarak and Kantapong Khaeso</i>	
Strategic Factor Analysis and Weight Determination for Textile Industry Production Relocation Decisions in CLMV Countries	17
<i>Kowit Ponhan Pattanapong Praykaw Khumpirada Thepphithak and Bhanarunn Youngsook</i>	
Development of an IoT-based Prototype for Water and Ice Scrap Recycling with Eco-Nudge Integration	40
<i>Anuwat Songphoklang Chawamin Chumwaengwapee Phatarapol Srisodaphol and Apichan Kanjanavapastit</i>	
Design and Performance Evaluation of a Hybrid Solar Dryer Integrated with Quartz Infrared Heaters for Banana Drying	52
<i>Sawanee Jansawang Anuwat Saenpong Chailai Sasen and Aphichon Mungchu</i>	
Design and development of an automatic temperature-controlled cricket fryer	66
<i>Wuttiaphong Thonghaeo Chaiyan Junsiri Wiroon Monatrakul And Jarupol Suriyawanakul1</i>	



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

**การออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง สำหรับการ
ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์**

**Design and Performance Evaluation of a Continuous Mixing–Pelletizing Machine for
Animal Feed and Organic Fertilizer Production**

วิรุณ โมณะตระกูล¹⁾ พันธิวา แก้วมาตย์²⁾ วสันต์ ปิณะเต³⁾ ทวีทรัพย์ ไชยรักษ์⁴⁾ และกันตพงษ์ แซ่โล^{5)*}

Wiroon Monatrakul¹⁾ Puntivar Keawmad²⁾ Wasan Pinate³⁾ Taweessab Chaiyarak⁴⁾

and Kantapong Khaeso^{5)*}

¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

²⁾ สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

³⁾ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁴⁾ สาขาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁵⁾ สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹⁾ Program in Agricultural Machinery Technology Innovation, Faculty of Agricultural Technology,
Rajabhat Maha Sarakham University

²⁾ Program in Biology, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

³⁾ Program in Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

⁴⁾ Program in Agriculture, Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

⁵⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 6 May 2026

Revised: 28 May 2026

Accepted: 11 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์ รวมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องและปัจจัยการทำงานที่เหมาะสม โดยศึกษาผลของความชื้นวัตถุดิบที่ระดับ 12, 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) และอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบอัดเม็ดที่ระดับ 120, 160 และ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ต่อคุณภาพเม็ดอัด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานไฟฟ้า เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบถังบรรจวัตถุดิบ ระบบผสม ระบบพักและลำเลียง และระบบอัดเม็ด ซึ่งสามารถทำงานแบบต่อเนื่องสั่งการด้วยระบบ PLC ผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลของความชื้นวัตถุดิบพบว่า ระดับความชื้น 15% ให้ค่าความคงทนของเม็ดสูงสุดทั้งในอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ ขณะที่อัตราการป้อน 160 กิโลกรัมต่อชั่วโมงให้สมดุลที่เหมาะสมด้านอัตราการผลิต ความเสถียรของการทำงาน และการใช้พลังงาน การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนคงที่ของเครื่องประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาการผลิตประมาณ 124 และ 160 ชั่วโมงต่อปี หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริงภายใต้การทำงานเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับชุมชนหรือเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง, อาหารสัตว์อัดเม็ด, ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด, การออกแบบเครื่องจักร, สมรรถนะเครื่องจักร

Abstract

This study aimed to design and develop an continuous mixing–pelletizing machine for the commercial production of animal feed and organic fertilizer, and to evaluate its performance and optimal operating conditions. The effects of raw material moisture content at 12%, 15%, and 18% (wet basis) and feeding rates of 120, 160, and 200 kg/h on pellet quality, production capacity, and energy consumption were investigated. The developed prototype consisted of four main subsystems: a raw material hopper system, a mixing system, a conveying and holding system, and a pelletizing system, which operated continuously. The experimental results showed that the prototype achieved average production capacities of 181 kg/h for pelleted animal feed and 168 kg/h for pelleted organic fertilizer. A raw

material moisture content of 15% resulted in the highest pellet durability for both animal feed and organic fertilizer pellets, and the mixing uniformity was within an acceptable range. In addition, a feeding rate of 160 kg/h provided the most suitable balance between production rate, operational stability, and energy consumption. An engineering economic analysis indicated that the annual fixed cost of the machine was approximately 69,900 THB. The break-even production quantities were 22,843 kg/year for animal feed pellets and 25,985 kg/year for organic fertilizer pellets. These values correspond to approximately 124 and 160 operating hours per year, or about 0.8–1 month of actual operation assuming an average working time of 8 hours per day. The results demonstrate that the developed continuous mixing–pelletizing machine has strong potential for efficient production of animal feed and organic fertilizer at community or commercial scales.

Keywords: continuous mixing–pelletizing machine: pelletized animal feed: organic fertilizer pellets: machine design: machine performance

*ติดต่อ: kkantapong@kkumail.com, 061-415-8664

1. บทนำ

การผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เป็นกิจกรรมสำคัญในภาคการเกษตร [1] เนื่องจากมีบทบาทต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงสัตว์ การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร อาหารสัตว์อัดเม็ด (pelleted feed) เป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปศุสัตว์ เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอาหาร ลดการสูญเสียจากฝุ่น และช่วยให้สัตว์ได้รับสารอาหารอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น [2,3] ในทำนองเดียวกัน การอัดเม็ดปุ๋ยอินทรีย์ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง การเก็บรักษา และการใช้ในภาคการเกษตร [4,5]

กระบวนการอัดเม็ดโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การผสม และการอัดเม็ดผ่านแม่พิมพ์ โดยแรงอัดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ และทำให้เกิดการยึดเกาะของอนุภาค ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและคงรูป [6] ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัด ได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อนวัตถุดิบ และสภาวะการทำงาน of เครื่องอัดเม็ด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความคงทนของเม็ด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานของระบบ [7]

ในปัจจุบัน เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอัดเม็ดในระดับเกษตรกรหรือวิสาหกิจชุมชนมักเป็นเครื่องจักรแบบแยกส่วน เช่น เครื่องผสมวัตถุดิบและเครื่องอัดเม็ดที่ทำงานแยกกัน ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอน ต้องใช้แรงงาน

เพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง [8] ในขณะที่ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous processing system) สามารถเชื่อมต่อขั้นตอนการผลิต การลำเลียง และการอัดเม็ดเข้าด้วยกันในสายการผลิตเดียว ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดเวลาในการผลิต และเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ [9]

อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรระบบต่อเนื่องส่วนใหญ่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งมีต้นทุนการลงทุนสูงและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับชุมชนหรือผู้ประกอบการขนาดเล็ก [10] ดังนั้น การพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานได้หลากหลายกับวัตถุดิบทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [11] และสนับสนุนการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับท้องถิ่น [12]

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยพัฒนาเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับชุมชนอยู่หลายชิ้น แต่ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดเม็ดเดี่ยว (single-unit pellet mill) ที่ต้องผสมวัตถุดิบด้วยมือหรือเครื่องผสมแยกก่อน ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านความสม่ำเสมอของส่วนผสม การสูญเสียเวลารอคอยระหว่างขั้นตอน การใช้แรงงานสูง และความแปรปรวนของคุณภาพเม็ดอัดระหว่างรุ่นการผลิต ขณะที่เครื่องระบบต่อเนื่องเชิงพาณิชย์ที่มีระบบผสม-ลำเลียง-อัดเม็ดในสายเดียวมักมีราคาสูงและกำลังผลิตเกินความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน จุดต่างของเครื่องต้นแบบนี้คือการรวมระบบผสมและอัดเม็ดให้ทำงานต่อเนื่องในสายการผลิตเดียว ควบคุมการบ้อนด้วย PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์

ทำให้สามารถจัดสมดุลไลน์การผลิต (line balancing) ระหว่างชุดผสมและชุดอัดเม็ดได้ในต้นทุนที่เหมาะสมกับระดับชุมชน [โปรดเพิ่มการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2-3 รายการในตำแหน่งนี้]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์ รวมทั้งศึกษาสมรรถนะของเครื่องและปัจจัยการทำงานที่เหมาะสม โดยพิจารณาผลของความเร็วรอบวัตถุดิบและอัตราการบ้อนวัตถุดิบต่อคุณภาพเม็ดอัด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานของระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุอัดเม็ดทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น ณ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม เครื่องต้นแบบประกอบด้วย 4 ระบบหลัก ได้แก่ 1) ระบบถังบรรจุวัตถุดิบ (raw material hopper system) 2) ระบบผสมวัตถุดิบ (mixing system) 3) ระบบพักและลำเลียง (conveying and holding system) และ 4) ระบบอัดเม็ด (pelletizing system) ระบบผสมใช้เครื่องผสมแบบใบพาย (paddle mixer) เพื่อให้วัตถุดิบเกิดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมวัสดุที่เป็นผงหรือเม็ด ส่วนระบบอัดเม็ดใช้

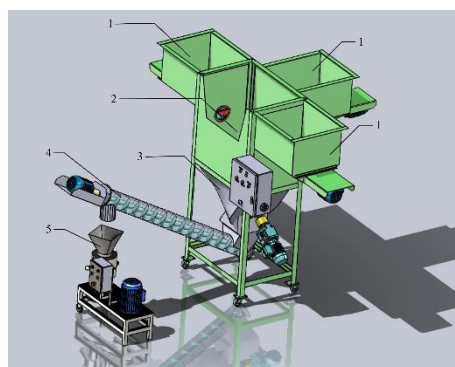
หลักการอัดผ่านแม่พิมพ์ (die) โดยแรงอัดจากลูกกลิ้ง และแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ ทำให้วัตถุดิบเกิดการยึดเกาะและอัดแน่นเป็นเม็ดตามขนาดที่กำหนด ระบบทั้งหมดถูกควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC เพื่อให้การทำงานของเครื่องเป็นแบบต่อเนื่องตลอดกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1

ระบบควบคุมใช้ PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของสกรูป้อนและชุดอัดเม็ด การจ่ายวัตถุดิบตามสูตรควบคุมด้วยการนับรอบการหมุนของสกรูป้อน (proximity/encoder sensor) ร่วมกับโหลดเซลล์ (load cell) ที่ถึงซึ่งเพื่อกำหนดน้ำหนักวัตถุดิบแต่ละชนิด เมื่อซึ่งได้ตามสูตร PLC จะสั่งเปิดการลำเลียงเข้าถังผสม จับเวลาผสม แล้วจึงลำเลียงเข้าสู่ชุดอัดเม็ดต่อเนื่อง

รายละเอียดผลการออกแบบของแต่ละระบบมีดังนี้ (1) ระบบถังบรรจุวัตถุดิบ ประกอบด้วยถังแยกชนิด 3 ถัง ผลิตจากเหล็กแผ่นชุบสังกะสีหนา 1.5 มม. ออกแบบส่วนล่างเป็นทรงกรวยโดยใช้มุมเอียงผนัง 60 องศา ซึ่งมากกว่ามุมกอง (angle of repose ประมาณ 35–40 องศา) ของวัตถุดิบผงเพื่อให้ไหลลงได้โดยไม่ค้าง ความจุถังละประมาณ 0.12 ม³ (บรรจุได้ประมาณ 60–80 กก./ถัง) เพียงพอต่อการเดินเครื่องต่อเนื่องประมาณ 30–40 นาทีต่อการเติมหนึ่งครั้ง (2) ระบบลำเลียงใช้สกรูลำเลียง (screw conveyor) เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียว 100 มม. ระยะพิทช์ 100 มม. ขับด้วยมอเตอร์เกียร์ปรับความเร็วผ่านอินเวอร์เตอร์ที่ 60–180 รอบต่อนาที ให้ความสามารถลำเลียงประมาณ 120–220 กก./ชม. ครอบคลุมช่วงอัตราการป้อนที่ใช้ทดลอง (120–200 กก./ชม.) จึงใช้เป็นตัวแปรหลักในการจัดสมดุลไลน์การผลิตระหว่างชุดผสมและ

ชุดอัดเม็ด (3) ระบบผสมใช้ถังผสมแบบใบพาย (paddle mixer) ความจุประมาณ 50 กก./รอบ ขับด้วยมอเตอร์ 2.2 kW ความเร็วใบกวนประมาณ 60 รอบต่อนาที และ (4) ระบบอัดเม็ดใช้แม่พิมพ์ (die) รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ขับด้วยมอเตอร์ 7.5 kW ส่วนถังพัก (buffer hopper) ระหว่างชุดผสมและชุดอัดเม็ดมีความจุประมาณ 30 กก. เพื่อรองรับการป้อนต่อเนื่อง ระบบส่งกำลังใช้ชุดเกียร์ทดรอบ

หลักการทำงานแบบต่อเนื่อง: วัตถุดิบจากถังบรรจุทั้ง 3 ถังถูกจ่ายลงถังซึ่งตามสัดส่วนของสูตร แล้วลำเลียงเข้าถังผสมแบบใบพายเพื่อคลุกเคล้าจนสม่ำเสมอ จากนั้นส่งผ่านถังพักและสกรูลำเลียงเข้าสู่ชุดอัดเม็ดอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการป้อนของสกรูปรับ ให้สอดคล้องกับกำลังการอัดเม็ดเพื่อป้องกันการอุดตันและรักษาสมดุลไลน์การผลิต



รูปที่ 1 เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

(1) ถังบรรจุ, (2) ถังผสม, (3) ถังพัก, (4) เกลียวลำเลียง, และ (5) เครื่องอัดเม็ด

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารสัตว์และวัสดุอินทรีย์สำหรับผลิตปุ๋ยอัดเม็ดที่

เพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ วัตถุดิบทั้งหมดถูกบดและปรับขนาดอนุภาคให้มีความเหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการผสมและอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างวัตถุดิบทดสอบ

(a) บลាយข้าว/รำข้าว (b) กากถั่วเหลือง (c) มูลโคบด และ (d) ปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 1

สูตรอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

รายการ	ถังที่ 1 วัตถุดิบหลัก	ถังที่ 2 วัตถุดิบ โปรตีน	ถังที่ 3 วัตถุดิบ ประสาน (กากน้ำตาล)
สูตรอาหาร สัตว์	65%	25%	10%
รายการ	ถังที่ 1 วัตถุดิบหลัก	ถังที่ 2 วัสดุ ปรับสภาพ	ถังที่ 3 วัตถุดิบ ประสาน (แป้งมัน สำปะหลัง)
สูตรปุ๋ย อินทรีย์ อัดเม็ด	70%	20%	10%

ก่อนเริ่มการทดลอง วัตถุดิบแต่ละสูตรถูกปรับความชื้นให้อยู่ในระดับที่กำหนด โดยรายงานค่าความชื้นบนฐานเปียก (wet basis, w.b.) ซึ่งเป็น

พบทั่วไปในพื้นที่เกษตรกรรม โดยมีการคัดเลือกสูตรอาหารสัตว์ และสูตรปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด อย่างละ 1 สูตร

รูปแบบที่ใช้ทั่วไปในงานด้านการอัดเม็ดชีวมวลและการประเมินคุณภาพวัตถุดิบสำหรับการอัดแน่น สมการคำนวณความชื้นฐานเปียกแสดงดังสมการที่ 1

วัตถุดิบทุกชนิดถูกบดด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดตา 2 มม. เพื่อควบคุมขนาดอนุภาคให้สม่ำเสมอ (≤ 2 มม.) ก่อนการผสม วัดความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบ moisture analyzer (อบที่ 105°C จนน้ำหนักคงที่) แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อปรับให้ได้ระดับ 12, 15 และ 18% (ฐานเปียก) จากนั้นฉีดพ่นน้ำสะอาดพร้อมคลุกเคล้าในเครื่องผสมให้ทั่ว และบ่มในถุงปิดประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอ ก่อนตรวจสอบความชื้นซ้ำให้อยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ ของค่าที่กำหนดก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง

$$MC_{wb}(\%) = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ความชื้นฐานเปียกของวัตถุดิบ (%)

W_{wet} คือ มวลวัตถุดิบก่อนอบแห้ง (g)

W_{dry} คือ มวลวัตถุดิบหลังอบแห้งจนคงที่ (g)

การทดลองออกแบบเพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ด โดยพิจารณา 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ 12, 15 และ 18% (ฐานเปียก) 2) อัตราการป้อน

วัตถุดิบเข้าสู่เครื่องอัดเม็ด 3 ระดับ คือ 120, 160 และ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้น แผนการทดลองมีลักษณะเป็นแฟกทอเรียล เพื่อให้สามารถประเมินได้ทั้งผลหลักของแต่ละปัจจัยและผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการป้อนต่อค่าตอบสนองของระบบ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้แนวคิด two-way ANOVA ซึ่งเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเมื่อมีปัจจัยอิสระมากกว่า 1 ปัจจัย และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

ในการทดลองแต่ละสภาวะ วัตถุดิบถูกปรับความชื้นให้ตรงตามระดับที่กำหนด จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่ระบบถึงบรรจุและส่งออกเข้าสู่ระบบผสม เมื่อส่วนผสมมีความสม่ำเสมอแล้ว วัตถุดิบจะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบพักและระบบอัดเม็ด โดยกำหนดอัตราการป้อนตามชุดการทดลอง

หลังจากเครื่องเดินเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state operation) แล้ว จึงเก็บข้อมูลค่าตอบสนอง ได้แก่ อัตราการผลิต ความคงทนของเม็ดอัด ความสม่ำเสมอของการผสม และการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีการบันทึกเวลา มวลผลิตภัณฑ์ มวลก่อนและหลังการทดสอบความคงทน และค่าพลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าในแต่ละสภาวะทดลองอย่างเป็นระบบ

การทดลองแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง ($n = 3$) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การเก็บข้อมูลในแต่ละสภาวะมีดังนี้ (1) ความสม่ำเสมอของการผสม ประเมินโดยสุ่มเก็บตัวอย่างส่วนผสม 10 จุดจากถังผสม นำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, CV) โดยถือว่าผสมสม่ำเสมอเมื่อ CV ต่ำกว่า 10% (2) ความคงทนของเม็ดอัด ทดสอบตาม

หลักการ pellet durability index โดยนำเม็ดที่ร้อนผงออกแล้วผ่านการกลิ้ง/กระแทกในเครื่องทดสอบ แล้วร่อนและชั่งมวลเม็ดที่คงสภาพ ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และ (3) การใช้พลังงานไฟฟ้า วัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า (kWh meter) ตลอดช่วงเดินเครื่องในสภาวะคงตัว พร้อมบันทึกเวลาและมวลผลิตภัณฑ์เพื่อคำนวณพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

2.3. ค่าชี้ผลและสมการที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ

2.3.1. อัตราการผลิต

อัตราการผลิตของเครื่อง (PR) ใช้เป็นตัวชี้ความสามารถของระบบในการผลิตเม็ดอัดต่อหน่วยเวลา โดยคำนวณจากมวลผลิตภัณฑ์ที่ได้จริงหารด้วยเวลาในการผลิต [13] ดังสมการที่ (2)

$$PR = \frac{m_p}{t} \quad (2)$$

เมื่อ PR คือ อัตราการผลิต (kg/h)

m_p คือ มวลผลิตภัณฑ์เม็ดอัดที่ได้จริง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการผลิต (h)

ตัวแปรนี้ใช้ประเมินประสิทธิภาพเชิงกำลังการผลิตของเครื่องอัดเม็ด และนิยมใช้รายงานผลในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมงในงานวิจัยด้าน pelletization ทั้งอาหารสัตว์และชีวมวลอัดเม็ด

2.3.2. ความคงทนของเม็ดอัด

ความคงทนของเม็ดอัดหรือ pellet durability เป็นดัชนีที่สะท้อนความสามารถของเม็ดในการคงรูปและต้านทานการแตกหักระหว่างการขนถ่าย การลำเลียง

และการจัดเก็บ ซึ่งเป็นตัวชี้คุณภาพสำคัญของผลิตภัณฑ์อัดเม็ด ในการทดสอบ ให้หลักการนำเม็ดอัดที่ร้อนเอาผงละเอียดออกแล้วไปผ่านการกลิ้ง/กระแทกในเครื่องทดสอบ จากนั้นร่อนผงละเอียดออกอีกครั้ง และคำนวณร้อยละมวลเม็ดที่ยังคงสภาพอยู่หลังการทดสอบ [14,15] ดังสมการที่ (3)

$$PDI(\%) = \frac{W_a}{W_b} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ PDI คือ ค่าความคงทนของเม็ดอัด (%)

W_b คือ มวลเม็ดก่อนการทดสอบ (g)

W_a คือ มวลเม็ดที่เหลืออยู่หลังการทดสอบและร่อนผงละเอียดออกแล้ว (g)

หลักการคำนวณนี้สอดคล้องกับวิธีประเมิน pellet durability index ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย และการประเมินคุณภาพเม็ดอาหารสัตว์และเม็ดชีวมวล

2.3.3. การใช้พลังงานไฟฟ้า

การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบในแต่ละสภาวะทดลองประเมินจากค่าพลังงานรวมที่วัดได้ระหว่างการเดินเครื่อง หรือคำนวณจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยคูณกับระยะเวลาเดินเครื่อง ดังสมการที่ (4)

$$E = P_{avg} \times t \quad (4)$$

เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

P_{avg} คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างการเดินทาง (kW)

t คือ เวลาเดินเครื่อง (h)

นอกจากพลังงานรวมแล้ว งานวิจัยด้านการอัดเม็ด มักรายงาน พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption; SEC) เพื่อให้เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างสภาวะทดลองหรือระหว่างเครื่องจักรต่างชนิด ได้ชัดเจนขึ้นโดยคำนวณจากสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{E}{m_p} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ พลังงานจำเพาะ (kWh/kg หรือ kWh/ton)

m_p คือ มวลผลิตภัณฑ์เม็ดอัดที่ผลิตได้จริง ตัวชี้วัดนี้ถูกใช้แพร่หลายในงานวิจัยด้าน pelletization เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกระบวนการผลิตเม็ดอัด [13]

2.3.4. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงปริมาณจากสมการมาตรฐานของการวิเคราะห์ต้นทุน-ปริมาณ-กำไร ดังสมการที่ (6)

$$BEQ = \frac{FC}{P-VC} \quad (6)$$

เมื่อ BEQ คือ ปริมาณผลผลิต ณ จุดคุ้มทุน (kg/year)

FC คือ ต้นทุนคงที่รวมต่อปี (THB/year)

P คือ ราคาขายต่อหน่วย (THB/kg)

VC คือ ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (THB/kg) และหากต้องการแปลงเป็นระยะเวลาการผลิต ณ จุดคุ้มทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$T_{BE} = \frac{BEQ}{PR} \quad (7)$$

เมื่อ T_{BE} คือ เวลาในการผลิตเพื่อให้ถึงจุดคุ้มทุน (h หรือ day หรือ month ตามหน่วยที่ใช้)

PR คือ อัตราการผลิตเฉลี่ยของเครื่อง

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1. ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ ได้พัฒนาเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ดแบบต่อเนื่อง โดยโครงสร้างเครื่องถูกออกแบบให้เป็นสายการผลิตเดียว (continuous processing line) เพื่อลดขั้นตอนการทำงานแบบแยกเครื่อง ซึ่งปกติการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอัดเม็ดจะต้องผ่านกระบวนการผสมและอัดเม็ดคนละเครื่อง ทำให้เกิดเวลารอคอยและใช้แรงงานสูง

เครื่องต้นแบบมีขนาดกว้าง 3.05 เมตร ยาว 3.51 เมตร สูง 2.00 เมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 7.5 กิโลวัตต์สำหรับชุดอัดเม็ด และ 2.2 กิโลวัตต์สำหรับชุดผสม ควบคุมการทำงานด้วย PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบของสกรูป้อนและชุดอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 นวัตกรรมเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ด

ระบบการทำงานเริ่มจากวัตถุดิบถูกบรรจุในถังแยกชนิด ระบบจะกำหนดน้ำหนักตามสูตรที่ตั้งค่าไว้และจ่ายวัตถุดิบด้วยการนับรอบการหมุนของสกรูป้อนเข้าสู่ถังซึ่ง จากนั้นวัตถุดิบถูกส่งเข้าสู่ถังผสม โดยใช้ใบกวนแบบใบพาย ทำการคลุกเคล้าเป็นเวลาเฉลี่ย 4–6 นาที จนค่าความแปรปรวนของส่วนผสมต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และมีการคลุกเคล้าของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นวัตถุดิบถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดผ่านแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และถูกตัดให้มีมีความยาวเฉลี่ย 8–12 มิลลิเมตร ก่อนเข้าสู่กระบวนการบรรจุ ดังแสดงในรูปที่ 4

ช่วงเวลาผสม 4–6 นาทีที่กำหนดจากการทดลองเบื้องต้นที่ติดตามค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (CV) ของส่วนผสมตามเวลา พบว่าค่า CV ลดลงต่ำกว่า 10% และคงที่หลังผสมประมาณ 4 นาทีสำหรับสูตรอาหารสัตว์ และประมาณ 6 นาทีสำหรับสูตรปุ๋ยอินทรีย์ ความแตกต่างนี้เกิดจากปุ๋ยอินทรีย์มีอนุภาคหยาบกว่าและความหนาแน่นแตกต่างระหว่างองค์ประกอบมากกว่า จึงต้องใช้เวลาผสมนานกว่าเล็กน้อยเพื่อให้

เกิดความสม่ำเสมอ การผสมนานเกินช่วงดังกล่าว ไม่ได้เพิ่มความสม่ำเสมออย่างมีนัยสำคัญแต่กลับสิ้นเปลืองพลังงาน จึงเลือกช่วง 4–6 นาทีเป็นเวลาผสมที่เหมาะสมก่อนป้อนเข้าสู่ชุดอัดเม็ด



รูปที่ 4 การทดสอบเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ด

3.2. สมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

3.2.1. ผลของอัตราการป้อนวัตถุดิบต่อสมรรถนะเครื่อง

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตันของวัตถุดิบในระบบผสมและระบบอัดเม็ด ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด เครื่องต้นแบบสามารถผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเครื่องต้นแบบในการผลิตเม็ดอัดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม โดยอัตราการป้อนวัตถุดิบมีผลต่ออัตราการผลิตและการใช้พลังงานของเครื่อง โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจาก 120

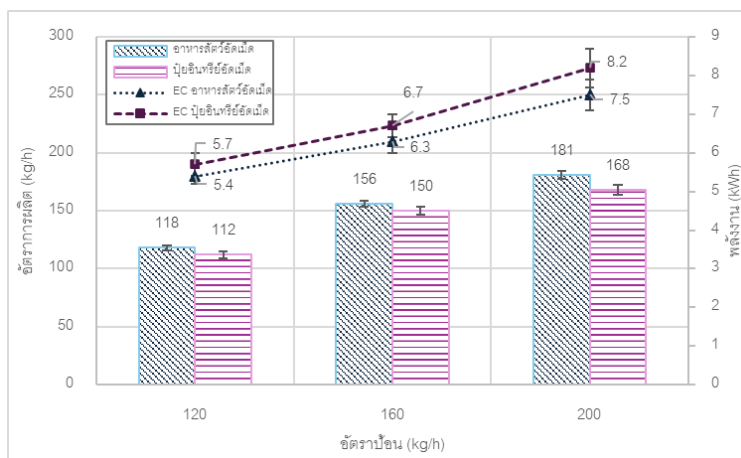
เป็น 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการผลิตของระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมีแนวโน้มลดลงและการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสูงเกินไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อน 160 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้สมดุลที่ดีระหว่างอัตราการผลิต ความเสถียรของระบบ และการใช้พลังงาน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับการอัดเม็ดชีวมวลที่รายงานว่า การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบช่วยเพิ่มกำลังการผลิตของระบบ แต่หากอัตราการป้อนสูงเกินไปจะทำให้แรงอัดในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้การใช้พลังงานสูงขึ้นและอาจลดคุณภาพของเม็ดอัด ดังแสดงในรูปที่ 5

ค่ากำลังการผลิตดังกล่าวอยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยด้านการอัดเม็ดชีวมวลและวัตถุดิบทางการเกษตรในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ซึ่งรายงานว่าเครื่องอัดเม็ดแบบ ring die ระดับ pilot scale สามารถผลิตได้ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [16] โดยอัตราการผลิตและคุณภาพของเม็ดอัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบ ความชื้น ขนาดอนุภาค และสภาวะการเดินเครื่อง [17] ผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง จากการวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าในการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด เครื่องใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 6.3 ± 0.3 kWh ในขณะที่การผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 6.7 ± 0.3 kW

การที่ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดใช้พลังงานสูงกว่าอาหารสัตว์อัดเม็ดเป็นผลจากคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ กล่าวคือ วัสดุอินทรีย์ (เช่น มูลโคบดและปุ๋ย

หมัก) มีปริมาณเส้นใยและความหยาบของอนุภาคสูงกว่า ทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ (die friction) มากกว่า ประกอบกับเมื่อปรับความชื้นแล้ววัสดุอินทรีย์มีความหนืดและแรงยึดเกาะภายในสูง

กว่า จึงต้องใช้แรงอัดผ่านแม่พิมพ์มากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้าน ส่งผลให้มอเตอร์ชุดอัดเม็ดรับภาระและใช้พลังงานจำเพาะสูงกว่าการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดที่อนุภาคละเอียดและไหลตัวได้ดีกว่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการป้อนต่ออัตราการผลิตและพลังงาน

3.2.2. ผลของความชื้นวัตถุดิบต่อคุณภาพเม็ดอัด

ผลของระดับความชื้นวัตถุดิบต่อความทนทานของเม็ดอัดและความชื้นหลังการอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด จากผลการทดลองพบว่าความชื้นของวัตถุดิบมีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทั้งสองชนิดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มความชื้นวัตถุดิบจาก 12% เป็น 15% ทำให้ค่า

ความทนทานของเม็ดอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอาหารสัตว์อัดเม็ดมีค่าความทนทานสูงสุดที่ระดับความชื้น 15% เท่ากับ $91.8 \pm 1.2\%$ ขณะที่ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดมีค่าความทนทานสูงสุดที่ระดับเดียวกันเท่ากับ $84.9 \pm 1.5\%$ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเป็น 18% พบว่าค่าความทนทานของเม็ดลดลงเมื่อเทียบกับระดับความชื้น 15% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความชื้นของวัตถุดิบมีช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัดเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

ผลของความชื้นวัตถุดิบต่อความทนทานเม็ดและความชื้นหลังอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

ตัวอย่าง	ความชื้นวัตถุดิบ (%)	ความทนทานเม็ด (%)	ความชื้นหลังอัด (%)
อาหารสัตว์อัดเม็ด	12	82.4 ± 1.6 ^c	10.1 ± 0.3 ^c
	15	91.8 ± 1.2 ^a	12.6 ± 0.4 ^b
	18	87.2 ± 1.8 ^b	14.9 ± 0.5 ^a
ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด	12	74.6 ± 2.0 ^c	10.8 ± 0.4 ^c
	15	84.9 ± 1.5 ^a	13.3 ± 0.5 ^b
	18	79.8 ± 1.9 ^b	15.6 ± 0.6 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มนี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$ ตามวิธี LSD; สำหรับอาหารสัตว์อัดเม็ด เท่ากับ 3.10 สำหรับความทนทานเม็ด และ 0.82 สำหรับความชื้นหลังอัด; ส่วนปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด เท่ากับ 3.62 สำหรับความทนทานเม็ด และ 1.01 สำหรับความชื้นหลังอัด

การเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบมีผลต่อกระบวนการอัดเม็ด เนื่องจากน้ำสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นและช่วยให้เม็ดอัดมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 12% เป็น 15% จึงช่วยให้เม็ดอัดมีความคงทนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นสูงเกินไป เช่นที่ระดับ 18% จะทำให้วัตถุดิบมีความหนืดสูงขึ้นและลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดอัดมีความหนาแน่นลดลงและทำให้เม็ดแตกหักได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นหลังการอัดเม็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของวัตถุดิบ โดยค่าความชื้นหลังการอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดเพิ่มจาก 10.1% เป็น 14.9% และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดเพิ่มจาก 10.8% เป็น 15.6% เมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มจาก 12% เป็น 18% ในเชิงทฤษฎีการอัดแน่น (compaction/agglomeration) น้ำทำหน้าที่เป็นตัวประสานของเหลว (liquid binder) ที่

สร้างสะพานของเหลว (liquid bridge) ระหว่างอนุภาค ที่ความชื้นเหมาะสม (~15%) แรงดึงดูดของสะพานของเหลวและแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ช่วยให้เกิดการยึดเกาะและความหนาแน่นสูงสุด แต่เมื่อความชื้นเพิ่มเป็น 18% ปริมาณน้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคจนเกิดการอิ่มตัว (over-saturation) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubrication) ลดแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ ทำให้แรงอัดที่ถ่ายทอดสู่วัสดุลดลง โครงสร้างเม็ดจึงมีความหนาแน่นและแรงยึดเกาะลดลง อีกทั้งเม็ดที่มีความชื้นสูงยังอ่อนตัวและแตกหักง่ายระหว่างการทดสอบความทนทาน จึงทำให้ค่าความทนทานที่ 18% ต่ำกว่าที่ 15% [18,19]

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยด้านการอัดเม็ดชีวมวลและอาหารสัตว์ที่รายงานว่าความชื้นของวัตถุดิบเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงและความคงทนของเม็ดอัด โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมมักอยู่ในช่วงประมาณ 10–15%

ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและทำให้เม็ดอัดมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น แต่หากความชื้นสูงเกินช่วงดังกล่าวจะทำให้ความหนาแน่นของเม็ดลดลงและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดในที่สุด โดยมีตัวอย่างของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

3.2.3. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนคงที่ของเครื่องต้นแบบประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดเท่ากับ 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี โดยต้นทุนคงที่รวมประมาณ 69,900 บาทต่อปี ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร (คิดแบบเส้นตรงจากราคาเครื่องประมาณ 350,000 บาท อายุการใช้งาน 7 ปี มูลค่าซาก 10% $\approx$ 45,000 บาท/ปี) ค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซมประจำปี ($\approx$ 5% ของราคาเครื่อง $\approx$ 17,500 บาท/ปี) และค่าดอกเบี้ย/ค่าเสียโอกาสของเงินลงทุน ($\approx$ 7,400 บาท/ปี) โดยไม่รวมต้นทุนผันแปร เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงาน ซึ่งคิดแยกในส่วนต้นทุนผันแปรต่อหน่วย

เมื่อพิจารณาจากอัตราการผลิตของเครื่อง พบว่าปริมาณการผลิตดังกล่าวเทียบเท่ากับระยะเวลาการ

ผลิตประมาณ 124 ชั่วโมงต่อปีสำหรับอาหารสัตว์ และ 160 ชั่วโมงต่อปีสำหรับปุ๋ยอินทรีย์ หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริง ภายใต้สมมติฐานการทำงานเฉลี่ยวันละ 8 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบมีศักยภาพในการใช้งานในระดับชุมชนหรือวิสาหกิจขนาดเล็ก เนื่องจากสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาการใช้งานที่ไม่ยาวนานเมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด พร้อมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัด จากผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการผลิตเฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับอาหารสัตว์อัดเม็ด และ 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด นอกจากนี้ระบบผสมของเครื่องให้ความสม่ำเสมอของส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์ดี ผลการศึกษาด้านความชื้นของวัตถุดิบพบว่ามีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยระดับความชื้นวัตถุดิบ 15% ให้ค่าความทนทานของเม็ดสูงสุดทั้งในอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด ขณะที่การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบเป็น 18% ทำให้ความทนทานของเม็ดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นหลังการอัดเม็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ในด้านการประเมินความ

คัมค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าเครื่องต้นแบบมีต้นทุนคงที่ประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาการผลิตประมาณ 124 และ 160 ชั่วโมงต่อปี หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริงภายใต้การทำงานเฉลี่ยวันละ 8 ชั่วโมง ดังนั้น เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดในระดับชุมชนหรือเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบทางการเกษตร ลดต้นทุนการผลิต และสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุอัดเม็ดทางการเกษตรในระดับท้องถิ่นได้

ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต: (1) พัฒนารุ่นต้นกำลังขนาดเล็กที่ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส หรือปรับลดขนาดมอเตอร์เพื่อให้เหมาะกับครัวเรือนและกลุ่มเกษตรกรรายย่อยที่เข้าถึงไฟ 3 เฟสได้จำกัด (2) ทดสอบเครื่องกับวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เพื่อขยายขอบเขตการใช้งาน และ (3) พัฒนาระบบอบแห้งเม็ดอัดต่อเนื่องต่อยอดจากชุดอัดเม็ด เพื่อควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษา

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการอัดโนมิตีสำหรับผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์” ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) โดยจัดสรรงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย

และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ภายใต้มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (เลขที่สัญญา ววน.มรм 030/2568) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลองและพัฒนาเครื่องต้นแบบ ตลอดจนคณาจารย์และบุคลากรที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gamage A, Gangahagedara R, Gamage J, Jayasinghe N, Kodikara N, Suraweera P, et al. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. Farming System. 2023;1:100005.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- [2] Thomas M, van der Poel AFB. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. Anim Feed Sci Technol. 1996;61:89–112.
doi:[https://doi.org/10.1016/0377-8401\(96\)00949-2](https://doi.org/10.1016/0377-8401(96)00949-2)
- [3] Touffet M, Délérís I, Bokhove J. Moisture sorption and diffusion in pelleted animal feed. Food and Bioproducts Processing. 2026;156:474–82.

- doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2026.02.001>
- [4] Chew KW, Chia SR, Yen HW, Nomanbhay S, Ho YC, Show PL. Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers. *Sustainability*. 2019;11. doi:[10.3390/su11082266](https://doi.org/10.3390/su11082266)
- [5] Romano E, Brambilla M, Bisaglia C, Pampuro N, Pedretti EF, Cavallo E. Pelletization of composted swine manure solid fraction with different organic co-formulates: effect of pellet physical properties on rotating spreader distribution patterns. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2014;3:101–11. doi:[10.1007/s40093-014-0070-2](https://doi.org/10.1007/s40093-014-0070-2)
- [6] Kaliyan N, Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*. 2009;33:337–59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- [7] Tumuluru JS, Wright C, Kenny K, Hess J. A Review on Biomass Densification for Energy Applications. In. 2011.
- [8] Behnke KC. Feed manufacturing technology: current issues and challenges. *Anim Feed Sci Technol*. 1996;62:49–57. doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01005-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01005-X)
- [9] Singh J, Gu S. Biomass conversion to energy in India—A critique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14:1367–78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.013>
- [10] Khan MI, Yasmeen T, Khan M, Hadi NU, Asif M, Farooq M, et al. Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustain Prod Consum*. 2025;54:149–89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
- [11] Leman AM, Wahab RA, Zakaria S, Feriyanto D, Nor MIFCM, Muzarpar S. The development of mixer machine for organic animal feed production: Proposed study. *AIP Conf Proc*. 2017;1885:20158. doi:[10.1063/1.5002352](https://doi.org/10.1063/1.5002352)
- [12] Gilbert P, Ryu C, Sharifi V, Swithenbank J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*. 2009;88:1491–7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>

- [13] Sung-inthara T, Juntahum S, Senawong K, Katekaew S, Laloon K. Pelletization of soil amendment: Optimizing the production and quality of soil amendment pellets from compost with water and biochar mixtures and their impact on soil properties. *Environ Technol Innov.* 2024;33:103505. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103505>
- [14] Jan K, Riar C, Saxena D. Engineering and functional properties of biodegradable pellets developed from various agro-industrial wastes using extrusion technology. *J Food Sci Technol.* 2015;52. doi:10.1007/s13197-015-1938-5
- [15] You J, Hall K, Civiero J, Malpass MC, Tulpan D, Ellis JL. Evaluating variables affecting Pellet Durability Index (PDI) in pelleted corn-soy-based feeds for swine and poultry: A meta-analysis. *Anim Feed Sci Technol.* 2025;330:116566. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116566>
- [16] Pradhan P, Mahajani SM, Arora A. Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel.* 2021;285:119145. doi:10.1016/J.FUEL.2020.119145
- [17] Theerarattananoon K, Xu F, Wilson J, Ballard R, Mckinney L, Staggenborg S, et al. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Ind Crops Prod.* 2011;33:325–32. doi:10.1016/J.INDCROP.2010.11.014
- [18] Kaliyan N, Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy.* 2009;33:337–59. doi:10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005
- [19] Serrano C, Monedero E, Lapuerta M, Portero H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology.* 2011;92:699–706. doi:10.1016/J.FUPROC.2010.11.031



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงกลยุทธ์และการกำหนดค่าน้ำหนักสำหรับการตัดสินใจย้ายฐาน
การผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

Strategic Factor Analysis and Weight Determination for Textile Industry Production

Relocation Decisions in CLMV Countries

โกวิทย์ พลหาญ¹⁾ พัฒนพงษ์ พลายแก้ว^{2)*} คัมภีรดา เทพพิทักษ์¹⁾ พันธัญญ์ ยังสุข³⁾Kowit Ponhan ¹⁾ Pattanapong Praykaw ^{2)*} Khumpirada Thepphithak ¹⁾ Bhanarunn Youngsook ³⁾¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน³⁾ วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิทยาเขตขอนแก่น¹⁾ Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University²⁾ Faculty of Business Administration and Information Technology Rajamangala University of Technology Isan³⁾ College of Logistics and Supply Chain Sripatum University Khon Kaen Campus

Received: 19 May 2026

Revised: 4 June 2026

Accepted: 11 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างต้นทุนการผลิตและการแข่งขันในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่งผลให้การตัดสินใจย้ายฐานการผลิตไปยังกลุ่มประเทศ CLMV ได้แก่ กัมพูชา ลาว เมียนมา และเวียดนาม เป็นประเด็นเชิงกลยุทธ์ที่มีความสำคัญต่อผู้ประกอบการและผู้กำหนดนโยบายด้านอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV และกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยจากมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ การวิจัยเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน การลงทุนระหว่างประเทศ และการย้ายฐานการผลิต สามารถ

สังเคราะห์ปัจจัยได้ทั้งหมด 28 รายการ และจัดกลุ่มเป็น 9 มิติหลัก ได้แก่ แรงงาน กฎหมายและข้อบังคับ สถานการณ์ทางการเมือง คุณภาพชีวิต โครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม ภูมิศาสตร์ และสังคม ข้อมูลเก็บรวบรวมจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คน ผ่านแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ และวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำผลการจัดอันดับปัจจัยมาคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธีเชิงอันดับ 3 วิธี ได้แก่ Rank Sum (RS), Rank Reciprocal (RR), Rank Order Centroid (ROC) ผลการศึกษาพบว่า ค่าแรงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด รองลงมาคือ ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจและเงินอุดหนุน ปริมาณแรงงาน และตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักสะท้อนว่า RS, RR และ ROC ให้แนวโน้มลำดับความสำคัญสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม วิธี RR ให้น้ำหนักแก่ปัจจัยอันดับต้นเด่นชัดกว่าวิธีอื่น ขณะที่ ROC มีรูปแบบการกระจายอยู่ระหว่าง RS และ RR ผลการวิจัยนี้เสนอกรอบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์สำหรับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสิ่งทอและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการประเมินปัจจัยก่อนการย้ายฐานการผลิตไปยังกลุ่มประเทศ CLMV อย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: การย้ายฐานการผลิต อุตสาหกรรมสิ่งทอ ปัจจัยการตัดสินใจ CLMV การเลือกทำเลที่ตั้ง

Abstract

Production relocation in the textile industry represents a strategic decision that affects cost structure, competitiveness, and supply chain continuity, particularly in the context of CLMV countries, namely Cambodia, Lao PDR, Myanmar, and Vietnam. These countries are geographically, commercially, and logistically connected with Thailand and have become potential destinations for labor-intensive manufacturing activities. This study aims to analyze the factors affecting production relocation decisions in the textile industry in CLMV countries and to determine the relative importance weights of those factors from expert perspectives. The study began with a review of literature related to factory location selection, international investment, and production relocation. A total of 28 factors were identified and classified into nine major dimensions: labor, laws and regulations, political conditions, quality of life, infrastructure, economy, environment, geography, and society. Data were collected from 23 experts using a five-point Likert scale questionnaire and analyzed using descriptive statistics, including mean and standard deviation. The ranked factors were subsequently converted into importance weights using three rank-based weighting methods: Rank Sum (RS), Rank Reciprocal (RR), and Rank Order Centroid (ROC). The findings indicate that wage cost was the most important factor affecting production relocation decisions. The next most important factors were natural disaster

risk, tax benefits, incentives and subsidies, labor supply, and geographic location, respectively. The comparison of factor weights shows that RS, RR, and ROC produced generally consistent priority patterns. However, RR assigned a substantially higher weight to the top-ranked factor, whereas ROC generated a weighting pattern between RS and RR. The findings provide a systematic strategic decision-support framework for textile entrepreneurs and relevant agencies in evaluating key factors before relocating production bases to CLMV countries.

Keywords: Production relocation: Textile industry: Location selection: CLMV: Decision factors

*ติดต่อ: pattanapong.pr@rmuti.ac.th

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างต้นทุนการผลิต การแข่งขันด้านราคา และความผันผวนของห่วงโซ่อุปทานโลก ส่งผลให้อุตสาหกรรมสิ่งทอต้องปรับกลยุทธ์การดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง เฉพาะอุตสาหกรรมที่พึ่งพาแรงงานจำนวนมากและมีความอ่อนไหวต่อต้นทุนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม ภายใต้อุปสรรคดังกล่าว การตัดสินใจย้ายฐานการผลิตมิใช่เพียงการเลือกประเทศที่มีค่าแรงต่ำ หากเป็นการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ที่มีผลตรงต่อความสามารถในการแข่งขัน ต้นทุนรวม ความต่อเนื่องของการผลิต และความคุ้มค่าของการลงทุนในระยะยาว [1,2] นอกจากนี้ ลักษณะเฉพาะของอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งต้องอาศัยแรงงาน ระบบสาธารณูปโภค การขนส่งวัตถุดิบ และการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม ทำให้กระบวนการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายมิติที่เชื่อมโยงกันอย่างซับซ้อน [3,4]

ในบริบทของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ กลุ่มประเทศ CLMV ได้แก่ กัมพูชา ลาว เมียนมา และเวียดนาม เป็นภูมิภาคที่ได้รับความสนใจจาก

ผู้ประกอบการไทยในฐานะพื้นที่รองรับการขยายหรือกระจายฐานการผลิต เนื่องจากมีความใกล้ชิดทางภูมิศาสตร์กับประเทศไทย มีความเชื่อมโยงด้านการค้า การลงทุน และโลจิสติกส์ รวมทั้งมีความแตกต่างด้านต้นทุนแรงงานและนโยบายส่งเสริมการลงทุน [5,6] อย่างไรก็ตาม การพิจารณาย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศในกลุ่ม CLMV เกี่ยวข้องกับความแตกต่างด้านโครงสร้างพื้นฐาน เสถียรภาพทางการเมือง ระบบกฎหมาย เศรษฐกิจ สาธารณูปโภค ความพร้อมของแรงงาน และความเสี่ยงจากภัยพิบัติ ดังนั้น การเลือกฐานการผลิตจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเชิงกลยุทธ์หลายด้านร่วมกัน แทนการพิจารณาเฉพาะค่าแรงหรือสิทธิประโยชน์ด้านภาษีเพียงด้านเดียว [1,7]

จากการศึกษาที่ผ่านมา งานวิจัยด้านการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานและการตัดสินใจลงทุนระหว่างประเทศให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านต้นทุน แรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน ระบบขนส่ง สิ่งแวดล้อม และเงื่อนไขเชิงนโยบายของพื้นที่ปลายทาง มีการประยุกต์ใช้แนวคิดการตัดสินใจหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision

Making: MCDM) เพื่อจัดการกับปัจจัยที่มีความหลากหลายและบางกรณีมีลักษณะขัดแย้งกัน [3,7,8] แนวทางดังกล่าวช่วยให้กระบวนการตัดสินใจมีความเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถอธิบายเหตุผลของการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เฉพาะในกรณีที่ต้องเปรียบเทียบปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น ต้นทุน ค่าแรง และค่าสาธารณูปโภค ร่วมกับปัจจัยเชิงคุณภาพ เช่น เสถียรภาพทางการเมือง คุณภาพแรงงาน และความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม [8,9]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งยังมีข้อจำกัดในด้านการศึกษาที่มุ่งเน้นบริบทของอุตสาหกรรมสิ่งทอไทยและกลุ่มประเทศ CLMV เฉพาะงานวิจัยที่วิเคราะห์ “ปัจจัยเชิงกลยุทธ์” และ “การกำหนดค่าน้ำหนักของปัจจัย” จากมุมมองของผู้เชี่ยวชาญตรงยังมีจำนวนจำกัด นอกจากนี้ การเปรียบเทียบวิธีการกำหนดค่าน้ำหนักที่แตกต่างกันมีความสำคัญ เนื่องจากแต่ละวิธีให้รูปแบบการกระจายน้ำหนักแตกต่างกัน และอาจส่งผลกระทบต่อความลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้สนับสนุนการตัดสินใจ [9,10]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์ปัจจัยเชิงกลยุทธ์ และกำหนดค่าน้ำหนักสำหรับการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV ได้พิจารณาจากมุมมองของผู้เชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำมาสังเคราะห์และจัดกลุ่มให้อยู่ในหมวดหมู่ที่ชัดเจน เพื่อลดความซ้ำซ้อนและเพิ่มความสอดคล้องเชิงแนวคิด ก่อนนำไปเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อ

จัดลำดับความสำคัญของปัจจัย และคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธีการกำหนดน้ำหนักจากอันดับ ได้แก่ Rank Sum (RS), Rank Reciprocal (RR), Rank Order Centroid (ROC) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในด้านความเรียบง่าย ความสะดวกในการประยุกต์ใช้ และความสามารถในการสะท้อนลำดับความสำคัญของปัจจัย [10]

ผลการศึกษานี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ นำเสนอทั้งโครงสร้างความสำคัญของปัจจัย และแนวทางการกำหนดค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นกรอบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์สำหรับผู้ประกอบการ หน่วยงานส่งเสริมการลงทุน และผู้กำหนดนโยบายได้อย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความโปร่งใส ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการอธิบายเหตุผลของการพิจารณาปัจจัยก่อนการย้ายฐานการผลิตในบริบทของภูมิภาคที่มีพลวัตทางเศรษฐกิจและการแข่งขันด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ปัจจัยที่มีผลต่อการย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

จากการพิจารณาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยในประเด็นการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานและการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตให้ความสำคัญกับปัจจัยที่สะท้อนความสามารถในการลดต้นทุน ความต่อเนื่องของการผลิต และความเหมาะสมของสภาพแวดล้อมทางธุรกิจ Arunyanart et al. [1] ศึกษาการเลือกทำเลที่ตั้งระหว่างประเทศสำหรับการกระจายกิจกรรมการ

ผลิต และระบุว่าการตัดสินใจในระดับนานาชาติต้องพิจารณาปัจจัยหลายด้านร่วมกัน ทั้งด้านต้นทุน แรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน ตลาด และความเสี่ยงของประเทศปลายทาง ขณะที่แนวคิดของ Dunning อธิบายว่าการเลือกทำเลของกิจการข้ามชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับความได้เปรียบด้านต้นทุนเพียงด้านเดียว หากยังเกี่ยวข้องกับศักยภาพของพื้นที่ สภาพแวดล้อมเชิงสถาบัน และความสามารถในการสนับสนุนการดำเนินงานระยะยาว [4]

ในกลุ่มงานวิจัยด้านการเลือกทำเลอุตสาหกรรม การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานถูกพิจารณาเป็นปัญหาการตัดสินใจหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) เนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยทั้งปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ อีกทั้งบางปัจจัยอาจมีลักษณะขัดแย้งกัน เช่น ค่าแรงต่ำ อาจสัมพันธ์กับข้อจำกัดด้านทักษะแรงงาน หรือพื้นที่ที่มีต้นทุนที่ดินต่ำอาจมีข้อจำกัดด้านระบบขนส่งและสาธารณูปโภค งานของ Rikalovic, Cosic และ Lazarevic แสดงให้เห็นว่าการเลือกพื้นที่อุตสาหกรรมควรพิจารณาข้อมูลเชิงพื้นที่ร่วมกับปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม และโครงสร้างพื้นฐาน [8] ขณะที่ Chang และ Lin ยืนยันว่าการเลือกทำเลโรงงานในเครือข่ายโลจิสติกส์ต้องพิจารณาทั้งระบบขนส่ง ต้นทุน และความสามารถในการเชื่อมโยงกับตลาดปลายทาง [3]

สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ ปัจจัยด้านแรงงานมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานในหลายกระบวนการผลิต ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การปั่นด้าย การทอ การย้อม การตกแต่งสำเร็จ ไปจนถึงการผลิตเครื่องนุ่งห่ม [3,4]

ดังนั้น ค่าแรง ปริมาณแรงงาน และระดับทักษะของแรงงานจึงเป็นตัวกำหนดต้นทุนและประสิทธิภาพการผลิต อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจย้ายฐานการผลิตจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานสิ่งทอต้องพึ่งพาระบบไฟฟ้า น้ำประปา ระบบขนส่ง มาตรการภาษี และความต่อเนื่องของการดำเนินงาน [1,4]

ในบริบทของกลุ่มประเทศ CLMV ได้แก่ กัมพูชา ลาว เมียนมา และเวียดนาม วรรณกรรมและรายงานด้านเศรษฐกิจระบุว่าประเทศเหล่านี้มีศักยภาพในการรองรับการลงทุนของอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานเข้มข้น เนื่องจากมีความเชื่อมโยงทางภูมิศาสตร์กับประเทศไทย มีความแตกต่างด้านค่าแรง และมีนโยบายส่งเสริมการลงทุนในบางประเทศ [9,10] อย่างไรก็ตาม แต่ละประเทศยังมีความแตกต่างด้านเสถียรภาพทางการเมือง โครงสร้างพื้นฐาน กฎหมายแรงงาน ระบบสาธารณูปโภค ความเสี่ยงจากภัยพิบัติ และสภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจ ด้วยเหตุนี้ การประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการย้ายฐานการผลิตจึงจำเป็นต้องครอบคลุมทั้งมิติด้านต้นทุน ความเสี่ยง ความพร้อมของทรัพยากร และความสามารถในการสนับสนุนการดำเนินงานในระยะยาว

จากการสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยการย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอไม่ได้จำกัดอยู่เพียงมิติด้านค่าแรงหรือต้นทุนการผลิตเท่านั้น หากครอบคลุมอย่างน้อย 4 มิติสำคัญ ได้แก่ มิติด้านต้นทุนและแรงงาน มิติด้านโครงสร้างพื้นฐานและโลจิสติกส์ มิติด้านนโยบายกฎหมาย และเศรษฐกิจ และมิติด้านความเสี่ยง สังคม และคุณภาพชีวิต นอกจากนี้ วรรณกรรมยังสะท้อนให้

เห็นว่า ปัจจัยแต่ละด้านส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อความสำเร็จของการย้ายฐานการผลิต เช่น ค่าแรงมีผลต่อต้นทุน ขณะที่ความเสี่ยงจากภัยพิบัติและเสถียรภาพทางการเมืองมีผลต่อความต่อเนื่องของการผลิตและความเชื่อมั่นของผู้ลงทุน

เพื่อให้ได้กรอบปัจจัยที่เหมาะสมกับบริบทของการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV งานวิจัยนี้นำปัจจัยจากวรรณกรรมทั้งหมดมาวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบและจัดกลุ่มใหม่ รวมปัจจัยที่มีความหมายใกล้เคียงกันไว้ภายใต้ชื่อมาตรฐานเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวช่วยลดความซ้ำซ้อนของถ้อยคำจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ และเพิ่มความชัดเจนเชิงแนวคิด ก่อนนำไปสู่การจัดอันดับและการคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัยในขั้นตอนถัดไป แนวทางนี้สอดคล้องกับลักษณะของงานวิจัยด้าน MCDM ซึ่งต้องเริ่มจากการกำหนดโครงสร้างเกณฑ์ที่ชัดเจน ตรวจสอบได้ และสอดคล้องกับบริบทของปัญหา ก่อนดำเนินการให้น้ำหนักหรือประเมินทางเลือก [8,9]

จากกระบวนการสังเคราะห์ดังกล่าว งานวิจัยนี้สามารถระบุปัจจัยได้ทั้งหมด 28 รายการ และจัดกลุ่มเป็น 9 มิติหลักได้แก่ ปัจจัยด้านแรงงาน ปัจจัยด้านกฎหมายและข้อบังคับ ปัจจัยด้านสถานการณ์ทางการเมือง ปัจจัยด้านคุณภาพชีวิต ปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐาน ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านภูมิศาสตร์ และปัจจัยด้านสังคม ดังตารางที่ 1 โครงสร้างปัจจัยดังกล่าวสะท้อนมิติด้านต้นทุน การดำเนินงาน ความเสี่ยง และความพร้อมของพื้นที่ปลายทางได้อย่างครอบคลุม จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นกรอบวิเคราะห์การ

ตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

ตารางที่ 1

โครงสร้างมิติหลักและปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

	ปัจจัย	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
1. ปัจจัยด้านแรงงาน		
SF1	ค่าแรง	[1,2,4]
SF2	ปริมาณแรงงาน	[1,2,4]
SF3	ระดับทักษะและความสามารถของแรงงาน	[1,2,4]
SF4	กฎหมายและข้อบังคับด้านแรงงาน	[1,2,13]
2. ปัจจัยด้านกฎหมายและข้อบังคับ		
SF5	สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจ และเงินอุดหนุน	[1,2,7]
SF6	กฎหมายกรรมสิทธิ์ของชาวต่างชาติ	[2,5,6]
SF7	บทบัญญัติทางกฎหมายเกี่ยวกับมลพิษทางเสียง	[3,7,13]
3. ปัจจัยด้านสถานการณ์ทางการเมือง		
SF8	โครงสร้างและความมั่นคงของรัฐบาล	[2,5,6]
SF9	ระดับการแทรกแซงทางการเมืองในธุรกิจ	[2,5,6]
4. ปัจจัยด้านคุณภาพชีวิต		
SF10	คุณภาพของการบริการด้านสุขภาพ	[2,7]
SF11	คุณภาพการศึกษา	[2,7]
SF12	ความเพียงพอของที่พักอาศัย	[2,7]

	ปัจจัย	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
SF13	สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการด้านสันตนาการ	[2,7]
5. ปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐาน		
SF14	คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้า	[3,4,7]
SF15	คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของน้ำประปา	[3,4,7]
SF16	ประสิทธิภาพของระบบขนส่ง	[3,4,7]
SF17	อัตราค่าไฟฟ้า	[1,3,4]
SF18	อัตราค่าน้ำประปา	[1,3,4]
SF19	ราคาค่าเช่าที่ดิน	[2,3,7]
6. ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ		
SF20	อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา	[2,5,6]
SF21	ภาษีศุลกากร	[2,5,6]
SF22	อัตราเงินเฟ้อ	[2,5,6]
SF23	การเติบโตของจีดีพี	[2,5,6]
SF24	ความมั่นคงของสถาบันการเงิน	[2,5,6]
7. ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม		
SF25	คุณภาพสิ่งแวดล้อม	[3,7,13]
SF26	ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ	[3,7,13]
8. ปัจจัยด้านภูมิศาสตร์		
SF27	ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	[1,3,7]
9. ปัจจัยด้านสังคม		
SF28	ความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน	[2,7]

เพื่อให้การใช้จ่ายในบทความมีความสอดคล้องกัน งานวิจัยนี้กำหนดคำเรียกของโครงสร้างปัจจัยเป็น 2 ระดับ ได้แก่ มิติหลัก หมายถึง กลุ่มของปัจจัยในระดับหมวดหมู่ จำนวน 9 มิติ ได้แก่ ด้านแรงงาน ด้านกฎหมายและข้อบังคับ ด้านสถานการณ์ทางการเมือง ด้านคุณภาพชีวิต ด้านโครงสร้างพื้นฐาน ด้านเศรษฐกิจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านภูมิศาสตร์ และด้านสังคม ส่วน ปัจจัย หมายถึง รายการปัจจัยที่ใช้ในการประเมินโดยตรง จำนวน 28 รายการ รหัส SF1–SF28 ทั้งนี้ ผลการประเมินระดับความสำคัญ การจัดอันดับ และการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธี RS, RR และ ROC ในบทความนี้เป็นการวิเคราะห์ในระดับ ปัจจัย 28 รายการ ไม่ใช้การคำนวณค่าน้ำหนักในระดับมิติหลัก 9 ด้าน

2.2. การหาค่าน้ำหนักของปัจจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการกำหนดน้ำหนักบนพื้นฐานของการจัดลำดับ (Rank-based Weighting) จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธีผลรวมของการจัดลำดับ (Rank Sum: RS) วิธีส่วนกลับของการจัดลำดับ (Rank Reciprocal: RR) และวิธีการใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ (Rank Order Centroid: ROC) วิธีดังกล่าวได้รับการกล่าวถึงอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการตัดสินใจหลายเกณฑ์ เนื่องจากมีโครงสร้างการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน ใช้งานได้สะดวก และสามารถสะท้อนความสำคัญเชิงลำดับของปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10]

ในบริบทของการวิจัยนี้ การใช้วิธีการกำหนดน้ำหนักบนพื้นฐานของการจัดลำดับมีความเหมาะสมเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญเป็นคะแนนการ

ประเมินระดับความสำคัญด้วยมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาใช้จัดลำดับความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของปัจจัย มากกว่าการตีความเป็นค่าระยะห่างเชิงปริมาณอย่างสมบูรณ์ การใช้วิธี Rank-based Weighting จึงช่วยแปลงผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญให้อยู่ในรูปค่าน้ำหนักที่เข้าใจง่าย เป็นระบบ และเหมาะสมกับกรณีที่มีปัจจัยจำนวนมากถึง 28 รายการ นอกจากนี้ การใช้วิธี RS, RR และ ROC ร่วมกันยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายน้ำหนักภายใต้หลักการคำนวณที่แตกต่างกัน และใช้ประกอบการพิจารณาความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของปัจจัยได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ผู้วิจัยตระหนักว่าการแปลงค่าเฉลี่ยเป็นอันดับอาจทำให้รายละเอียดเกี่ยวกับระยะห่างของคะแนนเฉลี่ยระหว่างปัจจัยลดลง เนื่องจากวิธี RS, RR และ ROC คำนวณค่าน้ำหนักจากลำดับอันดับ ไม่ได้คำนวณจากขนาดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยตรง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงรายงานค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานควบคู่กับค่าน้ำหนัก เพื่อให้สามารถพิจารณาทั้งระดับคะแนนดิบ การกระจายของความคิดเห็น และค่าน้ำหนักเชิงอันดับร่วมกันได้อย่างรอบด้าน

กำหนดให้มีปัจจัยทั้งหมดจำนวน N ปัจจัย ให้ n แทนปัจจัยลำดับที่ n เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots, N$ และให้ r_n แทนอันดับความสำคัญของปัจจัยที่ n อันดับที่ 1 หมายถึงปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด ส่วน w_n แทนค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ n ซึ่งค่าน้ำหนักของทุกปัจจัยรวมกันมีค่าเท่ากับ 1

(1) วิธีผลรวมของการจัดลำดับ (RS) [14]

$$w_n = \frac{N - r_n + 1}{\sum_{k=1}^N (N - r_k + 1)} \quad (1)$$

ที่ w_n คือค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ n , N คือจำนวนปัจจัยทั้งหมด, r_n คืออันดับของปัจจัยที่ n , และ k คือดัชนีที่ใช้ในการรวมค่าของปัจจัยทั้งหมดตั้งแต่ปัจจัยที่ 1 ถึงปัจจัยที่ N สมการนี้กำหนดน้ำหนักจากผลรวมของอันดับ ปัจจัยที่มีอันดับสูงกว่าจะได้รับค่าคะแนนมากกว่า เช่น ปัจจัยที่มีอันดับ 1 ได้คะแนนเท่ากับ N ขณะที่ปัจจัยอันดับสุดท้ายได้คะแนนเท่ากับ 1 จากนั้นนำคะแนนของแต่ละปัจจัยหารด้วยผลรวมคะแนนทั้งหมด เพื่อปรับให้ค่าน้ำหนักรวมของทุกปัจจัยเท่ากับ 1 วิธี RS จึงให้ค่าน้ำหนักลดลงตามลำดับความสำคัญในลักษณะเชิงเส้น

(2) วิธีส่วนกลับของการจัดลำดับ (RR) [14]

$$w_n = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{r_k} \right)} \quad (2)$$

ที่ w_n คือค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ n , r_n คืออันดับของปัจจัยที่ n , และ $\sum_{k=1}^N (1/r_k)$ คือผลรวมของค่าส่วนกลับของอันดับของปัจจัยทั้งหมด สมการนี้กำหนดน้ำหนักจากค่าส่วนกลับของอันดับ กล่าวคือปัจจัยที่มีอันดับสูงจะมีค่า $1/r_n$ มากกว่าปัจจัยที่มีอันดับต่ำ เช่น อันดับที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนอันดับที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.5 และอันดับที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.333 จากนั้นนำค่าดังกล่าวหารด้วยผลรวมของค่าส่วนกลับทั้งหมด เพื่อให้ผลรวมของค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 วิธี RR จึงให้ความสำคัญกับปัจจัยอันดับต้นในระดับสูงกว่าวิธี RS

(3) วิธีการใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ (ROC) [14]

$$w_n = \frac{1}{N} \sum_{k=n}^N \frac{1}{r_k} \quad (3)$$

ที่ w_n คือค่าน้ำหนักของปัจจัยที่ n , N คือจำนวนปัจจัยทั้งหมด, r_n คืออันดับของปัจจัยที่ n , และ k คือดัชนีของอันดับที่ใช้ในการรวมค่าตั้งแต่อันดับของปัจจัยนั้นจนถึงอันดับสุดท้าย สมการนี้คำนวณค่าน้ำหนักจากค่าเฉลี่ยของผลรวมส่วนกลับของอันดับตั้งแต่อันดับ r_n ถึง N กล่าวคือ ปัจจัยที่อยู่ในอันดับสูงกว่าจะได้รับผลรวมมากกว่า เนื่องจากมีช่วงการรวมค่าที่ครอบคลุมอันดับจำนวนมากกว่า วิธี ROC จึงสามารถสะท้อนลำดับความสำคัญของปัจจัยได้อย่างสมดุล และทั่วไปให้ค่าการกระจายน้ำหนักอยู่ระหว่างวิธี RS และ RR

ดังนั้น ค่าน้ำหนักที่ได้จากแต่ละวิธีมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ วิธี RS ให้ค่าน้ำหนักแบบเชิงเส้นตามลำดับความสำคัญ ทำให้ความแตกต่างระหว่างอันดับลดลงอย่างสม่ำเสมอ วิธี RR ให้ความสำคัญกับปัจจัยอันดับต้นมากกว่าวิธีอื่น เนื่องจากใช้น้ำหนักแบบผกผันตามอันดับ ส่วนวิธี ROC ให้ค่าน้ำหนักที่สะท้อนการกระจายของอันดับอย่างสมดุล ดังนั้น การประยุกต์ใช้ทั้งสามวิธีร่วมกันจึงช่วยให้การวิเคราะห์สามารถเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายน้ำหนัก ตรวจสอบความเสถียรของลำดับความสำคัญ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการจัดลำดับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตได้อย่างเป็นระบบ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ออกแบบวิธีดำเนินการอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การศึกษาปัจจัยจากวรรณกรรม การพัฒนาเครื่องมือวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยรายละเอียดมีดังนี้

3.1. การศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับการย้ายฐานการผลิต

การศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับการย้ายฐานการผลิตดำเนินการการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ มุ่งเน้นงานวิจัยด้านการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน การเลือกพื้นที่อุตสาหกรรม การลงทุนระหว่างประเทศ และการตัดสินใจหลายเกณฑ์ เพื่อรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตในบริบทของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

จากการทบทวนวรรณกรรม ปัจจัยที่ปรากฏในงานวิจัยก่อนหน้าถูกนำมาสังเคราะห์และวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ พิจารณาความหมาย ความซ้ำซ้อน และความสอดคล้องเชิงแนวคิด จากนั้นจึงจัดกลุ่มปัจจัยออกเป็นมิติหลักและปัจจัย เพื่อใช้เป็นกรอบในการพัฒนาเครื่องมือวิจัยให้เหมาะสมกับบริบทของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

ผลจากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมสามารถกำหนดปัจจัยได้ทั้งหมด 28 รายการ และจัดกลุ่มเป็น 9 มิติหลัก ได้แก่ ปัจจัยด้านแรงงาน ปัจจัยด้านกฎหมายและข้อบังคับ ปัจจัยด้านสถานการณ์ทางการเมือง ปัจจัยด้านคุณภาพชีวิต ปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐาน ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านภูมิศาสตร์ และปัจจัยด้านสังคม

3.2. การสร้างแบบสอบถาม

ปัจจัยที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมและการสังเคราะห์เชิงแนวคิดถูกนำมาพัฒนาเป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ เพื่อใช้ประเมินระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น สาขาความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง และส่วนที่ 2 การประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนตามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

ค่าระดับความสำคัญของปัจจัย

ระดับคะแนน	คำอธิบาย
5	ปัจจัยมีความสำคัญมากที่สุด
4	ปัจจัยมีความสำคัญมาก
3	ปัจจัยมีความสำคัญปานกลาง
2	ปัจจัยมีความสำคัญน้อย
1	ปัจจัยมีความสำคัญน้อยที่สุด

การกำหนดระดับคะแนนดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินและเปรียบเทียบระดับความสำคัญของปัจจัยแต่ละรายการได้อย่างเป็นระบบ ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามนำไปใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธีการกำหนดน้ำหนักบนพื้นฐานของการจัดลำดับในขั้นตอนถัดไป

3.3. การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity)

แบบสอบถามที่พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาจากผู้ทรงคุณวุฒิหรือผู้เชี่ยวชาญที่มีความเกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้ง การย้ายฐานการผลิต และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของรายการปัจจัย ความชัดเจนของถ้อยคำ และความครอบคลุมของเนื้อหา

กรณีที่ข้อคำถามมีความคลุมเครือ ข้ำซ้อน หรือไม่สอดคล้องกับบริบทของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผู้วิจัยดำเนินการปรับปรุงถ้อยคำหรือแก้ไขรายการปัจจัยให้มีความเหมาะสมก่อนนำแบบสอบถามไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ทั้งนี้ การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เครื่องมือวิจัยมีความถูกต้อง เหมาะสม และสามารถสะท้อนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอได้อย่างครอบคลุม

3.4. การกำหนดผู้เชี่ยวชาญในการประเมินแบบสอบถาม

การวิจัยนี้กำหนดกลุ่มผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เพื่อให้ได้ผู้ให้ข้อมูลที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ หรือประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญพิจารณาจากความเกี่ยวข้องกับมิติหลักของการวิจัย ได้แก่ ด้านแรงงาน กฎหมายและข้อบังคับ สถานการณ์ทางการเมือง คุณภาพชีวิต โครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม ภูมิศาสตร์ และสังคม

ผู้เชี่ยวชาญที่ได้รับการคัดเลือกต้องมีคุณสมบัติเกี่ยวข้องกับการวิจัยอย่างน้อยหนึ่งด้าน เช่น มีความรู้

หรือประสบการณ์เกี่ยวกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการผลิต การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน การลงทุนระหว่างประเทศ โลจิสติกส์ โครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ กฎหมาย แรงงาน สิ่งแวดล้อม หรือบริบทของประเทศในกลุ่ม CLMV ทั้งนี้ การใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คนเป็นการเก็บข้อมูลในลักษณะการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง (expert-based assessment) ซึ่งมุ่งเน้นคุณสมบัติ ความรู้ และประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยในการย้ายฐานการผลิต มากกว่าการสุ่มตัวอย่างเพื่ออนุมานผลไปยังประชากรทั่วไป

ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คน ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านแรงงาน จำนวน 7 คน ด้านกฎหมายและข้อบังคับ จำนวน 2 คน ด้านสถานการณ์ทางการเมือง จำนวน 1 คน ด้านคุณภาพชีวิต จำนวน 1 คน ด้านโครงสร้างพื้นฐาน จำนวน 5 คน ด้านเศรษฐกิจ จำนวน 4 คน ด้านสิ่งแวดล้อม จำนวน 1 คน ด้านภูมิศาสตร์ จำนวน 1 คน และด้านสังคม จำนวน 1 คน ดังแสดงในตารางที่ 3

แม้ว่าจำนวนผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสาขาจะมีสัดส่วนไม่เท่ากัน แต่ผู้เชี่ยวชาญทุกคนได้รับแบบสอบถามชุดเดียวกันและประเมินปัจจัยครบทั้ง 28 รายการ ภายใต้เกณฑ์การให้คะแนนเดียวกัน มิได้ประเมินเฉพาะปัจจัยในสาขาความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น แนวทางดังกล่าวช่วยให้ผลการประเมินสะท้อนมุมมองเชิงเปรียบเทียบของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญต่อปัจจัยทั้งหมดได้อย่างเป็นระบบ และลดความเป็นไปได้ของความคลาดเคลื่อนจากการประเมินเฉพาะมิติใดมิติหนึ่ง นอกจากนี้ ผู้วิจัยใช้รายการปัจจัยที่สังเคราะห์จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งชี้แจง

ความหมายของปัจจัยก่อนการประเมิน เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญมีความเข้าใจต่อรายการปัจจัยในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 3

คุณลักษณะของผู้เชี่ยวชาญตามสาขาความเชี่ยวชาญ

สาขาความเชี่ยวชาญ	จำนวน	ร้อยละ
แรงงาน	7	30.43
กฎหมายและข้อบังคับ	2	8.70
สถานการณ์ทางการเมือง	1	4.35
คุณภาพชีวิต	1	4.35
โครงสร้างพื้นฐาน	5	21.74
เศรษฐกิจ	4	17.39
สิ่งแวดล้อม	1	4.35
ภูมิศาสตร์	1	4.35
สังคม	1	4.35
รวม	23	100.00

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้เชี่ยวชาญด้านแรงงานมีสัดส่วนมากที่สุด จำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 30.43 รองลงมาคือผู้เชี่ยวชาญด้านโครงสร้างพื้นฐาน จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 21.74 และผู้เชี่ยวชาญด้านเศรษฐกิจ จำนวน 4 คน คิดเป็นร้อยละ 17.39 สัดส่วนดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานเข้มข้นและต้องพึ่งพาความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ต้นทุนการดำเนินงาน และเสถียรภาพทางเศรษฐกิจของประเทศปลายทางเป็นสำคัญ

แม้ว่าจำนวนผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสาขาจะมีสัดส่วนไม่เท่ากัน แต่การวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ผู้เชี่ยวชาญทุกคนประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยครบทั้ง 28 รายการด้วยแบบสอบถามชุดเดียวกัน มิได้ให้

ผู้เชี่ยวชาญประเมินเฉพาะปัจจัยในสาขาความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น แนวทางดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลการประเมินสะท้อนมุมมองโดยรวมต่อปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจย้ายฐานการผลิต มากกว่าการสะท้อนมุมมองของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ลดความเป็นไปได้ของความเอนเอียงในการประเมินโดยกำหนดรายการปัจจัยจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จัดกลุ่มปัจจัยเป็น 9 มิติหลักอย่างเป็นระบบ ใช้แบบสอบถามมาตรฐานเดียวกันสำหรับผู้เชี่ยวชาญทุกคน และชี้แจงความหมายของปัจจัยก่อนการประเมิน เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญมีความเข้าใจต่อรายการปัจจัยในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ ผู้วิจัยตระหนักว่าความไม่สมดุลของจำนวนผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสาขาอาจมีผลต่อมุมมองโดยรวมของผลการประเมิน จึงได้นำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้ประกอบการอภิปรายผล เพื่อพิจารณาระดับการกระจายของความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในแต่ละปัจจัย

3.5. การเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการนำแบบสอบถามให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยทั้ง 28 รายการ รูปแบบการเก็บรวบรวมข้อมูลประกอบด้วย 2 แนวทาง ได้แก่ (1) การสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง (Structured Interview) เพื่อให้สามารถชี้แจงความหมายของปัจจัยและรับฟังข้อคิดเห็นเพิ่มเติมจากผู้เชี่ยวชาญ และ (2) การตอบแบบสอบถามด้วยตนเองของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเปิดโอกาสให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินระดับความสำคัญของ

ปัจจัยตามความรู้ ประสบการณ์ และความเชี่ยวชาญของตนเอง

การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนได้รับแบบสอบถามรายการเดียวกันและประเมินปัจจัยครบทั้ง 28 รายการภายใต้เกณฑ์การให้คะแนนเดียวกัน การออกแบบดังกล่าวช่วยให้สามารถเปรียบเทียบระดับความสำคัญของปัจจัยทุกข้อภายใต้ฐานการประเมินเดียวกัน และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการให้ผู้เชี่ยวชาญแต่ละสาขาประเมินเฉพาะปัจจัยในมิติของตนเอง

ก่อนดำเนินการประเมิน ผู้วิจัยอธิบายความหมายของปัจจัยสำคัญให้ชัดเจน เพื่อสร้างความเข้าใจที่สอดคล้องกันระหว่างผู้เชี่ยวชาญ ตัวอย่างเช่น ค่าแรง หมายถึง ต้นทุนค่าจ้างแรงงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ปริมาณแรงงาน หมายถึง ความเพียงพอของแรงงานในพื้นที่ คุณภาพและความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้า หมายถึง ความเสถียรและความพร้อมของระบบไฟฟ้าที่สนับสนุนกระบวนการผลิต และความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ หมายถึง โอกาสเกิดเหตุการณ์ที่ส่งผลให้กระบวนการผลิตหรือระบบขนส่งเกิดการหยุดชะงัก ข้อมูลที่ได้จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัย การจัดลำดับปัจจัย และการคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัยในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

3.6. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อจัดลำดับ

ความสำคัญของปัจจัยเบื้องต้น และพิจารณาระดับการกระจายของความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ ค่าเฉลี่ยใช้สำหรับสะท้อนระดับความสำคัญรวมของแต่ละปัจจัย ส่วนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานใช้สำหรับพิจารณาความสอดคล้องหรือความแตกต่างของความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญต่อปัจจัยแต่ละรายการ

การแปลผลค่าเฉลี่ยกำหนดตามเกณฑ์ 5 ระดับ ดังนี้ ค่าเฉลี่ย 4.21–5.00 หมายถึง ปัจจัยมีความสำคัญมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 3.41–4.20 หมายถึง ปัจจัยมีความสำคัญมาก ค่าเฉลี่ย 2.61–3.40 หมายถึง ปัจจัยมีความสำคัญปานกลาง ค่าเฉลี่ย 1.81–2.60 หมายถึง ปัจจัยมีความสำคัญน้อย และค่าเฉลี่ย 1.00–1.80 หมายถึง ปัจจัยมีความสำคัญน้อยที่สุด

การพิจารณาความสอดคล้องของความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญดำเนินการในเบื้องต้นจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละปัจจัย โดยปัจจัยที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสะท้อนว่าผู้เชี่ยวชาญมีแนวโน้มให้ความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกันมากกว่า ปัจจัยที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง ทั้งนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถูกนำมาใช้ประกอบการอภิปรายผล เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยใดมีระดับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญสอดคล้องกันมากหรือน้อย ก่อนนำผลการจัดอันดับไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี Rank Sum (RS), Rank Reciprocal (RR), Rank Order Centroid (ROC)

3.7. การกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย

ผลการประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยจำนวน 28 รายการ จากผู้เชี่ยวชาญถูกนำมาจัดอันดับก่อน

การคำนวณค่าน้ำหนัก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของคะแนนความสำคัญเป็นเกณฑ์หลักในการจัดอันดับ กล่าวคือ ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าจะได้รับอันดับความสำคัญสูงกว่า โดยอันดับที่ 1 หมายถึงปัจจัยที่มีความสำคัญสูงที่สุดต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

ในกรณีที่ปัจจัยหลายรายการมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน ผู้วิจัยใช้ลำดับรหัสของปัจจัยตามโครงสร้างแบบสอบถามเดิมเป็นเกณฑ์รองในการจัดอันดับ โดยปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากันจะถูกเรียงตามลำดับรหัส SF ที่ปรากฏในตารางโครงสร้างมิติหลักและปัจจัย ทั้งนี้ เพื่อรักษาความต่อเนื่องของโครงสร้างปัจจัยที่ได้จากการสังเคราะห์วรรณกรรม และใช้เป็นกรอบเดียวกันตลอดกระบวนการวิจัย

ภายหลังจากได้ลำดับความสำคัญของปัจจัยแล้ว ผู้วิจัยนำอันดับดังกล่าวไปคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธีการกำหนดน้ำหนักบนพื้นฐานของการจัดลำดับ (Rank-based Weighting) จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธีผลรวมของการจัดลำดับ (Rank Sum: RS) วิธีส่วนกลับของการจัดลำดับ (Rank Reciprocal: RR) และวิธีการใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ (Rank Order Centroid: ROC)

การประยุกต์ใช้วิธีทั้งสามมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายน้ำหนักของปัจจัยภายใต้หลักการคำนวณที่แตกต่างกัน โดยวิธี RS ให้น้ำหนักลดหลั่นตามอันดับในลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น วิธี RR ให้น้ำหนักแก่ปัจจัยลำดับต้นอย่างเด่นชัดกว่าวิธีอื่น ส่วนวิธี ROC ให้รูปแบบการกระจายน้ำหนักอยู่ระหว่างวิธี RS และ RR

ดังนั้น คำนวณน้ำหนักที่รายงานในงานวิจัยนี้จึงควรตีความในระดับปัจจัย 28 รายการ มิใช่ระดับมิติหลัก 9 ด้าน เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการแปลผล และการนำผลการวิจัยไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์

4. ผลการวิจัย

4.1. ผลการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา

การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาของแบบสอบถามดำเนินการโดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินความเหมาะสมของรายการปัจจัยทั้งหมด 28 รายการ ซึ่งครอบคลุม 9 มิติหลัก ได้แก่ ด้านแรงงาน ด้านกฎหมายและข้อบังคับ ด้านสถานการณ์ทางการเมือง ด้านคุณภาพชีวิต ด้านโครงสร้างพื้นฐาน ด้านเศรษฐกิจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านภูมิศาสตร์ และด้านสังคม การประเมินดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเหมาะสม ความชัดเจนในการสื่อความหมาย ความไม่ซ้ำซ้อน และความสอดคล้องของรายการปัจจัยกับบริบทของการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

การจัดอันดับจากค่าเฉลี่ยในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญให้อยู่ในรูปของลำดับความสำคัญเชิงเปรียบเทียบ ก่อนนำไปคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี RS, RR และ ROC ทั้งนี้ ผู้วิจัยตระหนักว่าการแปลงค่าเฉลี่ยเป็นอันดับอาจทำให้รายละเอียดเกี่ยวกับระยะห่างของคะแนนเฉลี่ยระหว่างปัจจัยบางรายการลดลง เช่น ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยต่างกันมากและปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันอาจถูกนำไปคำนวณค่าน้ำหนักตามลำดับอันดับในรูปแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังคงรายงานค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานของปัจจัยแต่ละรายการควบคู่กับค่าน้ำหนัก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถพิจารณาทั้งระดับคะแนนดิบ การกระจายของความคิดเห็น และค่าน้ำหนักเชิงอันดับร่วมกัน

ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิพบว่า รายการปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยมีความครอบคลุมประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการย้ายฐานการผลิต ทั้งด้านต้นทุนแรงงาน ความพร้อมของแรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน ระบบสาธารณูปโภค สิทธิประโยชน์ทางภาษี เสถียรภาพทางการเมือง ปัจจัยทางเศรษฐกิจ คุณภาพสิ่งแวดล้อม ความเสี่ยงจากภัยพิบัติ และประเด็นด้านสังคมที่เกี่ยวข้องกับประเทศปลายทาง สะท้อนว่าแบบสอบถามมีความเหมาะสมในเชิงเนื้อหาสำหรับใช้ประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทั้งนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการปรับปรุงรายการปัจจัยบางรายการให้มีความจำเพาะและชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการแยกปัจจัยด้านคุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าออกจากอัตราค่าไฟฟ้า และการแยกปัจจัยด้านคุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของน้ำประปาออกจากอัตราค่าน้ำประปา เพื่อให้รายการปัจจัยแต่ละข้อสะท้อนประเด็นการประเมินที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และลดความคลาดเคลื่อนในการตีความของผู้ประเมิน

ภายหลังการปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ แบบสอบถามมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ เนื่องจากรายการปัจจัยมีความครอบคลุมเชิงเนื้อหา มีความชัดเจนในการสื่อความหมาย และมีความสอดคล้อง

กับวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

เพื่อเพิ่มความเข้มแข็งของการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัยในเชิงปริมาณ การศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณารายงานค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหา เช่น Index of Item-Objective Congruence (IOC) หรือ Content Validity Index (CVI) เพิ่มเติม เพื่อยืนยันความสอดคล้องของรายการปัจจัยกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยอย่างเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

4.2. ผลการประเมินความสำคัญของปัจจัย

ผลการประเมินความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คน ใช้มาตราส่วนแบบประเมินค่า 5 ระดับ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4

ผลการประเมินความสำคัญของปัจจัย

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความสำคัญ
SF1	4.5217	0.7144	สำคัญมากที่สุด
SF2	3.9565	0.8586	สำคัญมาก
SF3	3.4783	1.0159	สำคัญมาก
SF4	3.7826	1.1016	สำคัญมาก
SF5	4.0000	1.3188	สำคัญมาก
SF6	3.3478	1.1271	สำคัญปานกลาง
SF7	3.4783	1.0579	สำคัญมาก
SF8	3.8696	1.0756	สำคัญมาก
SF9	3.6087	1.0525	สำคัญมาก
SF10	3.4348	1.1354	สำคัญมาก
SF11	3.3478	1.0878	สำคัญปานกลาง
SF12	3.3478	1.1650	สำคัญปานกลาง

SF13	3.1739	1.0489	สำคัญปานกลาง
SF14	3.8696	1.2267	สำคัญมาก
SF15	3.7391	1.2586	สำคัญมาก
SF16	3.6522	1.2018	สำคัญมาก
SF17	3.8261	1.1288	สำคัญมาก
SF18	3.7391	1.1119	สำคัญมาก
SF19	3.5217	1.0159	สำคัญมาก
SF20	3.8696	1.1907	สำคัญมาก
SF21	3.8696	1.1907	สำคัญมาก
SF22	3.6522	1.1271	สำคัญมาก
SF23	3.5217	1.0982	สำคัญมาก
SF24	3.7391	1.1503	สำคัญมาก
SF25	3.7826	1.0197	สำคัญมาก
SF26	4.0435	0.9079	สำคัญมาก
SF27	3.9130	0.9741	สำคัญมาก
SF28	3.7826	0.9761	สำคัญมาก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ จำนวน 28 รายการ พบว่า ค่าเฉลี่ยของปัจจัยอยู่ระหว่าง 3.1739–4.5217 จากคะแนนเต็ม 5 เมื่อจำแนกระดับความสำคัญตามช่วงค่าเฉลี่ยพบว่าปัจจัยส่วนใหญ่อยู่ในระดับความสำคัญมาก จำนวน 23 ปัจจัย รองลงมาอยู่ในระดับความสำคัญปานกลาง จำนวน 4 ปัจจัย และอยู่ในระดับความสำคัญมากที่สุด จำนวน 1 ปัจจัย ผลดังกล่าวสะท้อนว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญต่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย้ายฐานการผลิตในหลายมิติ ครอบคลุมด้านแรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ กฎหมาย สิ่งแวดล้อม ภูมิศาสตร์ และสังคม

ปัจจัยที่ได้รับการประเมินในระดับความสำคัญมากที่สุด คือ SF1 ค่าแรง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.5217 และ

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.7144 ค่าดังกล่าวบ่งชี้ว่าค่าแรงเป็นปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากอุตสาหกรรมดังกล่าวมีลักษณะการใช้แรงงานเข้มข้น และต้นทุนแรงงานมีผลตรงต่อโครงสร้างต้นทุนการผลิต ความสามารถในการแข่งขันด้านราคา และความคุ้มค่าของการลงทุนในประเทศปลายทาง

กลุ่มปัจจัยที่อยู่ในระดับความสำคัญมากและมีค่าเฉลี่ยสูง ประกอบด้วย SF26 ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.0435 SF5 สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจ และเงินอุดหนุน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.0000 SF2 ปริมาณแรงงาน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.9565 และ SF27 ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.9130 ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนว่า การตัดสินใจย้ายฐานการผลิตมีได้ขึ้นอยู่กับต้นทุนแรงงานเพียงด้านเดียว หากยังสัมพันธ์กับความต่อเนื่องของการผลิต นโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ ความเพียงพอของแรงงาน และความได้เปรียบเชิงทำเลของประเทศปลายทาง

ปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.8696 ประกอบด้วย SF8 โครงสร้างและความมั่นคงของรัฐบาล S14 คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้า SF20 อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา และ SF21 ภาษีศุลกากร ทุกปัจจัยจัดอยู่ในระดับความสำคัญมาก ค่าดังกล่าวสะท้อนว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญต่อเสถียรภาพของประเทศปลายทาง ความพร้อมของระบบสาธารณูปโภค ต้นทุนทางเศรษฐกิจ และเงื่อนไขทางการค้าระหว่างประเทศในระดับใกล้เคียงกัน

ปัจจัยที่จัดอยู่ในระดับความสำคัญปานกลางประกอบด้วย SF6 กฎหมายกรรมสิทธิ์ของชาวต่างชาติ SF11 คุณภาพการศึกษา SF12 ความเพียงพอของที่พักอาศัย และ SF13 สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการด้านสันตนาการ SF13 มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 3.1739 ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่า ปัจจัยด้านคุณภาพชีวิตและสภาพแวดล้อมทางสังคมบางรายการมีบทบาทเชิงสนับสนุนต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านต้นทุนแรงงาน ความเสี่ยง ความพร้อมของแรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน และเงื่อนไขทางเศรษฐกิจ

เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของความคิดเห็นจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าปัจจัยที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ ประกอบด้วย SF1 ค่าแรง เท่ากับ 0.7144 SF2 ปริมาณแรงงาน เท่ากับ 0.8586 SF26 ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ เท่ากับ 0.9079 SF27 ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ เท่ากับ 0.9741 และ SF28 ความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน เท่ากับ 0.9761 ค่าดังกล่าวบ่งชี้ว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญต่อปัจจัยเหล่านี้มีความสอดคล้องกันในระดับสูง เฉพาะ SF1 ค่าแรง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดในชุดข้อมูล

ปัจจัยที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงประกอบด้วย SF5 สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจ และเงินอุดหนุน เท่ากับ 1.3188 SF15 คุณภาพประสิทธิภาพ และความเพียงพอของน้ำประปา เท่ากับ 1.2586 SF14 คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 1.2267 SF16 ประสิทธิภาพของระบบขนส่ง เท่ากับ 1.2018

SF20 อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา เท่ากับ 1.1907 และ SF21 ภาษีศุลกากร เท่ากับ 1.1907 ค่าดังกล่าวสะท้อนความหลากหลายของมุมมองผู้เชี่ยวชาญต่อปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างด้านประสิทธิภาพ ความเชี่ยวชาญเฉพาะสาขา และมุมมองต่อแนวโน้มการลงทุนของประเทศปลายทาง

ผลการประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยสะท้อนว่า การตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV มีลักษณะเป็นปัญหาการตัดสินใจหลายเกณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุน ความพร้อมของแรงงาน ความเสี่ยงโครงสร้างพื้นฐาน เศรษฐกิจ และสภาพแวดล้อมของประเทศปลายทางร่วมกัน เฉพาะปัจจัยด้านค่าแรง ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี ปริมาณแรงงาน และตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ซึ่งเป็นกลุ่มปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยสูงและมีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดลำดับความสำคัญในขั้นตอนการคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัย

4.3. ผลการกำหนดน้ำหนักของปัจจัย

ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV ด้วยวิธีการกำหนดน้ำหนักจากอันดับ ได้แก่ วิธีผลรวมอันดับ (Rank Sum: RS) วิธีผกผันอันดับ (Rank Reciprocal: RR) และวิธีค่าเฉลี่ยศูนย์กลางอันดับ (Rank Order Centroid: ROC) แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5

ค่าน้ำหนักของปัจจัยจากวิธี RS, RR และ ROC

ปัจจัย	RS	RR	ROC
SF1	0.069	0.255	0.140
SF2	0.062	0.064	0.075
SF3	0.017	0.012	0.010
SF4	0.044	0.023	0.036
SF5	0.064	0.085	0.087
SF6	0.010	0.010	0.005
SF7	0.015	0.011	0.008
SF8	0.057	0.042	0.059
SF9	0.025	0.013	0.015
SF10	0.012	0.011	0.007
SF11	0.007	0.010	0.004
SF12	0.005	0.009	0.003
SF13	0.002	0.009	0.001
SF14	0.054	0.036	0.053
SF15	0.037	0.018	0.027
SF16	0.030	0.015	0.020
SF17	0.047	0.025	0.039
SF18	0.034	0.017	0.024
SF19	0.022	0.013	0.014
SF20	0.052	0.032	0.048
SF21	0.049	0.028	0.043
SF22	0.027	0.014	0.017
SF23	0.020	0.012	0.012
SF24	0.032	0.016	0.022
SF25	0.042	0.021	0.032
SF26	0.067	0.127	0.105
SF27	0.059	0.051	0.066
SF28	0.039	0.020	0.029

ค่าน้ำหนักจากตารางที่ 5 เป็นค่าน้ำหนักที่ได้จากลำดับความสำคัญของปัจจัย ไม่ใช่ค่าน้ำหนักที่คำนวณจากระยะห่างของค่าเฉลี่ยโดยตรง ดังนั้น การแปลผลควรพิจารณาควบคู่กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในตารางที่ 4 เพื่อป้องกันการตีความว่าค่าน้ำหนักสะท้อนความแตกต่างเชิงปริมาณของคะแนนดิบอย่างสมบูรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักด้วยวิธี RS, RR และ ROC สะท้อนโครงสร้างลำดับความสำคัญของปัจจัยเชิงกลยุทธ์สำหรับการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนแรงงาน ความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต สิทธิประโยชน์จากภาครัฐ ความพร้อมของแรงงาน และตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์มีค่าน้ำหนักอยู่ในลำดับสูงอย่างสม่ำเสมอทั้งสามวิธี ขณะที่ปัจจัยด้านคุณภาพชีวิตบางรายการ เช่น สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการด้านสันติชน การคุณภาพการศึกษา และความเพียงพอของที่พักอาศัยมีค่าน้ำหนักอยู่ในลำดับต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านต้นทุนและการดำเนินงาน

SF1 ค่าแรง เป็นปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักสูงสุด มีค่าน้ำหนักจากวิธี RR เท่ากับ 0.255 วิธี ROC เท่ากับ 0.140 และวิธี RS เท่ากับ 0.069 ผลดังกล่าวสะท้อนว่าต้นทุนแรงงานเป็นปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่มีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิต เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานจำนวนมากในหลายกระบวนการผลิต ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการบรรจุผลิตภัณฑ์ ประเทศปลายทางที่มีระดับค่าแรงเหมาะสมจึงมีผลต่อการลดต้นทุนการผลิตและการ

เพิ่มความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการ ทั้งนี้ การพิจารณาค่าแรงจำเป็นต้องประเมินร่วมกับปริมาณแรงงานและทักษะแรงงาน เพื่อลดความเสี่ยงจากการขาดแคลนแรงงานและผลิตภาพแรงงานต่ำ

SF26 ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ เป็นปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักสูงทั้งสามวิธี มีค่าน้ำหนักจากวิธี RR เท่ากับ 0.127 วิธี ROC เท่ากับ 0.105 และวิธี RS เท่ากับ 0.067 ผลดังกล่าวสะท้อนความสำคัญของความต่อเนื่องในการผลิตและความสามารถในการบริหารความเสี่ยงของประเทศปลายทาง เนื่องจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น น้ำท่วม พายุ หรือเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบขนส่งและสาธารณูปโภค มีผลต่อการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ความเสียหายของเครื่องจักร วัตถุดิบ และสินค้าคงคลัง รวมทั้งความสามารถในการส่งมอบสินค้าให้แก่ลูกค้าตามกำหนดเวลา ปัจจัยดังกล่าวจึงมีนัยสำคัญเชิงกลยุทธ์ต่อความเสี่ยงของห่วงโซ่อุปทานและต้นทุนแฝงในระยะยาว

ปัจจัยสำคัญลำดับถัดมา ได้แก่ SF5 สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจ และเงินอุดหนุน, SF2 ปริมาณแรงงาน และ SF27 ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ซึ่งมีค่าน้ำหนักอยู่ในลำดับสูงและมีแนวโน้มสอดคล้องกันทั้งสามวิธี สิทธิประโยชน์ทางภาษีและมาตรการจูงใจจากภาครัฐมีผลต่อความคุ้มค่าของการลงทุนและระยะเวลาคืนทุนของโครงการ ขณะที่ปริมาณแรงงานสะท้อนความสามารถของประเทศปลายทางในการรองรับกำลังการผลิต ส่วนตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์เกี่ยวข้องกับการเข้าถึงตลาด แหล่งวัตถุดิบ ท่าเรือ เส้นทางขนส่ง และความเชื่อมโยงกับประเทศไทยหรือประเทศคู่ค้า กลุ่มปัจจัยดังกล่าวจึงสะท้อนความ

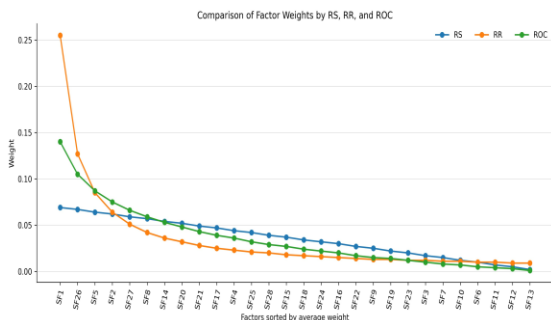
สมดุลระหว่างต้นทุน การดำเนินงาน และศักยภาพเชิง
ทำเลของฐานการผลิต

กลุ่มปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักในลำดับสูงรองลงมา ได้แก่ SF8 โครงสร้างและความมั่นคงของรัฐบาล, SF14 คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความเพียงพอของ พลังงานไฟฟ้า, SF20 อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา, SF21 ภาษีศุลกากร และ SF17 อัตราค่าไฟฟ้า ปัจจัยเหล่านี้ สะท้อนบทบาทของเสถียรภาพเชิงสถาบัน ต้นทุน สาธารณูปโภค และความเสี่ยงทางเศรษฐกิจต่อการ ตัดสินใจย้ายฐานการผลิต ประเทศปลายทางที่มี ความต่อเนื่องของนโยบายรัฐ ระบบไฟฟ้าเพียงพอ อัตราแลกเปลี่ยนมีเสถียรภาพ และกฎระเบียบด้าน การค้าระหว่างประเทศเอื้อต่อการดำเนินธุรกิจ ส่งผล ต่อการลดความไม่แน่นอนและเพิ่มความเชื่อมั่นของ ผู้ประกอบการต่อการลงทุนระยะยาว

ปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักในลำดับรอง ได้แก่ SF4 กฎหมายและข้อบังคับด้านแรงงาน, SF25 คุณภาพ สิ่งแวดล้อม, SF28 ความปลอดภัยต่อชีวิตและ ทรัพย์สิน, SF15 คุณภาพ ประสิทธิภาพ และความ เพียงพอของน้ำประปา, SF18 อัตราค่าน้ำประปา และ SF24 ความมั่นคงของสถาบันการเงิน แม้ปัจจัยเหล่านี้ มีได้อยู่ในกลุ่มที่มีค่าน้ำหนักสูงสุด แต่มีบทบาทเป็น เงื่อนไขสนับสนุนต่อความยั่งยืนของการดำเนินงาน เนื่องจากโรงงานสิ่งทอต้องใช้ทรัพยากรน้ำและ พลังงานอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งต้องดำเนินงานภายใต้ กฎหมายแรงงานและข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม ข้อจำกัดของปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเกิดต้นทุนแฝง และความเสี่ยงด้านการปฏิบัติตามกฎระเบียบใน ระยะยาว

ปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักต่ำที่สุด ได้แก่ SF13 สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการด้านสนทนากการ, SF12 ความ เพียงพอของที่พักราคาย, SF11 คุณภาพการศึกษา และ SF6 กฎหมายกรรมสิทธิ์ของชาวต่างชาติ เมื่อ เปรียบเทียบกับปัจจัยด้านต้นทุน แรงงาน ความเสี่ยง และโครงสร้างพื้นฐาน ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ปัจจัยเหล่านี้มีสถานะเป็นปัจจัยสนับสนุนด้าน คุณภาพชีวิตและเงื่อนไขการลงทุนระยะยาว มากกว่า มิติหลักในการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตในระยะแรก อย่างไรก็ตาม ปัจจัยดังกล่าวยังมีความเกี่ยวข้องกับการ รักษาบุคลากร การดึงดูดแรงงานฝีมือ และศักยภาพ การดำเนินงานของผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญจาก ต่างประเทศในระยะยาว

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี RS, RR และ ROC ลำดับของปัจจัยสำคัญมีความสอดคล้องกันใน ภาพรวม กลุ่มปัจจัยด้านค่าแรง ความเสี่ยงจากภัย พิบัติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี ปริมาณแรงงาน และ ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์อยู่ในกลุ่มลำดับต้นของ ทุกวิธี ความสอดคล้องดังกล่าวสะท้อนเสถียรภาพของ ผลลัพธ์และความน่าเชื่อถือของโครงสร้างปัจจัยที่ใช้ ในการศึกษา อีกทั้งยังยืนยันว่าการตัดสินใจย้ายฐาน การผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอควรให้ความสำคัญกับ ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างต้นทุน ความพร้อม ของแรงงาน ความต่อเนื่องของการผลิต และ ความสามารถในการแข่งขัน มากกว่าปัจจัยสนับสนุน ภายนอกที่สามารถบริหารจัดการในระยะต่อมา



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบน้ำหนักของปัจจัยเรียงจากค่าน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดไปน้อยที่สุดด้วยวิธี RS, RR และ ROC

รูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของปัจจัยทั้ง 28 รายการตามลำดับค่าเฉลี่ยของวิธี RS, RR และ ROC จากค่าสูงสุดไปต่ำสุด ผลการวิเคราะห์สะท้อนว่า ทั้งสามวิธีให้แนวโน้มค่าน้ำหนักสอดคล้องกัน กล่าวคือ ปัจจัยลำดับต้นมีค่าน้ำหนักสูงกว่าปัจจัยลำดับท้ายอย่างชัดเจน โดยเฉพาะ SF1 ซึ่งมีค่าน้ำหนักสูงสุดในทุกวิธี ได้แก่ RR เท่ากับ 0.255, ROC เท่ากับ 0.140 และ RS เท่ากับ 0.069 รองลงมาคือ SF26, SF5, SF2 และ SF27 ตามลำดับ

รูปแบบการกระจายน้ำหนักของแต่ละวิธีมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน วิธี RR ให้น้ำหนักแก่ปัจจัยลำดับแรกสูงกว่าวิธีอื่นมาก ทำให้เส้นกราฟลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้น ขณะที่วิธี RS มีลักษณะการลดลงของค่าน้ำหนักอย่างต่อเนื่องและใกล้เคียงเชิงเส้น ส่วนวิธี ROC มีลักษณะการกระจายอยู่ระหว่าง RS และ RR กล่าวคือ ให้น้ำหนักแก่ปัจจัยลำดับต้นสูงกว่า RS แต่ไม่สูงชันเท่า RR

ผลจากรูปที่ 1 สะท้อนว่า ความแตกต่างของทั้งสามวิธีมีได้อยู่ที่ทิศทางของลำดับความสำคัญ หากอยู่ที่ระดับการเน้นน้ำหนักของปัจจัยลำดับต้น วิธี RR เหมาะกับกรณีที่ต้องการเน้นปัจจัยสำคัญอันดับแรก

อย่างเด่นชัด วิธี RS เหมาะกับการกระจายน้ำหนักอย่างสมดุลตามลำดับ ส่วนวิธี ROC ให้ผลในลักษณะกึ่งกลางระหว่างสองวิธีดังกล่าว ดังนั้น กลุ่มปัจจัย SF1, SF26, SF5, SF2 และ SF27 จึงเป็นกลุ่มปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่มีความสำคัญสูงต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV

4.4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และจัดระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน การลงทุนระหว่างประเทศ และการย้ายฐานการผลิต จากนั้นสังเคราะห์ปัจจัยได้ทั้งหมด 28 รายการ และจัดกลุ่มเป็น 9 มิติหลัก ก่อนนำไปประเมินระดับความสำคัญจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 23 คน ผ่านแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ

ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญระดับมากที่สุดมี 1 ปัจจัย คือ ค่าแรง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.5217 ปัจจัยที่มีความสำคัญระดับมากมีจำนวน 23 ปัจจัย โดยปัจจัยสำคัญในลำดับต้นประกอบด้วยความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี สิ่งจูงใจและเงินอุดหนุน ปริมาณแรงงาน ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ โครงสร้างและความมั่นคงของรัฐบาล คุณภาพและความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้า อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา ภาษีศุลกากร และอัตราค่าไฟฟ้า ส่วนปัจจัยที่มีความสำคัญระดับปานกลางมีจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ กฎหมายกรรมสิทธิ์ของชาวต่างชาติ คุณภาพการศึกษา ความเพียงพอ

ของที่พักอาศัย และสิ่งอำนวยความสะดวกและบริการด้านสันตนาการ

ผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธี RS, RR และ ROC สะท้อนความสอดคล้องของลำดับความสำคัญในภาพรวม โดยเฉพาะกลุ่มปัจจัยด้านค่าแรง ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี ปริมาณแรงงาน และตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ซึ่งอยู่ในกลุ่มปัจจัยลำดับต้นทั้งสามวิธี ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV เป็นปัญหาการตัดสินใจหลายเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาทั้งต้นทุนแรงงาน ความพร้อมของแรงงาน ความต่อเนื่องของการผลิต ความเสี่ยงด้านห่วงโซ่อุปทาน โครงสร้างพื้นฐาน ระบบสาธารณูปโภค เงื่อนไขทางเศรษฐกิจ และเสถียรภาพของประเทศปลายทางร่วมกัน

ผลการวิจัยดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการเลือกทำเลที่ตั้งระหว่างประเทศและการกระจายฐานการผลิต ซึ่งระบุว่าต้นทุนแรงงาน ความพร้อมของแรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน ความเสี่ยงของพื้นที่ และความสามารถในการเชื่อมโยงกับระบบโลจิสติกส์เป็นปัจจัยสำคัญต่อการตัดสินใจลงทุนและการย้ายฐานการผลิต [1,9] นอกจากนี้ ผลที่พบว่าการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตต้องพิจารณาหลายปัจจัยร่วมกันยังสอดคล้องกับแนวคิดการตัดสินใจหลายเกณฑ์และงานวิจัยด้านการเลือกทำเลอุตสาหกรรมซึ่งเสนอว่าการประเมินพื้นที่ผลิตควรพิจารณาทั้งปัจจัยเชิงต้นทุน ปัจจัยเชิงโครงสร้างพื้นฐาน ปัจจัยด้านความเสี่ยง และสภาพแวดล้อมของประเทศปลายทางร่วมกัน [3,4,11,12]

ดังนั้น การพิจารณาย้ายฐานการผลิตไม่สามารถอาศัยปัจจัยด้านต้นทุนแรงงานเพียงมิติเดียว เนื่องจากความคุ้มค่าของการลงทุนในระยะยาวขึ้นอยู่กับความพร้อมของประเทศปลายทางในหลายมิติ ทั้งด้านทรัพยากรมนุษย์ นโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ ความเสี่ยงเชิงพื้นที่ ความสามารถด้านโลจิสติกส์ และสภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจ ผลการวิจัยนี้จึงเสนอกรอบปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่สามารถใช้ประกอบการประเมินทางเลือกของประเทศหรือพื้นที่ปลายทางสำหรับการย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอในกลุ่มประเทศ CLMV ได้อย่างเป็นระบบ

4.5. ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต

จากผลการวิจัย ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีแผนย้ายหรือกระจายฐานการผลิตไปยังกลุ่มประเทศ CLMV ควรใช้ผลการจัดระดับความสำคัญและค่าน้ำหนักของปัจจัยเป็นกรอบเบื้องต้นในการประเมินประเทศหรือพื้นที่ปลายทาง โดยควรให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านค่าแรง ปริมาณแรงงาน ความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ สิทธิประโยชน์ทางภาษี เสถียรภาพทางการเมือง และความพร้อมของระบบสาธารณูปโภคเป็นลำดับต้น เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างต้นทุน ความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต และความสามารถในการแข่งขันของกิจการ

ในเชิงนโยบาย หน่วยงานภาครัฐและหน่วยงานส่งเสริมการลงทุนสามารถใช้ผลการศึกษานี้เป็นข้อมูลประกอบการจัดทำฐานข้อมูลด้านการลงทุนในกลุ่มประเทศ CLMV การให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการ และการกำหนดมาตรการสนับสนุนการขยายฐานการ

ผลิตของอุตสาหกรรมไทยไปยังประเทศเพื่อนบ้าน โดยเฉพาะการจัดทำข้อมูลเปรียบเทียบด้านต้นทุนแรงงาน โครงสร้างพื้นฐาน สิทธิประโยชน์การลงทุน ความเสี่ยงจากภัยพิบัติ และเงื่อนไขทางเศรษฐกิจของแต่ละประเทศอย่างเป็นระบบ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจลงทุนของผู้ประกอบการให้มีความรอบคอบมากยิ่งขึ้น

สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรประยุกต์ผลการจัดระดับความสำคัญของปัจจัยร่วมกับวิธีการตัดสินใจหลายเกณฑ์ เช่น AHP, TOPSIS, VIKOR หรือ PROMETHEE เพื่อเปรียบเทียบประเทศหรือพื้นที่ปลายทางในเชิงลึกมากขึ้น นอกจากนี้ ควรเพิ่มเติมข้อมูลเชิงปริมาณที่เป็นปัจจุบันของแต่ละประเทศ เช่น ค่าแรงขั้นต่ำ ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำ ต้นทุนโลจิสติกส์ ภาษีศุลกากร ความเสี่ยงด้านภัยพิบัติ และตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจ เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการเปรียบเทียบศักยภาพของประเทศปลายทางภายใต้ปัจจัยเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การนำข้อมูลเชิงปริมาณมาใช้จำเป็นต้องพิจารณาความสอดคล้องของปีข้อมูล หน่วยวัด และวิธีการปรับมาตรฐานข้อมูล เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างประเทศมีความถูกต้องและเป็นธรรมมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การวิจัยในอนาคต ควรพิจารณาออกแบบกลุ่มผู้เชี่ยวชาญให้มีความสมดุลมากขึ้นในแต่ละมิติหลัก หรือใช้แนวทางการคัดเลือกแบบแบ่งชั้นตามสาขาความเชี่ยวชาญ เพื่อลดความเอนเอียงที่อาจเกิดจากสัดส่วนผู้เชี่ยวชาญที่ไม่เท่ากันระหว่างสาขา รวมทั้งควรตรวจสอบระดับความสอดคล้องของความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนดอลล์ (Kendall's Coefficient of Concordance: Kendall's W) โดยใช้

ข้อมูลคะแนนหรืออันดับรายผู้เชี่ยวชาญ เพื่อยืนยันระดับความสอดคล้องของความคิดเห็นในเชิงสถิติ และเพิ่มความเข้มแข็งของการนำผลการจัดอันดับไปใช้คำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี Rank Sum (RS), Rank Reciprocal (RR) , Rank Order Centroid (ROC)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ให้อาณัติในการประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจย้ายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ รวมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัย ตลอดจนภาคีวิชาชีพกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Arunyanart S, Sureeyatanapas P, Ponhan K, Sessomboon W, Niyamosoth T. International location selection for production fragmentation. Expert Systems with Applications. 2021;171:114564.
- [2] Chang PY, Lin HY. Manufacturing plant location selection in logistics network using analytic hierarchy process. Journal of Industrial Engineering and Management. 2015;8(5):1547-1575.

- [3] Boutkhoul O, Hanine M, Agouti T, Tikniouine A. An improved hybrid multi-criteria/multidimensional model for strategic industrial location selection: Casablanca industrial zones as a case study. SpringerPlus. 2015;4(1):1-23.
- [4] Hwang CL, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. Berlin: Springer-Verlag; 1981.
- [5] Ponhan K. International location selection for production fragmentation [Ph.D. Thesis in Engineering]. Leicester: University of Leicester; 2021.
- [6] Radwan NM, El-Deeb R, Khalifa WH. A proposed method for multi-criteria group decision making: an application to site selection. Applied Artificial Intelligence. 2021;35(7):505-519.
- [7] Phuong-Thao HT. Industrial location criteria of planners for Ho Chi Minh City. In: Proceedings of the 10th AMER International Conference on Quality of Life; 2022 Mar 16-17; Penang, Malaysia. p.365-371.
- [8] Daim TU, Bhatla A, Mansour M. Site selection for a data centre: a multi-criteria decision-making model. International Journal of Sustainable Engineering. 2013;6(1):10-22.
- [9] Rikalovic A, Cosic I. A fuzzy expert system for industrial location factor analysis. Acta Polytechnica Hungarica. 2015;12(2):33-51.
- [10] Banar M, Tulger G, Ozkan A. Plant site selection for recycling plants of waste electrical and electronic equipment in Turkey by using multicriteria decision making methods. Environmental Engineering and Management Journal. 2014;13(1):163-172.
- [11] Dunning JH. The eclectic paradigm of international production: a restatement and some possible extensions. Journal of International Business Studies. 1988;19(1):1-31.
- [12] Rikalovic A, Cosic I, Lazarevic D. GIS based multi-criteria analysis for industrial site selection. Procedia Engineering. 2014;69:1054-1063.
- [13] Paul SK, Chakraborty P, Ali SM, Kumar G. An advanced decision-making model for evaluating manufacturing plant locations using fuzzy inference system. Expert Systems with Applications. 2022;191:116378.
- [14] ปณิทัสน์ สุริยธนาภาส. การประเมินสมรรถนะและการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2564.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาระบบต้นแบบ IoT ไร้สายและเซ็นเซอร์น้ำแข็งร่วมกับการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ

Development of an IoT-based Prototype for Water and Ice Scrap Recycling with Eco-Nudge Integration

อนุวัฒน์ สงค์โพธิ์กลาง¹⁾ ชวามิน ชุมแวงวาปี¹⁾ ภัทรพล ศรีโสดาพล¹⁾ อภิमान กาญจนวาปสติดิย^{1)*}Anuwat Songphoklang¹⁾ Chawamin Chumwaengwapee¹⁾ Phatarapol Srisodaphol¹⁾ andApichan Kanjanavapastit^{1)*}¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี¹⁾Department of Computer and Communication Engineering, Faculty of Technology and Engineering,

Udon Thani Rajabhat University

Received: 6 May 2026

Revised: 8 June 2026

Accepted: 11 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

ในบริบทของการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ การจัดการขยะและการหมุนเวียนทรัพยากรน้ำกลับมาใช้ใหม่ถือเป็นประเด็นที่มีความสำคัญยิ่ง ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มักถูกมองข้ามในอาคารคือ "ขยะเปียกในขยะแห้ง" ซึ่งเกิดจากการทิ้งแก้วเครื่องดื่มที่มีน้ำและเศษน้ำแข็งค้างอยู่ลงในถังขยะทั่วไป ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์และการปนเปื้อนวัสดุรีไซเคิล งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบต้นแบบเครื่องรีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็งด้วยระบบ IoT ที่บูรณาการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพplingเข้ากับกลไกการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมผู้บริโภค ระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับการไหลเพื่อบริหารจัดการเก็บของเหลวผ่านตัวกรองสแตนเลส และใช้ Three.js ในการสร้างภาพจำลองข้อมูลแบบเรียลไทม์บนหน้าจอเพื่อมอบรางวัลทางจิตวิทยาให้แก่ผู้ใช้งาน โดยแปลงปริมาณน้ำที่รวบรวมได้เป็นจำนวนต้นไม้ที่จัดเก็บสามารถนำออกมาจ่ายให้กับระบบรดน้ำพืชโดยอัตโนมัติ ผลการทดสอบเชิงวิศวกรรมพบว่าเซนเซอร์วัดการไหล

มีอัตราความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 1.16 และ 4.23 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 7.9 mL และ ± 31.8 mL ตามลำดับ ระบบกู้คืนข้อมูลมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 100 และระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถสั่งการรดน้ำต้นไม้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้ การทดสอบภาคสนามเบื้องต้นพบว่าระบบสามารถดึงดูดความสนใจผู้สัญจร แต่ยังต้องการการประเมินผลเชิงพฤติกรรมอย่างเป็นระบบในงานวิจัยถัดไป

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง การรีไซเคิลน้ำ การสะกิดเตือนเชิงนิเวศ การจัดการขยะ

Abstract

In the framework of smart city development, efficient waste management and water resource circularity are critical challenges. An environmental issue frequently overlooked in buildings is the contamination of dry waste by liquids, caused by disposing of beverage cups containing fluid and ice scraps directly into general bins. This study presents an IoT-based water and ice scrap recycling system prototype that integrates Internet of Things technology with Eco-Nudge mechanisms to foster waste sorting behavior change. The architecture employs an ESP32 microcontroller paired with flow sensors to manage liquid storage via a stainless-steel filter mesh, alongside a Three.js graphical engine to generate real-time 3D visualizations that deliver psychological rewards to users by converting collected water volume into a corresponding number of chili plants. The stored water can be automatically distributed to a plant irrigation system. Engineering evaluations demonstrated that the flow sensors achieved mean measurement errors of 1.16% and 4.23%, with standard deviations of ± 7.9 and ± 31.8 mL, respectively. The data recovery system achieved a 100% success rate, and the automated control system successfully triggered plant irrigation under the specified conditions. A preliminary field test indicated that the system attracted passerby attention; however, systematic behavioral evaluation is required in future research.

Keywords: Internet of Things: Water recycling: Eco-nudge: Waste management

*ติดต่อ: apichan.ka@udru.ac.th, 093-629-5355

1. บทนำ

การบริหารจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมถือเป็นเสาหลักสำคัญของการพัฒนาไปสู่การเป็นเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ยุคใหม่ ภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว

เขียว [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาทางกายภาพที่มักเกิดขึ้นในพื้นที่สาธารณะและสถาบันการศึกษาคือ "ขยะเปียกปนเปื้อนในขยะแห้ง" ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากพฤติกรรมของผู้บริโภคที่มักทิ้งแก้วเครื่องดื่มพลาสติก

ที่ยังมีน้ำหวาน น้ำเปล่า หรือเศษน้ำแข็งเหลือกันแก้วลงในถังขยะทั่วไปทันทีโดยไม่มีการคัดแยก

การปนเปื้อนของของเหลวในถังขยะแห้งส่งผลกระทบในวงกว้าง ทั้งการก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ การเป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรค และที่สำคัญที่สุดคือทำให้วัสดุที่รีไซเคิลได้ เช่น กระดาษ หรือกล่องลังเสื่อมสภาพจนไม่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้อีกต่อไป [2] นอกจากนี้ ปริมาณน้ำเหลือกันแก้วที่ถูกทิ้งรวมกันในแต่ละวันหากรวบรวมในอาคารเรียนขนาดใหญ่จะมีปริมาณหลายสิบลิตร ซึ่งนับเป็นการสูญเสียทรัพยากรน้ำไปโดยเปล่าประโยชน์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบ IoT รีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็ง โดยนำแนวคิดการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ (Eco-Nudge) มาบูรณาการร่วมกับเทคโนโลยีฮาร์ดแวร์ฝังตัวและซอฟต์แวร์แสดงผลแบบเรียลไทม์เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมทางเลือกที่จูงใจให้ผู้ใช้งานของเหลวออกจากภาชนะก่อนทิ้งลงถังขยะ ระบบบูรณาการไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และเซนเซอร์วัดการไหลของน้ำเพื่อนำข้อมูลมาสร้างภาพจำลอง 3 มิติผ่าน Three.js บนหน้าจอแท็บเล็ต และแปลงปริมาณน้ำที่จัดเก็บได้เป็นจำนวนต้นไม้ที่ได้รับน้ำ เพื่อมอบรางวัลทางจิตวิทยาและสร้างความรู้สึถึงความสำเร็จในการอนุรักษ์ [3] น้ำที่รวบรวมได้จะถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้โดยอัตโนมัติสอดคล้องกับวิสัยทัศน์การพัฒนาเมืองอัจฉริยะในระยะยาว

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบจัดการขยะอัจฉริยะด้วย IoT

งานวิจัยของ Sosunova และคณะ [4] เป็นการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยจำนวน 173 ชิ้น พบว่าแม้เทคโนโลยี IoT จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบจัดการขยะอัจฉริยะ (Smart Waste Management) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ มักมุ่งเน้นไปที่โครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพ เช่น การวัดระดับความเต็มของถังขยะเพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บ อย่างไรก็ตาม การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบนี้ชี้ให้เห็นถึงช่องว่างทางวิจัยที่สำคัญประการหนึ่งคือระบบส่วนใหญ่ยังละเลยมิติทางสังคม และขาดกลไกส่งเสริมพฤติกรรมที่มีประสิทธิภาพ ณ จุดทิ้งขยะ งานวิจัยของ Hasan และคณะ [5] นำเสนอระบบการจัดการและคัดแยกขยะอัจฉริยะสำหรับเมืองอัจฉริยะ ซึ่งบูรณาการเทคโนโลยี IoT ร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เพื่อแก้ปัญหาการจัดการขยะเดิมที่ไม่มีประสิทธิภาพและช่วยส่งเสริมการรีไซเคิล แต่งานวิจัยนี้ก็ยังคงเน้นการประมวลผลหลังการทิ้งขยะ ไม่ใช้การแทรกแซงเชิงรุกเพื่อเปลี่ยนพฤติกรรมผู้ใช้

2.2 การสะกิดเตือนเชิงนิเวศ

งานวิจัยนี้จึงได้นำทฤษฎีการสะกิด (Nudge Theory) ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายจากผลงานของ Thaler และ Sunstein [6] มาเป็นกรอบแนวคิดหลัก ทฤษฎีดังกล่าวระบุว่า การจัดการ “สถาปัตยกรรมทางเลือก” สามารถช่วยปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของมนุษย์ไปในทิศทางที่พึงประสงค์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้การบังคับหรือใช้มาตรการจูงใจทางเศรษฐกิจ ทฤษฎีนี้ตั้งอยู่บนข้อค้นพบทางเศรษฐศาสตร์ พฤติกรรมที่ว่า มนุษย์มักพึ่งพากระบวนการคิดแบบอัตโนมัติและมีข้อจำกัดในการตัดสินใจ การสร้าง

สภาพแวดล้อมที่เอื้อให้เกิดการกระทำที่ถูกต้องจึงเป็นสิ่งสำคัญ Barker และคณะ [7] ศึกษาว่าเทคนิคการสะกิดเตือนรูปแบบใดมีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการจัดการขยะของผู้บริโภค พบว่าเทคนิคที่ให้ผลลัพธ์เชิงบวกและมีความน่าเชื่อถือสูงในการส่งเสริมพฤติกรรมการคัดแยกและนำขยะกลับมาใช้ใหม่ ประกอบด้วย 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ การใช้บรรทัดฐานทางสังคม การใช้เครื่องมือแจ้งเตือน และการเปิดเผยข้อมูลผลกระทบเมื่อใช้ร่วมกับบรรทัดฐานทางสังคม นอกจากนี้ การศึกษายังชี้ให้เห็นว่าการสร้างการสะกิดเตือนที่จุดคัดแยกขยะ เช่น การมีจุดเตือนสายตาหรือการแจ้งเตือน จะช่วยเพิ่มความตระหนักรู้ด้านการจัดการขยะของผู้บริโภค และนำไปสู่การลดปริมาณขยะได้อย่างเป็นรูปธรรมในภาพรวม ข้อค้นพบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ระบบ IoT เพื่อทำหน้าที่เป็นการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ Linder และคณะ [8] ได้นำแนวคิดด้านจิตวิทยาสิ่งแวดล้อมและการตลาดเพื่อสังคมมาออกแบบแผ่นพับสะกิดเตือนเพื่อส่งเสริมการคัดแยกขยะอาหารในครัวเรือนเขตเมือง โดยทดลองภาคสนามแบบธรรมชาติ (natural field experiment) ในย่าน Hökarängen กรุงสตอกโฮล์ม ประเทศสวีเดน มีครัวเรือนกลุ่มทดลอง 264 หลัง และกลุ่มควบคุม 210 หลัง เนื้อหาในแผ่นพับใช้บรรทัดฐานทางสังคมเชิงพรรณนา เช่น ข้อความเชิญชวนให้ทำตามพฤติกรรมของเพื่อนบ้าน ผสมผสานกับการนำเสนอข้อมูลที่จับต้องได้ เช่น การแจ้งว่าขยะอาหารจากทุกครัวเรือนในพื้นที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้เพียงพอสำหรับรถขยะ 15 คันต่อปี ผลการวิเคราะห์

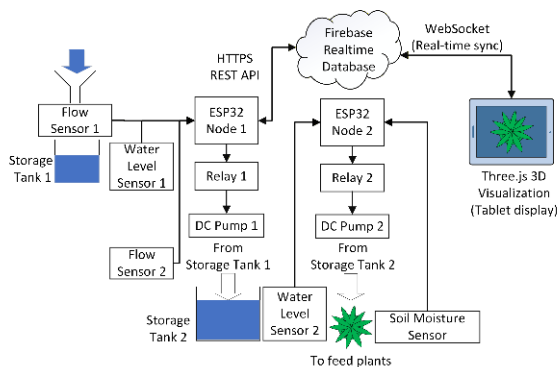
ด้วย difference-in-difference พบว่ากลุ่มทดลองมีปริมาณขยะอาหารที่คัดแยกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ($p < 0.05$) และที่สำคัญคือยังพบความแตกต่างระหว่างสองกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญแม้เวลาจะผ่านไปแล้ว 8 เดือนหลังการแทรกแซง

2.3 การใช้ 3D เพื่อเพิ่มการปรับพฤติกรรม

งานวิจัยของ Mataloto และคณะ [9] นำเสนอการพัฒนาระบบ IoT สำหรับตรวจสอบสภาพแวดล้อมและการใช้พลังงานในอาคาร ซึ่งมุ่งเน้นการแก้ปัญหาที่ว่าผู้ใช้งานทั่วไปมักขาดความรู้ทางเทคนิคในการทำ ความเข้าใจข้อมูลเชิงตัวเลขหรือหน่วยวัดด้านพลังงาน ผลการศึกษาพบว่า การแสดงข้อมูลผ่านภาพสัญลักษณ์ที่เข้าใจง่าย ไม่เพียงช่วยให้ผู้ใช้งานทั่วไปตระหนักรู้ถึงสภาพแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรของตนเองได้อย่างรวดเร็ว แต่ยังให้ผลทางจิตวิทยาที่ช่วยดึงดูดความสนใจ เพิ่มความผูกพัน และกระตุ้นให้ผู้ใช้งานเกิดความร่วมมือในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเพื่อลดการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ที่มุ่งเน้นการผสมผสานเทคโนโลยี IoT เข้ากับกลไกการให้ข้อมูลย้อนกลับเชิงภาพโดยการประยุกต์ใช้ Three.js ในการสร้างภาพจำลองการไหลของน้ำแบบ 3 มิติเรียลไทม์ และแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของน้ำที่รวบรวมได้ เพื่อให้ผู้ใช้งานเห็นผลลัพธ์และประโยชน์เชิงบวกของทรัพยากรน้ำที่ตนเองได้คัดแยกในทันที

3. การออกแบบและพัฒนาระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบเครื่องรีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็งด้วยระบบ IoT ได้รับการออกแบบให้รองรับการเชื่อมโยงข้อมูลและการควบคุมแบบบูรณาการ แบ่งโครงสร้างหลักออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนฮาร์ดแวร์ ตรวจวัดและควบคุม ส่วนฐานข้อมูลคลาวด์ และส่วนแสดงผลเพื่อการสื่อกับเตือน ดังแสดงสถาปัตยกรรมระบบในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพสถาปัตยกรรมระบบ

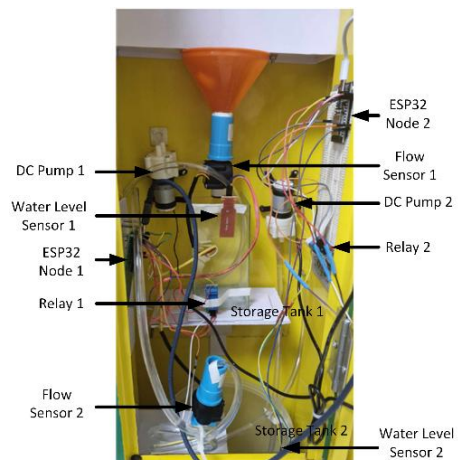
3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

โครงสร้างทางกายภาพของตู้ต้นแบบดัดแปลงมาจากตู้เดิมเงินโทรศัพท์มือถือ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยด้านหน้าตู้ติดตั้งกระเบื้องปูลูกพีช และหน้าจอแท็บเล็ตสำหรับแสดงผล Eco-Nudge ส่วนด้านหลังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด รูปที่ 3 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ภายในตู้ซึ่งประกอบด้วยกรวยรับน้ำด้านบน ถึงพักน้ำ 2 ใบ (Storage Tank 1 และ 2) ปั๊มน้ำ DC 2 ตัว (DC Pump 1 และ 2) เซนเซอร์วัดการไหล 2 ตัว (Flow Sensor 1 และ 2) เซนเซอร์วัดระดับน้ำ 2 ตัว ชนิดลายทองแดง (Water Level Sensor 1 และ 2) โมดูลรีเลย์ 2 ตัว (Relay 2 และ 2) และ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จำนวน 2 ชุด (Node 1 และ Node 2)



รูปที่ 2 ลักษณะกายภาพหน้าตู้จะติดตั้งกระเบื้องปูลูกพีชและด้านหลังที่ภายในบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในตู้

ระบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จำนวน 2 ชุด เพื่อแยกฟังก์ชันการทำงานและลดภาระการประมวลผล ESP32 Node 1 ทำหน้าที่เชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi รับสัญญาณพัลส์จากเซนเซอร์วัดการไหลทั้ง 2 ตัว ผ่านฟังก์ชัน External Interrupt และส่งข้อมูลขึ้น Firebase Realtime Database ผ่าน

ไลบรารี Firebase ESP Client ด้วย HTTPS นอกจากนี้ Node 1 ยังตรวจสอบค่า Water Level Sensor 1 ผ่านตัวแปลงสัญญาณ ADC 12 บิต เมื่อระดับน้ำใน Storage Tank 1 สูงถึงเกณฑ์ที่กำหนด ($ADC \geq 1,200$) จะสั่ง Relay 1 เปิด DC Pump 1 ทำงาน 20 วินาทีเพื่อถ่ายน้ำไปยัง Storage Tank 2 ส่วน ESP32 Node 2 ทำงานแบบออฟไลน์โดยตรวจสอบค่าจาก Water Level Sensor 2 และเซนเซอร์วัดความชื้นดินแบบคาปาซิทีฟ เมื่อเงื่อนไขทั้งสองครบ คือ $ADC \geq 1,200$ และ $ADC \geq 2,500$ พร้อมกัน จะสั่ง Relay 2 เปิด DC Pump 2 ทำงาน 20 วินาทีเพื่อรดน้ำพืช ทั้งนี้ ค่าเกณฑ์ ADC ทั้งหมดได้รับการปรับเทียบเชิงประจักษ์ (empirical calibration) จากการทดสอบจริง

3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์และฐานข้อมูล

3.2.1 ส่วน ควบคุม อุปกรณ์ และการประมวลผลสัญญาณ

ซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 พัฒนาขึ้นด้วยภาษา C/C++ ผ่านโปรแกรม Arduino IDE โดย Node 1 ใช้ฟังก์ชันอินเทอร์รัพท์ภายนอกแบบขอบขาสูง เพื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์จากเซนเซอร์วัดการไหล YF-S201 ทั้ง 2 ตัว นำจำนวนพัลส์ที่นับได้ในหนึ่งหน่วยเวลามาคำนวณหาปริมาตรน้ำสะสมผ่านค่าปรับแก้ K-factor ซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่เฉพาะของเซนเซอร์แต่ละตัว โดยคำนวณปริมาตรน้ำสะสมรวม (V) ตามสมการที่ (1)

$$V = \sum(p_t / K_factor) \quad (1)$$

เมื่อ V คือปริมาตรน้ำสะสมรวม (mL) p_t คือจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นในเวลา $t = 1$ วินาที และ K_factor คือค่าคงที่เฉพาะของเซนเซอร์แต่ละตัว (พัลส์/mL) โดย Flow Sensor 1 และ Flow Sensor 2 ใช้ K-factor ที่ต่างกันตามผลการสอบเทียบในหัวข้อ 4.1 ข้อมูลอัตราการไหลและปริมาตรสะสมจะถูกส่งขึ้น Firebase Realtime Database ผ่านไลบรารี Firebase ESP Client ด้วย HTTPS ทุก 1 วินาที และบันทึกเป็น log ทุก 15 วินาทีเมื่อตรวจพบการไหล

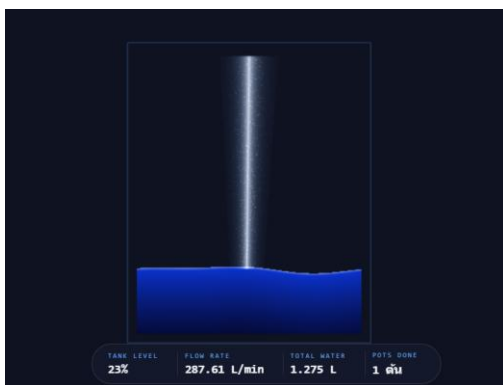
3.2.2. ส่วนจัดการฐานข้อมูลและการสื่อสารคลาวด์

ระบบเลือกใช้ฐานข้อมูล Firebase Realtime Database ของ Google เป็นตัวกลางหลักในการจัดเก็บและซิงโครไนซ์ข้อมูล โครงสร้างข้อมูลจัดเก็บในรูปแบบ JSON เหตุผลเชิงวิศวกรรมที่เลือกใช้ Firebase ประกอบด้วย (1) ทำงานบนสถาปัตยกรรม WebSockets ที่รองรับการผลักดันข้อมูลแบบทันทีทันใด ช่วยลดความหน่วงเมื่อเทียบกับระบบ Polling ทำให้เหมาะสมสำหรับการแสดงผลภาพจำลอง Three.js ที่ต้องอัปเดตทันทีเมื่อเซนเซอร์ส่งค่า (2) มีไลบรารี Firebase ESP Client สำหรับ ESP32 บน Arduino IDE โดยตรง ทำให้ลดความซับซ้อนในการพัฒนา (3) รองรับการทำงานแบบ Serverless เหมาะกับระบบต้นแบบ และ (4) มี Free Tier ที่เพียงพอสำหรับปริมาณข้อมูลของระบบ นอกจากนี้ระบบยังติดตั้งฟังก์ชันกู้คืนข้อมูล (Data Recovery) โดยกำหนดให้ ESP32 Node 1 อ่านค่าปริมาตรน้ำสะสมล่าสุดจาก Firebase กลับมาเป็นค่าเริ่มต้นโดย

อัตโนมัติทุกครั้งที่มีการรีเซ็ตาร์ท เพื่อป้องกันปัญหาข้อมูลสูญหายหรือนับเริ่มต้นจากศูนย์

3.2.3 ส่วนแสดงผลและกราฟิก 3 มิติเพื่อการสะกิดเตือน

ระบบแดชบอร์ดพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีเว็บมาตรฐาน ประกอบด้วย HTML5, CSS3 และ JavaScript โดยมีไลบรารี Three.js สร้างแบบจำลองวัตถุ 3 มิติ ระบบดึงค่าปริมาตรน้ำสะสมจาก Firebase ผ่าน WebSocket มาแปลงเป็นรางวัลทางจิตวิทยาเชิงนิเวศ โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำทุก 1 ลิตร มีค่าเทียบเท่ากับการรดน้ำต้นพริก 1 ต้น หน้าจอจะจำลองภาพสายน้ำไหลและการเจริญเติบโตของต้นพืชแบบทันทีเมื่อผู้ใช้เทน้ำลงตู้ เพื่อสร้างความรู้สึกรับรู้และตระหนักในคุณค่าของทรัพยากร ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ระบบยังแสดงกราฟประวัติการไหลผ่านไลบรารี Chart.js และรองรับการส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์ CSV สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงผลจำลองสายน้ำไหล

3.3 การออกแบบกลไกการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดการสะกิดเตือนตามกรอบแนวคิดของ Barker และคณะ เพื่อออกแบบสภาพแวดล้อมที่จูงใจให้ผู้ใช้งานปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการคัดแยกขยะโดยสมัครใจ ผ่านการสื่อสารด้วยภาพและข้อมูลป้อนกลับเชิงนิเวศ (Eco-feedback) ระบบจึงถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ดึงดูดความสนใจผู้ใช้งานด้วยการติดตั้งหน้าจอแท็บเล็ตสำหรับแสดงผล เพื่อสร้างประสบการณ์การโต้ตอบที่ทำให้การแยกน้ำและเศษน้ำแข็งไม่ใช่เพียงหน้าที่ แต่เป็นส่วนหนึ่งของการมีส่วนร่วมในระบบนิเวศจำลอง กลไกดังกล่าวจัดอยู่ในประเภท Prompt ร่วมกับ Information Disclosure ตามการจำแนกของ Barker และคณะ

การใช้เทคโนโลยีกราฟิก 3 มิติในการจำลองภาพการไหลของน้ำบนหน้าจอเมื่อเซนเซอร์ตรวจพบการเทน้ำทิ้งจริง ช่วยให้ผู้ใช้งานเห็นผลลัพธ์ของการกระทำในทันที การมองเห็นกระแสน้ำที่เคลื่อนที่ตามปริมาณที่เทจริงช่วยสร้างความตระหนักถึงทรัพยากรน้ำที่กำลังถูกจัดเก็บเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ระบบมีการกำหนดเกณฑ์การแปลงค่าปริมาณน้ำให้เป็นภาพที่สื่อความหมายเชิงคุณค่าทางสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดสัดส่วนเปรียบเทียบว่าปริมาณน้ำ 1 ลิตร เทียบเท่ากับการรดน้ำต้นพริก (*Capsicum frutescens*) 1 ต้น หน้าจอจะแสดงจำนวนต้นพริกที่ระบบสามารถหล่อเลี้ยงได้จากน้ำที่ผู้ใช้งานช่วยกันรีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อสร้างรางวัลทางจิตวิทยาและความรู้สึกถึงความสำเร็จในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม [3]



รูปที่ 5 หน้าจอแสดงต้นพริกที่สามารถปลูกได้

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ "เครื่องรีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็งด้วยระบบ IoT" มุ่งเน้นการประเมินผลใน 4 ด้าน ได้แก่ ความถูกต้องในการวัดปริมาณน้ำ ประสิทธิภาพของระบบ IoT การทำงานควบคุมอัตโนมัติ และผลการประยุกต์ใช้แนวคิดการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ

4.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของการวัด

การทดสอบความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณของเซนเซอร์วัดการไหล ดำเนินการโดยใช้น้ำดื่มสะอาดเป็นของเหลวอ้างอิงเพื่อควบคุมตัวแปรในการสอบเทียบเซนเซอร์ โดยทำการทดลองเทน้ำปริมาตรอ้างอิง 600 mL จำนวน 5 ครั้ง เพื่อหาค่า K-factor เฉพาะของเซนเซอร์แต่ละตัว สมการคำนวณปริมาตรน้ำสะสมจากหลักการทำงานของเซนเซอร์ที่แปลงจำนวนพัลส์เป็นปริมาตรผ่านค่าปรับแก้ K-factor เฉพาะของเซนเซอร์แต่ละตัว แสดงในสมการ (2)

$$K_factor = P/V \quad (2)$$

เมื่อ P คือจำนวนพัลส์ที่นับได้ และ V คือปริมาตรน้ำอ้างอิง (mL) จากนั้นคำนวณปริมาตรน้ำสะสมรวมตามสมการ (1) โดยใช้ค่า K-factor เฉลี่ยที่ได้จากการสอบเทียบ ได้แก่ K-factor = 2.371 สำหรับ Flow Sensor 1 และ K-factor = 8.178 สำหรับ Flow Sensor 2 ส่วนการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนปริมาตรน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์ (% Error) สามารถคำนวณตามสมการ (3) เมื่อ $V_{measured}$ คือ ปริมาตรน้ำที่วัดได้จากเซนเซอร์และ V_{actual} คือ ปริมาตรน้ำอ้างอิง

$$\%Error = \left(\frac{|V_{measured} - V_{actual}|}{V_{actual}} \right) 100 \quad (3)$$

ผลการทดลองในตารางที่ 1 พบว่าเซนเซอร์ตัวที่ 1 ซึ่งติดตั้ง ณ ช่องรับน้ำด้านบนของตู้โดยน้ำไหลผ่านแรงโน้มถ่วงจากการเทของผู้ใช้งานโดยตรง มีปริมาตรวัดได้เฉลี่ย 602.6 mL ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 1.16 และ SD ± 7.9 mL แสดงถึงความเสถียรสูงแม้อัตราการไหลจะมีความแปรปรวนตามพฤติกรรมการทำงานของผู้ทดสอบ ขณะที่เซนเซอร์ตัวที่ 2 ซึ่งติดตั้งในวงจรม้วนน้ำ มีปริมาตรวัดได้เฉลี่ย 592.6 mL ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 4.23 และ SD ± 31.8 mL ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่สูงกว่าเซนเซอร์ตัวที่ 1 น่าจะเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน ได้แก่ ปริมาตรน้ำค้างในท่อระหว่างถึงพักกับเซนเซอร์ ระยะเวลาการทำงานของปั๊มที่จำกัด (20 วินาที) ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับการถ่ายน้ำทั้งหมด และฟองอากาศที่เกิดจากการทำงานของปั๊มที่อาจส่งผลต่อการหมุนของใบพัดเซนเซอร์ อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

ของทั้งสองเซนเซอร์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ต่ำกว่าร้อยละ 5 สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร การทดสอบใช้ปริมาตรอ้างอิง 600 mL ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำเฉลี่ยในแก้วเครื่องดื่ม

ตารางที่ 1

ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซนเซอร์วัดการไหล

เซนเซอร์วัดการไหลของน้ำ	ปริมาตรอ้างอิง (mL)	ปริมาตรที่วัดได้เฉลี่ย (mL)	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)	SD (mL)
ตัวที่ 1	600	582.6	1.16	±7.9
ตัวที่ 2	600	592.6	4.23	±31.8

4.2 ประสิทธิภาพของระบบ IoT และความสมบูรณ์ของข้อมูล

ระบบบันทึกข้อมูลอัตราการไหลและปริมาตรสะสมขึ้น Firebase Realtime Database โดยอัตโนมัติทุก 15 วินาทีเมื่อตรวจพบการไหล การทดสอบความเสถียรของระบบโดยจำลองไฟดับและรีสตาร์ท ESP32 จำนวน 10 ครั้ง พบว่าระบบกู้คืนข้อมูลปริมาตรสะสมล่าสุดจาก Firebase ได้สำเร็จทุกครั้ง (ร้อยละ 100) และไม่พบการสูญหายของข้อมูลในสถานะ WiFi ปกติ ทั้งนี้ การวัดค่าความหน่วงของระบบสื่อสาร (Network Latency) อยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยนี้ เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับสถานะเครือข่าย WiFi ณ จุดติดตั้ง และได้เสนอไว้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

4.3 การทดสอบตรรกะการควบคุมอัตโนมัติและระบบรดน้ำ

ระบบควบคุมอัตโนมัติทำงานภายใต้เงื่อนไขแบบกำหนดเกณฑ์ (Threshold Control) โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ขนาดความละเอียด 12 บิต ซึ่งให้ค่าในช่วง 0-4095 ค่าเกณฑ์ ADC ทั้งหมดได้รับการปรับเทียบเชิงประจักษ์จากการทดสอบจริง ไม่ใช้การคำนวณเชิงเส้นตรงจากสมการเนื่องจากลักษณะการตอบสนองของเซนเซอร์วัดระดับน้ำแบบลายทองแดงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งและคุณสมบัติของของเหลว โดยกำหนดให้ ESP32 Node 1 สั่ง Relay 1 เปิด DC Pump 1 ทำงาน 20 วินาทีเมื่อระดับน้ำใน Storage Tank 1 ถึงเกณฑ์ที่กำหนด ($ADC \geq 1,200$) และ ESP32 Node 2 สั่ง Relay 2 เปิด DC Pump 2 ทำงาน 20 วินาทีเมื่อทั้งระดับน้ำใน Storage Tank 2 และความชื้นดินถึงเกณฑ์พร้อมกัน ($ADC \geq 1,200$ และ $ADC \geq 2,500$ ตามลำดับ) ผลการทดสอบจำนวน 20 รอบ พบว่าปั้มน้ำทั้งสองตัวทำงานตามเงื่อนไขได้ถูกต้องทุกรอบ (ร้อยละ 100) และระบบสามารถรดน้ำพืชได้โดยอัตโนมัติ

4.4 ผลการประยุกต์ใช้แนวคิดการสะกิดเตือนเชิงนิเวศและการทดสอบภาคสนาม

ส่วนแสดงผลผ่านกราฟิก 3 มิติสามารถตอบสนองต่ออัตราการไหลจริง โดยแสดงผลภาพสายน้ำที่เคลื่อนไหวตามค่าสัญญาณพัลส์ที่วัดได้แบบทันทีเมื่อผู้ใช้น้ำลงตู้ การแสดงผลจำนวนต้นพริกที่ได้รับการรดน้ำ (1 ลิตรต่อ 1 ต้น) ช่วยเปลี่ยนข้อมูลตัวเลขทางวิศวกรรมให้เป็นข้อมูลเชิงสัญลักษณ์ที่สื่อความหมายทางสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนา

ระบบต้นแบบเพื่อพิสูจน์แนวคิด (Proof of Concept) มิใช่การประเมินสมรรถนะระบบแสดงผลอย่างเป็นระบบ การวัดเวลาตอบสนองเชิงปริมาณจึงอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยนี้

การทดสอบภาคสนาม (Field Test) ดำเนินการโดยติดตั้งระบบต้นแบบ ณ พื้นที่สัญจรบริเวณหน้าอาคารเรียน ดังแสดงในรูปที่ 6 เป็นระยะเวลา 3 วัน (วันจันทร์-พุธ) วิธีการเก็บข้อมูลใช้การสังเกตการณ์โดยผู้วิจัย บันทึกจำนวนผู้ที่หยุดสังเกตและผู้ที่เข้าร่วมทดลองใช้งาน ผลการสังเกตการณ์พบว่า มีผู้สัญจรผ่านหยุดสังเกตระบบโดยเฉลี่ยวันละ 30-40 คน และมีผู้เข้าร่วมทดลองใช้งานจริงโดยเฉลี่ยวันละ 10-15 คน อย่างไรก็ตาม การทดสอบภาคสนามนี้ยังเป็นเพียงการสังเกตการณ์เบื้องต้น ยังไม่ได้ใช้แบบสอบถาม เครื่องมือวัดเชิงพฤติกรรมมาตรฐานหรือกลุ่มควบคุม จึงยังไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพของ Eco-Nudge ในเชิงวิชาการได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะนำไปดำเนินการในงานวิจัยถัดไป



รูปที่ 6 การทดลองติดตั้งตู้หน้าอาคาร

วิศวกรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยราช

ภัฏอุดรธานี ศูนย์การศึกษาสามพร้าว

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแบบต้นแบบ IoT รีไซเคิลน้ำและเศษน้ำแข็งร่วมกับการสะกิดเตือนเชิงนิเวศ บรรลุวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบต้นแบบที่สามารถทำงานได้จริง โดยมีผลการทดสอบเชิงปริมาณ ดังนี้ ด้านความแม่นยำ เช่น เซอร์วัดการไหลตัวที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 1.16 ($SD = \pm 7.9$ mL) และตัวที่ 2 มีค่าร้อยละ 4.23 ($SD = \pm 31.8$ mL) ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 5 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ด้านความเสถียรของข้อมูล ระบบกู้คืนข้อมูลมีอัตราความสำเร็จร้อยละ 100 โดยไม่พบการสูญหายของข้อมูลในสถานะ WiFi ปกติ ด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ บิมน้ำทั้งสองตัวทำงานตามเงื่อนไขได้ถูกต้องร้อยละ 100 จากการทดสอบ 20 รอบ ด้านการสะกิดเตือน ระบบกราฟิก 3 มิติสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเซนเซอร์ได้แบบทันทีทันใด และการทดสอบภาคสนามเบื้องต้นพบว่าระบบสามารถดึงดูดความสนใจผู้สัญจร อย่างไรก็ตาม ยังต้องการการประเมินผลเชิงพฤติกรรมอย่างเป็นระบบในงานวิจัยถัดไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดสำคัญที่พบจากการทดสอบภาคสนามคือของเหลวที่ผู้ใช้เททิ้งส่วนใหญ่เป็นเครื่องดื่มประเภทชา กาแฟ ซึ่งประกอบด้วยกรด น้ำตาล และคราบไขมัน สารเจือปนเหล่านี้เมื่อใช้งานเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดคราบฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) สะสมอยู่ภายในท่อและเกาะติดบริเวณใบพัดหมุนของเซนเซอร์

วัดการไหล ส่งผลให้ความเร็วรอบใบพัดลดลงและเกิดความคลาดเคลื่อนสะสมในระยะยาว ตลอดจนอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและการกัดกร่อนบนหน้าสัมผัสของอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ นอกจากนี้ คุณภาพน้ำรีไซเคิลที่มีสิ่งเจือปนอาจไม่เหมาะสำหรับการรดน้ำต้นไม้บางชนิดและอาจดึงดูดแมลง หากมีการนำระบบต้นแบบไปใช้งานจริง ผู้วิจัยเสนอแนะให้เปลี่ยนไปใช้เซนเซอร์วัดระดับของเหลวและเซนเซอร์วัดการไหลประเภทไม่สัมผัสของเหลว (Non-contact Sensors) เช่น เซนเซอร์วัดระดับแบบคาปาซิทีฟชนิดแนบภายนอกถัง หรือเซนเซอร์ตรวจจับการไหลแบบอัลตราโซนิก เพื่อขจัดปัญหาการอุดตันและการกัดกร่อนจากสารเคมีเหนียว

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรดำเนินการใน 4 ด้านหลัก ได้แก่ (1) การทดสอบค่า K-factor ที่ปริมาตรหลากหลายและจำนวนครั้งที่มากขึ้นเพื่อยืนยันความแม่นยำของเซนเซอร์และลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2) การออกแบบการทดลองเชิงพฤติกรรมที่มีกลุ่มควบคุมและใช้แบบสอบถามมาตรฐานเพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Eco-Nudge อย่างเป็นระบบ (3) การวัดค่าความหน่วงของระบบสื่อสาร (Network Latency) ระหว่าง ESP32 กับ Firebase Realtime Database และเวลาตอบสนองของระบบแสดงผลอย่างเป็นระบบภายใต้สถานะเครือข่ายที่ควบคุมได้ และ (4) การพิจารณาเพิ่มองค์ประกอบ Social Norm เข้าในระบบ Nudge เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตามกรอบแนวคิดของ Barker และคณะ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Belaïd F, Arora A, editors. Smart cities: social and environmental challenges and opportunities for local authorities. Cham: Springer; 2023. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-35664-3>.
- [2] University of Washington Sustainability. What is recycling contamination? [Internet]. Seattle: University of Washington; 2021 Apr 20 [cited 2026 Apr 5]. Available from: <https://sustainability.uw.edu/blog/recycling-contamination>
- [3] Froehlich J, Findlater L, Landay J. The design of eco-feedback technology. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10); 2010 Apr 10; Atlanta, GA. New York: ACM; 2010. p. 1999–2008.
- [4] Sosunova I, Porras J. IoT-enabled smart waste management systems for smart cities: A systematic review. IEEE Access 2022; 10: 73326-50.
- [5] Hasan MK, Khan MA, Issa GF, Atta A, Akram AS, Hassan M. Smart waste management and classification system for smart cities using deep learning. Proceedings of the 2022 International Conference on Business Analytics for Technology and Security (ICBATS); 2022

Feb 24-25; Dubai, United Arab Emirates.

New York: IEEE; 2022. p. 1-7.

- [6] Thaler RH, Sunstein CR. Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness. New Haven: Yale University Press; 2008.
- [7] Barker H, Shaw PJ, Richards B, Clegg Z, Smith D. What nudge techniques work for food waste behaviour change at the consumer level? A systematic review. Sustainability. 2021;13(19):11099.
- [8] Linder N, Lindahl T, Borgström S. Using behavioural insights to promote food waste recycling in urban households-evidence from a longitudinal field experiment. Front Psychol. 2018;9:352.
- [9] Mataloto B, Calé D, Carimo K, Ferreira JC, Resende R. 3 D IoT System for Environmental and Energy Consumption Monitoring System. Sustainability 2021 ; 13(3): 1495.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบและสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด
แบบควอทซ์เพื่อการอบกล้วยน้ำว้า

Design and Performance Evaluation of a Hybrid Solar Dryer Integrated with
Quartz Infrared Heaters for Banana Drying

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง¹⁾ อนูวัช แสนพงษ์¹⁾ ไฉไล ชาสะเสน¹⁾ และ อภิชน มุ่งชู^{1)*}

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

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

¹⁾Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

Received: 15 October 2025

Revised: 1 May 2026

Accepted: 11 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการอบกล้วยน้ำว้าเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดด ตู้อบที่พัฒนามีขนาด $100 \times 150 \times 80$ เซนติเมตร ใช้โพลีคาร์บอเนตเป็นวัสดุคลุมและติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรด 600 วัตต์ จำนวน 2 หลอดรวมกับความเร็วลมที่ 3 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสาน (พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด) ใช้เวลาอบเพียง 28 ชั่วโมง ซึ่งสั้นกว่าการอบด้วยแสงแดดเพียงอย่างเดียวที่ต้องใช้เวลาถึง 79 ชั่วโมง ขณะที่การอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดเพียงอย่างเดียวใช้เวลา 25 ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบผสมผสานอยู่ที่ 20.8 หน่วย ซึ่งช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 15.45 เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวซึ่งใช้พลังงาน 24.6 หน่วย คุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่ได้จากระบบผสมผสานมีสีส้มสวยงามและน่ารับประทานมากกว่าวิธีอื่น เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 50-

60 ±2 องศาเซลเซียส ได้อย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถลดเวลาอบ ประหยัดพลังงานไฟฟ้า และคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี โดยคาดว่าจะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3 ปี

คำสำคัญ: กลัวย่น้ำว้า การอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ อินฟราเรด ระบบอบแห้งแบบผสมผสาน

Abstract

This research aimed to design and construct a solar dryer integrated with quartz infrared heaters and to evaluate its performance in drying bananas compared with traditional sun drying. The developed dryer has dimensions of 100 × 150 × 80 cm, covered with polycarbonate material, and equipped with two 600-watt infrared heaters combined with an air velocity of 3 m/s. The experimental results revealed that the hybrid drying system (solar energy combined with infrared heaters) required only 28 hours, which was significantly shorter than sun drying alone, which took up to 79 hours, while infrared heaters alone required 25 hours. The hybrid system consumed 20.8 kWh of electricity, saving 15.45% compared to the infrared-only system, which consumed 24.6 kWh. The dried bananas produced by the hybrid system showed superior color and appearance, making them more appealing than those dried by other methods, due to its ability to maintain a continuous temperature in the range of 50–60 ±2 °C. The findings indicate that the hybrid dryer is the most suitable method for commercial production, as it reduces drying time, conserves energy, and maintains product quality. The estimated payback period of the system is approximately three years.

Keywords: Banana: Drying: Solar energy: Infrared: Hybrid drying system

*ติดต่อ: Sawanee.ja@ksu.ac.th, 088-798-1158

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อาหารแปรรูปได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกระบวนการแปรรูปมีบทบาทสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษา ช่วยเพิ่มความปลอดภัยจากการปนเปื้อนของสารพิษและเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงอำนวยความสะดวกในการบริโภคและการขนส่ง อีกทั้งยังสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ผลผลิตทางการเกษตร และตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายของผู้บริโภค [1] จาก

รายงานการสำรวจพบว่า ความนิยมในการบริโภคอาหารแปรรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการแปรรูปที่ได้รับความนิยมมากคือ การอบแห้ง (drying) เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และสร้างเอกลักษณ์ด้านสี กลิ่น และรสชาติให้ผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น กล้วยอบแห้งและลำไยอบแห้ง

กล้วยน้ำว่า จัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย โดยได้รับความนิยมสูงทั้งในประเทศและต่างประเทศ กล้วยน้ำว่ามีคุณประโยชน์ทางโภชนาการและทางการแพทย์ เช่น ช่วยบรรเทาอาการแผลในกระเพาะอาหาร รักษาอาการท้องเสียและท้องผูก เสริมสร้างธาตุเหล็กเพื่อลดภาวะโลหิตจาง อีกทั้งยังมีสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยชะลอวัย และใยอาหารที่ช่วยในการทำงานของระบบขับถ่าย [2] อย่างไรก็ตาม กล้วยน้ำว่าเป็นผลไม้ที่เน่าเสียง่าย โดยเฉพาะเมื่อสุก เนื้อกล้วยจะนิ่มและ มีกลิ่นรุนแรง และเปลือกหลุดง่าย ส่งผลให้เกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวและกระบวนการแปรรูป

ที่เหมาะสม เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค

สำหรับกระบวนการอบแห้งอาหาร แม้ว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) จะสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับสภาพสดมากที่สุด [3] แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือต้นทุนการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง งานวิจัยหลายชิ้นจึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่มีต้นทุนที่ต่ำลงแต่ยังคงสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่ติดตั้ง heat exchanger และวัสดุสะสมความร้อนสำหรับการอบกล้วยสไลซ์ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านสีและกลิ่นที่ดีขึ้น และเนื้อสัมผัสนุ่มกว่าการตากแดด [5] อีกงานวิจัยหนึ่งพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบายอากาศด้วยไฟโดไวลตาอีกเพื่ออบกล้วยแผ่น ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพด้านกลิ่น รส สี และเนื้อสัมผัสดีกว่าการตากแดด และมีศักยภาพสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ [5]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งมีศักยภาพสูงในการลดเวลาและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของกระบวนการ เนื่องจากสภาพอากาศที่ผันผวน เช่น วันที่มีเมฆมากหรือในช่วงเวลาเช้าและเย็น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว นักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบผสมผสาน (hybrid drying systems) โดยนำแหล่งพลังงานอื่นมาใช้ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพ หรือรังสีอินฟราเรด โดยเฉพาะอินฟราเรดซึ่งมีข้อดีในการถ่ายเทความร้อน

โดยตรงเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดความร้อนรวดเร็ว ลดเวลาอบ และช่วยรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัสได้ดีกว่าระบบอบแห้งทั่วไป นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาตู้อบแห้งแบบ parabolic greenhouse solar dryer ที่ติดตั้งระบบเผาแก๊สเพื่อใช้เป็นพลังงานเสริมในการอบกล้วย ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิ ลดเวลาอบ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการตากแดดแบบดั้งเดิม [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบปิด ช่วยลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยเฉพาะในช่วงที่มีความชื้นสูง ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์สามารถแผ่รังสีได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า ระบบดังกล่าวสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลักในช่วงกลางวัน และเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดในวันที่มีพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อให้กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ลดการสูญเสียพลังงาน และได้ผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่มีคุณภาพสูง อันจะช่วยเพิ่มมูลค่าและรายได้แก่เกษตรกรในท้องถิ่น

ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ (Quartz Infrared Heater) ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร โดยฮีตเตอร์ชนิดนี้สามารถแผ่รังสีในช่วง near to mid-infrared (ประมาณ 0.8–3 μm) ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่วัตถุดิบอาหาร โดยเฉพาะผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถดูดกลืนพลังงานได้

ดี ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยตรงสู่พื้นผิว และชั้นเนื้อของผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว แตกต่างจากการให้ความร้อนแบบพาความร้อน (convective heating) ที่ต้องอาศัยตัวกลางอากาศเป็นหลัก นอกจากนี้ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ยังมีอัตราการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดที่รวดเร็ว ให้กำลังความร้อนคงที่ และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูง จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นแหล่งพลังงานเสริมในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ ในช่วงที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

จากแนวคิดดังกล่าวผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่า การผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์จะสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งกล้วยน้ำว้าได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ และสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว ขณะเดียวกันยังสามารถคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสี กลิ่น และลักษณะทางกายภาพได้ดีกว่า

ทั้งนี้เพื่อความชัดเจนในการนำเสนอผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้คำว่าความชื้น หมายถึง ค่าความชื้นตามมาตรฐานที่ได้จากการหาค่าหนักของตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ความชื้นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยค่าความชื้นดังกล่าวแสดงผลในรูปเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก (%wb)

2. วิธีการวิจัย

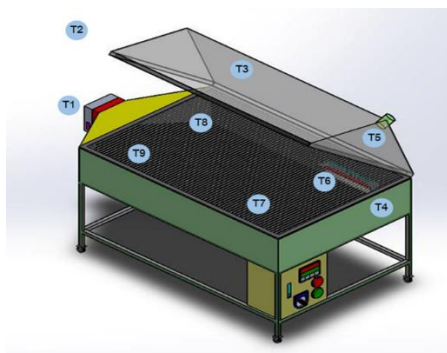
การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตนั้น เงื่อนไขสำคัญของการอบแห้งที่มีคุณภาพคือ การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในกระบวนการอบ [7] เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมส่งผลต่อสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กล้วยอบ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ซึ่งประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิจากฮีตเตอร์อินฟราเรดถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องศึกษา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่มีคุณภาพดีที่สุด ดังนั้น ในการศึกษานี้ ได้กำหนดขั้นตอนการเตรียมวัสดุ การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 1 การติดตั้งระบบควบคุมดังรูปที่ 2 ตลอดจนการวางแผนการทดลอง เพื่อใช้ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์อย่างเป็นระบบ โดยในการศึกษานี้กำหนดขั้นตอนการเตรียมวัสดุ และการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในช่วงที่มีแสงแดดและในวันที่ไม่มีแสงแดด โครงสร้างหลักของเครื่องทำจากเหล็กกล้าเคลือบกันสนิม มีขนาดประมาณ $100 \times 150 \times 80$ เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ภายในติดตั้งตะแกรงสเตนเลสที่ถอดเข้าออกได้สะดวก ใช้สำหรับจัดเรียงกล้วยน้ำว้าหรือผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ ให้สามารถรับความร้อนได้อย่างทั่วถึง พร้อมกับมีพัด

ลมช่วยให้อากาศหมุนเวียน ทำให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกส่วนของตู้อบ

ด้านบนของเครื่องออกแบบเป็นฝาครอบโปร่งใสทำจากอะคริลิกหรือโพลีคาร์บอเนต ซึ่งช่วยให้รังสีแสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเข้าสู่ภายในได้ ขณะเดียวกันยังทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก ตัวเครื่องติดตั้งช่องระบายความชื้นที่สามารถปรับเปิด-ปิดได้เพื่อป้องกันการสะสมของไอน้ำซึ่งอาจส่งผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ส่วนระบบให้ความร้อนเสริมใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ที่ติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของห้องอบ ซึ่งสามารถแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุโดยตรง ทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและช่วยให้กระบวนการอบแห้งดำเนินไปได้ต่อเนื่องแม้ในช่วงที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์

การทำงานทั้งหมดถูกควบคุมด้วยตู้ควบคุมไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบให้ใช้งานได้สะดวกและมีความทันสมัย โดยภายในตู้มีระบบควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น การทำงานของพัดลมและการทำงานของฮีต

เตอรอินฟราเรดแบบควอท์ทั้งหมดถูกเชื่อมโยงเข้ากับระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถตั้งค่าได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน อีกทั้งยังมีหน้าจอดิจิทัลแสดงผลการทำงานอย่างชัดเจน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าการทำงานได้แบบเรียลไทม์ อีกทั้งยังติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ (T1-T9) และความชื้นภายในตู้รวมทั้งหมด 9 จุด เพื่อบันทึกค่าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบและใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยรวม เครื่องอบแห้งนี้จึงมีความสามารถในการทำงานได้สม่ำเสมอ ควบคุมง่าย ลดการสูญเสียพลังงาน และช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติ การคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น (1)

$$M = \frac{(w_1 - w_2)}{w_1 - w} \quad (1)$$

โดยที่

M = ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์ %wb)

w = น้ำหนักถ้วยเปล่า (กรัม)

w₁ = น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยก่อนอบ (กรัม)

w₂ = น้ำหนักตัวอย่างพร้อมถ้วยหลังอบ (กรัม)



รูปที่ 2 ตู้อบพลังแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์

อินฟราเรดแบบควอท์

การคำนวณหาจุดคุ้มทุน ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอท์ในด้านของระยะเวลาคืนทุนตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอท์ (Pay-back period) จะอ้างอิงสมการที่ (2)

$$PBP = \frac{C_{inw}}{S_{annual}} \quad (2)$$

โดยที่

PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)

C_{inw} = เงินลงทุนเริ่มต้น (บาท)

S_{annual} = ผลประหยัดสุทธิต่อปี หรือรายได้สุทธิ (บาท/ปี)

2.2 การทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ดำเนินการในเดือนเมษายน เริ่มต้นด้วยการหาค่าความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้า โดยนำถ้วยใส่ตัวอย่างจำนวน 3 ถ้วยเข้าสู่กระบวนการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พักให้เย็นในเครื่องดูดความชื้นก่อนทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำกล้วยน้ำว้าที่ปอกเปลือกแล้วมาบดละเอียด ใส่ลงไปในถ้วยตัวอย่างประมาณถ้วยละ 3 กรัม แล้วบันทึกน้ำหนัก ก่อนจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเครื่องดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำหลายครั้งจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ เพื่อใช้เป็นค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง ทั้งนี้ในการอบแห้งกล้วยน้ำว้า จะพิจารณาให้ค่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่เกินร้อยละ 25 ตามที่กำหนดใน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง (มอก. 919-2532) [8] เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้อย่างปลอดภัยและมีคุณภาพตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน

หลังจากนั้นจึงเข้าสู่การเตรียมกล้วยสำหรับการอบแห้ง โดยคัดเลือกกล้วยน้ำว้าสุกงอมที่มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 50 กรัมต่อลูก มาปอกเปลือกและแช่ในน้ำเกลือ ซึ่งเตรียมจากการผสมน้ำ 1,000 มิลลิลิตร กับเกลือ 20 กรัม เป็นเวลา 5 นาที ก่อนจะนำออกมาวางเรียงบนถาดอบจนได้กล้วยน้ำว้าโดยในการทดลองต่อครั้งจะใช้กล้วยน้ำว้าตัวอย่างครั้งละ 13 กิโลกรัม จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักรวมของกล้วยพร้อมถาดและบันทึกข้อมูลก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยการทดลองอบแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ได้แก่

1. การอบแบบตากแดดธรรมชาติ (ระบบที่ 1) เป็นการอบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว สำหรับวิธีนี้เป็นการตากแดดโดยไม่ใช้ฮีตเตอร์ เริ่มทดลองตั้งแต่เวลา 09.00–17.00 น. ของแต่ละวัน โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที และบันทึกข้อมูลจนกว่าน้ำหนักจะได้ตามที่กำหนด

2. การอบโดยใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด (ระบบที่ 2) เริ่มอบตั้งแต่เวลา 09.00 น. โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง $50-60 \pm 2$ องศาเซลเซียส พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกตู้อบทุก ๆ 30 นาที รวมทั้งชั่งน้ำหนักกล้วยและบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนบันทึกปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

3. การอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดอย่างเดียว (ระบบที่ 3) เริ่มการอบในเวลา 09.00 น. โดยควบคุมอุณหภูมิในช่วง $50-60 \pm 2$ องศาเซลเซียส และวัดค่าต่าง ๆ

เช่นเดียวกับการอบแบบรวม ได้แก่ อุณหภูมิภายในและภายนอกตู้อบ น้ำหนักของกล้วย และปริมาณการใช้ไฟฟ้า

2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จึงเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำสูงในการวัดค่า เช่น เครื่องชั่งดิจิทัล เครื่องวัดอัตราเร็วลม เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และมีเตอร์วัดหน่วยไฟฟ้า โดยคุณสมบัติและความแม่นยำของเครื่องมือแต่ละชนิดสรุปแสดงใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1

รายละเอียดอุปกรณ์วิเคราะห์การทดลอง

รายการ	ย่านการทำงาน (Ranges)	ค่าความ แม่นยำ (Accuracy)
เครื่องชั่งดิจิทัล	0 – 30 kg	$\pm 0.0167\%$
เครื่องวัดอัตราเร็วลม	0 – 30 m/s	$\pm 3\%$
เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (ชนิด K-type)	-50 - 150 °C	$\pm 0.1\%$
มิเตอร์วัดหน่วยไฟฟ้า	220 – 240 V, 5(15) A	$\pm 1\%$

หมายเหตุ ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำการประเมินค่าความชื้น (%wb) และน้ำหนักของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขวิธีการตากแห้งที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการอบแต่ละรูปแบบ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ เวลาในการอบ ความชื้น (%wb) น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ และการใช้พลังงานไฟฟ้า จะถูกนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐาน และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีการอบแห้งแต่ละระบบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อประเมินความแตกต่างของผลการทดลองอย่างเป็นระบบ การทดลองได้ทำการวัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไข ($n = 3$) และนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เพื่อแสดงความแปรปรวนของข้อมูล ผลลัพธ์ถูกนำเสนอในรูปแบบตารางและกราฟ โดยแสดงค่าในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งช่วยให้การตีความผลการทดลองมีความชัดเจนยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ทางสถิติดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดลองและใช้เป็นหลักฐานทางวิชาการเพื่อสนับสนุนข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

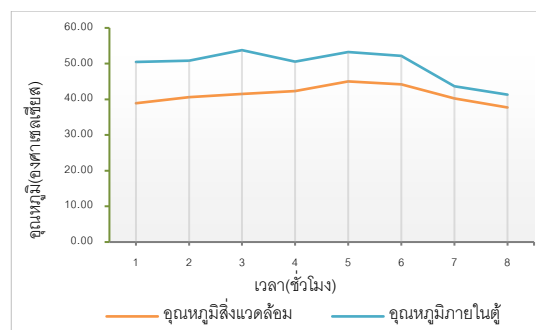
3. วิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อตรวจสอบสมรรถนะด้านการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาในการอบ รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยน้ำว่าที่ผ่านการอบแห้ง โดยผลการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการอบแบบตากแดดธรรมชาติ การอบด้วยระบบผสมผสาน (พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด) และการอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ผลที่ได้จะช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น ทั้งในด้านพลังงานที่ใช้ คุณภาพ

ผลิตภัณฑ์ และความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

3.1 วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิภายในตู้เป่า

จากการทดสอบวัดอุณหภูมิภายในตู้อบโดยที่ยังไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและไม่ได้ใส่วัตถุใดตัวอย่าง พบว่าอุณหภูมิภายในตู้สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 53.77 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุดอยู่ที่ 45.12 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าตู้อบมีประสิทธิภาพในการกักเก็บและสะสมความร้อนได้ดีกว่าสภาพแวดล้อมภายนอก โดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถึง 8.65 องศาเซลเซียส ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของวัสดุฝาครอบโปร่งใสและโครงสร้างตู้อบที่ออกแบบมาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับพลังงานแสงอาทิตย์



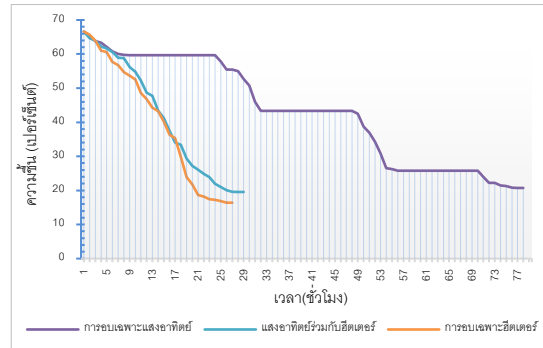
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในตู้และสิ่งแวดล้อม

ผลการทดลองจากรูปที่ 3 นี้ชี้ให้เห็นว่าแม้ในสภาวะที่ยังไม่มีการทำงานของฮีตเตอร์อินฟราเรด ตู้อบก็สามารถสร้างสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

สภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) ระหว่างภายในตู้กับสิ่งแวดล้อมมีส่วนช่วยเร่งอัตราการระเหยของความชื้นจากวัตถุดิบ ทั้งยังแสดงถึงศักยภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำงานได้ด้วยตัวเอง และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด จะช่วยให้การอบแห้งมีความต่อเนื่องและสามารถควบคุมสภาวะได้อย่างเสถียรมากยิ่งขึ้น

3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองอบกล้วยน้ำว้า

การทดลองที่ระบบต่างๆ โดยนำกล้วยที่หาได้ง่ายตามท้องตลาดคือ กล้วยน้ำว้า มาทำการทดลองที่ระบบต่างๆ คือ ระบบที่ 1 จะไม่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบและไม่มีการควบคุมความเร็วลมโดยใช้เฉพาะแสงแดดอย่างเดียว ระบบที่ 2 จะมีการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องและควบคุมความเร็วลม (การควบคุมอุณหภูมิจะควบคุมให้อยู่ในช่วง 50-60 ±2 องศาเซลเซียส และความเร็วลมที่ 3 เมตรต่อวินาที) โดยใช้แสงแดดร่วมกับฮีตเตอร์ และระบบที่ 3 ทำการอบเหมือนระบบที่ 2 โดยใช้เฉพาะฮีตเตอร์อย่างเดียว และจะทำการสุ่มตัวอย่างกล้วยเพื่อทำการวัดน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง (ตั้งแต่ 9.00 - 17.00 น.) จนได้น้ำหนักตามที่ต้องการคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก นอกจากนี้ก็จะทำการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบและวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกตลอดช่วงการทดลอง



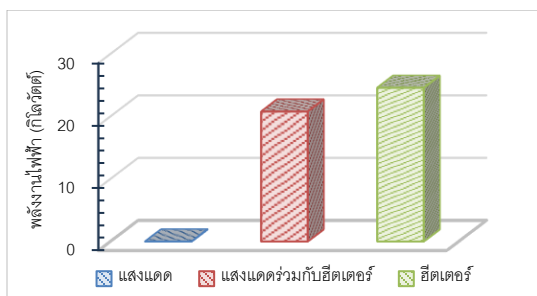
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนความชื้นของการอบแต่ละระบบ

ผลการทดลองจากรูปที่ 4 จะเห็นว่าการอบกล้วยจนได้ค่าความชื้นตามต้องการคือ เมื่อสุ่มตัวอย่างกล้วยมาวัดน้ำหนักและความชื้นจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงพบว่า การอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิและควบคุมความเร็วลม (ระบบที่ 2 และ 3) มีการลดลงของค่าความชื้นเร็วกว่าการอบโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบและไม่มีการควบคุมความเร็วลม (ระบบที่ 1) เนื่องจากมีการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบในช่วง 50-60 ±2 องศาเซลเซียส และมีการควบคุมความเร็วลมทำให้การหมุนเวียนของอากาศร้อนขึ้นออกไปได้ดีกว่า แต่ในระบบที่ 1 ที่ไม่มีการควบคุมทำให้การไหลเวียนของอากาศร้อนขึ้นออกไปได้ช้าที่ปล่องทางออกทางด้านบน ทำให้ต้องใช้เวลาานกว่าประมาณ 48-80 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามต้องการ ทั้งนี้ การลดความชื้นที่ได้สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง (มอก. 919-2532) [8] ซึ่งกำหนดให้ผลิตภัณฑ์กล้วยอบมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 25 นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วยทำให้เวลาอบสั้นลงกว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4-6] แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่สามารถลดเวลา

และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 วิเคราะห์การเปรียบเทียบการใช้หน่วยไฟฟ้าในการอบ

จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงผลการวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าด้วยมิเตอร์ พบว่าระบบที่ 2 (Hybrid: พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 20.8 หน่วย ขณะที่ระบบที่ 3 (Infrared only) มีการใช้ไฟฟ้า 24.6 หน่วย ส่วนระบบที่ 1 (Solar only) ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากใช้เพียงพลังงานจากแสงอาทิตย์ในการอบ



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการใช้หน่วยไฟฟ้าในการอบแห้งแต่ละระบบ

ผลการทดลองสะท้อนให้เห็นว่า แม้ระบบที่ 2 และ 3 จะใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ระบบที่ 2 สามารถ ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณร้อยละ 15–20 เมื่อเทียบกับระบบที่ 3 อันเป็นผลมาจากการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด ทำให้ลดภาระการทำงานของฮีตเตอร์ลงในช่วงที่มีแดดจัด ทั้งนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการอบ

(50 – 60 องศาเซลเซียส) ได้อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับระบบที่ 3

ในทางตรงกันข้าม แม้ว่าจะระบบที่ 1 จะไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าเลย แต่การอบแห้งกลับใช้เวลานานกว่ามาก (ประมาณ 48-80 ชั่วโมง) และมีข้อจำกัดในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาทั้งในแง่ เวลาในการอบ คุณภาพผลิตภัณฑ์ และการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าระบบที่ 2 มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดเวลาอบแห้งลงได้มาก รักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ดี และยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว

3.4 การเปรียบเทียบทางกายภาพด้านสี และกลิ่น

เมื่อพิจารณาคุณภาพของกล้วยน้ำว่าสุกอบแห้งที่ได้จากการใช้ ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ (ค) พบว่าผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีที่เข้มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และมีสีน้ำตาลสวยงามน่ารับประทานมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบด้วยวิธีอบตามธรรมชาติ (ก) หรือวิธีการใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว (ข) ทั้งนี้คุณสมบัติในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของกล้วย เช่น ปฏิกิริยา Maillard reaction [9] และการคาราเมลไลซ์ (caramelization) [10] ของน้ำตาลธรรมชาติ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และกลิ่นของผลิตภัณฑ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6 (ก) กลัวย่น้ำว้าอบธรรมชาติ (ข) กลัวย่น้ำว้าอบฮีตเตอร์ (ค) กลัวย่น้ำว้าอบร่วมกับฮีตเตอร์

ในกรณีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 50–60 องศาเซลเซียส และมีการระบายความชื้นที่ต่อเนื่อง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเหลืองทองถึงน้ำตาลอ่อน ที่เป็นเอกลักษณ์ของกล้วยอบคุณภาพดี อีกทั้งยังคงความเงาและความสม่ำเสมอของพื้นผิว ซึ่งแตกต่างจากการอบแบบธรรมชาติที่ผลิตภัณฑ์มักมีสีไม่สม่ำเสมอ ซีด และบางส่วนมีลักษณะคัลลิกเกินไปเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ

สำหรับการอบด้วยฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว แม้จะสามารถลดเวลาการอบได้ แต่กลับทำให้ผลิตภัณฑ์บางส่วนมีสีคล้ำมากกว่าปกติ เนื่องจากการได้รับรังสีอินฟราเรดโดยตรงเป็นเวลานานเกินไป ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของสีและความน่ารับประทานเมื่อเทียบกับการอบแบบผสมผสาน การเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีและกลิ่นของกล้วยอบในงานวิจัยนี้แม้จะอาศัยการประเมินเชิงกายภาพเบื้องต้น แต่ในอนาคตสามารถพัฒนาเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เช่น การวัดค่าสีด้วยระบบ CIE L*, a*, b* หรือการประเมินทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation)

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือทางวิชาการของผลการทดลอง

โดยสรุปการใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ไม่เพียงแต่ช่วยลดเวลาอบและประหยัดพลังงานไฟฟ้า แต่ยังมีข้อได้เปรียบอย่างชัดเจนในด้าน คุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะลักษณะทางด้านสี กลิ่น และความน่ารับประทาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภคและเพิ่มโอกาสเชิงพาณิชย์

4. สรุปผล

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี โดยสามารถสร้างอุณหภูมิภายในสูงกว่าสภาพแวดล้อมเฉลี่ยได้ถึง 8.65 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 41.3 องศาเซลเซียส เครื่องอบแห้งที่ออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเปรียบเทียบการอบกล้วยในสามระบบแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยการอบด้วยแสงแดดเพียงอย่างเดียวไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมต้องใช้เวลานานถึง 79 ชั่วโมงจึงจะได้รับความชื้นตามมาตรฐาน ขณะที่การใช้ระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์และควบคุมอุณหภูมิในช่วง 50–60 องศาเซลเซียส รวมถึงควบคุมความเร็วลมที่ 3 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาเพียง 28 ชั่วโมง ส่วนการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดเพียงอย่างเดียวใช้เวลา 25 ชั่วโมง การใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดเวลาอบได้ถึงร้อยละ 68 เมื่อเทียบกับการตากแดด

เมื่อพิจารณาด้านการใช้พลังงานพบว่าระบบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่สิ้นเปลืองไฟฟ้า แต่ใช้เวลานานมากจนไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ ในขณะที่การใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวแม้จะประหยัดเวลา แต่กลับใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าระบบผสมผสาน คุณภาพผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่ได้มีความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 25 สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง (มอก. 919-2532) [8] การใช้ระบบที่สองซึ่งผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควบหึ่งจึงถือว่ามีความเหมาะสมที่สุด เพราะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้น้อยลงร้อยละ 15 - 20 เมื่อเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังมีระบบควบคุมความร้อนและการระบายอากาศที่สม่ำเสมอ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่ได้มีสีสดน่ารับประทานกว่าการอบด้วยวิธีตากแดด อีกทั้งยังสามารถดำเนินการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ขึ้นกับช่วงเวลากลางวันหรือสภาพอากาศ จึงมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยคาดว่าจะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณสามปี ผลการเปรียบเทียบเชิงสถิติยืนยันว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสานให้ผลแตกต่างจากวิธีการอบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งในด้านระยะเวลาอบและการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับกิ่งอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Weaver CM, Dwyer J, Fulgoni VL 3rd, King JC, Leveille GA, MacDonald RS, et al. Processed foods: contributions to nutrition. *Am J Clin Nutr*. 2014;99(6):1525-42. doi:10.3945/ajcn.114.089284.
- [2] Zahra F, Khalid S, Aslam M, Sharmeen Z. Health benefits of banana (Musa)-a review study. *Int J Biosci*. 2021;18(4):189-99. doi:10.12692/ijb/18.4.189-8.
- [3] Young D. Lyophilization vs. traditional drying methods: why choose freeze drying? *Specialty Solutions*. 2024 Dec 23.
- [4] Amer BMA, Hossain MA, Gottschalk K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Convers Manag*. 2010;51(4):813-20. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.016.
- [5] Suherman S, Hadiyanto H, Asy-Syaqiq MA, Brastayudha AA, Fahrudin MW. Drying banana slices using photovoltaic ventilation solar dryer. *Food Res*. 2024;8(Suppl 1):90-102. doi:10.26656/fr.2017.8(S1).13.
- [6] Pankaew P, Aumporn O, Janjai S, Mundpookhiew T, Bala BK. Performance of parabolic greenhouse solar dryer equipped with rice husk burning system for banana drying. *J Renew Energy Smart Grid Technol*. 2019;14(1):52-65.

- [7] Kushwah SS, Saini RP, Dhar A. Optimization of drying parameters for hybrid indirect solar dryer for banana slices using response surface methodology. *Process Saf Environ Prot.* 2023;172:1025-38. doi:10.1016/j.psep.2022.12.003.
- [8] สถาบันมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 919-2532: ผลไม้แห้ง. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2532.
- [9] Chee XC, Razali Z, Somasundram C, Ching JJ, Abdullah E, Tan CH. Effects of different ripening stages on the physiological, biochemical, and sensory properties of microwave-dried berangan banana (*Musa acuminata*). *J Food Meas Charact.* 2025;21(2):e03515. doi:10.1007/s11694-025-03515-z.
- [10] Woo KS, Kim HY, Hwang IG, Lee SH, Jeong HS. Characteristics of the thermal degradation of glucose and maltose solutions. *Prev Nutr Food Sci.* 2015;20(2):102-9. doi:10.3746/pnf.2015.20.2.102



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

Design and development of an automatic temperature-controlled cricket fryer

วุฒิพงศ์ ทองแห้ว^{1,4,5} ชัยยันต์ จันทศิริ^{2,4,5} วิรุณ โมณะตระกูล³และ จารุพล สุริยวานากุล^{1,4*}Wuttiphong Thonghao^{1,4,5}, Chaiyan Junsiri^{2,4,5}, Wiroon Monatrakul³And Jarupol Suriyawanakul^{1,4*}¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น³สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม⁴ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น⁵ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม 10400

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Khon Kaen University³Innovative Technology Machinery Program, Rajabhat Maha Sarakham University⁴Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University

Khon Kaen Province 40002

⁵Postharvest Technology Innovation Center, Science, Research and Innovation Promotion and Utilization Division, Office of the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation 10400

Received: 29 May 2026

Revised: 18 June 2026

Accepted: 26 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ เพื่อลดการพึ่งพาทักษะของผู้ปฏิบัติงาน เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ เครื่องต้นแบบมีขนาด 28.5 × 63.5 × 73.0 เซนติเมตร น้ำหนัก 15 กิโลกรัม ใช้ฮีตเตอร์กำลังไฟฟ้า 2,500 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ K-Type Thermocouple ร่วมกับ Arduino Uno R3 และระบบควบคุมแบบ ON-OFF Control โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 140, 160,

180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 6 และ 8 นาที ผลการทดสอบประสิทธิภาพพบว่า เครื่องสามารถเพิ่มอุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดได้ภายใน 3–5 นาที โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด 47.28 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีค่า Overshoot อยู่ในช่วง 3.25–7.22 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานพบว่า เครื่องทอดอัตโนมัติมีเวลามาตรฐานการทำงาน 5 นาที 20 วินาที และมีกำลังการผลิต 2.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สูงกว่าการทอดโดยเกษตรกรซึ่งมีกำลังการผลิต 1.44 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พบว่า สภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ให้ลักษณะสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงมากที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างของสีรวม (ΔE) เท่ากับ 0.84 ขณะที่สภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ให้ค่า Hardness เท่ากับ 105.97 ± 24.68 N ซึ่งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ของเกษตรกรที่มีค่า 106.06 ± 12.83 N และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการเกิดสีและการพัฒนาเนื้อสัมผัสของจิ้งหรีดทอดได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิและระยะเวลาการทอดแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งด้านประสิทธิภาพการผลิต คุณลักษณะด้านสี และเนื้อสัมผัส พบว่าเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ดั้งเดิมของเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 28 วัน

คำสำคัญ: จิ้งหรีดทอด; คุณลักษณะทางกายภาพ; เนื้อสัมผัส; ค่าสี; ระบบควบคุมการทอดอัตโนมัติ

Abstract

This research aims to design and develop an automatic temperature-controlled cricket fryer to reduce reliance on operator skill, increase production efficiency, and ensure consistent product quality. The prototype measures $28.5 \times 63.5 \times 7.3$ cm, weighs 15 kg, uses a 2,500 Watt heater, and is temperature-controlled using a K-Type Thermocouple sensor in conjunction with an Arduino Uno R3 and an ON-OFF control system. Tests were conducted at temperatures of 140, 160, 180, and 200 °C for 4, 6, and 8 minutes. Performance tests showed that the machine could reach the set temperature within 3–5 minutes, with a maximum temperature increase rate of 47.28 °C/minute and an overshoot range of 3.25–7.22 %. Performance comparisons revealed that the automatic fryer had a standard operating time of 5 minutes and 20 seconds and a production capacity of 2.25 kg/h, significantly higher than manual frying by farmers (1.44 kg/h). Product quality evaluation showed that frying at 200 °C for 4 minutes resulted in a color closest to a reference product. The overall color difference (ΔE) was 0.84. Frying at 160 °C for 4 minutes resulted in a hardness of 105.97 ± 24.68 N, which is similar to the farmer's product (106.06 ± 12.83 N) and not statistically different ($p > 0.05$). This indicates that color development and texture improvement in fried crickets are influenced by different frying temperatures and times. Considering production efficiency, color characteristics, and texture, the automatic temperature-controlled cricket fryer can efficiently produce a product of quality similar to the farmer's traditional product and has commercial potential, with a payback period of approximately 28 days.

Keywords: Cricket fried; Cricket physical properties; Texture analysis; Color values; Automatic frying control system

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีและระบบอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ รวมถึงอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่ได้มีการนำหุ่นยนต์และแขนกลมาใช้ในการกระบวนการผลิตอย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความปลอดภัย ตลอดจนลดต้นทุนแรงงานและความผิดพลาดที่เกิดจากการทำงานของมนุษย์ [1,2] หนึ่งในกระบวนการผลิตอาหารที่มักนำแขนกลมาใช้ คือ กระบวนการทอด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ทักษะเฉพาะและใช้ความร้อนสูงอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานและเพิ่มโอกาสการเกิดอุบัติเหตุหากใช้แรงงานคนเป็นผู้ดำเนินการ ดังนั้น แขนกลสำหรับทอดอาหารจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวและเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการผลิต

อย่างไรก็ตามในการที่จะออกแบบแขนกลทอดอาหารนั้นจะต้องคำนึงถึงกระบวนการทอดอาหารที่ถูกวิธีด้วย ถึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ซึ่งวิธีการทอดอาหารนั้นอาหารจะถูกปรุงโดยใช้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิประมาณ 160-200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [3] ถือเป็นวิธีที่ถูกที่สุดและเร็วที่สุดซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอดเป็นที่ยอมรับมากขึ้นตามมุมมองของผู้บริโภค โดยกระบวนการทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์เนื่องจากทำให้อาหารที่ผ่านกระบวนการมีรสชาติ สีสัน และความกรอบที่โดดเด่น ซึ่งในปัจจุบันเองการบริโภคอาหารทอดได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมและปลอดภัยต่อการบริโภค มากขึ้น [4]

ในปัจจุบันในประเทศไทยก็มีกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม หรือ SMEs ที่เกี่ยวกับการแปรรูปอาหารโดยการทอด เริ่มมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลาย ด้าน เช่นการสนับสนุนจากภาครัฐและความต้องการ ของผู้บริโภค มีความต้องการเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการ ขยายตัวของตลาดในประเทศ โดยปี 2026 GDP ของ ภาคการเกษตรสูงขึ้นจาก ร้อยละ 2.4 เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา [11] ทำให้เกิดช่องทางในการสร้างรายได้ให้กับ ผู้ประกอบการรายย่อย หรือ

แม้แต่การรวมกลุ่มกันของคน ในชุมชนที่สามารถก่อตั้งเป็นวิสาหกิจชุมชนเพื่อสร้าง ผลิตภัณฑ์ออกมาจำหน่าย

ยกตัวอย่างการขายจิ้งหรีดของกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด บ้านแสนตอ ต.บัวใหญ่ อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น จะทำการขายจิ้งหรีดสดและจิ้งหรีดแช่แข็ง โดยราคาจิ้งหรีดสดในปี 2568 อยู่ในช่วงประมาณ 110 – 140 บาทต่อกิโลกรัม โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบการจำหน่าย (ขายส่ง/ปลีก) และพื้นที่ [5] แต่เมื่อแปรรูปโดยการทอด ปิ้งรส และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งน้ำหนักของจิ้งหรีดจะหายไปประมาณ 70 % แต่สามารถจำหน่ายที่ราคาประมาณ 25 บาทต่อ 30 กรัม ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าได้ถึงประมาณ 250 บาทต่อกิโลกรัมหลังทอดเสร็จ แต่การที่จะควบคุมการทอดให้มีคุณภาพที่ดี และมีมาตรฐานเดียวกันในทุกกรอบการทอด จำเป็นต้องมีนวัตกรรมเครื่องทอด เพื่อเป็นตัวช่วยในการยกระดับการผลิต รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ทอดกับวัตถุดิบอื่นๆ ที่มีในชุมชนนั้นๆ สำหรับการทอดจิ้งหรีดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน เริ่มต้นด้วยการเตรียมจิ้งหรีดสดแช่เย็นปริมาณประมาณ 500 กรัมต่อการทอด 1 ครั้ง จากนั้นทำการเตรียมอุปกรณ์ทอดโดยใช้กระทะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว เติมน้ำมันสำหรับทอดปริมาณ 2 ลิตรลงในกระทะ และให้ความร้อนด้วยเตาแก๊สจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิถึงระดับที่เหมาะสมต่อการทอด โดยในขั้นตอนนี้มีการปรับระดับความร้อนให้คงที่เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้เหมาะสมต่อการทอดจิ้งหรีดโดยเกษตรกรส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการสังเกตพฤติกรรมของน้ำมันและสีของไฟเพื่อกำหนดเวลาในการนำจิ้งหรีดที่ผ่านการเตรียมการลงไปทอด อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่พบในปัจจุบันคือ

1. แรงงานภาคเกษตรส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุ ส่งผลให้สมรรถภาพทางร่างกายและความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

2. กระบวนการทอดจำเป็นต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานที่มีทักษะและประสบการณ์ในการสังเกตลักษณะของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการควบคุมขั้นตอนการทอด เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอ

3. เกษตรกรยังขาดเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ช่วยลดภาระในการปฏิบัติงาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายและประสิทธิภาพในการทำงานของเกษตรกรในระยะยาว

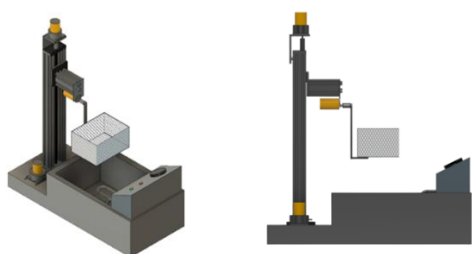
จากปัญหาที่กล่าวมา หากต้องการยกระดับกระบวนการแปรรูปจิ้งหรีดทอดให้ได้มาตรฐานและมีประสิทธิภาพสามารถมีกำลังการผลิตเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและช่วยเหลือเกษตรกร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดระบบอัตโนมัติ ที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีระดับมาตรฐานเดียวกันในทุกรอบการผลิต ช่วยลดต้นทุนในด้านค่าใช้จ่ายเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน รวมถึงสามารถเพิ่มกำลังการผลิต เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติจะมีวิธีการทดลอง ดังนี้

2.1) การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

ผู้วิจัยได้มีแนวคิดและขั้นตอนการสร้างเครื่องจักรเพื่อช่วยทุ่นแรงและลดระยะเวลาการทำงานของเกษตรกร โดยแบบร่างของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแสดงดังภาพที่ 1



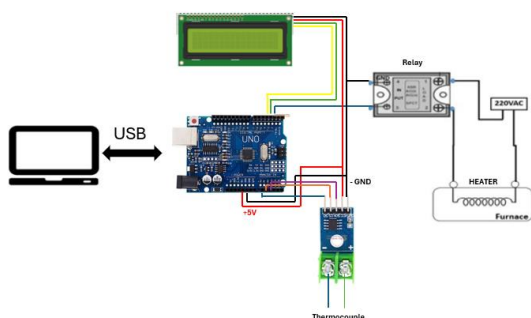
ภาพที่ 1 แบบร่างของเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ



ภาพที่ 2 เครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

โดยเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมีขนาดของตัวเครื่องอยู่ที่ 28.5 × 63.5 × 73 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) และมีน้ำหนักรวมประมาณ 15 กิโลกรัม โดยโครงสร้างหลักผลิตจากสแตนเลสเกรด 304 เพื่อให้มีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย แสดงดังภาพที่ 2 เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการแปรรูปจิ้งหรีดและอาหารชนิดอื่น อุปกรณ์ของเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติจะประกอบด้วย

1. ระบบขับเคลื่อนแขนกลจะประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 V จำนวน 3 ตัว โดยเป็นมอเตอร์ความเร็ว 100 rpm จำนวน 2 ตัว สำหรับการขับเคลื่อนแขนกลและระบบหมุนเทให้มอเตอร์ความเร็ว 5 rpm จำนวน 1 ตัว สำหรับควบคุมการหมุนในกระบวนการทอด ทำให้สามารถดำเนินกระบวนการทอดได้อย่างต่อเนื่องและลดการพึ่งพาการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน
2. ระบบให้ความร้อนใช้ฮีตเตอร์ชนิด Nikrothal 80 ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,500 W
3. ระบบตรวจวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K-Type ร่วมกับโมดูล MAX6675 สำหรับแปลงสัญญาณอุณหภูมิและส่งข้อมูลเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลักของระบบ โดยใช้หลักการควบคุมอุณหภูมิแบบ ON-OFF Control เพื่อควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ให้รักษาอุณหภูมิใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรควบคุมการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

2.2) การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิในการทอดที่ 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ร่วมกับระยะเวลาในการทอด 4, 6 และ 8 นาที เพื่อศึกษาผลหาอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการทดลองจะกำหนดปริมาณจิ้งหรีดที่ใช้ทอดเท่ากับ 200 กรัมต่อหนึ่งชุดการทดลอง ใช้น้ำมันปาล์มเป็นตัวกลางในการทอดในปริมาณ 2 ลิตรต่อการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้สภาวะการทอดมีความสม่ำเสมอและสามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างมีประสิทธิภาพผู้วิจัยจะเลือกเปลี่ยนน้ำมันทุกๆการเปลี่ยนอุณหภูมิทดสอบ

2.3) การทดสอบเวลาการทำงาน

การทดสอบเวลาการทำงานของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติและวิธีการทำงานด้วยแรงงานคน การทดลองได้จากการจับเวลาการทำงานด้วยนาฬิกาจับเวลาซึ่งคิดค่าเวลาเผื่อร้อยละ 20 เริ่มต้นด้วยการนำจิ้งหรีดที่ผ่านการเตรียมการ พร้อมสำหรับการทอด น้ำหนัก 200 กรัม จากนั้นเปรียบเทียบโดยการจับเวลาที่เกษตรกรทอดจิ้งหรีดตั้งแต่การเริ่มเปิดเตาไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทอด จากนั้นคำนวณเวลามาตรฐานการทำงาน ดังสมการที่ 1 และคำนวณความสามารถในการทอด ดังสมการที่ 2 [6,7]

$$STD = NT + (1 + A) \quad (1)$$

โดย **STD** คือ เวลามาตรฐานการทำงาน หรือ

Standard time (นาที)

NT คือ เวลาปกติในการทำงานหรือ

เวลาที่จับได้จากนาฬิกาจับ

เวลา (นาที)

A คือ เวลาเผื่อ (นาที)

$$\text{ความสามารถในการทอดจิ้งหรีด} = \frac{\text{ปริมาณจิ้งหรีดที่ทอดได้}}{\text{เวลามาตรฐาน}} \quad (2)$$

(กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

2.4) การตรวจสอบลักษณะของจิ้งหรีดที่ผ่านการทอดด้วยเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

ในการตรวจสอบลักษณะของจิ้งหรีดที่ผ่านการทอดด้วยเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติผู้วิจัยได้เลือกใช้การวัดสี ของจิ้งหรีดร่วมกับวิธีการวัดเนื้อสัมผัสของอาหาร (Texture Profile Analysis) เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะของจิ้งหรีดทอดที่สุกแล้ว

2.4.1) การวัดค่าสีระบบ CIE ($L^* a^* b^*$)

การวัดค่าสีระบบ CIE ($L^* a^* b^*$) ด้วยเครื่อง Color Reader รุ่น Konica Minolta (Model CR-10) (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น) รายงานค่าเป็น L^* ระบุความสว่าง (100: สีขาว, 0: สีดำ) a^* หมายถึงสีแดง (+) / สีเขียว (-) และ b^* หมายถึง สีเหลือง (+) / สีนํ้าเงิน (-) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วิธีการทดสอบการวัดสี เครื่อง Color Reader รุ่น Konica Minolta (Model CR-10)

โดยมีวิธีการทดสอบ

2.4.1.1) เริ่มจากการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบ เช่น ถาด ตารางสำหรับวัดค่าและเครื่องวัดสี

2.4.1.2) นำผลิตภัณฑ์ออกจากบรรจุภัณฑ์ที่ละกลุ่ม เทใส่ถาดและเกลี่ยให้ทั่วโดยไม่ให้เห็นชิ้นส่วนของถาด (ใช้ผลิตภัณฑ์ 300 กรัมต่อ 1 กลุ่ม)

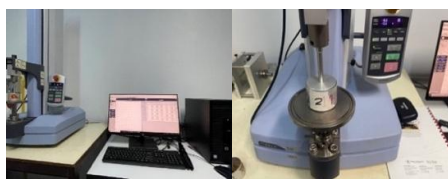
2.4.1.3) วางตารางเพื่อกำหนดจุดในการวัดแต่ละจุด

2.4.1.4) ใช้เครื่องวัดสีกดเพื่อบันทึกค่า L^* (ความสว่าง), a^* (เขียว-แดง), b^* (น้ำเงิน-เหลือง) ของแต่ละจุดจำนวนจุดละ 3 ครั้ง แล้วเฉลี่ยเป็นค่าของผลิตภัณฑ์ในช่องนั้นทำซ้ำจนครบทุกช่อง ทั้งหมด 12 ช่อง จำนวน 5 ซ้ำต่อ 1 กลุ่ม

2.4.1.5) ใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมดในการรายงานผล

2.4.2) การวัดเนื้อสัมผัส

การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture Analysis (รุ่น Shimadzu Scientific Instruments EZ-SX texture analyzer) (สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น) ตัวเครื่องถูกออกแบบมาเพื่อเสริมการทดสอบทางประสาทสัมผัสในการพัฒนาอาหารและการควบคุมคุณภาพ ให้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่เป็นรูปธรรมเกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของอาหาร เครื่องนี้มีเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่หลากหลาย ได้แก่ แรงอัด ความแข็ง แรงเฉือน แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่อง Texture Analysis รุ่น Shimadzu Scientific Instruments EZ-SX texture analyzer

โดยมีวิธีการทดสอบ

2.4.2.1) เลือกวิธีการทดสอบแบบ Compression Test (การกดอัด) วัดแรงอัดสูงสุด (N)

2.4.2.2) เลือกใช้หัวกดขนาด 49 mm และกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 40 mm

2.4.2.3) กำหนดความเร็วในการกด 100 mm/min

2.4.2.4) เตรียมผลิตภัณฑ์ จำนวน 300 กรัม ต่อ 1 กลุ่ม และนำผลิตภัณฑ์ใส่กระบอกทรงกรวย และชั่งน้ำหนัก 10 g (10g ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 20-100 ตัว ต่อกลุ่มของผลิตภัณฑ์) ต่อ 1 การทดลอง

2.4.2.5) เริ่มการทดสอบด้วยการกดอัด 2 จังหวะ โดยเมื่อถึง 50% แล้วคืนกลับแล้วกดซ้ำเพื่อหาพารามิเตอร์ให้ครบกระบวนการ

2.4.2.6) ทำซ้ำ 25 ซ้ำต่อ 1 กลุ่มตัวอย่าง(ออกแบบการทดลองตามปริมาณของตัวอย่าง)

2.4.2.7) ใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมดในการรายงานผล

2.4.3) การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิจัยครั้งนี้ใช้กรอบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

2.5) การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ระยะเวลาดำเนินงานจะเป็นผลที่นำมาใช้ในการพิจารณาถึงระยะเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน หรือผลกำไรที่ได้รับแต่ละปีต่อต้นทุนทั้งหมด มีความเหมาะสมที่ต้องการจะลงทุนหรือไม่ โดยเป็นกำไรสุทธิหลังหักภาษี ดอกเบี้ย และค่าเสื่อมราคาของทรัพย์สิน เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระยะเวลาดำเนินงาน ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ผลประโยชน์ที่ได้รับมีความคุ้มค่าต่อ

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน หากการดำเนินงานแล้วทำให้เกิดผลประโยชน์ที่คุ้มค่างบประมาณที่ลงทุนมีระยะเวลาดำเนินการที่รวดเร็วก็จะเป็นผลดี ทำให้เกิดความเสียหายน้อยและผูกลงทุนได้รับเงินลงทุนคืนที่จะสามารถนำเงินไปลงทุนในกิจการอื่น ๆ ได้ต่อไป

โดยระยะเวลาดำเนินการเป็นส่วนการคำนวณของจำนวนเงินของการลงทุนเริ่มต้นต่อผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปี สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 [10,12]

$$\text{ระยะเวลาดำเนินการ} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มต้น}}{\text{กำไรสุทธิต่อปี}} \quad (3)$$

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองและวิจัยจะได้ผลการวิจัยและการอภิปรายผลดังนี้

3.1) การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

จากการพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ พบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดผ่านโปรแกรม Arduino โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิจากเซนเซอร์ K-Type Thermocouple ที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MAX6675 เพื่อควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์แบบ ON-OFF Control ให้อุณหภูมิภายในหม้อทอดให้อยู่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดตลอดกระบวนการทอด โดยการใช้ฮีตเตอร์กำลัง 2,500 W ร่วมกับระบบตรวจวัดอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ ช่วยให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิภายในหม้อทอดมีความสม่ำเสมอมากกว่าการทอดแบบดั้งเดิมที่อาศัยการปรับระดับความร้อนด้วยผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้มอเตอร์กระแสตรงร่วมกับระบบแขนกลและชุดหมุนเหวี่ยง ช่วยลดขั้นตอนการทำงานของแรงงาน ลดความผิดพลาดจากการควบคุมด้วยมนุษย์ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

3.2) การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ ดำเนินการโดยกำหนดอุณหภูมิ

เป้าหมาย (Set Point) ที่ 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส เพื่อประเมินความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิและรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการทอด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน

ผลการทดลองพบว่า ระบบ				
อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	เวลาถึง Set Point (min)	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (°C/min)	ช่วงอุณหภูมิที่ทอด
140	36.75	3.00	34.42	140.5 – 149.75
160	35.00	3.00	41.67	160.0 – 168.5
180	35.00	3.07	47.28	180.0 – 193.0
200	38.00	5.00	32.42	200.0 – 206.5



สามารถเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายได้ภายในเวลา 3.00–5.00 นาที โดยที่อุณหภูมิเป้าหมาย 180 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 47.28 องศาเซลเซียสต่อนาที ขณะที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่ำที่สุด เท่ากับ 32.42 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิเป้าหมายนานที่สุด คือ 5 นาที และเมื่อพิจารณาความสามารถในการรักษาอุณหภูมิระหว่างการทอดพบว่า ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่กำหนดได้ทุกระดับการทำงาน โดยช่วงอุณหภูมิระหว่างการทอดอยู่ในช่วง 140.5–149.75, 160.0–168.5, 180.0–193.0 และ 200.0–206.5 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิเป้าหมาย 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับนอกจากนี้พบว่า ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 180 องศาเซลเซียส ระบบมีการแกว่งตัวของอุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิอื่น โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 193 องศาเซลเซียส

หรือสูงกว่าค่าอุณหภูมิเป้าหมายประมาณ 13 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเกิดจากความเฉื่อยทางความร้อนของฮีตเตอร์และการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ระบบยังสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการทอดได้จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติมีศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็วและสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่กำหนดได้ตลอดกระบวนการทอด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความสม่ำเสมอของกระบวนการผลิต

3.3) การทดสอบเวลาการทำงาน

ในการทดสอบเวลาทำงานของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด บ้านแสนตอ ตำบล บัวใหญ่ อำเภอ น้ำพอง จังหวัด ขอนแก่น แสดงดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 ลงพื้นที่เก็บข้อมูลกับกลุ่มเกษตรกร

โดยในการทดลองจะเริ่มจากให้กลุ่มเกษตรกรทดสอบทอดจิ้งหรีดที่ทำขายเป็นประจำ และผู้วิจัยจะทำการจับเวลาการทำงานด้วยนาฬิกาจับเวลา ซึ่งคิดค่าเวลาเพื่อร้อยละ 20 เริ่มต้นด้วยการนำจิ้งหรีดที่ผ่านการเตรียมการ พร้อมสำหรับการทอด น้ำหนัก 200 กรัม จากนั้นเปรียบเทียบโดยการจับเวลาที่เกษตรกรทอดจิ้งหรีดตั้งแต่การเริ่มเปิดเตาไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทอด จากนั้นคำนวณเวลามาตรฐานการทำงาน ดังสมการที่ 1 และคำนวณความสามารถในการทอด ดังสมการที่ 2 ผลที่ได้มีดังนี้เวลามาตรฐานการทำงานของแรงงานเกษตรกรอยู่ที่ 8 นาที 20 วินาที และ ความสามารถในการทอดจิ้งหรีดปริมาณ 200 กรัม ของเกษตรกรเท่ากับ 1.44 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ มีเวลา

มาตรฐานการทำงานอยู่ที่ 5 นาที 20 วินาทีสำหรับการทอดที่อุณหภูมิ 200 องศา และ ความสามารถในการทอดจิ้งหรีดปริมาณ 200 กรัม ของเครื่องทอดเท่ากับ 2.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งมากกว่าเดิม 0.8 กิโลกรัมในปริมาณจิ้งหรีดที่เท่ากัน 8 ถ การใช้เครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติยังสามารถลดการทำงานของเกษตรกรในการมาคอยสังเกตและปรับควบคุมไฟระหว่างการทอดอีกทั้งยังสามารถทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้อีกด้วย

3.4) การตรวจสอบลักษณะของจิ้งหรีดที่ผ่านการทอดด้วยเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติในการตรวจสอบลักษณะของจิ้งหรีดผู้วิจัยเลือกใช้การทดสอบแบบเก็บข้อมูลเฉพาะข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

3.4.1) การวัดค่าสีระบบ CIE ($L^* a^* b^*$)

ในขั้นตอนของการวัดค่าสีผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลอ้างอิงมาจากการวิจัยก่อนหน้า[9] ที่ได้มีการทำข้อมูลพื้นฐานสำหรับจิ้งหรีดทอดของแต่ละกลุ่มโดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่ม A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่มีขายทั่วไป กลุ่ม B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ และ กลุ่ม C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่ได้รับมาตรฐาน อย. (9) แสดงดังภาพที่ 7



กลุ่ม A

กลุ่ม B

กลุ่ม C

ภาพที่ 7 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์แต่ละกลุ่ม

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่มีขายทั่วไป B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด ที่ได้รับมาตรฐาน อย.

โดยกลุ่ม A จะเป็นกลุ่มที่เป็นจิ้งหรีดทอดที่มีขายทั่วไปเหมือนของเกษตรกรกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด บ้านแสนตอ ต.บัวใหญ่ อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น ที่มีค่าสีของผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2 และตาราง 3 เปรียบเทียบค่า ΔE

จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่า ค่าสีของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดที่ผลิตด้วยเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติมีความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดของเกษตรกรและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะการทอดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ซึ่งให้

ตารางที่ 2

ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดของเกษตรกรเทียบกับผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดที่ได้จากเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดจากเกษตรกรกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีดและค่าในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD, n=3) อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ ns หมายถึงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3

ตารางเปรียบเทียบค่า ΔE ของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดของเกษตรกรเทียบกับผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดที่ได้จากเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

Comparison	ΔE
A	0
A เทียบ 140C/4min	3.24
A เทียบ 140C/6min	3.38
A เทียบ 140C/8min	4.31
A เทียบ 160C/4min	5.1
A เทียบ 160C/6min	3.61
A เทียบ 160C/8min	5.93
A เทียบ 180C/4min	1.35
A เทียบ 180C/6min	2.18
A เทียบ 180C/8min	3.05
A เทียบ 200C/4min	0.84
A เทียบ 200C/6min	2.4
A เทียบ 200C/8min	12.22

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดจากเกษตรกรกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด

ค่าพารามิเตอร์สี L^* a^* และ b^* ใกล้เคียงกับกลุ่ม

Group	L^*	a^*	b^*
A	30.70 $\pm$ 0.81 ^a	4.00 $\pm$ 1.14 ^a	14.40 $\pm$ 0.82 ^{ns}
140C/4min	32.63 $\pm$ 6.05 ^a	5.37 $\pm$ 1.56 ^b	12.17 $\pm$ 3.42 ^{ns}
140C/6min	30.60 $\pm$ 5.10 ^a	7.37 $\pm$ 0.75 ^a	14.13 $\pm$ 1.91 ^{ns}
140C/8min	28.63 $\pm$ 1.95 ^a	7.17 $\pm$ 1.00 ^a	11.87 $\pm$ 1.72 ^{ns}
160C/4min	34.07 $\pm$ 1.36 ^a	7.73 $\pm$ 0.57 ^a	15.30 $\pm$ 0.53 ^{ns}
160C/6min	32.80 $\pm$ 3.32 ^a	6.83 $\pm$ 1.10 ^{ab}	14.87 $\pm$ 2.82 ^{ns}
160C/8min	32.87 $\pm$ 5.63 ^a	7.83 $\pm$ 2.08 ^a	18.60 $\pm$ 8.49 ^{ns}
180C/4min	30.90 $\pm$ 2.90 ^a	3.03 $\pm$ 1.20 ^c	15.13 $\pm$ 2.62 ^{ns}
180C/6min	29.03 $\pm$ 1.83 ^a	2.40 $\pm$ 0.56 ^c	13.33 $\pm$ 0.21 ^{ns}
180C/8min	28.27 $\pm$ 2.28 ^a	5.57 $\pm$ 1.92 ^b	12.70 $\pm$ 2.16 ^{ns}
200C/4min	30.50 $\pm$ 3.66 ^a	3.20 $\pm$ 1.22 ^c	14.57 $\pm$ 2.08 ^{ns}
200C/6min	28.53 $\pm$ 1.13 ^a	2.97 $\pm$ 1.70 ^c	14.37 $\pm$ 0.51 ^{ns}
200C/8min	21.03 $\pm$ 0.81 ^b	-3.27 $\pm$ 0.42 ^d	7.80 $\pm$ 0.20 ^{ns}

อ้างอิงมากที่สุดและเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสีรวม ΔE ระหว่างผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดกลุ่ม A และผลิตภัณฑ์ที่ทอดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที พบว่ามีค่า ΔE เท่ากับ 0.84 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสภาวะการทอดที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มอ้างอิงมากที่สุด ทั้งนี้ ค่า ΔE ที่มีค่าต่ำกว่า 2 จัดอยู่ในช่วงที่ความแตกต่างของสีสามารถสังเกตเห็นได้ยากด้วยสายตามนุษย์ทั่วไป และถือว่ามี ความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยสอดคล้องกับรายงานของ [7] ที่ระบุว่าค่า ΔE ประมาณ 2 ขึ้นไปเป็นระดับที่ผู้สังเกตเริ่มสามารถรับรู้ความแตกต่างของสีได้

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดของเกษตรกรและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะที่สภาวะการทอด 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในด้านคุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์

3.4.2) การวัดเนื้อสัมผัส

การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสและความกรอบของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสด้วย วิธีการ Texture Profile Analysis (TPA) โดยทำการ เปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดของเกษตรกรและ ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดที่ได้จากเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุม อุณหภูมิอัตโนมัติ แสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 8

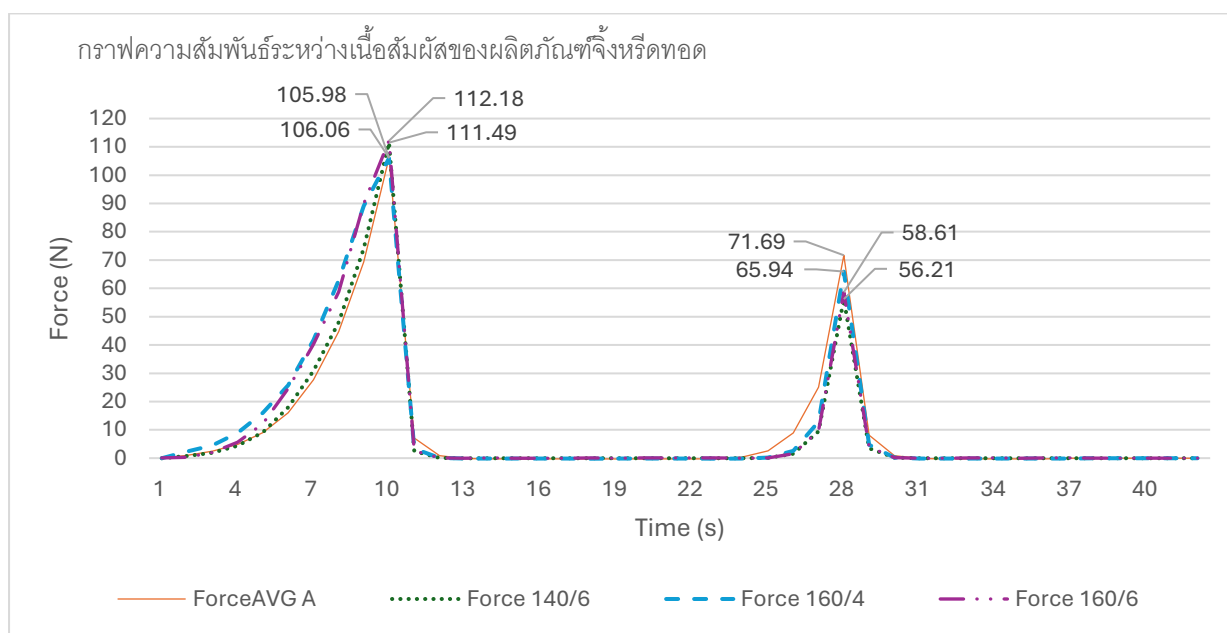
ตารางที่ 4

เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดของเกษตรกรเทียบกับเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดของเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

Group	Hardness (N) (Mean ± SD)	Adhesiveness (Mean ± SD)	Springiness (Mean ± SD)	Cohesiveness (Mean ± SD)	Gumminess (N) (Mean ± SD)	Chewiness (Mean ± SD)
A	106.06 ± 12.83 ^a	0.007 ± 0.019 ^{ns}	0.093 ± 0.011 ^{ns}	0.289 ± 0.010 ^{ns}	30.46 ± 3.10 ^{ns}	2.94 ± 0.60 ^{ns}
140°C/ 4 min	40.02 ± 7.60 ^d	0.031 ± 0.060 ^{ns}	0.037 ± 0.032 ^{ns}	0.284 ± 0.238 ^{ns}	11.81 ± 10.50 ^{ns}	0.98 ± 0.84 ^{ns}
140°C/ 6 min	111.49 ± 15.09 ^a	0.028 ± 0.052 ^{ns}	0.047 ± 0.011 ^{ns}	0.128 ± 0.004 ^{ns}	14.25 ± 1.54 ^{ns}	0.68 ± 0.24 ^{ns}
140°C/ 8 min	85.60 ± 18.68 ^{abc}	0.070 ± 0.019 ^{ns}	0.033 ± 0.009 ^{ns}	0.123 ± 0.007 ^{ns}	10.44 ± 1.67 ^{ns}	0.35 ± 0.15 ^{ns}
160°C/ 4 min	105.97 ± 24.68 ^a	-0.005 ± 0.003 ^{ns}	0.062 ± 0.013 ^{ns}	0.144 ± 0.011 ^{ns}	16.40 ± 2.48 ^{ns}	6.05 ± 5.04 ^{ns}
160°C/ 6 min	112.17 ± 31.55 ^a	0.022 ± 0.050 ^{ns}	0.049 ± 0.016 ^{ns}	0.131 ± 0.017 ^{ns}	14.13 ± 2.28 ^{ns}	0.72 ± 0.36 ^{ns}
160°C/ 8 min	48.56 ± 15.44 ^d	0.064 ± 0.024 ^{ns}	0.037 ± 0.014 ^{ns}	0.313 ± 0.021 ^{ns}	15.00 ± 4.03 ^{ns}	0.59 ± 0.33 ^{ns}
180°C/ 4 min	91.42 ± 17.97 ^{abc}	0.048 ± 0.097 ^{ns}	0.056 ± 0.010 ^{ns}	0.173 ± 0.006 ^{ns}	15.81 ± 2.84 ^{ns}	3.44 ± 2.48 ^{ns}
180°C/ 6 min	75.22 ± 15.07 ^{bc}	0.081 ± 0.015 ^{ns}	0.164 ± 0.220 ^{ns}	0.637 ± 0.829 ^{ns}	50.57 ± 67.66 ^{ns}	18.29 ± 30.94 ^{ns}

180°C/ 8 min	79.12 ± 4.06 ^{bc}	0.073 ± 0.008 ^{ns}	0.030 ± 0.004 ^{ns}	0.130 ± 0.009 ^{ns}	10.26 ± 0.40 ^{ns}	0.31 ± 0.04 ^{ns}
200°C/ 4 min	99.58 ± 13.92 ^{ab}	0.064 ± 0.061 ^{ns}	0.043 ± 0.004 ^{ns}	0.119 ± 0.012 ^{ns}	11.77 ± 0.93 ^{ns}	3.04 ± 2.41 ^{ns}
200°C/ 6 min	65.71 ± 17.14 ^{bcd}	0.029 ± 0.031 ^{ns}	0.022 ± 0.006 ^{ns}	0.095 ± 0.009 ^{ns}	6.15 ± 1.05 ^{ns}	0.14 ± 0.06 ^{ns}
200°C/ 8 min	59.32 ± 9.47 ^{cd}	0.049 ± 0.007 ^{ns}	0.020 ± 0.003 ^{ns}	0.098 ± 0.004 ^{ns}	5.80 ± 0.71 ^{ns}	0.12 ± 0.03 ^{ns}

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดจากเกษตรกรกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด และค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=5) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ ns หมายถึงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดของเกษตรกรเทียบกับเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดของเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอดจากเกษตรกรกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด และ 140/6 หมายถึงสภาวะการทอดที่ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 6 นาที, 160/4 หมายถึงสภาวะการทอดที่ใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 นาที, 160/6 หมายถึงสภาวะการทอดที่ใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 6 นาที

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) พบว่า ค่า Hardness เป็นพารามิเตอร์เดียวที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$) ระหว่างสภาวะการทอดต่าง ๆ ขณะที่ค่า Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดย

ผลิตภัณฑ์จึงหรีดทอดจากเกษตรกร (กลุ่ม A) มีค่า Hardness เท่ากับ 106.06 ± 12.83 N ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ ผลิตภัณฑ์ที่ทอดด้วยเครื่องที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 6 นาที, 160°C เป็นเวลา 4 นาที และ 160°C เป็นเวลา 6 นาที แสดงดังภาพที่ 10

โดยพบว่าสภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 4 นาที ให้ค่าคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสโดยรวมใกล้เคียงกับ ผลิตภัณฑ์จากเกษตรกรมากที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการผลิตจึงหรีดทอดด้วยเครื่องทอดแบบควบคุม อุณหภูมิอัตโนมัติ เนื่องจากสามารถให้ลักษณะความแข็งและ คุณภาพเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยวิธีการ ดั้งเดิมได้ โดยยังคงรักษาความสม่ำเสมอของกระบวนการ ผลิตและลดการพึ่งพาทักษะของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5) การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ในการวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณต้นทุนการทอดจึงหรีด โดยการทอด 1 รอบจะใช้เวลาในการเตรียมอุปกรณ์ เตรียม วัตถุดิบ รอให้อุณหภูมิของหม้อทอดถึงค่าที่กำหนด รวมถึง ระยะเวลาในการทอด เฉลี่ยประมาณ 6 นาทีต่อรอบ โดยใน การทอด 1 รอบจะใช้วัตถุดิบจึงหรีดสดจำนวน 200 กรัม เมื่อนำมาทอดแล้วน้ำหนักจะลดลงประมาณ 140 กรัม หรือคิด เป็นร้อยละ 70 ส่งผลให้เหลือน้ำหนักจึงหรีดหลังการทอด ประมาณ 60 กรัม ซึ่งสามารถบรรจุได้จำนวน 3 ถ้วย ถ้วยละ 20 กรัม

ดังนั้น ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะสามารถทอดจึงหรีดได้ ประมาณ 10 รอบ คิดเป็นจึงหรีดทอดจำนวน 30 ถ้วยต่อ ชั่วโมง และหากกำหนดระยะเวลาการทำงานวันละ 8 ชั่วโมง จะสามารถผลิตจึงหรีดทอดได้ประมาณ 240 ถ้วยต่อวัน

ต้นทุนวัตถุดิบจึงหรีดทอด

ในการศึกษานี้กำหนดให้จึงหรีดสดมีราคา 140 บาทต่อ กิโลกรัม โดยการทอด 1 รอบ ใช้วัตถุดิบ 200 กรัม ดังนั้น ต้นทุนวัตถุดิบต่อรอบจะเท่ากับ

$$140\text{บาท} \times 0.2\text{กิโลกรัม} = 28\text{บาท}$$

หรือต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 28 บาทต่อรอบ เมื่อ 1 รอบสามารถ แบ่งขายได้ 3 ถ้วย ต้นทุนวัตถุดิบต่อถ้วยจะเท่ากับ

$$\frac{28\text{บาท}}{3\text{ถ้วย}} = 9.3\text{บาท}$$

ดังนั้น ต้นทุนจึงหรีดทอดต่อ 1 ถ้วยจะตกอยู่ที่ประมาณ 9 บาทต่อถ้วย สำหรับต้นทุนวัตถุดิบต่อวัน จะได้เท่ากับ

$$240\text{ถ้วย} \times 9\text{บาท} = 2,160\text{บาท}$$

ดังนั้น ต้นทุนวัตถุดิบจึงหรีดทอดต่อวันเท่ากับ 2,160 บาท

การคำนวณค่าไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่า เครื่องทอดใช้พลังงานไฟฟ้า ประมาณ 0.5 kWh ต่อรอบ และกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 4.2218 บาทต่อหน่วย ดังนั้น ค่าไฟฟ้าต่อรอบจะ เท่ากับ

$$0.5\text{ kWh} \times 4.2218\text{บาท/หน่วย} = 2.1109\text{บาท}$$

หรือประมาณ 2.11 บาทต่อรอบ เมื่อ 1 รอบแบ่งได้ 3 ถ้วย ค่า ไฟฟ้าต่อถ้วยจะเท่ากับ

$$\frac{2.1109\text{บาท}}{3\text{ถ้วย}} = 0.704\text{บาทต่อถ้วย}$$

หรือประมาณ 0.70 บาทต่อถ้วย สำหรับการใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง จะทอดได้ 240 ถ้วยต่อวัน ใช้ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าทั้งหมด

$$240\text{ถ้วย} \times 0.7\text{บาท} = 168\text{บาทต่อวัน}$$

เท่ากับ 168 บาทต่อวัน

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

จากต้นทุนในการสร้างเครื่องทอดจึงหรีดแบบควบคุม อุณหภูมิอัตโนมัติ ราคาเครื่อง 20,000 บาท มีอายุการใช้งาน 5 ปี กำหนดมูลค่าซาก 2,000 บาท (คิดเป็น 10% ของราคา

เครื่อง) ค่าแรงงาน 357 บาท/วัน จำนวน 1 คน ระยะเวลาในการทำงานของแรงงาน 242 วัน/ปี กำหนดค่าซ่อมบำรุงเครื่องทอดจิ้งหรีดอัตโนมัติ 2,000 บาท/ปี กำหนดจำนวนขายได้จริงประมาณ 72 ถ้วย/วัน (คิดเป็น 30% ของกำลังการผลิต) มีราคาขาย 30 บาท/ถ้วย จะสามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติจากสมการที่ 3 ได้ดังนี้

รายได้ต่อปี

$$72 \text{ ถ้วย} \times 30 \text{ บาท} \times 242 \text{ วัน} = 522,720 \text{ บาท}$$

ต้นทุนวัตถุดิบต่อปี

$$72 \text{ ถ้วย} \times 9 \text{ บาท} \times 242 \text{ วัน} = 156,816 \text{ บาท}$$

ค่าไฟฟ้าต่อปี

$$72 \text{ ถ้วย} \times 0.70 \text{ บาท} \times 242 \text{ วัน} = 12,196.8 \text{ บาท}$$

ค่าแรงงานต่อปี

$$357 \text{ บาท} \times 242 \text{ วัน} = 86,394 \text{ บาท}$$

ค่าซ่อมบำรุงต่อปี

$$2,000 \text{ บาท}$$

คิดค่าเสื่อมราคาแบบมีมูลค่าซาก

$$\text{ค่าเสื่อมราคา} = \frac{20,000 \text{ บาท} - 2,000 \text{ บาท}}{5 \text{ ปี}}$$

ค่าเสื่อมราคาเท่ากับ 3,600 บาทต่อปี

ต้นทุนรวมต่อปี

$$156,816 \text{ บาท} + 12,196.8 \text{ บาท} + 86,394 \text{ บาท} + 2,000 \text{ บาท} + 3,600 \text{ บาท} = 261,006.8 \text{ บาท}$$

กำไรสุทธิต่อปี

$$522,720 \text{ บาท} - 261,006 \text{ บาท} = 261,713.2 \text{ บาท}$$

ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{20,000 \text{ บาท}}{261,713.2 \text{ บาท}} = 0.0764 \text{ ปี}$$

หรือ

$$0.0764 \text{ ปี} \times 12 \text{ เดือน} = 0.92 \text{ เดือน}$$

จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ พบว่าเครื่องมีต้นทุนการสร้งรวม 20,000 บาท มีอายุการใช้งาน 5 ปี และมีมูลค่าซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน 2,000 บาท โดยกำหนดให้สามารถจำหน่ายผลิตภัณฑ์ได้จริงคิดเป็นร้อยละ 30 ของกำลังการผลิตสูงสุด หรือประมาณ 72 ถ้วยต่อวัน ที่ราคาจำหน่าย 30 บาทต่อถ้วย และมีวันทำงานเฉลี่ย 242 วันต่อปี ส่งผลให้มีรายได้รวม 522,720 บาทต่อปี เมื่อพิจารณาต้นทุนการดำเนินงาน ประกอบด้วยต้นทุนวัตถุดิบ 156,816 บาทต่อปี ค่าไฟฟ้า 12,196.80 บาทต่อปี ค่าแรงงาน 86,394 บาทต่อปี ค่าซ่อมบำรุง 2,000 บาทต่อปี และค่าเสื่อมราคา 3,600 บาทต่อปี ทำให้มีต้นทุนรวม 261,006.80 บาทต่อปี และมีกำไรสุทธิ 261,713.20 บาทต่อปี

ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติเท่ากับ 0.076 ปี หรือประมาณ 0.92 เดือน (28 วัน) แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบมีความคุ้มค่าในการลงทุนและสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาอันสั้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยใช้ระบบตรวจวัดอุณหภูมิร่วมกับการควบคุมแบบ ON-OFF Control ทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิการทอดให้อยู่ใกล้เคียงค่าที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิถึงค่าเป้าหมายได้ภายใน 3-5 นาที และมีค่า Overshoot อยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับกระบวนการทอดอาหาร ผลการเปรียบเทียบ

กับการทอดโดยเกษตรกรพบว่า เครื่องทอดอัตโนมัติช่วยลดเวลาการปฏิบัติงานจาก 8 นาที 20 วินาที เหลือ 5 นาที 20 วินาที และเพิ่มกำลังการผลิตจาก 1.44 เป็น 2.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตประมาณร้อยละ 56.25 พร้อมทั้งลดภาระการเฝ้าระวังและควบคุมไฟระหว่างการทอด ด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ พบว่าสภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ให้คุณลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ของเกษตรกรมากที่สุด โดยมีค่า ΔE เท่ากับ 0.84 ขณะที่สภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ให้คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงมากที่สุด โดยมีค่า Hardness เท่ากับ 105.97 ± 24.68 นิวตัน ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ของเกษตรกรที่มีค่า 106.06 ± 12.83 นิวตัน และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

เมื่อพิจารณาาร่วมกันทั้งด้านสีและเนื้อสัมผัส พบว่าสภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 160–200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที เป็นช่วงสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตจิ้งหรีดทอดด้วยเครื่องทอดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยหากให้ความสำคัญกับลักษณะด้านสีของผลิตภัณฑ์ควรเลือกสภาวะ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที แต่หากให้ความสำคัญกับคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ของเกษตรกร ควรเลือกสภาวะ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที และเมื่อพิจารณาาร่วมกันทั้งด้านประสิทธิภาพการผลิต คุณลักษณะสี และเนื้อสัมผัส พบว่าเครื่องทอดจิ้งหรีดแบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติสามารถผลิตจิ้งหรีดทอดที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับการผลิตแบบดั้งเดิมของเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ลดการพึ่งพาทักษะของผู้ปฏิบัติงาน และสามารถคืนทุนได้ภายในประมาณ 28 วัน จึงมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการด้านการแปรรูปแมลงเศรษฐกิจในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัย

เครื่องจักรกล เกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ดุษฎีนิพนธ์หรือการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น กลุ่มเกษตรกรจากกลุ่มวิสาหกิจพอเพียงเลี้ยงจิ้งหรีด บ้านแสนตอ ต.บัวใหญ่ อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น และทุนวิจัยเพื่อพัฒนาด้านแบบงานนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

1. Bogue R. The role of robots in the food industry: A review. *Industrial Robot*. 2009;36(6):531–6. doi:10.1108/01439910910994588
2. Chaimanee A, Khuadthong R. The Analysis to Determine Appropriate Number of Labors by Industrial Engineering Tools in Laminate Glass Production Process. *Sripatum Review of Science and Technology*. 2020 Jan.
3. Frakolaki G, Kekes T, Bizymis AP, Giannou V, Tzia C. Fundamentals of food frying processes. *High-Temperature Processing of Food Products: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. 2023 Jan 1;227–91. doi:10.1016/B978-0-12-818618-3.00001-X
4. Ghodsian N, Benfriha K, Olabi A, Gopinath V, Arnou A. Mobile Manipulators in Industry 4.0: A Review of Developments for Industrial

- Applications. Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. doi:10.3390/s23198026 PubMed PMID: 37836855.
5. Iqbal J, Khan ZH, Khalid A. Prospects of robotics in food industry. Food Science and Technology (Brazil). 2017;37(2):159–65. doi:10.1590/1678-457X.14616
 6. Rani L, Kumar M, Kaushik D, Kaur J, Kumar A, Oz F, et al. A review on the frying process: Methods, models and their mechanism and application in the food industry. Food Research International. 2023 Oct 1;172:113176. doi:10.1016/J.FOODRES.2023.113176 PubMed PMID: 37689929.
 7. Sineenath Sukkwai, Pichayaphat Chonpracha, Kongkarn Kijroongrojana, Witoon Prinyawiwatkul, Influences of a natural colourant on colour and salty taste perception, liking, emotion and purchase intent: a case of mayonnaise-based dipping sauces, *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 52, Issue 10, October 2017, Pages 2256–2264, <https://doi.org/10.1111/ijfs.13506>
 8. Thawanrat Sumrit NDI. DESIGN AND CONSTRUCT OF THE SAJOR-CAJU MUSHROOM SHREDDING MACHINE PROTOTYPE . Life Sciences and Environment Journal. 2022 Mar 9;(Vol. 23 No. 1 (2022): January-June):170–83. doi:https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14456/lsej.2022.13
 9. วุฒิพงศ์ ทองแก้ว, ชัยยันต์ จันทร์ศิริ, จารุพล สุริยว นากุล, วิรุณ โมณะตระกูล, นครินทร์ แสนคำ. The Analysis of Physical Properties and Textural of Fried Cricket Products for the Developing Automatic Frying Quality Control Systems. featkku. 2025 Dec 26. doi: availableat:<https://ph02.tcithaijo.org/index.php/featkku/article/view/262277>
 10. สุริยล อุดชาชน, มาลินี แก้วปัญหา. การวิเคราะห์ ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเสี่ยงในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร . Naresuan University [Internet]. 2022 [cited 2026 May 19]. Available from: <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/5201>
 11. กองนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ธันวาคม2568 https://oae.go.th/assets/oae/DKW_FGWEFGEOwldsfwEF2569final_compressed.pdf
 12. นะเที่ยง, ไพโรจน์. (2557). การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะคืนทุนของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับน่าน้ำตม. *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 10(1),15,22.https://ph01.tcithaijo.org/index.php/jit_journal/article/view/32814

ข้อแนะนำในการส่งต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (FEAT Journal) มีกำหนดออกเป็นราย 6 เดือน คือ มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม - ธันวาคม ของทุกปี จัดพิมพ์โดยกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อเป็นการส่งเสริมและเผยแพร่ความรู้ ผลงานทางวิชาการ งานวิจัยทางด้าน วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีพร้อมทั้งยังจัดส่ง เผยแพร่ตามสถาบันการศึกษาต่างๆ ในประเทศด้วย บทความที่ดีพิมพ์ลงในวารสาร FEAT บทความนั้นจะต้องผ่านความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2535

ต้นฉบับบทความ

โปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Window ชนิดตัวอักษรในบทความฉบับภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จะต้องใช้ตัวอักษร Cordia New ทั้งหมด ความยาวของต้นฉบับ ไม่เกิน 12 หน้า รวมรูปภาพและตารางต่างๆ หรือมีจำนวนคำไม่เกิน 10,000 คำ

กรุณาใช้กระดาษขนาด A4 ปรับเค้าโครงขนาดกระดาษ ความกว้าง 7.5 นิ้ว ความสูง 10.5 นิ้ว และรูปแบบหน้าเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่าง 0.19 นิ้ว กรอบของบทความกำหนดดังนี้ ขอบด้านบน 0.88 นิ้ว ขอบด้านล่าง 0.75 นิ้ว ด้านซ้าย 1 นิ้ว และด้านขวา 0.75 นิ้ว

โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

1. บทนำ
2. วิธีการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ข้อบทรความภาษาไทย Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)
ข้อบทรความภาษาอังกฤษ Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ควรปฏิบัติตามคำแนะนำอย่างเคร่งครัด บทคัดย่อควรมีเพียงย่อหน้าเดียวที่อธิบายถึง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และสรุป ไม่ควรเกิน 300 คำ คำหลักที่เป็นภาษาอังกฤษให้ตัวอักษรคำแรกเป็นตัว พยัญชนะใหญ่ คำในลำดับถัดไปเป็นตัวพิมพ์เล็ก

คำสำคัญ: จำนวน 4 ถึง 6 คำ ภาษาไทยแต่ละคำเว้นวรรค 1 จุด ไม่ต้องมีจุลภาค (.)

Abstract

This is an instruction for manuscript preparation for Publication KCU Engineering Journal. Please follow this guideline strictly. The abstract should contain a single paragraph describing objectives, methodology and a summary of important results and its length should not exceed 300 words.

Keywords: 4-6 keywords, separated by colons. and the first letter of each keyword must be capital letter

*ติดต่อ: E-mail, เบอร์โทรศัพท์, เบอร์โทรสาร

1. บทนำ

บทความนี้แสดงตัวอย่างแนวทางการเตรียมต้นฉบับของคุณเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น และโปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Window ความยาวของต้นฉบับจะต้องไม่เกิน 12 หน้า มีจำนวนคำไม่เกิน 10,000 คำ

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

กรุณาใช้กระดาษขนาด A4 ปรับเค้าโครงขนาดกระดาษ ความกว้าง 7.5 นิ้ว ความสูง 10.5 นิ้ว และรูปแบบหน้าเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่าง 0.19 นิ้ว กรอบของบทความกำหนดดังนี้ ขอบด้านบน 0.88 นิ้ว ขอบด้านล่าง 0.75 นิ้ว ด้านซ้าย 1 นิ้ว และด้านขวา 0.75 นิ้ว ให้เว้น 1 บรรทัดระหว่างหัวเรื่องทุกครั้ง

1.2 ชนิดตัวอักษร

ในบทความฉบับภาษาไทยและภาษาอังกฤษจะต้องใช้ตัวอักษร Cordia New ทั้งหมด ชื่อบทความใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด ตัวหนา ผู้แต่งใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด สถาบันและข้อมูลติดต่อใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด หัวเรื่องและหัวเรื่องย่อยใช้ตัวธรรมดาขนาด 14 จุด การบรรยายและเนื้อหาใช้ตัวธรรมดาขนาด 14 จุด คำในวงเล็บที่เป็นภาษาอังกฤษให้เป็นตัวเล็กทั้งหมด

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 จุด ตัวหนา ให้ขีดทางกรอบซ้าย แต่ละหัวข้อย่อยจะเว้น 1 บรรทัด (ปรับให้บรรทัดมีขนาดเท่ากับอักษรขนาด 8 จุด) ส่วนหัวข้อย่อยให้เขียนตามตัวอย่างดังรายการต่อไปนี้

1. รายการแรกในรายการนี้
2. รายการที่สอง
 - 2.1. รายการย่อย
3. รายการสุดท้าย

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

1. บทนำ
2. วิธีการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความขีดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

ชื่อผู้แต่งให้พิมพ์ได้ชื่อบทความ จัดชื่อผู้แต่งให้อยู่ขีดทางกรอบซ้าย ใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด ในกรณีมีผู้ทำวิจัยหลายท่านจากหน่วยงานต่างกันให้กำกับด้วยก¹⁾, ²⁾ ไว้หลังชื่อ สำหรับ Corresponding ให้ใส่เครื่องหมาย *กำกับไว้ท้ายชื่อ สถานที่ติดต่อ ให้พิมพ์ที่อยู่หน่วยงานรหัสไปรษณีย์ประเทศ พิมพ์ได้ชื่อผู้แต่งใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด จัดขีดทางกรอบซ้าย

4. บทคัดย่อ

บทความภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้เว้น 1 บรรทัดจากสถานที่ติดต่อ พิมพ์บทคัดย่อได้หัวข้อ “บทคัดย่อ/Abstract” เนื้อความของบทคัดย่อไม่ควรเกิน 15 บรรทัด หรือ 300 คำ ส่วนบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินัยย่อหน้าใหม่ ให้พินัยบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินัยบทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพหรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการ จะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ขีดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$D = \left(\frac{1.27FRC}{SGR} \right) 0.5 \quad (1)$$

ตัวอักษรในสมการให้ใช้ Cambria Math ขนาด 11 ตัว สัญลักษณ์ให้ใช้ Symbol ขนาด 10 ใช้ Math Type หรือ Equation Editor ในการเขียนสมการ

7.2. รูปภาพและตาราง

รูปภาพและตารางจะต้องมีความกว้างเพียงพอที่จะลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือในกรณีจำเป็น เพื่อการรักษารายละเอียดในภาพอาจยอมให้กว้างเต็มหน้ากระดาษ ผู้แต่งจะต้องรับผิดชอบในการจัดภาพให้อยู่ในขนาดที่กำหนดนี้ โดยสามารถมองเห็นรายละเอียดและอ่านตัวหนังสือในภาพได้ชัดเจนโดยตัวอักษรที่ใช้อธิบายรูปจะต้องไม่ต่ำกว่าขนาด 10 รูปภาพลายเส้นจะต้องใช้เส้นหมึกสีดำวาดด้วยโปรแกรม เช่น Visio, Adobe Illustrator, Macromedia Freehand หรือโปรแกรมวาดรูปอื่นๆ ส่วนภาพถ่ายควรเป็นภาพที่มีความคมชัด

รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็น รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับได้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2 , ... พินัยหมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความ จะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

ในกรณีที่ เป็นตารางจะต้องมีคำบรรยายกำกับตารางไว้เหนือตารางโดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก 1, 2, 3,... ตารางจะต้องกำหนดให้ขีดขอบซ้ายของเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัดก่อนคำบรรยายตารางและหลังตาราง ตามตัวอย่างตารางดังนี้

ตารางที่ 1

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

Redox moiety	Diluent	Method	k ₀ (s ⁻¹)
R1	D1	ILIT	3.4 x 10 ⁴
		CV	3.3 x 10 ⁴
R2	D2	ILIT	6.0 x 10 ⁴

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

X	a _r / m _r	2ζ _r ω _r
0.1	2.7470e+01	2.7483e+01
0.5	3.5352e+01	3.5360e+01

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนสรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

ทั้งนี้เพื่อความสมบูรณ์และความน่าเชื่อถือของบทความ ท่านควรใช้เอกสารอ้างอิงจากวารสารที่อยู่ในฐาน TCI (Thai Journal Citation Index Centre) ที่สามารถตรวจสอบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และควรใช้การอ้างอิงจากรายงานผลการวิจัย เอกสารประกอบการประชุม และหรือวิทยานิพนธ์เท่าที่จำเป็น

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของบทความ ใช้ระบบตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับของเอกสารที่มีการอ้างถึงในเนื้อหาและหมายเลขที่อ้างถึงในเนื้อเรื่อนั้นจะต้องตรงกับหมายเลขที่มีการกำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ตัวเลข อารบิกในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิงในบทความ เช่น [1] หรือ [2-4, 8, 10] หมายถึงอ้างถึงลำดับผู้แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดยเรียงลำดับจากหมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่สุดท้าย ตามการอ้างอิงการเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่องเฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาของบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

[1] Murray PR, Rosenthal KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2002.

[2] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1. เม็ดทรายพริ้นต์: กรุงเทพฯ; 2540.

1. การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

[3] Ramazan B, Cetinceviz Y. A Water Pumping Control System with A Programmable logic controller (PLC) and Industrial Wireless Modules for Industrial Plants - An Experimental Setup. ISA Transactions 2011; 50(2): 321-8.

[4] สุกัญญา หงส์ทอง และ สมใจ ขจรชีพนันทงาม. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวด้วยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัยนครสวรรค์. 2553; 18(3): 20-6.

คำอธิบายเพิ่มเติม กรณีผู้แต่งเกิน 6 คน ให้ใส่ชื่อผู้แต่ง 6 คนแรก คั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (comma- ,) และตามด้วย et al. และภาษาไทยใช้คำว่า “และคณะ”

2. การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

[5] Promma K, Thong - In W. Algae Cultivation for Biofuel Using Effluent Wastewater [MEn Thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2013.

[6] สิริประภา แพงคำแหง. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหมโดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2553.

3. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

- [7] Kimura J, Shibasaki H, editors. Recent Advances in Clinical Neurophysiology. Proceedings of The 10th International Congress of EMG and Clinical Neurophysiology; 1995 Oct 15-19; Kyoto, Japan. Amsterdam: Elsevier; 1996.
- [8] นครินทร์ เทอดเกียรติกุล พชร หอวิจิตร และ สมณา ราษฎร์ภักดี. การจัดการการใช้น้ำสำหรับกระบวนการย้อม ในอุตสาหกรรมผลิตพรมตามแนวทางเทคโนโลยีสะอาด. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14, 27-29 พฤษภาคม 2558, จังหวัดเชียงใหม่; 2558.

4. การอ้างอิงเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

- [9] Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet] . Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9] . Available from: <http://www.nap.edu/ books/0309074029/html/>
- [10] ทานตะวัน. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2550]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.doe.go.th/html.detail.sunflower.t2.gif>