

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol.11 No.2 July — December 2025

Research Article

- Development of a Semi-Automatic Pork Floss Shredding Machine for Community Enterprises 1

Piyapong Singbua Rakpong Khanhawithi Swas Oajsalee and Wiroon Monatrakul

- A Simple 3D Pet Food Pellet Measurement Application Based on Intel RealSense and Streamlit 12

Wichit Ruanchai Surasak Boonruam Paisarn Thaveesuk Ittichai Oungwattanasirikul Chettarin Sriarram and Shutchon Premchaisawatt

- Self-Adjusting Greenhouse System for Black Oyster Mushroom Cultivation Using Automatic CO₂ Responsive Ventilation Control 23

Jarinee Jongpluempiti Waree Srison Peeranat Ansuree Thayawee Nuboon Daranee Plueangsantia and Ponthepong Vengsungnle

- Development of a Prototype Device for Automatic Plant Watering Using a Soil Moisture Detection System 34

Kittinun Bunsiri Premruedee Thongbaisri Natthanicha Prasitthiwetchakoon and Supakit Rooppakhun

- Comparative Performance Evaluation of Beater Blade Designs in a Banana Sheath Fiber Extraction Machine for Natural Fiber Applications 44

Kaweepong Hongtong Weeraphon Kaewka Adisak Bootwong Komsan Tuntichukiad Tawatchai Seelaso Aphichat Srichat and Theeratechin Lertrakworakul

- The Analysis of Physical Properties and Textural of Fried Cricket Products for the Developing Automatic Frying Quality Control Systems 59

Wuttiaphong Thonghaeo Chaiyan Junsiri Wiroon Monatrakul Nakarin Saemkam And Jarupol Suriyawanakul

FEAT JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

Vol.11 No.2



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol.11 No.2 July – December 2025

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

ISSN 2408-0985

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

FEAT 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

กองบรรณาธิการ

รศ.ดร.กิตติพงษ์	ลาดูน	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.กานต์	จันทร์	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
รศ.ดร.จักรมาศ	เลาหวนิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.ศิวดล	กัญญาคำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ผศ.ดร.วิรุณ	โมณะตระกูล	คณะเทคโนโลยีการเกษตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ผศ.ดร.อดุลย์	จรรยาเลิศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.สุภกิจ	รูปขันธ์	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ปิยะพงษ์	สิงห์บัว	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ชาญวิฑ	สุวรรณพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ดร.คณิศร	ธัญญะมิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ดร.อภิวัตร	บุญทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.บัณฑิต	บุญขาว	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.อภิชน	มั่งชู	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.ดร.อภิมาณ	กาญจนาปสภิตย์	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ดร.กวีพงษ์	หงส์ทอง	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ดร.ศักรินทร์	วังคะฮาด	คณะวิทยาการจัดการ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร.ปิยะวัฒน์	ศรีธรรม	คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.สหัสวรรษ	ภูจิระ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.ดร.พลเทพ	เวงสูงเนิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.จาริณี	จงปลื้มปิติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.กศิ์บุญ	ทองแกม	สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดอุดรธานี	กระทรวงอุตสาหกรรม

บรรณาธิการ	รศ.ดร.ชัยยันต์	จันทร์ศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
	รศ.ดร.อภิชาติ	ศรีชาติ	คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ที่ปรึกษาบรรณาธิการ	รศ.ดร. รัชพล	สันติวรกร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ฝ่ายจัดการวารสาร	นางสาวฉัตรเกล้า	มะชะศรี		
สำนักงาน	กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล			
	คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น 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.

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

Editor-in-chief	Assoc.Prof.Dr.Chaiyan Junsiri	Khon Kaen University
	Assoc.Prof.Dr.Aphichat Srichat	Udon Thani Rajabhat University

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 11 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2568 ฉบับนี้เป็นปีที่ 11 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 6 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

25 ธันวาคม 2568

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. หากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบพบว่าบทความที่รับประเมินเป็นบทความที่คัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
5. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาประเมินที่กำหนด รวมถึงไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้

บทความวิจัย

การพัฒนาเครื่องฉีกลมฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับวิสาหกิจชุมชน	1
ปิยะพงษ์ สิงห์บัว รักพงษ์ ชันธวิธิ สवास อาจสาลี และ วิรุณ โมนะตระกูล	
การพัฒนาระบบวัดขนาดเมล็ดอาหารสัตว์เลี้ยงแบบ 3 มิติอย่างง่าย	12
ด้วยกล้อง Intel RealSense และ ไบรารี Streamlit	
วิฑิต เรือนชัย สุรศักดิ์ บุญร่วม ไพศาล ทวีสุข อธิชัย อึ้งวัฒนศิริกุล	
เจตรินทร์ ศรีอาราม และ ชัชชล เปรมชัยสวัสดิ์	
ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิด	23
อัตโนมัติตามระดับคาร์บอนไดออกไซด์	
จารุณี จงปลื้มปิติ วาริ ศรีสอน พิรณัฐ อันสุรีย์ ทยาวิธ หนูบุญ	
ดารณี เปลื้องสันเทียะ และ พลเทพ เวงสูงเนิน	
การพัฒนาชุดอุปกรณ์ต้นแบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติโดยใช้ระบบตรวจจับความชื้นในดิน	34
กิตตินันท์ บุญศิริ เปรมฤดี ทองใบศรี ณัฐธินิชา ประสิทธิ์เวชชากร	
และ สุภากิจ รูปจันทร์	
การเปรียบเทียบสมรรถนะของชนิดใบตมเส้นใยสำหรับเครื่องสีเส้นใยกากกล้วย	44
เพื่อทำผลิตภัณฑ์เส้นใยธรรมชาติ	
กวีพงษ์ หงษ์ทอง วีระพล แก้วก่า อติศักดิ์ บุตรวงษ์ คมสัน ตันติชูเกียรติ	
ธวัชชัย สีลาไล อภิชาติ ศรีชาติ และ ชีรเดชินทร์ เลิศรักษ์วรกุล	
การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด	59
เพื่อนำไปสู่การควบคุมคุณภาพการทอดด้วยระบบอัตโนมัติ	
วุฒิพงศ์ ทองแก้ว ชัยยันต์ จันทศิริ วิรุณ โมนะตระกูล นครินทร์ แสนคำ	
และ จารุพล สุริยวนากุล	

Research Article

Development of a Semi-Automatic Pork Floss Shredding Machine for Community Enterprises <i>Piyapong Singbua Rakpong Khanthawithi Swas Oajsalee and Wiroon Monatrakul</i>	1
A Simple 3D Pet Food Pellet Measurement Application based on Intel RealSense and Streamlit <i>Wichit Ruanchai Surasak Boonruam Paisarn Thaveesuk Ittichai Oungwattanasirikul Chettarin Sriarram and Shutchon Premchaisawatt</i>	12
Self-Adjusting Greenhouse System for Black Oyster Mushroom Cultivation Using Automatic CO ₂ Responsive Ventilation Control <i>Jarinee Jongpluempiti Watee Srison Peeranat Ansuree Thayawee Nuboon Daranee Plueangsantia and Ponthepong Vengsungnle</i>	23
Development of a prototype device for automatic plant watering using a soil moisture detection system <i>Kittinun Bunsiri Premruedee Thongbaisri Natthanicha Prasitthiwetchakoon and Supakit Rooppakhun</i>	34
Comparative Performance Evaluation of Beater Blade Designs in a Banana Sheath Fiber Extraction Machine for Natural Fiber Applications <i>Kaweepong Hongtong Weeraphon Kaewka Adisak Bootwong Komsan Tuntichukiad Tawatchai Seelaso Aphichat Srichat and Theeratechin Lertrakworakul</i>	44
The Analysis of Physical Properties and Textural of Fried Cricket Products for the Developing Automatic Frying Quality Control Systems <i>Wuttiaphong Thonghaeo Chaiyan Junsiri Wiroon Monatrakul Nakarin Saemkam And Jarupol Suriyawanakul</i>	59



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับวิสาหกิจชุมชน
Development of a Semi-Automatic Pork Floss Shredding Machine
for Community Enterprises

ปิยะพงษ์ สิงห์บัว^{1)*}, รักพงษ์ ขันธวิธิ¹⁾, สวาส อจาสาลี²⁾, วิรุณ โมณะตระกูล³⁾Piyapong Singbua^{1)*}, Rakpong Khanthawithi¹⁾, Swas Oajsalee²⁾ and Wiroon Monatrakul³⁾¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

จังหวัดนครราชสีมา

²⁾สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

จังหวัดนครราชสีมา

³⁾สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัย ราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Vongchavalitkul University,
Nakhon Ratchasima²⁾ Department of Management Engineering and Logistics, Faculty of Engineering and Architecture,
Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima³⁾ Innovative Technology Machinery Program, Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

Received: 5 October 2025

Revised: 25 November 2025

Accepted: 11 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับวิสาหกิจชุมชนครัว
ข้าวแกง จังหวัดมหาสารคาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังการผลิตในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์หมูฝอย
เครื่องต้นแบบมีขนาด 60×120×106 เซนติเมตร ผลิตจากสแตนเลสเกรด SUS 304 ตามมาตรฐาน GMP
ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กำลัง 1 แรงม้า และสามารถปรับความเร็วรอบและระยะห่างของลูกกลิ้งได้ ผลการพัฒนา

เครื่องพบว่า ที่ความเร็วรอบ 90 รอบต่อนาที และระยะห่างลูกกลิ้ง 3 มิลลิเมตร เครื่องสามารถผลิตหมูฝอยได้สูงสุด 49.8 ± 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพิ่มขึ้นกว่าการใช้แรงงานคนซึ่งทำได้เฉลี่ยเพียง 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 1,892% หรือราว 20 เท่า ผลการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนความสม่ำเสมอเฉลี่ย 4.60 จาก 5 คะแนน ขณะที่ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับ “มาก” (ค่าเฉลี่ย 4.53 จาก 5 คะแนน) แสดงให้เห็นว่าเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถยกระดับกระบวนการผลิตของวิสาหกิจชุมชนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดภาระแรงงาน และคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในระดับชุมชน

คำสำคัญ: เครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ, เครื่องจักรต้นแบบ, การแปรรูปอาหาร, วิสาหกิจชุมชน, การเพิ่มกำลังการผลิต

Abstract

This study aimed to design and develop a semi-automatic shredded pork machine for the *Krua Khao Kaeng* community enterprise in Maha Sarakham Province to enhance production efficiency and reduce manual labor in traditional pork floss processing. The developed prototype measures $60 \times 120 \times 106$ cm, is constructed from SUS 304 stainless steel compliant with GMP standards, and is powered by a 1-hp motor with adjustable roller speed and gap. Experimental results revealed that the optimal condition at a roller speed of 90 rpm and a roller gap of 3 mm achieved a maximum production rate of 49.8 ± 1.0 kg/h, compared with 2.5 kg/h from manual operation—representing a 1,892% increase or approximately 20 times higher productivity. The uniformity of shredded pork, as evaluated by experts, received an average score of 4.60 out of 5, while user satisfaction was rated at 4.53 out of 5, indicating a high level of acceptance. The findings confirm that the semi-automatic shredded pork machine effectively improves production capacity, maintains product quality, and provides a practical and hygienic solution for small-scale community food enterprises.

Keywords: Semi-automatic pork shredder: Prototype machine: Food processing: Community enterprise: Production efficiency

1. บทนำ

การผลิตหมูฝอย (Pork floss) เป็นกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [1] ซึ่งนิยมบริโภคผลิตภัณฑ์เนื้อแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้นานและบริโภคได้สะดวก โดยหมูฝอยถือเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์แปรรูปที่มีบทบาทสำคัญในระดับครัวเรือนและวิสาหกิจชุมชน เนื่องจากสามารถยืดอายุการเก็บรักษา เพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของเนื้อหมู และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่นิยมบริโภคอาหารพร้อมรับประทาน ทั้งนี้ กระบวนการผลิตหมูฝอยยังอาศัยทักษะเชิงช่างและแรงงานคนในหลายขั้นตอน โดยเฉพาะขั้นตอนการฉีกเนื้อหมูให้เป็นเส้นฝอย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานและมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงกลายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมของผู้ประกอบการในระดับชุมชน [2]

หมูฝอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอน ตั้งแต่การต้ม ทอด ไปจนถึงการฉีกเนื้อให้เป็นเส้น ซึ่งขั้นตอนการฉีกถือเป็นขั้นตอนที่ใช้แรงงานมากที่สุด และใช้เวลาในการผลิตนานที่สุด ซึ่งวิธีการทำหมูฝอยส่วนใหญ่ยังคงอาศัยแรงงานคนในการฉีกกล้ามเนื้อหมูที่ต้มสุกแล้ว ทำให้ข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพและต้นทุนแรงงานกลายเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการผลิตโดยเฉพาะในชุมชนขนาดเล็ก [3]

ในกระบวนการผลิตหมูฝอย โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะถูกกำหนดโดยปัจจัยสำคัญ เช่น ขนาดแรงกลที่ใช้ในการฉีกเนื้อ ความร้อนจากการทอด และระยะเวลาการตีเส้น ซึ่งล้วนส่งผลต่อการแยกตัว

ของเส้นใยกล้ามเนื้อ ค่าความชื้นในเนื้อ และการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม หากโครงสร้างภายในมีความพรุนและการเรียงตัวของเส้นที่เหมาะสม จะช่วยให้เนื้อหมูฝอยดูฟู ไม่จับตัวเป็นก้อน และไม่แห้งกระด้างจนเกินไป ซึ่งถือเป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก [4]

การแปรรูปอาหารโดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติที่สามารถปรับตั้งค่าเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของวัตถุดิบได้ ช่วยลดความผิดพลาดจากแรงงานคนและเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ที่ต้องอาศัยแรงตัดและความแม่นยำ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยจาก Wright et al. (2024) พบว่า การใช้แขนกลหุ่นยนต์ร่วมกับระบบควบคุมด้วยวิทยุทัศน์และเซนเซอร์แรงกระทำ สามารถฉีกและตัดเนื้อหมูให้เป็นชิ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยยังคงรักษาคุณภาพตามมาตรฐานประสาทสัมผัสของผู้เชี่ยวชาญ ไม่ว่าจะเป็นรูปร่าง ความสม่ำเสมอ และน้ำหนักของเนื้อ [5] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยโดย Lyu et al. (2025) ซึ่งเป็นบทวิเคราะห์เครื่องจักรและระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ พบว่าการนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์ร่วมกับวิทยุทัศน์คอมพิวเตอร์และเซนเซอร์ต่างๆ ทำให้การตัดและการแยกเนื้อสัตว์มีความต่อเนื่องและปลอดภัยมากขึ้น พร้อมทั้งเพิ่มผลผลิตและลดแรงงานที่เข้าถึงได้ยาก [6] จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่า งานวิจัยที่มีอยู่ส่วนใหญ่เน้นการพัฒนาเครื่องจักรในระดับอุตสาหกรรมหรือเครื่องต้นแบบที่ยังไม่สามารถปรับค่าการทำงานได้หลากหลาย จึงยังไม่เหมาะสมกับบริบทของวิสาหกิจชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ พื้นที่และกำลังการผลิต งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา เครื่องฉีก

หมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่สามารถปรับความเร็วรอบและระยะห่างของลูกกลิ้งได้ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะเนื้อหมูและระดับความฟูของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ โดยเน้นการออกแบบที่ใช้งานง่าย ปลอดภัย ต่ออาหาร (Food grade: SUS 304)

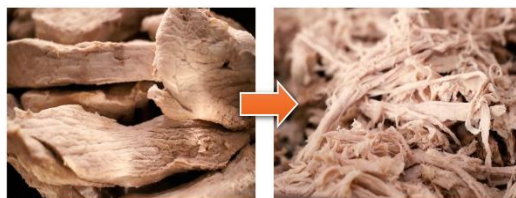
สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนครัวข้าวแกง จังหวัดมหาสารคาม ซึ่งยังคงใช้แรงงานคนในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตหมูฝอย พบว่าไม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตให้เพียงพอกับความต้องการของตลาดได้ อีกทั้งการนำเครื่องจักรสำเร็จรูปจากท้องตลาดมาใช้งาน กลับไม่สามารถผลิตเส้นหมูฝอยที่มีลักษณะตรงตามความต้องการของผู้บริโภคในด้านความฟู ความยาวของเส้น และเนื้อสัมผัสได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องหันกลับมาใช้แรงงานคนเช่นเดิม ซึ่งก่อให้เกิดข้อจำกัดทั้งในด้านต้นทุนแรงงาน คุณภาพผลิตภัณฑ์ และความยั่งยืนในการผลิต

จากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติที่สามารถปรับตั้งความเร็วรอบของมอเตอร์ และระยะห่างของลูกกลิ้ง เพื่อควบคุมลักษณะของเส้นหมูฝอยได้อย่างเหมาะสมตามความต้องการ เครื่องต้นแบบมีขนาดกะทัดรัด เหมาะสำหรับพื้นที่จำกัดในระดับชุมชนผลิตจากวัสดุสแตนเลสชนิด SUS 304 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความปลอดภัยต่อการสัมผัสอาหาร และสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานการผลิตที่ดี (Good Manufacturing Practice: GMP) โดยมีเป้าหมายเพื่อยกระดับกระบวนการแปรรูปอาหารในระดับชุมชนให้มีประสิทธิภาพ สม่ำเสมอ และสามารถรองรับปริมาณการผลิตที่มากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการการวิจัย

2.1. การออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากการสำรวจกระบวนการผลิตหมูฝอยของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนครัวข้าวแกง จังหวัดมหาสารคาม พบว่า ขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุดคือการฉีกเนื้อหมูที่ผ่านการต้มสุกแล้วให้เป็นเส้น (รูปที่ 1) ซึ่งในกระบวนการนี้ยังคงใช้แรงงานคนเป็นหลัก โดยแรงงานหนึ่งคนสามารถฉีกเนื้อหมูได้เพียง 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเท่านั้น ส่งผลให้ไม่สามารถรองรับความต้องการของตลาดที่เพิ่มขึ้นได้ และยังส่งผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ความเหนื่อยล้าของแรงงาน และต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ทั้งนี้ กลุ่มผู้ประกอบการเคยทดลองใช้เครื่องจักรสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แต่พบว่าไม่สามารถผลิตเส้นหมูฝอยที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส ความฟู และความสม่ำเสมอที่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคได้ จึงต้องกลับมาใช้แรงงานคนเช่นเดิม

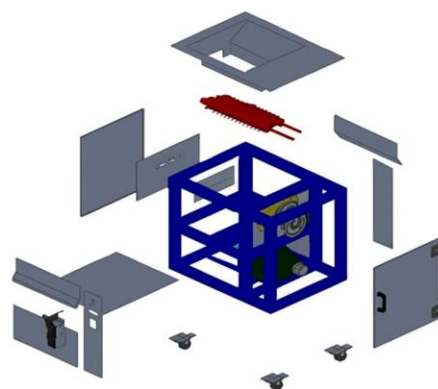


รูปที่ 1 ขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุดคือการฉีกหมูที่ปรุงสุกแล้ว

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ทีมวิจัยจึงได้พัฒนาแนวคิดในการออกแบบเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติที่สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมระดับวิสาหกิจชุมชน โดยยึดหลักกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design Process) ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์ข้อจำกัด

ของกระบวนการเดิม การจัดทำแบบร่างแนวคิด (Conceptual Design) การกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องจักร (Specification) และการเลือกวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้ได้เลือกใช้วัสดุหลักเป็นสแตนเลสเกรด SUS 304 ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการกัดกร่อน แข็งแรง ทนทาน และสามารถล้างทำความสะอาดได้ง่ายตามมาตรฐาน GMP

ระบบภายในของเครื่องได้รับการออกแบบโดยเน้นความสามารถในการฉีกเนื้อหมูให้เป็นเส้นได้อย่างสม่ำเสมอ ด้วยชุดลูกกลิ้งคู่ (Roller) โดยลูกกลิ้งตัวแรกเป็นแบบมีมุมเดือยสำหรับตีแยกเส้นเนื้อ ส่วนลูกกลิ้งตัวที่สองเป็นผิวเรียบสำหรับบีบและส่งวัตถุดิบเข้าสู่ชุดตี นอกจากนี้ระบบส่งกำลังถูกออกแบบให้ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้ตามลักษณะเนื้อหมูและความต้องการของผู้ใช้ อีกทั้งยังมีระบบปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งด้วยมือหมุน เพื่อให้สามารถกำหนดความหนา-บางของเส้นหมูฝอยได้อย่างแม่นยำ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 แบบเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

การออกแบบเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติในครั้งนี้อาศัยแนวคิดของระบบลูกกลิ้งคู่ (Dual Roller System) ที่สามารถปรับความเร็วรอบและระยะห่างของลูกกลิ้งได้ เพื่อควบคุมแรงเฉือนและแรงกดที่ใช้ในการฉีกเส้นเนื้อหมูให้มีลักษณะสม่ำเสมอ การคำนวณในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ ได้ดำเนินการตามหลักวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อให้โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ มีความแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งานจริง โดยเริ่มจากการคำนวณกำลังและแรงบิดที่ต้องใช้ในการหมุนลูกกลิ้งฉีกหมู เพื่อให้สามารถฉีกเนื้อหมูได้ต่อเนื่องโดยไม่เกิดการติดขัด จากนั้นนำค่าทอร์กที่ได้ไปใช้ในการกำหนดขนาดเพลลา ระบบส่งกำลัง และองค์ประกอบของลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับภาระที่เกิดขึ้นจริง การออกแบบเพลลาได้อ้างอิงตามทฤษฎีแรงบิดสูงสุด (Maximum shear stress theory) เพื่อให้เพลลาสามารถรับแรงบิดได้โดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร พร้อมทั้งคำนวณขนาดและความยาวของคีย์ (key) เพื่อถ่ายทอดแรงบิดจากเพลลาไปยังลูกกลิ้งได้อย่างมั่นคง โดยองค์ประกอบหลักของเครื่องต้นแบบประกอบด้วย

1) ชุดป้อนวัตถุดิบ (Feeding Unit) ทำหน้าที่นำเนื้อหมูที่ผ่านการต้มสุกเข้าสู่ช่องป้อน โดยออกแบบให้มีถาดรับขนาดกว้างและมีฝาปิดเพื่อป้องกันการกระเด็นของวัตถุดิบระหว่างการทำงาน

2) ชุดลูกกลิ้งตีและฉีกเส้น (Shredding Roller Assembly) เป็นหัวใจสำคัญของเครื่อง ประกอบด้วยลูกกลิ้งคู่ โดยลูกกลิ้งตัวแรกมีเดือยโลหะรอบผิวสำหรับตีและดึงเส้นเนื้อ ส่วนลูกกลิ้งตัวที่สองเป็นผิวเรียบสำหรับบีบและส่งเนื้อหมูให้แนบสนิทกับลูกกลิ้งตัวแรก ชุดลูกกลิ้งทั้งสองหมุนสวนทางกันและขับเคลื่อนด้วยระบบโซ่และเฟือง (chain and sprocket) ที่ต่อกับเพลามอเตอร์กำลัง 1 แรงม้า

3) ชุดปรับระยะห่างลูกกลิ้ง (Roller Gap Adjustment Unit) ใช้กลไกเกลียวและมือหมุน (handwheel) สองข้าง เพื่อปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้อยู่ในช่วง 2–4 มิลลิเมตร ตามลักษณะของเนื้อหมูที่ใช้ในการฉีก

4) ระบบควบคุมความเร็ว (Speed Control System) ใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ในช่วง 0–100 รอบต่อนาที เพื่อให้สามารถปรับแรงเฉือนของลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับความชื้นและความหนืดของเนื้อหมูในแต่ละชุดการผลิต

5) ชุดรองรับและเก็บผลิตภัณฑ์ (Collection Unit) ประกอบด้วยถาดสแตนเลสรองรับหมูฝอยที่ฉีกเสร็จแล้ว พร้อมฝาครอบกันกระเด็น เพื่อรักษาความสะอาดและความปลอดภัยทางอาหาร

6) โครงสร้างและอุปกรณ์ความปลอดภัย (Machine Frame and Safety Devices) โครงสร้างผลิตจากสแตนเลสเกรด SUS 304 ตามมาตรฐาน GMP มีสวิตช์หยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop) และ

ฝาครอบป้องกันชิ้นส่วนหมุนเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน

หลักการทำงานของเครื่องต้นแบบ เริ่มจากการนำเนื้อหมูที่ผ่านการต้มสุกและพักให้เย็นจนมีความชื้นเหมาะสมเข้าสู่ ช่องป้อนวัตถุดิบ จากนั้นเนื้อหมูจะถูกดึงเข้าสู่ช่องลูกกลิ้งคู่ โดยลูกกลิ้งตัวแรกซึ่งมีเดือยรอบผิวจะทำหน้าที่ ตีและฉีกเส้นใยกล้ามเนื้อ ในขณะที่ลูกกลิ้งตัวที่สองซึ่งเป็นผิวเรียบจะ บีบและส่งต่อเนื้อหมู ให้เคลื่อนผ่านช่องระหว่างลูกกลิ้งตามแรงหมุน การปรับระยะห่างของลูกกลิ้งจะควบคุม “ความหนาและความยาวของเส้นหมูฝอย” ส่วนการปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะควบคุม “แรงเฉือนและอัตราการผลิต” เมื่อเนื้อหมูถูกฉีกจนเป็นเส้นละเอียดตามต้องการแล้ว จะตกลงสู่ถาดรองรับด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปทอดหรือปรุงรสต่อได้ทันที

2.2 การทดสอบปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องต้นแบบฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้จัดอยู่ในประเภทการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับใช้งานในระดับวิสาหกิจชุมชน และประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นผ่านการควบคุมตัวแปรเชิงวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่ ความเร็วรอบของลูกกลิ้งและระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อแรงเฉือน (shear force) และความสม่ำเสมอของเส้นเนื้อ โดยอ้างอิงแนวทางจากมาตรฐานการทดสอบเครื่องจักรกลอาหารและเครื่องจักรกลเกษตร ISO 4254-1:2013 ซึ่งกำหนดให้ การทดสอบต้องดำเนินภายใต้สภาวะแวดล้อมคงที่

(อุณหภูมิ $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $60\pm 5\%$) และวัดค่าความเร็วรอบด้วยเครื่องวัดรอบแบบไม่สัมผัส (tachometer) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1\%$ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนด ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 2 ระดับ คือ 60 และ 90 รอบต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบอัตราการฉีกเนื้อหมูในระดับพลังงานต่างกัน และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 3 ระดับ คือ 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร ส่วนตัวแปรตามประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ (1) อัตราการผลิตของเครื่องจักร (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) ดังแสดงในสมการที่ 1 [7], (2) ความสม่ำเสมอของเส้นหมูฝอยซึ่งประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบคะแนน Likert scale ระดับ 1–5 และ (3) ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานจริงที่ใช้เครื่องต้นแบบ ซึ่งเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ราย โดยใช้แบบสอบถามมาตร Likert scale เช่นกัน ทั้งนี้มีการควบคุมตัวแปรอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ ได้แก่ ชนิดของเนื้อหมูที่ใช้ในแต่ละรอบ, น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น, อุณหภูมิห้อง และผู้ป้อนวัตถุดิบให้คงที่ตลอดการทดลอง

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

โดยที่ : P = Production rate (kg/h)

W = Weight of shredded pork
produced per batch (kg)

t = Processing time (h)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

ผลการออกแบบเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติในครั้งนี้ เกิดจากความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนครัวข้าวแกง จ.มหาสารคาม ที่มีข้อจำกัดด้าน

กำลังการผลิต โดยเฉพาะในขั้นตอนการฉีกหมู ซึ่งใช้แรงงานคนทั้งหมดและใช้เวลานานที่สุด ในกระบวนการผลิต ที่วิจัยจึงได้ดำเนินการออกแบบเครื่องจักรต้นแบบโดยใช้หลักการทางวิศวกรรมควบคู่กับข้อกำหนดด้านสุขลักษณะ (GMP) เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในระดับชุมชน

เครื่องจักรถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นระบบลูกกลิ้งคู่ (Roller) จำนวน 2 ลูก โดยลูกกลิ้งที่ 1 ทำหน้าที่ตีฉีกเส้นหมู โดยมีหมุดเดือยติดอยู่รอบผิวลูกกลิ้ง เพื่อช่วยให้เนื้อหมูแยกตัวเป็นเส้นตามแนวกล้ำมเนื้อ ส่วนลูกกลิ้งที่ 2 เป็นลูกกลิ้งผิวเรียบทำหน้าที่บีบเนื้อหมูให้แนบกับลูกกลิ้งตัวแรก ทำให้การตีฉีกเนื้อมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ลูกกลิ้งตัวที่ 2 ยังสามารถปรับระยะห่างได้ด้วยมือหมุน (Handle) จำนวน 2 ตัว เพื่อควบคุมความหนาบางของเส้นหมูฝอยตามต้องการของผู้ใช้งาน ระบบโครงสร้างเครื่องจักรประกอบด้วยวัสดุหลักเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปอาหาร มีความทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย โดยขนาดโครงสร้างรวมของเครื่องจักรอยู่ที่ $60 \times 120 \times 106$ เซนติเมตร ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกในพื้นที่จำกัด พร้อมติดตั้งล้อเลื่อนด้านล่างเพื่อความสะดวกในการใช้งานและบำรุงรักษา นอกจากนี้ เครื่องยังได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ด้านความปลอดภัย เช่น สวิตช์หยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop), ฝาครอบป้องกันชิ้นส่วนหมุน, และไฟแสดงสถานะ เพื่อให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานในระดับชุมชนที่อาจไม่มีพื้นฐานทางช่างโดยตรง (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ต้นแบบเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

3.2 ผลการทดสอบปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องต้นแบบฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่วิจัยได้ออกแบบการทดลองเชิงปัจจัย (Factorial Design) แบบ 2×3 โดยกำหนด

ตัวแปรต้น 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 2 ระดับ คือ 60 และ 90 รอบต่อนาที และ (2) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 3 ระดับ คือ 2 มิลลิเมตร, 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร รวมเป็น 6 ชุดการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเส้นหมูฝอย

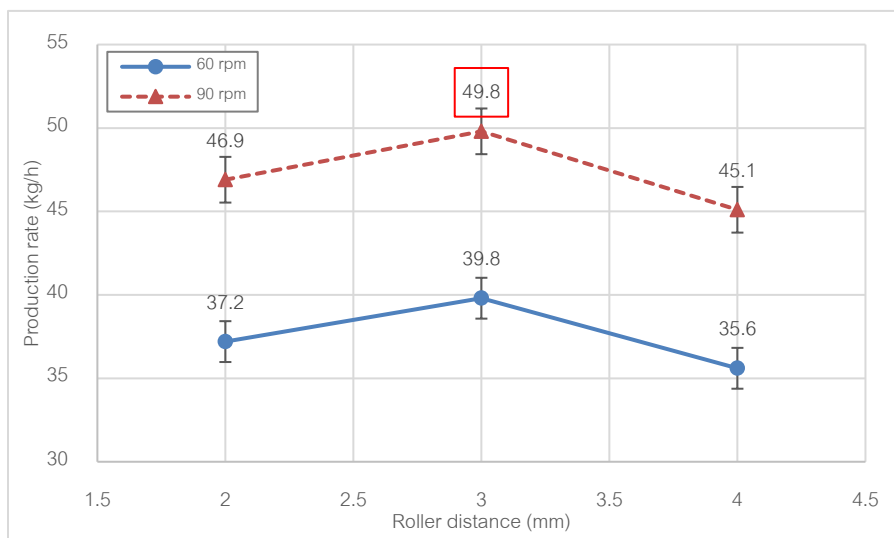
การทดสอบดำเนินการโดยใช้เนื้อหมูต้มสุกในปริมาณเท่ากัน (5 กิโลกรัมต่อรอบ) ป้อนเข้าสู่เครื่องต้นแบบ จากนั้นวัดผลลัพธ์ที่ได้ตามตัวแปรตาม 3 ด้าน ได้แก่ (1) อัตราการผลิต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง), (2) ความสม่ำเสมอของเส้นหมูฝอย โดยประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 5 รายในรูปแบบ Likert scale 1–5 และ (3) ความพึงพอใจจากผู้ใช้งานจริงจำนวน 5 ราย ซึ่งสะท้อนถึงการใช้งานในสถานการณ์จริงของวิสาหกิจชุมชน โดยมีผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 และ รูปที่ 4

ตารางที่ 1

ผลการทดสอบปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องผลิตหมูฝอยต้นแบบกึ่งอัตโนมัติ

Sample	Rotation speed (rpm)	Roller distance (mm)	Production rate (kg/h)	Consistency (score 1–5)	Satisfaction (1–5 scores)
A	60	2	37.2 ± 1.3c	4.10 ± 0.22bc	4.05 ± 0.18b
B	60	3	39.8 ± 1.1c	4.35 ± 0.19ab	4.20 ± 0.15ab
C	60	4	35.6 ± 1.5c	3.90 ± 0.24c	4.00 ± 0.20b
D	90	2	46.9 ± 1.2ab	4.30 ± 0.25ab	4.35 ± 0.16ab
E	90	3	49.8 ± 1.0a	4.60 ± 0.20a	4.53 ± 0.17a
F	90	4	45.1 ± 1.4b	4.05 ± 0.23bc	4.18 ± 0.14ab
AVG	–	–	42.4 ± 5.2	4.22 ± 0.26	4.22 ± 0.19

Note: Means in the same column followed by different superscript letters (a, b, c) are significantly different at $p < 0.05$ according to One-way ANOVA with LSD post hoc test. The LSD critical values were 2.45 for production rate, 0.35 for consistency, and 0.29 for satisfaction.



รูปที่ 4 ผลของความเร็วลูกกลิ้งและระยะห่างของลูกกลิ้งต่ออัตราการผลิตของเครื่องหั่นหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากผลการทดลอง พบว่า ชุดเงื่อนไขที่ใช้ความเร็วรอบ 90 รอบต่อนาที และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 3 มิลลิเมตร ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในภาพรวม โดยให้ค่ากำลังการผลิตเฉลี่ย 49.8 ± 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งใกล้เคียงค่ากำลังสูงสุดที่เครื่องรองรับ และได้คะแนนความสม่ำเสมอของเส้นหมูฝอยจากผู้เชี่ยวชาญเฉลี่ย 4.60 ± 0.20 คะแนน จาก 5 คะแนน ในขณะที่ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ที่ 4.53 ± 0.17 คะแนน โดยผู้ใช้งานให้ความเห็นว่าเส้นหมูมีความยาวสม่ำเสมอ ไม่ขาดตอน และใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แรงงานคน (รูปที่ 5) และจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ Two-way ANOVA แสดงให้เห็นว่าทั้งความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่ออัตราการผลิตและคุณภาพของเส้นหมูฝอย นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง

สองปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อผลผลิตโดยรวมด้วย กล่าวคือ ระยะห่างของลูกกลิ้งที่แคบเกินไป (2 มม.) อาจทำให้เนื้อถูกบดละเอียดเกินความต้องการ ขณะที่ระยะห่างที่กว้างเกินไป (4 มม.) จะทำให้เนื้อไม่ถูกฉีกออกเป็นเส้นอย่างเหมาะสม แม้จะใช้ความเร็วรอบสูงก็ตาม จากผลการทดลองดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานเครื่องต้นแบบคือ ความเร็วรอบที่ 90 รอบต่อนาที และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 3 มิลลิเมตร ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สมดุลระหว่างปริมาณการผลิต ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับใช้งานใน

ระดับวิสาหกิจชุมชน และศึกษาผลของปัจจัยด้านวิศวกรรมต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยระบบลูกกลิ้งคู่ที่สามารถปรับระยะห่างได้ และควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ มีโครงสร้างแข็งแรง ผลิตจากวัสดุที่เหมาะสมกับการแปรรูปอาหาร (SUS 304) พร้อมอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับชุมชน โดยเครื่องต้นแบบมีขนาดกะทัดรัด เคลื่อนย้ายได้สะดวก และสามารถใช้งานจริงในสถานประกอบการขนาดเล็กได้

2) จากการทดลองเชิงปัจจัย (Factorial Design 2×3) โดยกำหนดความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง พบว่า ปัจจัยทั้งสองมีผลต่ออัตราการผลิต ความสม่ำเสมอของเส้นหมู และความพึงพอใจของผู้ใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ ความเร็วรอบ 90 รอบต่อนาที และระยะห่างลูกกลิ้ง 3 มิลลิเมตร ซึ่งให้ผลการผลิตเฉลี่ย 49.8 ± 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความสม่ำเสมอเฉลี่ย 4.60 ± 0.20 คะแนน และความพึงพอใจของผู้ใช้งานเฉลี่ย 4.53 ± 0.17 คะแนน

3) เครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มกำลังการผลิต จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการฉีกหมูด้วยแรงงานคนและการใช้เครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น พบว่าแรงงานคนที่มีความชำนาญสามารถฉีกหมูได้เฉลี่ยเพียง 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่เครื่องต้นแบบสามารถผลิตหมูฝอยได้สูงที่สุดถึง 49.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบลูกกลิ้ง 90 รอบต่อนาที และระยะห่างลูกกลิ้ง 3 มิลลิเมตร เมื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณ

อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตตามสมการ โดยแทนค่ากำลังการผลิตของเครื่อง ($P_{เครื่อง}$) เท่ากับ 49.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกำลังการผลิตจากแรงงานคน ($P_{แรงงานคน}$) เท่ากับ 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้ว่าเครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ร้อยละ 1,892 หรือประมาณ 20 เท่าของวิธีการผลิตแบบเดิม

4) ผู้ใช้งานในระดับชุมชนมีความพึงพอใจต่อการใช้งานของเครื่องต้นแบบ และเห็นว่าเป็นนวัตกรรมที่สามารถใช้งานได้จริง ตอบสนองความต้องการในเชิงเศรษฐกิจ และสามารถลดภาระการทำงานของแรงงานในกระบวนการผลิตอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “เครื่องฉีกหมูฝอยแบบกึ่งอัตโนมัติ” นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยการสนับสนุนจากหน่วยงานและบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สป.อว.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณดำเนินโครงการภายใต้ทุนวิจัยปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ขอขอบคุณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนครัวข้าวแกง จังหวัดมหาสารคาม ที่อนุญาตให้เข้าไปศึกษาข้อมูล ให้ข้อเสนอแนะ และร่วมทดสอบเครื่องต้นแบบในสภาพการใช้งานจริง ตลอดจนให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการประเมินผลการใช้งาน ขอขอบคุณทีมวิจัยและนักศึกษาฝึกประสบการณ์จากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่มีส่วนร่วมในการออกแบบ สร้าง และปรับปรุงเครื่องจักรตลอดระยะเวลาของโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Torsakul S, Thuankruaval V. Case study of a prototype shredded pork shredder for OTOP volunteer women group to develop Nong Luang village for export to ASEAN community. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal. 2019;12(1):77–87.
- [2] Office of Vocational Education Research and Development. Pork floss [Internet]. 2025 [cited 2025 Jul 13]. Available from: <https://www.thailandinnovationportal.com/info/innovation/item/4612>
- [3] Singbua P, Monatrakul W. Semi-automatic shredded pork machine. Nakhon Ratchasima; 2021.
- [4] Shen C, et al. Identifying the quality characteristics of pork floss structure based on deep learning framework. Curr Res Food Sci. 2023;7:100587. doi:10.1016/j.crfs.2023.100587.
- [5] Wright R, Parekh S, White R, Losey D. Safely and autonomously cutting meat with a collaborative robot arm. Sci Rep. 2024;14. doi:10.1038/s41598-023-50569-4.
- [6] Lyu Y, et al. A review of robotic and automated systems in meat processing. Front Robot AI. 2025;12. doi:10.3389/frobt.2025.1578318.
- [7] Nipa JF, Mondal M, Islam M. Design, development and performance evaluation of small-scale fodder chopping machine for farmers. Research in Agricultural Engineering. 2021;67. doi:10.17221/52/2020-RAE



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาระบบวัดขนาดเม็ดอาหารสัตว์เลี้ยงแบบ 3 มิติอย่างง่าย
ด้วยกล้อง Intel RealSense และ ไลบรารี Streamlit

A Simple 3D Pet Food Pellet Measurement Application

based on Intel RealSense and Streamlit

วิชิต เรือนชัย, สุรศักดิ์ บุญร่วม, ไพศาล ทวีสุข, อธิติชัย อึ้งวัฒนศิริกุล, เจตรินทร์ ศรีอาราม
และ ชัชชล เปรมชัยสวัสดิ์¹⁾

Wichit Ruanchai, Surasak Boonruam, Paisarn Thaveesuk, Ittichai Oungwattanasirikul,

Chettarin Sriarram and Shutchon Premchaisawatt¹⁾

¹⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีระบบการผลิตอัตโนมัติ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹⁾ Department of Automated Manufacturing System Technology, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

Received: 12 November 2025

Revised: 5 December 2025

Accepted: 11 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

การควบคุมคุณภาพขนาดเม็ดอาหารสัตว์เลี้ยงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการตรวจสอบส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาแรงงานมนุษย์ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าหรือมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง และไม่สามารถตรวจสอบแบบเรียลไทม์ได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบวัดขนาดเม็ดอาหารสัตว์เลี้ยงแบบ 3 มิติอัตโนมัติ เพื่อทดแทนกระบวนการตรวจสอบด้วยแรงงานมนุษย์ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing) ด้วยเทคนิค Thresholding และ Contour Detection ร่วมกับกล้องวัดระยะ (Depth Camera) รุ่น Intel RealSense D435i ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งความกว้าง ความยาว และความหนาของ

เม็ดอาหาร ระบบนี้ถูกพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ไลบรารี Streamlit เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงผลการวิเคราะห์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเวอร์เนียคาลิเปอร์ในเม็ดอาหาร 3 รูปแบบ พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำเฉลี่ย 93.55% ของความกว้าง 93.93% ของความยาว และ 93.62% ของความหนา ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วกว่าการวัดด้วยแรงงานคน ระบบนี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเป็นเครื่องมือควบคุมคุณภาพที่มีประสิทธิภาพสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เลี้ยงด้วยการพัฒนาระบบที่ง่าย

คำสำคัญ: ประมวลผลภาพ วัดขนาดเม็ดอาหารสัตว์เลี้ยง กล้องวัดระยะ Streamlit เม็ดอาหารสัตว์เลี้ยง

Abstract

Quality control of pet food pellet size is a critical factor in the manufacturing process. Currently, most inspections rely on manual labor, which leads to delays, high error rates, and the inability to perform real-time monitoring. This research proposes an automated 3D pet food pellet measurement system to replace manual inspection. The system applies image processing techniques, specifically thresholding and contour detection, utilizing an Intel RealSense D435i depth camera to analyze width, length, and thickness. To ensure convenient and fast access to the results, the system was developed as a web application using the Streamlit library. Experimental results comparing the system with a vernier caliper across three pellet shapes showed average accuracies of 93.55% for width, 93.93% for length, and 93.62% for thickness. This process is significantly faster than manual measurement. Consequently, this system demonstrates potential as an effective and simple-to-develop quality control tool for the pet food industry.

Keywords: Image processing: pellet size measurement: Depth camera: Streamlit: pet food pellet

*ติดต่อ: shutchon.pr@rmuti.ac.th

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตจำเป็นต้องเผชิญกับความท้าทายหลากหลายมิติ ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นหรือสภาวะการขาดแคลนแรงงานทักษะ (Skill Labor Shortage) หรือความต้องการของตลาดที่มีความผันผวนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ปัจจัยเหล่านี้ได้ผลักดันให้ผู้ประกอบการ

ต้องนำเทคโนโลยีอัตโนมัติ (Automation Technology) เข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ลดความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ (Human Error) และเพิ่มขีดความสามารถในการตอบสนองต่อตลาดให้ทันทั่วทั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เลี้ยงของประเทศไทย ซึ่งมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดและ

มีบทบาทสำคัญในฐานะผู้ส่งออกรายใหญ่อันดับ 4 ของโลกในปี 2567 [1] หนึ่งในความท้าทายสำคัญที่ยังคงพบในกระบวนการผลิต คือ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ (Quality Control) โดยเฉพาะการควบคุมขนาดเม็ดอาหาร (Pellet Size) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพสินค้าและความพึงพอใจของผู้บริโภค

การที่ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ไม่ว่าจะเป็นด้านขนาด สี หรือการปนเปื้อน อาจนำไปสู่การร้องเรียนจากลูกค้าและการส่งคืนสินค้า ซึ่งกระทบต่อข้อกำหนดในระบบมาตรฐานสากล ISO 9001:2015 [2] และส่งผลเสียต่อชื่อเสียงและความน่าเชื่อถือของอุตสาหกรรมไทยในเวทีโลก อย่างไรก็ตาม กระบวนการตรวจสอบในโรงงานส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาการตรวจสอบด้วยสายตาโดยแรงงานมนุษย์ (Manual Inspection) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ล่าช้าและมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง (Error-Prone) และไม่สามารถทำการตรวจสอบแบบเรียลไทม์ (Real-time) ได้ การตรวจสอบเป็นช่วงเวลา (Periodic Inspection) ไม่สามารถให้ข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ได้ทันที ทำให้เกิดความเสี่ยงในการผลิตสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพเป็นปริมาณมากก่อนที่จะมีการตรวจพบและแก้ไข

เพื่อแก้ไขปัญหาและก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing) ร่วมกับกล้องวัดระยะ (Depth Camera) ในการพัฒนาระบบวัดขนาดเม็ดอาหารสัตว์เลี้ยง ที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งความกว้าง ความยาว และความหนาของเม็ดอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพมาทดแทนกระบวนการตรวจสอบด้วย

แรงงานมนุษย์ นอกจากนี้ งานวิจัยได้เลือกใช้ Streamlit ซึ่งเป็นไลบรารี Python แบบโอเพนซอร์ส ในการพัฒนาส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน (User Interface) ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน เนื่องจากมีจุดเด่นด้านการพัฒนาที่รวดเร็วและใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ [3]

2. การทบทวนวรรณกรรม

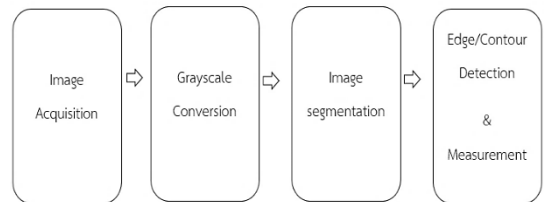
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่องานตรวจสอบคุณภาพเชิงอุตสาหกรรม (Industrial Quality Control) โดยเฉพาะการวัดขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในแวดวงวิชาการ การวัดขนาดวัตถุด้วยเทคโนโลยีกล้อง Depth Camera ได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิจัยหลายสาขา เช่น [4] อุตสาหกรรมเหล็กและเกษตรกรรม โดยระบบการมองเห็น 3D ถูกนำมาใช้วัดขนาดของเม็ดเหล็ก (pellet) บนสายพานลำเลียง ซึ่งใช้กล้อง 3D ร่วมกับอัลกอริทึม segmentation และ sphere fitting เพื่อให้ได้ค่าการกระจายขนาดที่แม่นยำ สำหรับในงานเกษตรกรรม [5] เทคโนโลยี CAMSIZER 3D สามารถวัดขนาดเม็ดยาและ granule ในช่วง $20\ \mu\text{m}$ ถึง $30\ \text{mm}$ โดยใช้กล้องความละเอียดสูงถึง 9 MP ในการวิเคราะห์รูปร่าง 3D จากหลายมุมมองพร้อมกัน ด้านการวัดขนาดผลไม้ [6] กล้อง RGB-D เช่น Azure Kinect DK ถูกนำมาใช้ประมาณขนาดและน้ำหนักแอปเปิ้ลในสภาพภาคสนาม โดยใช้ทฤษฎี thin lens ร่วมกับ allometric modeling ซึ่งให้ค่าความแม่นยำสูง ($R^2 > 0.942$, $\text{RMSE} < 16\ \text{g}$) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของกล้อง RGB-D จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อความเข้มแสงโดยรอบสูงเกิน 2000 lux [7] แต่ปัญหานี้สามารถลดลงได้เมื่อวัดในระยะใกล้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวัดขนาดอาหารสัตว์เลี้ยง ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรง เช่น งานของ Ljungqvist และคณะ [8] ที่ได้พัฒนาระบบวิเคราะห์ภาพสำหรับตรวจสอบขนาดเม็ดอาหาร (Feed Pellet) ในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคการแปลงภาพเป็น Grayscale และการดำเนินการทางสัณฐานวิทยา (Morphological Operations) เพื่อสกัดค่าแกนหลัก (Major Axis) และแกนรอง (Minor Axis) ของเม็ดอาหาร ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่าที่วัดได้จากเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ดังรูปที่ 1 เช่นเดียวกับที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้

อย่างไรก็ตาม หนึ่งในความท้าทายสำคัญของระบบวิชันซิสเต็ม (Vision System) คือการจัดการกับวัตถุที่ซ้อนทับกัน (Overlapping Objects) ซึ่งงานวิจัยของ Wang และคณะ [9] ได้นำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหานี้ในการวัดขนาดเม็ดแร่เหล็ก โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Marker-Controlled Watershed ร่วมกับการแบ่งส่วนภาพแบบ Gaussian Mixture Model (GMM) เพื่อจำแนกเม็ดที่ซ้อนทับกันออกจากกันก่อนดำเนินการวัดขนาด

นอกเหนือจากปัจจัยด้านอัลกอริทึมแล้ว สภาพแวดล้อมในการถ่ายภาพ โดยเฉพาะการควบคุมแสง (Lighting Control) ยังเป็นองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของระบบ งานวิจัยหลายชิ้นในบริบทของประเทศไทยได้ตระหนักถึงความสำคัญนี้ เช่น งานของ สันติภาพ สัตย์ธรรมรังษี และ อรุณา พร้าโมต [10] ที่ใช้ระบบไฟ LED สีขาว 4 ดวง เพื่อลดการเกิดเงาในการจำแนกขนาดแก้วมังกร สอดคล้องกับงานของ สิริวิชญ์ เดชอริราช [11] ที่ใช้ไฟ LED

สีขาวอุณหภูมิสี 6500K เพื่อสร้างสภาวะแสงที่คงที่ในการทำนายความสูงของผลอะโวคาโด และงานของ นนินทร พัฒนชัย และคณะ [12] ที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของการถ่ายภาพทางแผ่นใน 3 สภาวะแสงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนของการประมวลผลภาพ

ในขณะที่ยานวิจัยส่วนใหญ่ [10-13] ยังคงพึ่งพาการใช้กล้อง 2 มิติ ซึ่งมีข้อจำกัดโดยธรรมชาติในการวัดค่าความหนาหรือการเก็บข้อมูลเชิง 3 มิติ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กล้องวัดระยะ (Depth Camera) รุ่น Intel RealSense D435i เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีงานวิจัยรองรับการใช้งานเพื่อวัดขนาดวัตถุ 3 มิติแบบเรียลไทม์ เช่น งานของ Wang และคณะ [14] ที่พัฒนาระบบวัดขนาดวัตถุ 3 มิติโดยใช้กล้อง RealSense ร่วมกับไลบรารี OpenCV และ pyrealsense2 ซึ่งเป็นกลุ่มเครื่องมือเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเทคโนโลยีกล้อง RealSense อาศัยหลักการ Stereovision ร่วมกับโปรเจคเตอร์อินฟราเรด (IR Projector) ในการสร้างข้อมูลความลึก (Depth Image)

สุดท้าย ในด้านการนำเสนอผลลัพธ์และการโต้ตอบกับใช้งาน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Streamlit ในการสร้างเว็บแอปพลิเคชัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการประยุกต์ใช้ Streamlit ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และการแพทย์ เพื่อพัฒนาเครื่องมือที่เน้น

"ความสามารถในการใช้งานทางคลินิกและความสะดวกในการเข้าถึง" (clinical usability and ease of access) สำหรับการแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลหรือแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ที่มีความซับซ้อน [3]

3. วิธีการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบการวัดที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบเดิม โดยใช้เวอร์เนียร์

3.1. ขั้นตอนการทดลอง

พัฒนา Application เพื่อวัดขนาดของเมล็ดอาหารสัตว์เลี้ยงด้วยการใช้โปรแกรม ทำงานร่วมกับ กล้องแบบระยะ (Depth Camera) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดของมนุษย์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1. ข้อมูลภาพจากกล้องที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบประมวลผลภาพ (Input)

3.1.2. ระบบใช้เทคนิค Thresholding และ Contour Detection เพื่อแยกขอบวัตถุ

3.1.3. ระบบคำนวณขนาดวัตถุจากจำนวนพิกเซล แล้วแปลงเป็นหน่วยจริง (mm) โดยความหนาแน่นจากระยะจากกล้องถึงพื้นลบด้วยระยะจากกล้องถึงวัตถุ

3.1.4. นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าจริงจากเครื่องมือ เพื่อประเมินผลความถูกต้อง

ซึ่งการเปรียบเทียบซ้ำ 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งวัดแต่ละรูปแบบของอาหารแต่ละลักษณะจำนวนแบบละ 20 เม็ด (ทรงเหลี่ยม ทรงปลา ทรงหอยเชลล์) รวมเป็นครั้งละ 60 เม็ด จึงมีตัวอย่างทดลองทั้งหมด 180 เม็ด ซึ่งมีการวางจัดเรียงเป็นแถวและจัดระยะห่าง

3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1. ถาดพื้นหลังติดกับวัตถุ และ หลอดไฟ LED

11 watt จำนวน 4 หลอด

3.2.2. กล้อง Depth Camera รุ่น RealSense D435i ยี่ห้อ Intel พร้อมขาตั้ง

3.2.3. คอมพิวเตอร์ควบคุมสำหรับรับภาพและประมวลผล OS: Window 10, Intel i-7, RAM 8GB

3.2.4. เวอร์เนียร์วัดขนาด สำหรับวัดเทียบผลที่ได้จากกล้อง Depth Camera

3.2.5. Software PyCharm ในการประมวลผล

3.2.6. อาหารแมว/สุนัข รูปร่างต่างๆ 3 แบบ

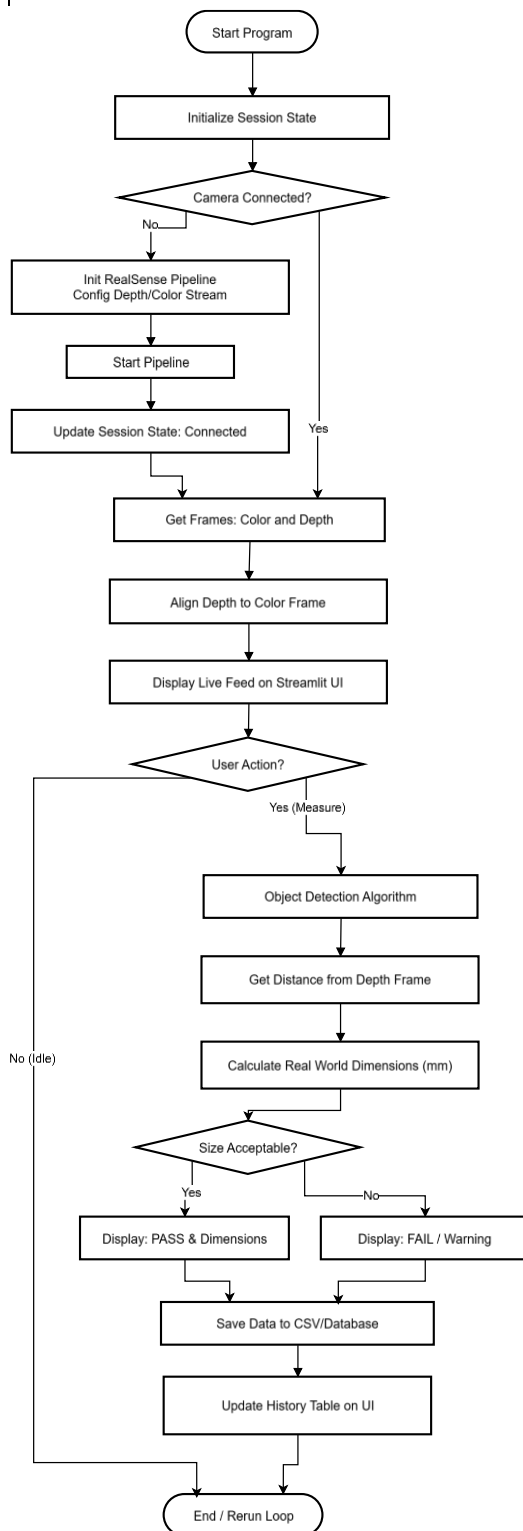


รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3. การออกแบบซอฟต์แวร์

การออกแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์นั้น จะใช้ Streamlit เป็น UI แบบ เว็บแอปพลิเคชัน สำหรับเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งหลักการทำงานทั้งหมดมีทำงานตาม Flowchart ดังรูปที่ 3 โดยออกแบบ ดังนี้

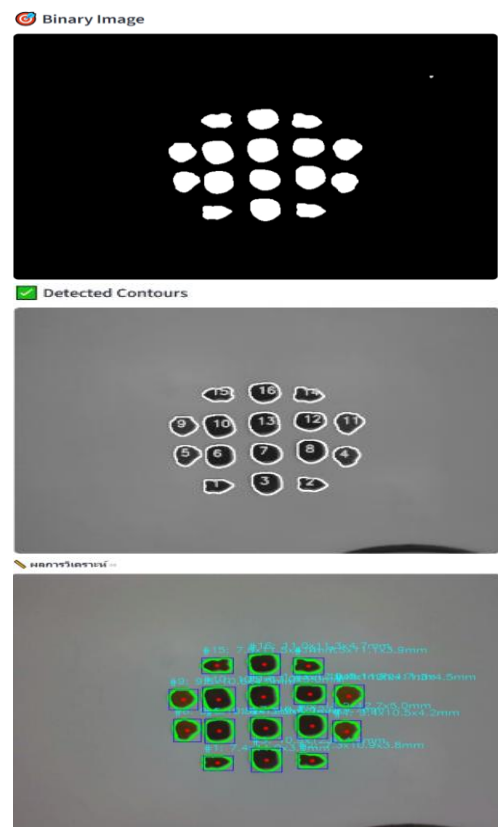
3.3.1. ด้าน side bar มีปุ่มสำหรับการเชื่อมต่อกับกล้อง มีส่วนของ slider bar สำหรับปรับ Calibration Factor มีส่วนของ slider bar ของจำนวน เม็ดอาหาร Minimum และ Maximum ที่สามารถวัดได้



รูปที่ 3 Flowchart การทำงานของ Software



รูปที่ 4 side bar และ Preview ภาพก่อนการวัดขนาด



รูปที่ 5 ตัวอย่าง Grayscale, Detect Contours และ ผลการวิเคราะห์

3.3.2. มีปุ่มในการ Preview แบบ Realtime เพื่อให้สามารถวางเมล็ดอาหารให้อยู่ในขอบเขตที่กล้องสามารถวัดได้ ดังรูปที่ 4

3.3.3. หน้าต่างแสดงผล จะมีภาพจริงที่วัดมาได้ มีรูปที่เป็น Grayscale มีภาพ contour ของเมล็ดอาหาร และมีภาพผลวิเคราะห์สุดท้ายที่ระบุ ขนาด และ ลำดับของเมล็ดอาหาร ดังรูปที่ 5

3.3.4. แสดงผลข้อมูลการวัดล่าสุด ประกอบด้วย ข้อมูล ลำดับที่ของเมล็ดอาหารที่วัดคือ ความกว้าง ความยาว ความหนา และแสดงระยะห่างของกล้องกับเมล็ดอาหารแต่ละเม็ดและพื้นที่ของแต่ละเม็ด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ตัวอย่างข้อมูลการวัด

วันเวลา	เมล็ดที่	ความกว้าง	ความยาว	ความหนา	ระยะห่าง
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
13/10/2025 8:22	1	7.21	10.87	3.8	189
13/10/2025 8:22	2	7.56	10.85	3.87	189
13/10/2025 8:22	3	10.84	12.01	4.8	187
13/10/2025 8:22	4	9.16	10.84	4.2	188
13/10/2025 8:22	5	10.28	11.73	4.62	187

3.4. ตัวอย่าง Python Library ที่ใช้ในการพัฒนา

3.4.1. Library ที่ต้องนำเข้า ดังรูปที่ 6

```
import streamlit as st
import pyrealsense2 as rs
import numpy as np
import cv2
import pandas as pd
from datetime import datetime
```

รูปที่ 6 library ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

ซึ่ง Streamlit เป็น Library สำหรับ UI เว็บแอปพลิเคชัน pyrealsense2 เป็น Library สำหรับ ติดต่อกล้อง Intel Realsense D435i numpy เป็น Library สำหรับ ข้อมูล array คำนวณ matrix cv2 เป็น Library สำหรับ ประมวลผลภาพ(Image Processing) pandas เป็น Library สำหรับ ตารางข้อมูล และ export ข้อมูล และ datetime เป็น Library สำหรับ timestamp

3.4.2. Code บางส่วนในการ เชื่อมต่อกล้อง ดังรูปที่ 7 ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อกล้องกับโปรแกรมเพื่อวัดขนาด เมล็ดอาหาร

3.4.3. Code บางส่วนที่ใช้ในการวัดขนาดของเมล็ดอาหาร โดยใช้ opencv ดังรูปที่ 8

```
st.sidebar.header("การควบคุม")
if st.sidebar.button("เชื่อมต่อกล้อง RealSense"):
    with st.spinner("กำลังเชื่อมต่อกล้อง..."):
        camera = RealSenseCamera()
        if camera.initialize():
            st.session_state.camera = camera
            st.session_state.camera_connected = True
            st.success("เชื่อมต่อกล้องสำเร็จ!")
        else:
            st.error("ไม่สามารถเชื่อมต่อกล้องได้")

if st.sidebar.button("หยุดกล้อง") and st.session_state.camera_connected:
    if hasattr(st.session_state, 'camera'):
        st.session_state.camera.stop()
        st.session_state.camera_connected = False
        st.success("หยุดกล้องแล้ว")

if st.session_state.camera_connected:
    st.sidebar.success("กล้องเชื่อมต่อแล้ว")
else:
    st.sidebar.error("กล้องไม่ได้เชื่อมต่อ")
st.sidebar.markdown("---")
```

รูปที่ 7 ตัวอย่างโค้ดสำหรับเชื่อมต่อกล้อง Intel RealSense D435i เพื่อเริ่มต้นการรับข้อมูลภาพ

```
# Find all contours
cnts, _ = cv2.findContours(edged.copy(),
cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

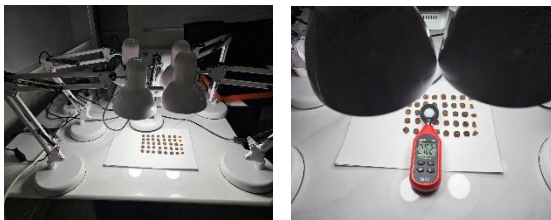
# Iterate over contours
for c in cnts:
    # Filter small contours (noise)
    if cv2.contourArea(c) < 100:
        continue

    # Get rotated bounding box and dimensions
    # rect = ((center_x, center_y), (width, height),
angle)
    rect = cv2.minAreaRect(c)
```

รูปที่ 8 ตัวอย่างโค้ดสำหรับตรวจจับขอบวัตถุและ
คำนวณขนาดเม็ดอาหารโดยใช้ OpenCV

3.5 การออกแบบโครงสร้างแบบอุปกรณ์

ติดตั้งโคมไฟ 4 ชุด 11 Watt โดย ปรับระดับให้ได้
ความเข้มแสง 2,500 lux และวางกล้อง Intel
RealSense ไว้ตรงกลางกล้อง มีระยะห่างจากพื้นฉาก
200 mm ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การติดตั้งอุปกรณ์

การคำนวณจาก datasheet ได้ใช้ focal length
เท่ากับ 615 mm และ correction factor เท่ากับ 0.85
จะได้ pixel ต่อระยะคือ 0.276 mm/pixel จากสมการ
ที่ (1)

$$\text{pixel to mm} = \frac{(\text{depth_mm} \times 1000)}{\text{focal_length}} \times \text{correction_factor} \quad (1)$$

4. ผลการวิจัย

ทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง แรงงานคนวัด
เทียบกับ เครื่องวัด จากการทดสอบใช้กล้องในการวัด
ขนาดอาหาร โดยใช้เม็ดอาหารที่มีความแตกต่างกัน
3 รูปแบบ เทียบกับแรงงานคนวัดขนาด ดังแสดงใน
ตารางที่ 2 แสดงความถูกต้องของการวัดด้วยกล้อง
จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาเทียบกับ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์
ที่ผ่านการสอบเทียบมาแล้ว โดยมีสมการหาค่า ดังนี้
สมการหาค่าความคลาดเคลื่อน

$$\text{Error} = \text{Actual} - \text{Measure} \quad (2)$$

สมการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาด (error)

$$\text{Error\%} = \frac{\text{Actual} - \text{Measure}}{\text{Actual}} \times 100 \quad (3)$$

สมการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง

$$\text{Accuracy\%} = 100 - \text{Error\%} \quad (4)$$

ตารางที่ 2

แสดงค่าข้อมูลการวัดด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนา

วันเวลา	เม็ด ที่	ความ กว้าง (mm)	ความ ยาว (mm)	ความ หนา (mm)	ระยะ ห่าง (mm)
13/10/2025 8:22	1	7.21	10.87	3.8	189
13/10/2025 8:22	2	7.56	10.85	3.87	189
13/10/2025 8:22	3	10.84	12.01	4.8	187
13/10/2025 8:22	4	9.16	10.84	4.2	188
13/10/2025 8:22	5	10.28	11.73	4.62	187
13/10/2025 8:22	6	9.66	11.12	4.36	189
13/10/2025 8:22	7	10.96	12.5	4.93	186
13/10/2025 8:22	8	10.73	12.45	4.87	187
13/10/2025 8:22	9	10.08	11.64	4.56	186
13/10/2025 8:22	10	9.91	10.32	4.25	189

ตารางที่ 3

แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดด้วย
ซอฟต์แวร์เทียบกับ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

ลักษณะเม็ด		ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (mm)		
		ความกว้าง	ความยาว	ความหนา
ทรงเหลี่ยม		-0.585	-0.8075	-0.295
ทรงปลา		-0.38	-0.9125	-0.0475
ทรงหอยเชลล์		-0.8625	-0.5525	-0.235
รวมคลาดเคลื่อนเฉลี่ย		-0.609	-0.7575	-0.1925

เมื่อได้ผลที่วัดจากซอฟต์แวร์จะนำมาเปรียบเทียบกับ การวัดด้วยเวอร์เนียร์ซึ่งจะเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบซอฟต์แวร์ที่สร้างมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1 mm ในทุกลักษณะการวัดค่าและในทุกทรงของเม็ด และทำให้ทราบว่าแต่ละทรงมีจุดวัดที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงต่างกัน และเมื่อใช้สมการที่ (3) และ (4) เพื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวัดของแต่ละประเภทการวัดและแต่ละรูปทรงจะได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4

แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ของการวัดด้วย
ซอฟต์แวร์เทียบกับ เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

ลักษณะเม็ด		% ความถูกต้อง		
		ความกว้าง	ความยาว	ความหนา
ทรงเหลี่ยม		92.14	95.54	94.00
ทรงปลา		95.18	92.35	95.62
ทรงหอยเชลล์		93.33	93.90	91.25
%ความถูกต้องเฉลี่ย		93.55	93.93	93.62

5. การอภิปรายผล

จากการทดสอบระบบซอฟต์แวร์ที่นำเสนอพบว่าสามารถทำงานได้จริง โดยมีประสิทธิภาพโดยรวม ที่มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องรวมของทั้ง 3 มิติ (กว้าง, ยาว, หนา) อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกันมาก คือ ประมาณ 93.55% - 93.93% นี้แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าจะวัดได้เล็กกว่าจริง (จากตารางที่ 3) แต่สัดส่วนความผิดพลาดนั้นค่อนข้างคงที่และเชื่อถือได้

ประสิทธิภาพจำแนกตามรูปทรง ทรงปลามีความแม่นยำในด้าน “ความหนา” สูงที่สุดถึง 95.62% แต่มีความแม่นยำด้าน “ความยาว” ต่ำที่สุดในกลุ่ม (92.35%) อาจเป็นเพราะรูปทรงปลามีความโค้งมนที่หางหรือหัว ทำให้ซอฟต์แวร์ระบุจุดปลายสุดได้ยากกว่าทรงเหลี่ยมมีความสมดุลของความแม่นยำดีที่สุด (ค่าเฉลี่ยเกาะกลุ่มกันดี) เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตที่ชัดเจนทำให้ Edge Detection ทำงานได้ง่าย แต่คะแนนด้านความกว้างยังมีค่าน้อยที่สุด ส่วนทรงหอยเชลล์เป็นทรงหอยากที่สุดสำหรับการวัดด้วยซอฟต์แวร์ไม่มีคะแนนด้านไหนสูงเป็นพิเศษจำเป็นต้องหาอัลกอริทึมอื่นๆ และการปรับแสงเงา มาช่วยในการวัดขนาดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่านี้ อีกข้อสังเกตหนึ่งเรื่องระบบมี Bias ในลักษณะ Underestimation (วัดได้ค่าน้อยกว่าจริงประมาณ 0.2 - 0.7 mm) พบในทุกๆ การวัด ซึ่งเป็นช่องว่างให้สามารถพัฒนาต่อยอดในอนาคตได้อีก

6. สรุป

จากการใช้โปรแกรมวัดขนาดเม็ดอาหารของสัตว์เลี้ยงที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ และสามารถวัดขนาดได้หลายชนิด รูปแบบขึ้นอยู่กับความคมชัดของภาพที่ได้ ซึ่งในกรณีที่ภาพต้นแบบคมชัดโปรแกรมจะ

สามารถประมวลผล คือ วัดขนาด ความกว้าง ความยาว ความหนา และ มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 93.55% ของความกว้าง 93.93% ของความยาว และ 93.62% ของความหนา เมื่อเทียบกับการวัดขนาดด้วยแรงงานคนได้อย่างรวดเร็วกว่า เนื่องจากขั้นตอนที่น้อยกว่าการวัดด้วยแรงงานคน แต่ยังมีข้อจำกัด คือ การต้องเตรียมอุปกรณ์และการจัดวางทำให้ทำงานได้ช้ากว่าอุปกรณ์เกรดอุตสาหกรรม จึงเป็นแนวทางสำหรับการวัดเบื้องต้น

7. งานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ทีมงานวิจัยอาจจะมุ่งเน้นการเปลี่ยนไปใช้อัลกอริทึม Deep Learning เช่น Instance Segmentation เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดรูปทรงที่ซับซ้อนและแก้ปัญหาวัตถุซ้อนทับ พร้อมทั้งปรับปรุงระบบแสงสว่างเพื่อลดเงา นอกจากนี้ ควรพัฒนาระบบให้สามารถทดสอบบนสายพานลำเลียงแบบเคลื่อนที่ (Dynamic Test) และขยายขีดความสามารถในการตรวจสอบคุณภาพด้านอื่นๆ เช่น สี หรือการปนเปื้อน เพื่อนำไปสู่การบูรณาการกับระบบคัดแยกอัตโนมัติ (Automated Sorting)

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] เกตินิกี ศศิธร. แนวโน้มอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เลี้ยงไทย. ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2567;4:1–3.
- [2] Bravi L, Murmura F, Santos G. The ISO 9001:2015 quality management system standard: companies' drivers, benefits and barriers to its implementation. Qual Innov Prosper. 2019;23(2):65–7.

- [3] Buga R, et al. Streamlit application and deep learning model for brain metastasis monitoring after Gamma Knife treatment. Biomedicines. 2025;13(2):423.
- [4] Xin G, et al. Error analysis of green pellet size distribution measurement on conveyor belt. ISIJ Int. 2024.
- [5] Microtrac. CAMSIZER 3D [product datasheet]. 2023.
- [6] Miranda JC, et al. Assessing automatic data processing algorithms for RGB-D imaging-based apple fruit size and weight prediction. Comput Electron Agric. 2023.
- [7] Gené-Mola J, et al. Assessing the performance of RGB-D sensors for 3D fruit crop canopy characterization. Sensors. 2020.
- [8] Ljungqvist MG, Nielsen ME, Ersbøll BK, Frosch S. Image analysis of pellet size for a control system in industrial feed production. PLoS One. 2011;6(10):e26492.
- [9] Ma W, Wang L, Jiang T, Yang A, Zhang Y. Overlapping pellet size detection method based on marker watershed and GMM image segmentation. Metals. 2023;13(2):327.

- [10] สันติภาพ สัตย์ธรรมรังษี, อรุณา พราโมต.
การจำแนกขนาดแก้วมังกรสายพันธุ์ขาว
เวียดนามด้วยภาพถ่ายโดยใช้เทคนิคการ
ประมวลผลภาพและโครงข่ายประสาทเทียม
แบบคอนโวลูชัน. วารสารวิจัยและพัฒนา
โดยองค์กรฯ ในพระบรมราชูปถัมภ์.
2567;19(1):18–9.
- [11] สิริวิทย์ เดชอริราช. การทำนายระดับความ
สูงของผลอะโวคาโดด้วยวิธีการประมวลผล
ภาพ [วิทยานิพนธ์]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2566.
- [12] นนินทร พัฒนชัย, สัน นามตะคุ, ศศิน เทียน
ดี. การจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การ
ประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน.
วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
2568;20(2):166–7.
- [13] Hoang ML. Object size measurement
and camera distance evaluation for
electronic components using fixed-
position camera. Sanderman Publishing
House. 2023;2(1):1–2.
- [14] Ji X, Wang M, Wang W, Liu Q.
Enhancing small object detection for
HCI: BRA-YOLO algorithm with
RealSense 3D trajectory tracking.
Franklin Open. 2025;100325.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติ
ตามระดับคาร์บอนไดออกไซด์

Self-Adjusting Greenhouse System for Black Oyster Mushroom Cultivation Using
Automatic CO₂ Responsive Ventilation Control

จาริณี จงปลื้มปิติ¹⁾, วารีย์ ศรีสอน¹⁾, พีรณัฐ อันสุรีย์¹⁾,
ทยาวิทย์ หนูบุญ¹⁾, ดารณีย์ เป็ล้องสันเทียะ²⁾ และ พลเทพ เวงสูงเนิน^{1)*}
Jarinee Jongpluempiti¹⁾, Waree Srison¹⁾, Peeranat Ansuree¹⁾,
Thayawee Nuboon¹⁾, Daranee Plueangsantia²⁾ and Ponthep Vengsungnle^{1)*}

¹⁾สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตรอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

²⁾สาขาสังคมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹⁾Department of Smart Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering and Technology

²⁾Department of Social Sciences, Faculty of Science and Liberal Arts

Rajamangala University of Technology Isan

Received: 28 November 2025

Revised: 15 December 2025

Accepted: 20 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ที่สามารถควบคุมการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศโดยอัตโนมัติตามระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโรงเรือน โดยอาศัยเซ็นเซอร์แบบไม่กระจายรังสีอินฟราเรดร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบอินเทอร์เน็ทของสรรพสิ่งเพื่อเก็บข้อมูลและสั่งการแบบเรียลไทม์ การทดลองดำเนินการในโรงเรือนสองรูปแบบ ได้แก่ โรงเรือนที่ไม่มีระบบระบายอากาศและโรงเรือนที่มี

ระบบระบายอากาศอัตโนมัติ โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ CO₂ ตำแหน่งกึ่งกลางโรงเรือนเพื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของก๊าซในสภาวะจริง การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ t-test พบว่าระดับ CO₂ เฉลี่ยภายในโรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศอยู่ที่ 727.61 ppm ซึ่งต่ำกว่าสภาวะที่ไม่มีระบบระบายอากาศ (1,198.30 ppm) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และลดลงประมาณ 39.3% พร้อมลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก 348.8 เป็น 85.5 ppm สะท้อนถึงเสถียรภาพของสภาพแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นกว่า 4 เท่า การวิเคราะห์เชิงเวลาแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาความเข้มข้น CO₂ ให้อยู่ในช่วง 700–1,000 ppm ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมดำทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ผลการศึกษาชี้ชัดว่าระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือน ลดภาระแรงงาน และยกระดับกระบวนการเพาะเห็ดสู่ระบบเกษตรอัจฉริยะที่มีความแม่นยำและยั่งยืน

คำสำคัญ: โรงเรือนอัจฉริยะ การเพาะเห็ดนางรมดำ การควบคุมการระบายอากาศอัตโนมัติ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This study aimed to develop an adaptive smart greenhouse system for oyster mushroom cultivation capable of automatically controlling ventilation based on carbon dioxide concentration. The system utilized a Non-Dispersive Infrared sensor integrated with a microcontroller and an Internet of Things (IoT) platform to collect real-time data and actuate the ventilation mechanism. Experiments were conducted in two identical mushroom houses: one without a ventilation system and another equipped with an automatic ventilation control system. A CO₂ sensor was installed at the central position of each house to monitor the environmental concentration under actual cultivation conditions. Statistical analysis using a paired sample t-test revealed that the average CO₂ concentration inside the greenhouse with automatic ventilation was 727.61 ppm, significantly lower than the 1,198.30 ppm measured in the unventilated house ($p < 0.05$). The system effectively reduced CO₂ accumulation by approximately 39.3% and decreased the standard deviation from 348.8 ppm to 85.5 ppm, indicating over fourfold improvement in environmental stability. Time-series analysis showed that the system consistently maintained CO₂ levels between 700–1,000 ppm, which is optimal for oyster mushroom growth throughout day and night cycles. These results confirm that the developed automated control system enhances environmental stability, reduces labor demand, and provides a reliable and sustainable solution for precision mushroom cultivation under the concept of smart agriculture.

Keywords: oyster mushroom cultivation: automatic ventilation control: carbon dioxide: smart greenhouse: Internet of Things

*ติดต่อ: ponthep.ve@rmuti.ac.th

1. บทนำ

เห็ดนางรมดำ (Pleurotus ostreatus var. columbinus) เป็นหนึ่งในเห็ดเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศเขตร้อน และสามารถเพาะเลี้ยงได้ตลอดทั้งปี การเจริญเติบโตของเห็ดได้รับอิทธิพลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสง และองค์ประกอบของอากาศในโรงเรือน โดยเฉพาะความเข้มข้นของออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาและรูปร่างของเห็ดในแต่ละระยะการเจริญเติบโต [1-3] ผลผลิตและคุณภาพของเห็ดยังมีความไวต่อสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะความเข้มข้น CO_2 ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการพัฒนาโครงสร้างของดอกเห็ด ความเข้มข้นของ CO_2 สูงมีผลต่อรูปร่างของดอกเห็ด โดยทำให้หมวกเห็ด (pileus) ไม่พัฒนาเต็มที่ และก้านเห็ด (stipe) ยาวเรียวผิดปกติ จากการศึกษา ก่อนหน้าพบว่าระดับ CO_2 ที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมทั่วไปในระยะบ่มเส้นใยอยู่ที่ประมาณ 5,000–10,000 ppm ขณะที่ระยะเปิดดอกควรควบคุมให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 1,000 ppm เพื่อให้ได้หมวกเห็ดที่มีรูปร่างสมบูรณ์ เนื่องจาก CO_2 ส่งผลอย่างเด่นชัดต่อเห็ดในช่วงระยะต้นของการพัฒนา [4] มีงานวิจัย รายงานว่าหากในช่วงเจริญเติบโตของดอกเห็ดมีปริมาณ CO_2 ที่สูงเกิน 1,200 ppm ส่งผลเสียต่อ

คุณภาพเห็ด เช่น ทำให้เนื้อเห็ดนุ่มลงและเพิ่มการเกิดสีน้ำตาล [5] หรือการกระจายสปอร์ลดลง และเกิดการชะงักของกระบวนการสร้างดอก ส่งผลให้ผลผลิตและคุณภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษามลกระทบของ CO_2 ต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของเห็ดนางรมดำ (Pleurotus ostreatus) เป็นประเด็นสำคัญในสาขาวิชาวิทยาเห็ดและเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยง เนื่องจาก CO_2 มีบทบาทโดยตรงต่อกระบวนการสรีรวิทยา การสังเคราะห์โปรตีน และการสร้างโครงสร้างผลผลิตของเห็ด งานวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 2021-2025 พบว่ามีการพัฒนาความรู้ในเชิงกลไกทางสรีรวิทยาและเทคนิคการเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ยังพบช่องว่างขององค์ความรู้หลายด้านที่สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาองค์ความรู้เชิงลึกและประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะได้ เห็ดเป็นสิ่งมีชีวิตกลุ่ม heterotroph หมายถึง ไม่สามารถสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารได้เหมือนพืช แต่จะใช้ออกซิเจน (O_2) จากอากาศและปล่อย CO_2 ออกมาในกระบวนการเมแทบอลิซึม เห็ดจึงจัดอยู่ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่หายใจได้ และ CO_2 ที่พบในโรงเพาะส่วนใหญ่ไม่ได้มาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่เกิดจากกระบวนการหายใจของเห็ดเอง ส่วนที่ทำหน้าที่หายใจมากที่สุดคือ เส้นใยไมซีเลียม (mycelium) ซึ่งย่อยสลายวัสดุเพาะ เช่น ขี้เลื่อย ฟางข้าว หรือรำข้าว เพื่อดึงพลังงานมาใช้ในการเจริญเติบโต ในกระบวนการย่อยสลายดังกล่าวจะเกิด

การปล่อย CO_2 ออกมาจำนวนมาก โดยเฉพาะใน ระยะที่ไม่ซีเลียมเติบโตเร็วที่สุด ระดับ CO_2 ภายในโรง เพาะหรือโรงเรือนสามารถเพิ่มขึ้นเกิน 5,000 ppm ได้ ภายในไม่กี่ชั่วโมง หากไม่มีการระบายอากาศ

งานวิจัยเชิงปริมาณระบุว่า เห็ดนางรมดำสามารถ ผลิต CO_2 ได้เฉลี่ย 0.9–1.3 กิโลกรัมต่อเห็ดสด 1 กิโลกรัม ที่เก็บเกี่ยว และจากการวัดอัตราการหายใจ พบว่า เห็ดจะใช้ออกซิเจนประมาณ 135–319 $\text{mlO}_2/\text{kg}\cdot\text{h}$ และปล่อย CO_2 ประมาณ 165–336 $\text{mlCO}_2/\text{kg}\cdot\text{h}$ โดยมีความแปรผันตามอุณหภูมิและ อัตราการเจริญเติบโตของเห็ด [9] CO_2 ภายในโรง เพาะเห็ดจึงมีแหล่งกำเนิดหลักสองประการ ได้แก่ จาก เห็ดเอง ซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจของเส้นใยและ ดอกเห็ด จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในวัสดุเพาะ โดยมีจุลินทรีย์อื่นช่วยย่อยร่วมด้วย ในช่วงเจริญของ เส้นใย (spawn run) เห็ดต้องการระดับ CO_2 ค่อนข้าง สูง เพื่อส่งเสริมการเจริญของเนื้อเยื่อและการขยาย เส้นใย แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงออกดอก (fruiting stage) ต้อง รักษาระดับ CO_2 ให้อยู่ในช่วง 700–1,000 ppm เพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดก้านเห็ดยาว หมวกเล็ก หรือรูปร่าง บิดเบี้ยว อย่างไรก็ตามการควบคุมระดับ CO_2 ในโรงเรือน เพาะเห็ดของเกษตรกรไทยส่วนใหญ่ยังคงอาศัยการ เปิด-ปิดประตูหรือช่องระบายอากาศด้วยมือ ซึ่งไม่ สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซใน เวลาเฉพาะได้ทันที ทำให้ระดับ CO_2 ผันผวน และ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลผลิตโดยรวม นอกจากนี้ ยังเพิ่มภาระด้านแรงงานและพลังงานโดยไม่จำเป็น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แนวคิดโรงเรือนอัจฉริยะ (Smart Greenhouse) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) และระบบควบคุมอัตโนมัติ

(Automation Control System) เพื่อจัดการสภาวะ แวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการระบาย อากาศแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวน มากมุ่งเน้นที่การเพาะพืชผักหรือไม้ผล ขณะที่งาน ด้านโรงเรือนเพาะเห็ด โดยเฉพาะเห็ดนางรมดำในเขต ร้อน ยังคงมีช่องว่างด้านการพัฒนาเทคโนโลยีควบคุม ระดับ CO_2 แบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำและ เหมาะสมกับสภาพโรงเรือนไทย แสงเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ควบคุมการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงแบบ diurnal (กลางวัน-กลางคืน) ของ ความเข้มข้น CO_2 ในบรรยากาศ [6] การระบาย อากาศและระบบควบคุม การเปิดระบบระบายอากาศ หรือกำจัด CO_2 จะทำให้ความเข้มข้นลดลงเป็น ระยะเวลา [7,8]

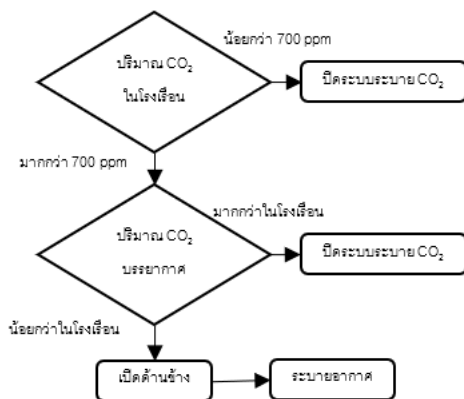
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ การพัฒนาโรงเรือน อัจฉริยะปรับตัว (Adaptive Smart Greenhouse) ที่ สามารถตรวจวัดและควบคุมการเปิด-ปิดช่องระบาย อากาศโดยอัตโนมัติ เมื่อระดับ CO_2 ภายในโรงเรือน สูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบดังกล่าวจะอาศัย เซนเซอร์ CO_2 แบบ NDIR (Non-Dispersive Infrared) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการมอเตอร์เปิด- ปิดบานพับระบายอากาศ โดยมีการบันทึกข้อมูลและ แจ้งเตือนผ่านแพลตฟอร์ม IoT เพื่อให้ผู้เพาะเห็ด สามารถตรวจสอบสถานะและปรับค่าการควบคุมได้ แบบเรียลไทม์ผ่านสมาร์ทโฟนหรือคอมพิวเตอร์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1. การปรับตั้งค่าระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้จะทำการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ และความชื้นอากาศ เซนเซอร์วัดปริมาณ CO_2 ที่มีการ ติดตั้งไว้บริเวณภายนอกและภายในโรงเรือน เพื่อวัด

ความแตกต่างระหว่างคุณภาพอากาศภายในและภายนอกโรงเรียน หากมองในมุมมองด้านบนแล้ว ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในโรงเรียนติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของโรงเรียน สูงจากพื้นดิน 1.9 m ข้อมูลที่วัดค่าจากเซ็นเซอร์จะถูกส่งขึ้นไปยังระบบ Cloud เพื่อใช้ในการติดตามประเมินผลทั้ง 2 โรงเรียน มีจำนวนเซ็นเซอร์และระบบทั้งหมดเหมือนกัน ความแตกต่างกัน คือโรงเรียนที่ 1 จะไม่มีการสั่งให้ด้านข้างมีการเปิดปิดและไม่สั่งการให้พัดลมระบาย CO_2 ออกทางด้านข้าง ส่วนโรงเรียนที่ 2 จะมีการสั่งให้มอเตอร์เปิดปิดผนังโรงเรียนด้านข้าง และมีการสั่งพัดลมให้มีการทำงานเพื่อระบาย CO_2 เมื่อปริมาณ CO_2 ด้านในโรงเรียนมีปริมาณสูงกว่า 700 ppm และมีปริมาณสูงกว่าด้านนอก แต่ถ้าหากมีปริมาณ CO_2 ที่ต่ำกว่าด้านนอกระบบจะไม่มีการเปิด เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มปริมาณ CO_2 ในโรงเรียน ให้เพิ่มมากขึ้น โดยเงื่อนไขในการสร้างระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



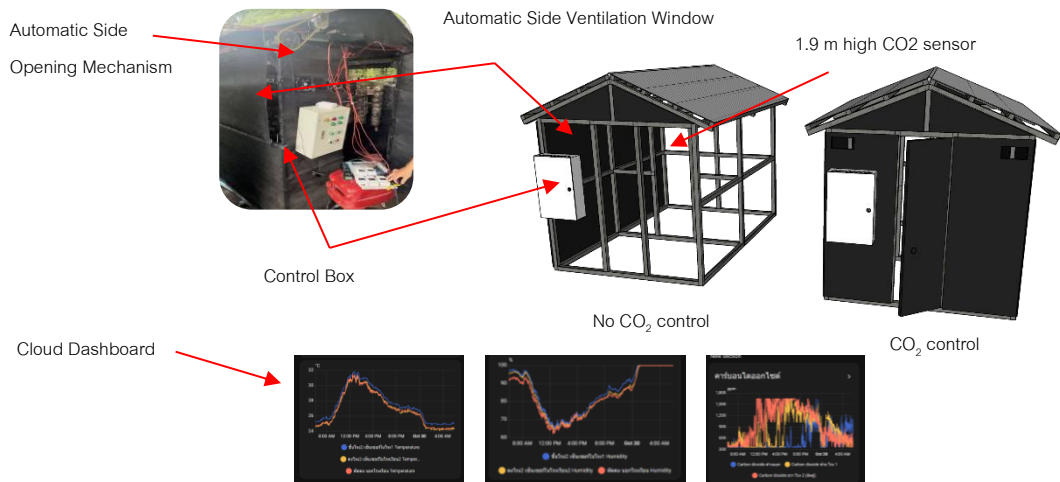
รูปที่ 1 เงื่อนไขการเปิดระบบระบาย CO_2

2.2. การติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงเรียน

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นโรงเรียน กลไก การติดตั้งระบบควบคุม และตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ติดตั้ง โดยโรงเรียนที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้างยาวสูงเท่ากับ 2.00 m x 3.00 m x 2.50 m ตามลำดับ ด้านข้างสามารถเปิดปิดได้ด้วยกลไกที่มีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ สามารถสั่งให้เปิดปิดได้ผ่านระบบ IoT ระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ เซ็นเซอร์วัดปริมาณ CO_2 โดยส่งข้อมูลที่ได้ขึ้นระบบ Cloud เพื่อใช้ในการติดตามประเมินผล การศึกษาจะแบ่งโรงเรียนออกเป็น 2 โรงเรียน โรงเรียนที่ 1 จะไม่มีการเปิดปิดด้านข้างของโรงเรียนเพื่อระบาย CO_2 ส่วนโรงเรียนที่ 2 จะมีระบบนี้ ส่วนระบบการให้น้ำจะมีการกำหนดเงื่อนไขเหมือนกัน คือให้น้ำเข้า และเย็น โดยมีการให้น้ำในเวลา 7:00 และเวลา 17:00 น. มีอัตราการให้น้ำประมาณ 30 ml/time/bag ในโรงเรียนเพาะเห็ด 500 ก้อน

2.3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่า CO_2 ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในและภายนอกโรงเรียนเพาะเห็ดนางรมดำ เพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติของโรงเรียนให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ CO_2 ได้อย่างเหมาะสมต่อการเจริญของเส้นใยและดอกเห็ด เซ็นเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของโรงเรียนเพาะเห็ดจำนวน 1 จุดต่อโรงเรียน



รูปที่ 2 โรงเรียนที่ไม่มี และมีระบบไหลเวียนอากาศตามระดับของ CO₂

เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนของบรรยากาศภายในโดยรวม และติดตั้งอีก 1 จุดภายนอกโรงเรียน เพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะแวดล้อมภายนอก การเก็บข้อมูลดำเนินการในระยะเวลา 1 นาทีต่อครั้ง ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 14 วัน โดยข้อมูลทั้งหมดถูกส่งเข้าสู่ระบบฐานข้อมูล IoT ผ่านเครือข่าย Wi-Fi เพื่อจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์ภายหลังด้วยโปรแกรมทางสถิติ

ระดับ CO₂ ทั้งภายในและภายนอกโรงเรียนจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าทางสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ Mean หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลซึ่งแสดงค่ากลางโดยรวม ส่วน Standard Error เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยที่บ่งบอกความแม่นยำของการประมาณค่าเฉลี่ย, Median คือค่ากึ่งกลางของข้อมูล, Mode คือค่าที่พบมากที่สุด, Standard Deviation และ Sample Variance แสดงระดับการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย, Kurtosis และ Skewness ใช้บ่งบอกรูปร่างของการกระจายข้อมูลว่า

มีความโด่งหรือเบ้ไปด้านใด, Range คือ ช่วงความแตกต่างระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด, Minimum และ Maximum คือค่าต่ำสุดและสูงสุดที่พบในชุดข้อมูล, Sum คือผลรวมทั้งหมดของข้อมูล, Count คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ และ Confidence Level (95%) คือ ช่วงค่าที่คาดว่าค่าเฉลี่ยจริงของประชากรจะอยู่ในนั้นด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งหมดนี้ช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของข้อมูลในเชิงแนวโน้ม การกระจาย ความสมมาตร และความน่าเชื่อถือก่อนทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติได้อย่างถูกต้อง

เพื่อประเมินความแตกต่างของระดับ CO₂ ระหว่างภายในและภายนอกโรงเรียน ใช้วิธีทดสอบสมมติฐานด้วย t-test ทางเดียว (One-tailed test) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลเทียบกับความผันผวนของข้อมูลในกลุ่มนั้นๆ โดยอิงกับการแจกแจงแบบ t ของ Student (Student's t-distribution) [10] โดยคำนวณได้จากสมการที่ (1)

โดยที่ $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ หมายถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองกลุ่ม S_p หมายถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม n_1 และ n_2 หมายถึงจำนวนข้อมูลแต่ละกลุ่ม [11,12]

การทดสอบสถิติมีการกำหนดตามสมมติฐานที่ว่า การมีระบบระบายอากาศจะช่วยลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรียนให้ต่ำลงจากกรณีที่ไม่มีการระบายอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าเฉลี่ย CO_2 ภายในโรงเรียนที่มีระบบระบายเท่ากับภายในโรงเรียนที่ไม่มีระบบระบาย

H_1 : ค่าเฉลี่ย CO_2 ภายในโรงเรียนที่มีระบบระบายน้อยกว่าภายในโรงเรียนที่ไม่มีระบบระบาย

กำหนดความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อใช้ในการตรวจสอบถึงความแตกต่างของระดับ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 18.00–06.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่การระบายอากาศลดลงและมีการสะสมของ CO_2 ภายในมากที่สุด

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

3. ผลการศึกษา

จากรูปที่ 1 แสดงแนวโน้มระดับ CO_2 ที่แสดงในช่วงเวลาต่อเนื่องหลายวัน สามารถสังเกตได้ว่าการมีหรือไม่มีระบบระบายอากาศส่งผลต่อความเข้มข้นของ CO_2 ภายในโรงเรียนอย่างชัดเจน เส้นสีน้ำเงินซึ่งแทนสถานะที่ไม่มีระบบระบายอากาศมีลักษณะยอดแหลมขึ้นเป็นคาบ โดยค่าจะเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงกลางวันจนแตะระดับกว่า 2,000 ppm และค่อยๆ

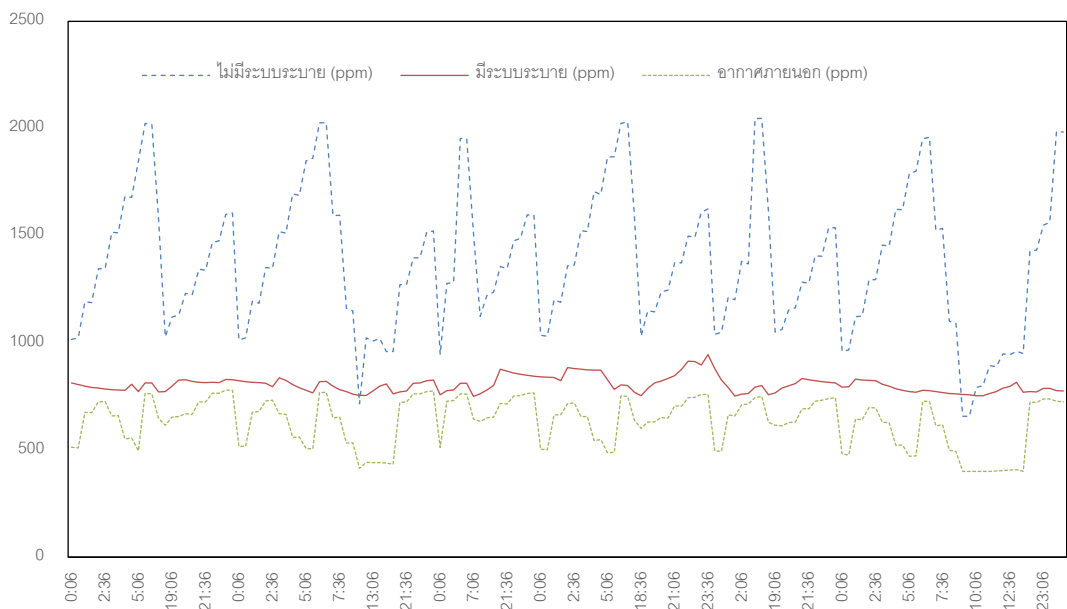
ลดลงในช่วงกลางวัน สะท้อนให้เห็นถึงการสะสมของ CO_2 จากการหายใจของเห็ดนางรมดำโดยไม่มีการถ่ายเทอากาศ ส่งผลให้บรรยากาศภายในโรงเรียนอยู่ในสภาพไม่เสถียร ส่วนเส้นสีส้มซึ่งแทนสถานะมีระบบระบายอากาศอัตโนมัติมีความราบเรียบและค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วงประมาณ 600–850 ppm โดยมีการแกว่งตัวอย่างสม่ำเสมอ แสดงถึงการตอบสนองของระบบควบคุมที่ทำงานตามค่าที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ ผลการวิเคราะห์พบว่าในช่วงเวลากลางคืน ค่า CO_2 ภายในโรงเรียนมีค่ามากกว่าภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่เห็ดนางรมดำมีการหายใจและปล่อย CO_2 สูงสุด และในช่วงกลางวันเมื่อระบบพัดลมระบายอากาศทำงาน ค่า CO_2 ภายในจะลดลงจนใกล้เคียงกับค่าภายนอก

เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นสีเขียวซึ่งเป็นอากาศภายนอกโรงเรียนจะเห็นว่าค่ามีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติระหว่าง 400–800 ppm โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเวลากลางคืนและลดลงในช่วงกลางวัน อันเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและการหายใจของสิ่งมีชีวิตโดยรอบ ความแตกต่างของระดับ CO_2 ระหว่างภายในและภายนอกในกรณีที่มีระบบระบายอากาศจึงอยู่ในระดับเหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ ซึ่งอยู่ในช่วง 700–1,000 ppm ข้อมูลจากกราฟจึงยืนยันว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถรักษาสมดุลของบรรยากาศภายในให้คงที่ ลดการสะสมของ CO_2 ที่เกินค่ามาตรฐานและสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า CO_2 ในบรรยากาศ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละวัน โดยภายในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีมลพิษ ค่าความเข้มข้นของ CO_2 จะต่ำสุดประมาณ 398.73 ppm ในช่วงเที่ยงวัน และสูงสุดประมาณ 779.21 ppm ในช่วงเที่ยงคืนถึงเช้ามืดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8,13] ระบบระบายอากาศช่วยลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรือนได้ประมาณ 39.3% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ระบายอากาศและยังคงมีค่ามากกว่าอากาศภายนอกเพียงราว 171 ppm ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ลดลงจาก 348.8 ไปเป็น 85.5 ppm เมื่อใช้ระบบระบายอากาศ แสดงว่า ระบบควบคุมสามารถรักษาสีเขียวภาพของ CO_2 ภายในโรงเรือนได้ถึง 4 เท่า ซึ่งถือว่าดีกว่าเดิม ระบบระบายอากาศช่วยให้รูปแบบ

การกระจายของข้อมูลเปลี่ยนจากเบ้ขวาไปเป็นสมมาตรซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถป้องกันการสะสมของ CO_2 เกินค่ากำหนดได้อย่างต่อเนื่องผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่า ระบบระบายอากาศอัตโนมัติสามารถลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงจาก 1,198.3 ppm เหลือเพียง 727.6 ppm และมีช่วงความเชื่อมั่นที่แคบที่สุด (± 9.4 ppm) เมื่อเทียบกับสถานะไม่มีการระบายอากาศ (± 38.3 ppm) และอากาศภายนอก (± 13.6 ppm) สะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมบรรยากาศภายในโรงเรือน ซึ่งสามารถรักษาระดับ CO_2 ให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมดำได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพสูง



รูปที่ 1 ปริมาณ CO_2 ของตำแหน่งข้างอิง

ตารางที่ 1

ค่าสถิติในการศึกษา

	ไม่มีระบบระบาย (ppm)	มีระบบระบาย (ppm)	อากาศภายนอก (ppm)
Mean	1198.300187	727.6056698	556.1229595
Standard Error	19.46882662	4.772575863	6.90042102
Median	1119.73	735.9	532.9
Mode	#N/A	772.09	398.73
Standard Deviation	348.8127039	85.50772596	123.631206
Sample Variance	121670.3024	7311.571199	15284.67509
Kurtosis	-0.490357257	-0.867006496	-1.385459433
Skewness	0.668446831	-0.125354219	0.2406923
Range	1407.94	411.42	379.21
Minimum	639.22	533.47	398.73
Maximum	2047.16	944.89	779.21
Sum	384654.36	233561.42	178515.47
Count	321	321	321
Confidence Level (95.0%)	38.30306633	9.389589491	13.57592264

ผลการทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ t-test แบบจับคู่ (Paired Sample) พบว่าค่าเฉลี่ยของ CO₂ ภายในโรงเรือนที่ไม่มีระบบระบายอากาศเท่ากับ 1,198.30 ppm ในขณะที่โรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศมีค่าเฉลี่ยเพียง 727.61 ppm จากข้อมูลทั้งหมด 321 คู่ พบค่า t Stat = 26.9163 ซึ่งมากกว่าค่า t Critical (one-tail) = 1.6493 อย่างมาก และมีค่า p-value = 1.68×10^{-84} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าระดับ CO₂ ในโรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีระบบระบายอากาศอย่างชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบระบายอากาศอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงในการลดการสะสมของ CO₂ ภายในโรงเรือนและช่วยรักษาสภาวะบรรยากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนา ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติตามระดับ CO₂ โดยใช้เซ็นเซอร์ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบ IoT เพื่อควบคุมการระบายอากาศตามค่าที่ตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนที่มีและไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับ CO₂ เฉลี่ยจาก 1,198.30 ppm เหลือเพียง 727.61 ppm หรือลดลงประมาณ 39.3% พร้อมทั้งลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก 348.8 ppm เหลือ 85.5 ppm ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของบรรยากาศภายในที่เพิ่มขึ้นกว่า 4 เท่า ผลการทดสอบทางสถิติแบบ t-test ให้ค่า p-value = 1.68×10^{-84} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยืนยันว่าการมีระบบระบายอากาศ

ช่วยลดการสะสมของ CO₂ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเวลาแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระดับก๊าซตลอดรอบวัน โดยรักษาความเข้มข้นให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน นอกจากนี้ระบบยังสามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องอาศัยแรงงานคน ช่วยลดความผันผวนของสภาพแวดล้อมภายในและเพิ่มประสิทธิภาพของการเพาะเห็ดเชิงพาณิชย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม แต่อย่างไรก็ตามหากมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงอาจจะจำเป็นต้องมีการเพิ่มจุดที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณ CO₂ เพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ และควรมีการทดสอบผลผลิตของดอกเห็ดที่ได้เมื่อมีภาวะของ CO₂ ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อยืนยันว่า CO₂ ส่งผลกระทบท่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อเป็นการยกระดับกระบวนการเพาะเห็ดสู่แนวทางการเกษตรอัจฉริยะที่มีความแม่นยำ ประสิทธิภาพสูง และยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณงบประมาณสำหรับสนับสนุนงานวิจัยพื้นฐาน กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่อนุเคราะห์งบประมาณในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้พื้นที่ในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang H, Lei M, Huang L, Wang Y, Sun N, Ban L, et al. Study on the effects of environmental factors on enzyme activities during growth of *Hypsizygus marmoreus*. PLoS One. 2022;17:e0268107. doi:10.1371/journal.pone.0268107.
- [2] Tian Y, Zheng S, Zhang J, Chen Q, Zhang R. Fatty acid synthesis: a critical factor determining mycelial growth rate in *Pleurotus tuoliensis*. Food Chem Mol Sci. 2025;11:100285. doi:10.1016/j.fochms.2025.100285.
- [3] Lu CP, Liaw JJ. A novel image measurement algorithm for common mushroom caps based on convolutional neural network. Comput Electron Agric. 2020;171:105336. doi:10.1016/j.compag.2020.105336.
- [4] Sakamoto Y. Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi. Fungal Biol Rev. 2018;32:236–48. doi:10.1016/j.fbr.2018.02.003.
- [5] Zhang L, Liu Z, Sun Y, Wang X, Li L. Combined antioxidant and sensory effects of active chitosan/zein film containing α -tocopherol on *Agaricus bisporus*. Food Packag Shelf Life.

- 2020;24:100470.
doi:10.1016/j.fpsl.2020.100470.
- [6] Wei S, Han G, Jia X, Song W, Chu X, He W, et al. Tidal effects on ecosystem CO₂ exchange at multiple timescales in a salt marsh in the Yellow River Delta. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2020;238:106727. doi:10.1016/j.ecss.2020.106727.
- [7] Zender-Swiercz E. Improvement of indoor air quality by way of using decentralised ventilation. *J Build Eng.* 2020;32:101663. doi:10.1016/j.job.2020.101663.
- [8] Sinha A, Thakkar H, Rezaei F, Kawajiri Y, Realf MJ. Reduced building energy consumption by combined indoor CO₂ and H₂O composition control. *Appl Energy.* 2022;322:119526. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119526.
- [9] Rai DR, Paul S. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. *Biosyst Eng.* 2007;98:383–92. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.07.012.
- [10] Lord D. Exploratory analyses of safety data. In: *Statistical methods in crash safety analysis.* 2021. p. 389–404. doi:10.1016/B978-0-12-816818-9.00015-9.
- [11] Liang J, Yuen SY. An edge detection with automatic scale selection approach to improve coherent visual attention model. *Pattern Recognit Lett.* 2013;34:1943–51. doi:10.1016/j.patrec.2013.06.004.
- [12] Liu SC, Yang JJ, Shao KN, Chueh PJ. RNA interference targeting tNOX attenuates cell migration via a mechanism that involves membrane association of Rac. *Biochem Biophys Res Commun.* 2008;365:720–6. doi:10.1016/j.bbrc.2007.11.025.
- [13] Miracco G, Nicoletti F, Ferraro V, Kaliakatsos D. Innovative mechanical ventilation control for enhanced indoor air quality and energy efficiency. *Energy Eng.* 2025;122:1–14. doi:10.32604/ee.2025.060750.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาชุดอุปกรณ์ต้นแบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติโดยใช้ระบบตรวจจับความชื้นในดิน

Development of a prototype device for automatic plant watering using
a soil moisture detection systemกิตตินันท์ บุญศิริ เปรมฤดี ทองใบศรี ณัฐฐนิชา ประสิทธิ์เวชชากร และ สุภกิจ รูปขันธ์^{1)*}

Kittinun Bunsiri , Premrudee Thongbaisri , Natthanicha Prasitthiwetchakoon and

Supakit Roopakhun^{1)*}¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี¹⁾School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Received: 9 November 2025

Revised: 14 December 2025

Accepted: 20 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติที่สามารถทำงานตามระดับความชื้นในดินโดยอาศัยเซนเซอร์ตรวจสอบวัดความชื้น เพื่อช่วยลดภาระในการดูแลรักษาต้นไม้ของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่สามารถรดน้ำได้อย่างสม่ำเสมอ โดยต้นแบบได้รับการทดสอบกับพืชในกระถางและดินร่วนปลูกทั่วไป เพื่อประเมินความเหมาะสมของเกณฑ์ความชื้นในดินที่ใช้ควบคุมระบบ ระบบต้นแบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ไมโครคอนโทรลเลอร์ (เช่น Arduino/ESP32) และปั้มน้ำ ซึ่งควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติตามค่าความชื้นที่ตั้งไว้ล่วงหน้า เมื่อระดับความชื้นในดินต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งให้ปั้มน้ำทำงานเพื่อรดน้ำต้นไม้ และจะหยุดการทำงานเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสม วิธีการทดลองประกอบด้วยการสอบเทียบเซนเซอร์ด้วยวิธีการอบตัวอย่างดินตามมาตรฐาน ASTM D4959 และทดสอบการทำงานของระบบจริงตลอด 3 วัน โดยบันทึกค่าความชื้นทุก 30 นาที ผลการทดสอบ พบว่า ปั้มน้ำทำงานเฉลี่ยวันละ 3 ครั้ง โดยเริ่มทำงานเมื่อค่าความชื้นต่ำกว่า 12% และหยุดทำงานเมื่อความชื้นสูงถึงประมาณ 16% ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่

จ่ายต่อรอบอยู่ที่ประมาณ 85–95 มิลลิลิตร ระบบสามารถรักษาความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง และลดการใช้น้ำเกินความจำเป็น ผลลัพธ์เชิงปริมาณแสดงให้เห็นว่าสามารถลดปริมาณการใช้น้ำลงประมาณ 18–25% เมื่อเทียบกับการรดน้ำด้วยมือ และระบบสามารถตอบสนองสถานะแห้งในดินได้ภายในเวลาน้อยกว่า 30 นาที หลังค่าความชื้นลดลงถึงเกณฑ์ล่าง โครงการนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระดับครัวเรือนหรือสวนขนาดเล็ก อีกทั้งสามารถพัฒนาเพิ่มให้รองรับการควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สายหรืออุปกรณ์สมาร์ทโฟนในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ เช่น เซอร์วูดความชื้นในดิน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบควบคุมอัตโนมัติ

Abstract

This research aims to develop a prototype automatic plant-watering system that operates based on soil moisture levels measured by a soil moisture sensor. The system is designed to reduce the users' burden of plant care, particularly when regular watering is not possible. The prototype was tested using potted plants grown in loamy soil to evaluate the suitability of moisture thresholds for automatic control. The system consists of a soil moisture sensor, a microcontroller (e.g., Arduino or ESP32), and a water pump, all controlled automatically by predefined moisture thresholds. When soil moisture falls below the threshold, the system activates the water pump to irrigate the plant, and the pump stops once the moisture level reaches the upper limit. The experimental procedure included calibrating the sensor using the oven-dry method following ASTM D4959 and evaluating the prototype under real operating conditions for three consecutive days, with moisture data recorded every 30 minutes. The results show that the pump operated an average of three times per day, activating at moisture levels below approximately 12% and stopping at around 16%. Each activation delivered approximately 85–95 mL of water. Quantitative analysis indicates that the system reduced water usage by approximately 18–25% compared with manual watering while maintaining soil moisture within the desired range. The system also responded within 30 minutes of soil dryness detection. This prototype demonstrates strong potential for household or small-garden applications and can be further developed to support wireless networks or smartphone-based control for future smart farming implementations.

Keywords: Automatic Plant Watering System: Soil Moisture Sensor: Microcontroller: Automatic Control

July – December 2025; 11(2) : 34 – 43

1. บทนำ

การจัดการน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดความเจริญเติบโตและสุขภาพของพืช โดยเฉพาะในระบบการปลูกพืชกระถางซึ่งมีปริมาณดินจำกัดและมีความแปรผันของความชื้นสูง การให้น้ำที่ไม่สม่ำเสมอสามารถนำไปสู่การชะงักงันของการดูดซึมธาตุอาหารและความเสียหายของระบบราก ในขณะที่การให้น้ำมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นก่อให้เกิดภาวะน้ำขังและลดการถ่ายเทอากาศในดิน ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดโรครากเน่า ปัญหาเหล่านี้ทำให้ความสามารถในการจัดการน้ำอย่างแม่นยำเป็นความท้าทายสำคัญทั้งในระดับครัวเรือนและระบบการปลูกพืชเชิงพาณิชย์

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลข้อมูล และ IoT ทำให้ระบบรดน้ำอัตโนมัติที่อาศัยการตรวจวัดความชื้นในดินแบบเรียลไทม์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง จากรายงานจำนวนมากพบว่า sensor-driven irrigation systems สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้อย่างมีนัยสำคัญและลดความสูญเสียจากการรดน้ำไม่เหมาะสม [1-3] ในขณะเดียวกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ เช่น ESP32 ได้รับการยอมรับว่ามีศักยภาพเหมาะสมต่อระบบควบคุมที่ต้องการทั้งความต่อเนื่อง ความเสถียร และความสามารถในการเชื่อมต่อข้อมูลไร้สาย [4-5]

แม้ว่างานวิจัยด้านระบบรดน้ำอัตโนมัติจะมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง แต่การทบทวนวรรณกรรมชี้ให้เห็นว่า ยังมีประเด็นสำคัญที่ไม่ได้รับการแก้ไขอย่างเป็นระบบ ได้แก่ (1) การกำหนด threshold ความชื้นในดินมักอาศัยค่าทดลองทั่วไป โดยยังไม่เชื่อมโยงกับคุณสมบัติเฉพาะของดินและ

ความต้องการน้ำของพืชแต่ละชนิด ทั้งที่ดินแต่ละประเภทมี water-holding capacity แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (2) การสอบเทียบเซนเซอร์ความชื้นในดินยังขาดมาตรฐานเดียวกัน แม้เซนเซอร์แบบ capacitive จะเป็นที่ยอมรับเนื่องจากไม่เกิดการกัดกร่อนง่าย แต่ผลการวัดยังขึ้นกับเนื้อดิน อุณหภูมิ และปริมาณอินทรีย์วัตถุ จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนสอบเทียบที่ถูกต้อง เช่น วิธี oven-dry ตาม ASTM D4959 และ (3) ข้อมูลเชิงวิศวกรรมที่มีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบต้นแบบ เช่น ปริมาณน้ำที่จ่ายจริง ความแม่นยำของระบบ และเวลาในการตอบสนอง ยังไม่ถูกนำเสนออย่างละเอียดในงานวิจัยส่วนใหญ่

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดข้างต้น งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบระบบรดน้ำอัตโนมัติที่ใช้งานเซนเซอร์ความชื้นแบบ capacitive ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการควบคุมระดับความชื้นของดินแบบเรียลไทม์ โดยเลือกใช้พืชกระถางชนิด (ต้นบอนสี *Caladium bicolor*) ซึ่งเป็นพืชที่มีความต้องการน้ำสม่ำเสมอ และทดลองในดินร่วนปลูกสำเร็จรูป (loamy soil) ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการกักน้ำและการระบายน้ำเหมาะสมตามเกณฑ์ USDA (2017) ช่วงค่าความชื้นที่ใช้ควบคุมระบบ (12–16%) ได้รับการกำหนดจากผลการสอบเทียบเซนเซอร์ตามมาตรฐาน ASTM D4959 และการทดลองเบื้องต้นกับดินที่ใช้จริง เพื่อให้ threshold มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการกักเก็บน้ำของดินและความต้องการของพืชที่ปลูก

ต้นแบบระบบรดน้ำที่นำเสนอมีเป้าหมายเพื่อประเมินศักยภาพของระบบควบคุมบนพื้นฐานข้อมูลเชิงปริมาณ ทั้งด้านความแม่นยำของการจ่ายน้ำ

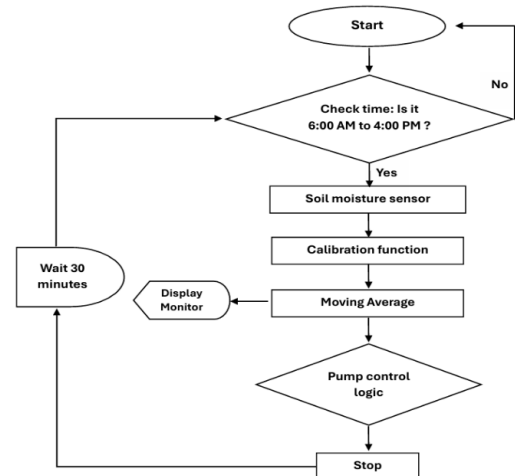
การรักษาระดับความชื้นในช่วงที่เหมาะสม และความสามารถในการลดปริมาณการใช้น้ำเมื่อเทียบกับการรดน้ำแบบดั้งเดิม ผลลัพธ์ที่น่าเสนอมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยี Smart Irrigation สำหรับการใช้งานจริงในระดับครัวเรือนและพื้นที่เพาะปลูกขนาดเล็ก ตลอดจนเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูงที่อาศัยการเชื่อมต่อเครือข่าย IoT และการประมวลผลข้อมูลในอนาคต

2. วิธีการการวิจัย

การพัฒนาระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย กระบวนการออกแบบระบบควบคุม การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดและตัดสินใจรดน้ำ การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน และการทดสอบระบบต้นแบบในสภาพแวดล้อมจริง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

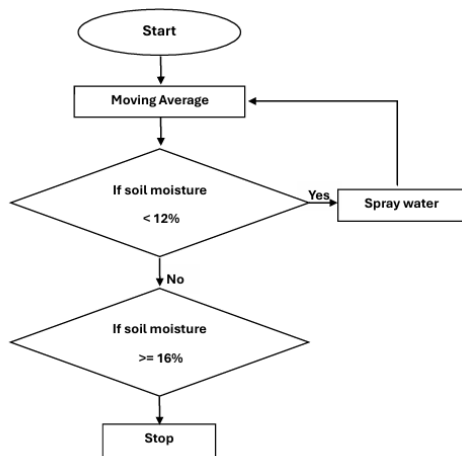
2.1. กระบวนการออกแบบระบบควบคุม การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับตรวจวัดและตัดสินใจรดน้ำ

ระบบต้นแบบถูกออกแบบให้ทำงานตามตรรกะของผังงาน (Flowchart) ซึ่งแสดงใน รูปที่ 1 โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบช่วงเวลาการปฏิบัติงานระหว่าง 06.00–16.00 น. ช่วงเวลานี้ถูกกำหนดจากรายงานทางสรีรวิทยาพืชที่ระบุว่า การให้น้ำในช่วงเช้า-บ่าย มีความเหมาะสมต่อการดูดน้ำและลดความเสี่ยงต่อโรคพืชจากความชื้นสะสมในเวลากลางคืน

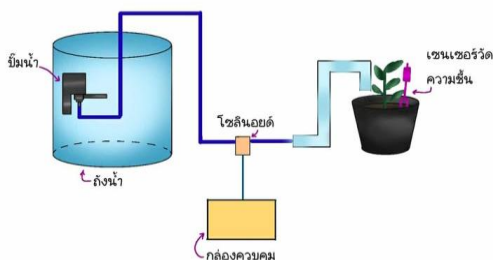


รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบ แสดงลำดับการตรวจสอบช่วงเวลา การอ่านค่าความชื้น และการตัดสินใจรดน้ำตาม threshold ที่กำหนด

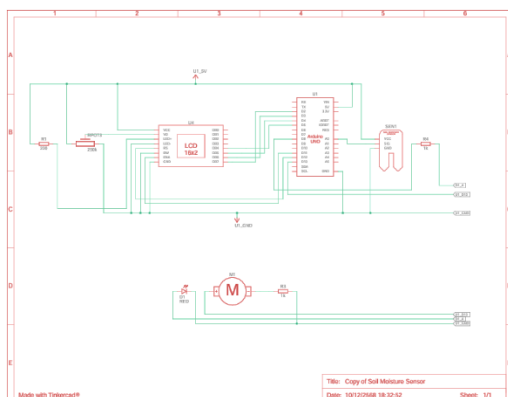
เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาที่กำหนด ระบบจะอ่านค่าความชื้นในดินผ่านเซนเซอร์แบบ capacitive โดยค่าดิบที่วัดได้จะถูกแปลงด้วยฟังก์ชันการปรับเทียบ (Calibration Function) และประมวลผลเพื่อลดสัญญาณรบกวนด้วยค่าเฉลี่ยแบบ Moving Average ก่อนส่งสัญญาณเข้าสู่ชุดตรรกะควบคุมการทำงานของปั้มน้ำ ดังแสดงใน รูปที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันการควบคุมแบบลอจิก (Control Logic Diagram) แสดงเงื่อนไขการเริ่มรดน้ำที่ความชื้นต่ำกว่า 12% และเงื่อนไขหยุดที่ 16%



รูปที่ 3 โมเดลสามมิติของชุดต้นแบบ แสดงการจัดวางตำแหน่งของปั๊มน้ำ ถังน้ำ เซนเซอร์ และกล่องควบคุมเพื่อจำลองสภาพการติดตั้งจริง



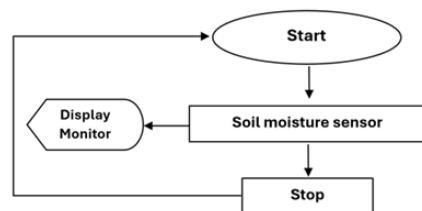
รูปที่ 4 รูปการต่อวงจรของระบบ

**หมายเหตุ ในโปรแกรมจำลองไม่มี Esp32 เลยใช้ Arduino Uno แทน

การทำงานของอัลกอริทึมบน ESP32 แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นผังงานสำหรับการตรวจวัดและแสดงผลค่าความชื้นเบื้องต้น ขณะที่ได้ควบคุมจริงได้รวมขั้นตอนการตัดสินใจ (Decision making) และการสั่งงานอุปกรณ์ขับเคลื่อน โดยใช้สมการเชิงเส้นที่ได้จากการสอบเทียบ

$$\text{Raw Value} = -39.432(\% \text{Moisture}) + 2663.9 \quad (1)$$

ซึ่งให้ค่า $R^2=0.9949$ แสดงถึงความถูกต้องสูงของการปรับเทียบ ผลการแปลงค่าความชื้นถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 0–100% และเก็บค่าซ้ำหลายครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ลดผลกระทบจาก noise ตามหลักการวัดสัญญาณอนาล็อก



รูปที่ 5 Flowchart การอ่านค่าและแสดงผลจากเซนเซอร์ในขั้นตอน Calibration ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาอัลกอริทึมเบื้องต้น

2.2. การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

การสอบเทียบเซนเซอร์ดำเนินการ โดยเตรียมดินตามมาตรฐาน ASTM D4959 ใช้ดินทรายปนร่วนแห้ง (ดินทรายแป้ง) ขนาดอนุภาคดินพื้นฐานตามระบบ USDA มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05-0.002 มม. [6-8] ซึ่งกำหนดให้ทำการอบดินที่

105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินที่อบแห้ง 100 กรัม ใส่ในถุงตัวอย่างจำนวน 12 ถุง และเติมน้ำ ในปริมาณต่างกันตามที่กำหนด (รูปที่ 6) เพื่อให้เกิด ระดับความชื้นหลากหลาย หลังจากหมัก 24 ชั่วโมง ทำการวัดค่าด้วยเซนเซอร์ความชื้น โดยวัดซ้ำ 10 ครั้งต่อระดับความชื้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลด ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล การวัดทั้งหมดถูก บันทึกและนำเสนอในตารางที่ 1 และกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิบกับค่าเปอร์เซ็นต์ ความชื้น (รูปที่ 7)

สมการการคำนวณค่าความชื้นในดินแบบ dry weight basis ตามมาตรฐาน ASTM D4959-00

$$\text{Moisture Content (\%)} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (2)$$

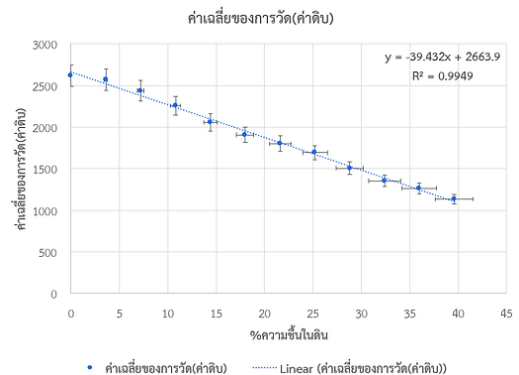


รูปที่ 6 การเตรียมดินจำนวน 12 ถุง และเติมน้ำ ในปริมาณต่างกันตามที่กำหนด

ตารางที่ 1

การวัดค่าซ้ำ 10 ครั้ง เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบตาม มาตรฐาน ASTM

น้ำหนัก ของดิน (g)	น้ำหนัก ของน้ำ (g)	%ความชื้นใน ดินที่คำนวณ ได้	ค่าเฉลี่ยของ การวัด (ค่าดิบ)	S.D.
100	0	0	2619.3	5.14
100.03	3.6	3.598920324	2566.9	13.60
100.02	7.2	7.198560288	2437.6	9.50
100.01	10.8	10.79892011	2256.4	28.95
100.03	14.4	14.3956813	2056.2	48.88
100.03	18	17.99460162	1908.3	39.10
100.01	21.6	21.59784022	1802.6	53.88
100.01	25.2	25.19748025	1692.4	58.90
100.03	28.8	28.79136259	1507	49.86
100.02	32.4	32.3935213	1354.3	24.42
100.03	36	35.98920324	1266	46.64
100.03	39.6	39.58812356	1132.7	34.42



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าดิบ และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น พร้อม error bars

2.3. การทดสอบระบบต้นแบบใน สภาพแวดล้อมจริง

หลังจากสอบเทียบเซนเซอร์แล้ว ระบบถูกนำไป ทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงระหว่างเวลา 06.00– 16.00 น. เป็นเวลา 3 วัน โดยทำการบันทึกค่า ความชื้นและสถานะปั๊มทุกๆ 30 นาที นอกจากนี้ยังมี

วันที่ 16 ตุลาคม 2568 อุณหภูมิ 34°C และ
ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75%

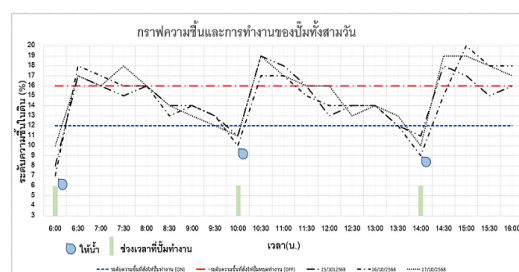
วันที่ 17 ตุลาคม 2568 อุณหภูมิ 34°C และ
ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 80%

ทดสอบ ณ หอพักเนียร์ยู เลขที่ 545 หมู่ที่ 5 ตำบล
สุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา
ทั้งนี้ระหว่างการทำทดสอบ มีการวัดเวลาการทำงาน
จริงของปั๊มแต่ละครั้ง ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 10 วินาที
ปริมาณน้ำที่จ่ายต่อครั้ง (mL) ได้รับการบันทึกและ
ใช้เปรียบเทียบกับการรดน้ำแบบดั้งเดิม เพื่อประเมิน
ค่าใช้จ่ายและคำนวณระยะเวลาคืนทุน

การทดสอบระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติถูกดำเนินการในสภาพแวดล้อมจริงเป็นเวลา 3 วัน ระหว่างเวลา 06.00–16.00 น. โดยบันทึกค่าความชื้นในดิน สถานะปั๊มน้ำ และปริมาณน้ำที่จ่ายในแต่ละรอบทุกๆ 30 นาที รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินและการตอบสนองของระบบควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งสรุปผลการทดลองทั้ง 3 วันในกราฟเดียว เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของระบบในแต่ละรอบการทดสอบ

รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองในวันที่ 1-3 โดยแต่ละ
ช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินที่มี

แนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ เมื่อค่าความชื้นลดลงสู่ระดับประมาณ 11-12% ระบบจะสั่งให้ปั๊มน้ำทำงาน และความชื้นจะเพิ่มขึ้นถึงค่าประมาณ 16% หลังการรดน้ำในแต่ละรอบ จากนั้นค่าความชื้นจะค่อยลดลงตามพฤติกรรมการระเหยของน้ำในดินร่วน จนถึงช่วงที่ระบบต้องสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานอีกครั้ง กลไกนี้เกิดซ้ำเป็นคาบอย่างชัดเจนตลอดระยะเวลา 3 วัน ในการทดลอง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของระบบ
ในแต่ละรอบการทดสอบ

3.1. ผลการทำงานระบบและการวิเคราะห์เชิง ควมคม

ระบบสามารถรักษาระดับความชื้นให้อยู่ในช่วงความชื้นที่กำหนด (12–16%) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจำนวนครั้งเฉลี่ยของการทำงานของปั้มน้ำอยู่ที่ 3 ครั้งต่อวัน การตอบสนองดังกล่าวสอดคล้องกับรูปแบบการสูญเสียน้ำของดินร่วนที่มีอัตราการระเหยสูงในช่วงกลางวัน การทำงานของปั้มน้ำแต่ละครั้งมีระยะเวลาประมาณ 10 วินาที ทำให้ปริมาณน้ำที่จ่ายมีความสม่ำเสมอ โดยเฉลี่ยประมาณ 85–95 mL ต่อรอบ ซึ่งทำให้การใช้น้ำต่อวันอยู่ในช่วงประมาณ 255–285 mL ผลของการสอบเทียบเซนเซอร์ด้วยวิธีเชิงเส้นซึ่งให้ค่า $R^2 = 0.9949$ ช่วยให้การแปลงค่าความชื้นมีความถูกต้องมากขึ้น จึงลด

การเกิดเหตุการณ์การเปิด-ปิดปั้มน้ำโดยไม่จำเป็น การใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) ยังช่วยลดสัญญาณรบกวนและปรับเสถียรค่าที่วัดได้ ทำให้ระบบตัดสินใจได้อย่างต่อเนื่องและไม่เกิดการกระตุกของสัญญาณ (signal oscillation) โดยเส้นกราฟในรูปที่ 8 มีรูปแบบ “คาบขึ้น-ลง” อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของระบบควบคุมแบบ On-Off ที่ตอบสนองต่อสภาพดินแห้งทันทีเมื่อต่ำกว่า threshold ล่าง และหยุดเมื่อถึง threshold บน

3.2. ประเมินความเชื่อถือของระบบและเซนเซอร์

ระหว่างการทดลอง ไม่พบอาการ drift ของเซนเซอร์แบบ capacitive หรือ ความผิดปกติของสัญญาณวัด ข้อมูลทั้ง 3 วัน มีความสอดคล้องกันในทุกช่วงเวลา แสดงว่าระบบตรวจวัดสามารถใช้งานได้อย่างเสถียรในระยะสั้น นอกจากนี้ ไม่พบปัญหาการอุดตันของหัวจ่ายน้ำหรือแรงดันปั้มน้ำลดลง ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของระบบต้นแบบในระยะสั้น อย่างไรก็ตาม ควรมีการทดลองระบบในระยะยาวมากกว่า 3 วัน เพื่อประเมิน

- ความเสถียรของเซนเซอร์เมื่ออยู่ในดินขึ้นต่อเนื่อง

- ความเสื่อมของปั้มน้ำและโซลินอยด์วาล์ว
- ความถูกต้องของค่าความชื้น เมื่อเทียบกับวิธี gravimetric ซ้ำในช่วงเวลาต่างกัน

ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญสำหรับการนำระบบไปใช้งานในระดับฟาร์มจริง

3.3. การประเมินเชิงปริมาณด้านประสิทธิภาพการใช้น้ำ

จากข้อมูลปริมาณน้ำที่จ่ายจริง ระบบสามารถลดการใช้น้ำได้ประมาณ 18–25% เมื่อเทียบกับการรดน้ำแบบดั้งเดิมที่ใช้ปริมาณน้ำมากกว่าและมีความแปรผันสูงกว่า ผลลัพธ์นี้สะท้อนว่า ระบบควบคุมแบบ “moisture-on-demand” สามารถลดปริมาณน้ำที่ไม่จำเป็นได้ โดยยังคงรักษาความชื้นของดินให้อยู่ในช่วงเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพืช

3.4. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เพื่อนำเสนอความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริง ได้มีการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Pay-back Period, PBP) ตามสมการ

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (3)$$

โดยค่าใช้จ่ายและผลตอบแทน คือ

$P = 1,422$ บาท (ต้นทุนอุปกรณ์ต้นแบบ)

$R = 600$ บาท/เดือน (ปริมาณน้ำที่ประหยัดได้จากกรณีศึกษา)

ดังนั้น $PBP = 2.37$ เดือน

4. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติที่ใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการรดน้ำตามระดับความชื้นที่ตั้งไว้ ผลการทดลองภายใต้สภาพแวดล้อมจริงเป็นเวลา 3 วัน แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถวัดค่าความชื้นในดินได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีเชิงมวล (gravimetric) หลังผ่านการ

July – December 2025; 11(2) : 34 – 43

สอบเทียบ ทำให้ข้อมูลที่ใช้สำหรับการควบคุมมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับระบบต้นแบบ

ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความชื้นได้ตามตรรกะการควบคุม เมื่อค่าความชื้นลดต่ำกว่า 12% ระบบจะสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานเพื่อเพิ่มความชื้นในดิน และหยุดการทำงานเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้นถึงระดับประมาณ 16% รูปแบบการทำงานแบบ On-Off ดังกล่าวสามารถรักษาช่วงความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอในระดับการใช้งานภายในครัวเรือนหรือพื้นที่ปลูกขนาดเล็ก

5. ข้อเสนอแนะ

5.1. ควรมีการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นอากาศ ปริมาณแสง และความเร็วลม ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินและระบบควบคุมได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น

5.2. การเชื่อมต่อระบบเข้ากับแพลตฟอร์ม IoT โดยใช้โปรโตคอลที่เหมาะสม เช่น MQTT จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าความชื้นและสถานะปั๊มแบบเรียลไทม์ รวมทั้งส่งสัญญาณแจ้งเตือนเมื่อมีความผิดปกติ เช่น ค่าความชื้นไม่เปลี่ยนแปลงหรือปั๊มไม่ทำงาน ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการต่อยอดสู่ Smart Farming

5.3. ควรมีการทดลองซ้ำหลายรอบและเปรียบเทียบผลลัพธ์เพื่อประเมินความเสถียรของเซนเซอร์ในสภาวะดินชื้นต่อเนื่อง รวมถึงการตรวจสอบ drift ของสัญญาณเมื่อใช้งานระยะยาว

5.4. การทดลองในช่วงเวลาเพียง 3 วันอาจยังไม่เพียงพอสำหรับการประเมินการทำงานของระบบในสภาพอากาศที่แตกต่างกัน จึงควรเพิ่มจำนวนวัน

ทดลองและทดสอบในหลายฤดูกาล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม

5.5. ควรทดลองกับดินหลายประเภท เช่น ดินเหนียว ดินทราย หรือดินปลูกเชิงพาณิชย์ เนื่องจากคุณสมบัติการอุ้มน้ำของดินแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองในสภาพดินที่หลากหลายจะช่วยประเมินความสามารถของระบบในบริบทที่กว้างขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการให้คำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในโครงการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] García-Sánchez L, et al. IoT-enabled smart irrigation systems: an overview. *Sensors*. 2020;20(15):4311–24. doi:10.3390/s20154311.
- [2] Obaideen K, Yousef BAA, AlMallahi MN, Tan YC, Mahmoud M, Jaber H, Ramadan M. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*. 2022;7:100124. doi:10.1016/j.nexus.2022.100124.
- [3] Pereira GP, et al. IoT-enabled smart drip irrigation and climate monitoring using ESP32. *Electronics*. 2023;12(6):1352. doi:10.3390/electronics12061352.

- [4] Kumar SV, Singh CD, Rao KVR, Kumar M, Rajwade YA, Babu B, et al. Evaluation of IoT-based smart drip irrigation and ETc-based system for sweet corn. Smart Agricultural Technology. 2023;5:100248. doi:10.1016/j.atech.2023.100248.
- [5] Sudarmaji A. Smart soil moisture control based on IoT ESP32 for horticulture cultivation. Bio-Conf Proc. 2024;5(1):48–55.
- [6] โชคชัย ลิ้มประเสริฐ, ภัคพงษ์ อุบลเลิศ. เครื่องวัดความชื้นในดิน [Internet]. มหาวิทยาลัยสยาม; 2021 [cited 2025 Dec 20]. Available from: <https://e-research.siam.edu/>
- [7] ปภัสรา สารวรรณ, สุภาพร พัฒนแก้ว, สุรภา สีสะอาด. กำหนดการให้น้ำพืชโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดคาปาซิทีฟร่วมกับ IoT [Internet]. 2019 [cited 2025 Dec 20]. Available from: <https://irre.ku.ac.th/project/pdf/256204.pdf>
- [8] ภาคภูมิ พันธุพันธ์. การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้าแบบหลายระดับ [Internet]. 2022 [cited 2025 Dec 20]. Available from: <http://202.28.34.124/dspace/>



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเปรียบเทียบสมรรถนะของชนิดใบตีเส้นใยสำหรับเครื่องสีเส้นใยจากกล้วย
เพื่อทำผลิตภัณฑ์เส้นใยธรรมชาติ

Comparative Performance Evaluation of Beater Blade Designs in a Banana Sheath
Fiber Extraction Machine for Natural Fiber Applications

กวีพงษ์ หงษ์ทอง¹⁾, วีระพล แก้วกา¹⁾, อติศักดิ์ บุตรวงษ์¹⁾, คมสัน ต้นติชูเกียรติ¹⁾,

ธวัชชัย สีลาไส¹⁾ อภิชาติ ศรีชาติ¹⁾ และธีรเดชินทร์ เลิศรักษวรกุล^{2)*}

Kaweepong Hongtong¹⁾, Weeraphon Kaewka¹⁾, Adisak Bootwong¹⁾, Komsan Tuntichukiat¹⁾,

Tawatchai Seelaso¹⁾ Aphichat Srichat¹⁾ and Theeratechin Lertrakworakul^{2)*}

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

234 ม.12 ต.สามพร้าว อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000

^{2)*}วิศวกรรมเครื่องกล ฝ่ายออกแบบ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

64 ถนนทหาร ต.หมากแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Udonthani Rajabhat University

234, Moo 12, Sam Phrao Subdistrict, Mueang Udon Thani District, Udon Thani Province, 41000

^{2)*}Mechanical Engineering, Udon Thani Rajabhat University

64 Tahan road, Makang, Muang Udonthani, UdonThani, 41000

Received: 13 December 2025

Revised: 20 December 2025

Accepted: 23 December 2025

Available online: 26 December 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของใบตีเส้นใยจากกล้วย 3 รูปแบบ ได้แก่ ใบตีแบบ 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ โดยศึกษาปัจจัยด้านความแข็งแรงทางกล ผลผลิต คุณภาพเส้นใย และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน วัตถุดิบที่ใช้คือกล้วยสดขนาดมาตรฐาน โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อชุดการทดสอบ

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือทางสถิติ ผลการทดลองพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ มีความเหมาะสมทางวิศวกรรมสูงสุด โดยมีความเค้นดัดต่ำสุด 19.4 เมกะปาสคาล (MPa) และความเค้นเฉือนต่ำสุด 1.90 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งต่ำกว่าใบตีแบบอื่นถึงร้อยละ 33.5 ส่งผลให้โครงสร้างมีความปลอดภัยสูงต่อการล้าและแตกร้าว ในด้านสมรรถนะการผลิตพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ผลผลิตเส้นใย (Y%) และดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) ดีที่สุดโดยเฉพาะที่ระยะห่างใบตี 0.8–0.9 มิลลิเมตร และพูลเลย์ขนาด 5 นิ้ว ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานจำเพาะลงได้เหลือเพียง 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (kWh/kg) หรือประหยัดพลังงานได้มากกว่าใบตีแบบ 32 ใบ ถึงร้อยละ 68.4 สำหรับใบตีแบบ 13 ใบ ให้ผลผลิตเชิงปริมาณใกล้เคียงกับแบบ 5 ใบแต่มีความแปรปรวนของคุณภาพสูงกว่า ขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบ ให้ผลผลิตและคุณภาพต่ำที่สุดเนื่องจากความเสียหายของเส้นใยระหว่างการสกัด สรุปได้ว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ความสมดุลสูงสุดระหว่างความปลอดภัยของวัสดุ ผลผลิต และความคุ้มค่าด้านพลังงาน ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของการผลิตเส้นใยจากกล้วยในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้

คำสำคัญ: ใบตีเส้นใย กาบกล้วย ผลผลิตเส้นใย คุณภาพเส้นใย แรงเฉือนและแรงดัด การใช้พลังงาน

Abstract

This study evaluates the performance of three beater blade configurations—5-blade, 13-blade, and 32-blade designs—for banana fiber extraction, focusing on mechanical strength, production yield, fiber quality, and energy efficiency. Using standardized fresh banana sheaths, experiments were conducted with three replications per test group to ensure statistical reliability. The results demonstrate that the 5-blade configuration offers the superior engineering profile, exhibiting the lowest bending stress at 19.4 MPa and a minimum shear stress of 1.90 MPa, which is 33.5% lower than the alternative designs. This significantly enhances structural safety against fatigue and cracking. Regarding production performance, the 5-blade design achieved the highest fiber yield (Y%) and Fiber Quality Index (FQI), particularly at a clearance of 0.8–0.9 mm with a 5-inch pulley. This setup optimized energy consumption, reaching a minimum specific energy of 0.06 kilowatt-hours per kilogram (kWh/kg), representing a 68.4% reduction in energy usage compared to the 32-blade model. While the 13-blade design yielded comparable quantities to the 5-blade version, it exhibited higher qualitative variability. Conversely, the 32-blade design performed poorly across all metrics due to extensive fiber damage during extraction. In conclusion, the 5-blade beater blade provides the optimal balance of material safety, yield quality, and energy efficiency, providing a definitive framework for enhancing the efficiency and sustainability of small-scale industrial banana fiber production.

Keywords: Beater blade: Banana sheath fiber: Fiber yield: Fiber quality: Shear and cutting forces: Energy efficiency

*ติดต่อ: theeratechin59@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แนวโน้มการใช้วัสดุธรรมชาติทดแทนวัสดุสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความตระหนักในด้านสิ่งแวดล้อมและความพยายามลดผลกระทบจากของเสียในอุตสาหกรรมทำให้เส้นใยธรรมชาติจากพืชกลายเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมในหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ งานหัตถกรรม และวัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Bio-Composite Materials) เส้นใยที่สกัดจากกาบกล้วย (Banana Sheath Fiber) ถือเป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น ความเหนียว ความแข็งแรง น้ำหนักเบา และความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติ รวมถึงต้นทุนในการผลิตที่ไม่สูงมาก [1]

อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติงานจริงโดยเฉพาะในระดับชุมชน การสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยมักอาศัยแรงงานคนหรือใช้เครื่องจักรแบบพื้นฐานซึ่งให้ผลผลิตต่ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนางานวิจัยทั้งในและต่างประเทศเพื่อแก้ปัญหานี้อย่างแพร่หลาย เช่น การศึกษาเครื่องสกัดแบบป้อนแวนอนในประเทศอินเดีย และการพัฒนาเครื่องสกัดประสิทธิภาพสูงในประเทศฟิลิปปินส์ที่มีการผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว [2] ซึ่งเครื่องส่วนใหญ่ในท้องตลาดมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการผลิต (Productivity) โดยใช้ความเร็วรอบที่สูงหรือการใช้ระบบป้อนอัตโนมัติแต่ยังคงพบความท้าทายหลักคือ การควบคุมคุณภาพ

เส้นใย (เช่น ความยาว เส้นใยขาดหรือแตก) และการใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใยที่ยังไม่เหมาะสม [3]

เครื่องดีเส้นใย (Fiber Extractor / Beater Machine) จึงมีบทบาทสำคัญในการยกระดับสมรรถนะการสกัด โดยเฉพาะชิ้นส่วนสำคัญคือ ใบดีเส้นใย (Beater Blade) ซึ่งรูปทรง จำนวน มุมเฉียง และการจัดวางของใบดีมีผลโดยตรงต่อแรงกระทำ การปลดปล่อยเส้นใย และการสูญเสียพลังงาน จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาปัจจัยด้านสภาวะการทำงาน เช่น การปรับความเร็วรอบ (Rotational Speed) โดยพบว่าความเร็วรอบในช่วง 750-1,000 rpm (รอบต่อนาที) เป็นช่วงที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ [4] หรือการศึกษาวิธีการสกัดด้วยสารเคมีและจุลินทรีย์เพื่อช่วยแยกเส้นใยแต่จากการสืบค้นและทบทวนวรรณกรรมอย่างละเอียด พบว่าข้อจำกัดสำคัญของงานวิจัยที่ผ่านมาคือการมุ่งเน้นศึกษาตัวแปรด้านสภาวะการทำงานเพียงด้านเดียว หรือ การทดสอบรูปแบบใบดีเพียงรูปแบบเดียวในแต่ละงานวิจัย ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลขาดการเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะระหว่างรูปทรงเรขาคณิตของใบดีที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะควบคุมเดียวกันอย่างเป็นระบบ

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนใบดี ระยะห่างระหว่างใบดีและลูกกลิ้ง ความเร็วรอบ หรือวิธีการสกัดเส้นใยแบบแมนนวล เคมี หรือชีวภาพ แต่ยังไม่พบงานที่เน้นเปรียบเทียบ “ชนิด รูปทรง หรือเรขาคณิตของใบดีเส้นใย” ภายใต้

เงื่อนไขการดำเนินงานเดียวกันอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุนี้ จึงยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่ารูปทรงเรขาคณิตของใบตีแบบใดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านการกลไกการแยกเส้นใยและการใช้พลังงาน

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการเปรียบเทียบสมรรถนะของใบตีเส้นใยรูปแบบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานและสภาวะการทดสอบเดียวกัน เพื่อหาชนิดของใบตีที่ให้ผลดีที่สุดทั้งในด้านประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพเส้นใย และการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงเครื่องตีเส้นใยจากกล้วยให้เหมาะสมต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมที่ต้องการคุณภาพเส้นใยสูงกว่าเครื่องจักรที่มีขายทั่วไปในปัจจุบัน

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ใช้การทดลอง

การศึกษานี้ใช้หลักการกลศาสตร์และการประมวลผลเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Processing of Materials) เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของใบตีเส้นใยจากกล้วย โดยมุ่งเน้นการคำนวณแรงที่เกิดขึ้น การสกัดเนื้อเยื่อ และการประเมินผลลัพธ์ในการใช้พลังงานและคุณภาพเส้นใย ดังนี้

2.1. กลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials)

ใช้ในการประเมินค่าความเค้นและการเสียรูปของใบตีภายใต้แรงต้านทานที่เกิดจากการปะทะกับกล้วยขณะหมุน เหตุผลที่เลือกใช้กลุ่มสมการนี้เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและตรวจสอบว่าวัสดุที่เลือกใช้ (หลักกล้วยและเหล็กฉาก)

สามารถรองรับโมเมนต์ดัดจากการทำงานต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดการล้า (Fatigue) หรือการแตกร้าว [5]

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

โดยที่ σ = ความเค้นดัด (Bending stress, Pa)

M = โมเมนต์ดัด (Bending moment, N·m)

y = ระยะจากแกนเป็นกลางของใบตี
(Distance from neutral axis, m)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด
(Moment of inertia, m⁴)

ϵ = ความเครียด (Strain)

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
(Young's modulus, Pa)

2.2. แรงเฉือนและการตัด (Shear and Cutting Forces)

ในกระบวนการสกัดเส้นใยใบตีต้องสร้างแรงเฉือนเพื่อแยกเนื้อเยื่อ (Parenchyma) ออกจากเส้นใย การใช้สมการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของใบตีแต่ละรูปแบบในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นวัสดุ และใช้ตรวจสอบว่าพื้นที่หน้าตัดของใบตี (A) มีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนอย่างไร เพื่อลดการเสียหายของเส้นใย [6]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3)$$

โดยที่

τ = แรงเฉือน (Shear stress, Pa)

F = แรงเฉือน (Shear Force, N)

A = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงเฉือน
(Shear Area, m^2)

2.3. การประเมินสมรรถนะของใบตี (Performance Assessment)

การประเมินสมรรถนะใช้ตัวชี้วัด 4 ด้านหลัก เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ครอบคลุมทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ และคุณภาพวัสดุ โดยมีรายละเอียดสมการและเหตุผลในการเลือกใช้ ดังนี้

2.3.1. ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y) ใช้สำหรับ วัดความสามารถในการคงอยู่ของเส้นใยหลังผ่าน กระบวนการสกัด เพื่อเปรียบเทียบว่ารูปทรงของใบตี แบบใดทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยน้อยที่สุด [7]

$$Y(\%) = \frac{W_f}{W_g} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ W_f = น้ำหนักเส้นใยที่สกัดได้ (kg)

W_g = น้ำหนักกากบดที่ใส่สกัด (kg)

2.3.2. เวลาในการสกัด (Extraction Time, T) ใช้สำหรับประเมินขีดความสามารถในการผลิต (Productivity) เพื่อวิเคราะห์ว่าจำนวนและระยะห่าง ของใบตีส่งผลต่อความเร็วในการผ่านวัสดุอย่างไร [4]

$$T = \frac{V_s}{F_r} \quad (5)$$

โดยที่ T = เวลาในการสกัด (hr)

V_s = ปริมาณกากบดที่จะสกัด (kg)

F_r = อัตราการผ่านของวัสดุ (Feed rate, kg/hr)

2.3.3. ดัชนีคุณภาพเส้นใย (Fiber Quality Index, Q) เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่รวมเอาคุณสมบัติทางกายภาพหลายด้านมาพิจารณาร่วมกัน เพื่อสะท้อนถึงเกรดของเส้นใยที่ได้จากใบตีแต่ละชนิด ซึ่งมีผลต่อมูลค่าการจำหน่าย [8]

$$FQI = \frac{L \times UR \times S \times m}{f} \quad (6)$$

โดยที่ L = ความยาวเฉลี่ยของเส้นใย

(50% span length, cm)

UR = ดัชนีความสม่ำเสมอ (Uniformity Ratio)

S = ความแข็งแรงของเส้นใย (Strength, g/tex)

m = ดัชนีความสมบูรณ์ของเส้นใย

(Maturity Coefficient)

F = ความละเอียดของเส้นใย (Fineness, μm)

2.3.4. การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย (Energy Efficiency, E) ใช้เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงพลังงานและต้นทุนการผลิต เพื่อหาจุดสมดุลระหว่างปริมาณใบตีและภาระโหลดของมอเตอร์ต้นกำลัง [4]

$$E = \frac{P \times t}{W_f} \quad (7)$$

โดยที่ E = การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย

(kWh/kg)

P = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)

t = เวลาในการสกัด (hr)

W_f = น้ำหนักเส้นใยที่ได้ (kg)

3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง (Materials and Experimental Methods)

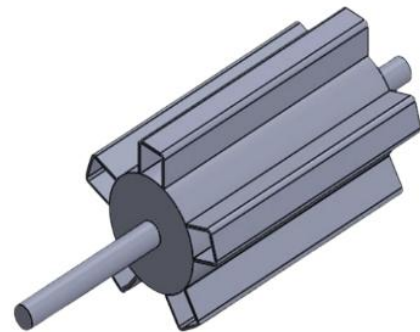
งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของไบต์เส้นใยจากกากกล้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลผลิตเส้นใย คุณภาพเส้นใย และการใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย ซึ่งใช้หลักการกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) และแรงเฉือน รวมถึงการตัด (Shear and Cutting Forces) ในการประเมินแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นกับไบต์ เพื่อเลือกวัสดุ ขนาด และรูปแบบหน้าตัดที่เหมาะสม รวมถึงลดความเสี่ยงต่อการล้าหรือแตกร้าวของชิ้นงาน [9]

ในการทดลอง ใช้กากกล้วยสดที่เตรียมโดยการล้างและตัดเป็นชิ้นขนาดมาตรฐาน ไบต์เส้นใยที่ใช้มีทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งแตกต่างกันในเรื่องจำนวนไบต์ รูปทรง และมุมเอียง แสดงดังรูปที่ 1-3 เครื่องตีเส้นใยเป็นเครื่องจักรเชิงกลขนาดเล็กที่สามารถปรับรอบหมุนได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์สำหรับวัดน้ำหนัก ความยาว และความละเอียดของเส้นใย รวมถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อคำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency, E)

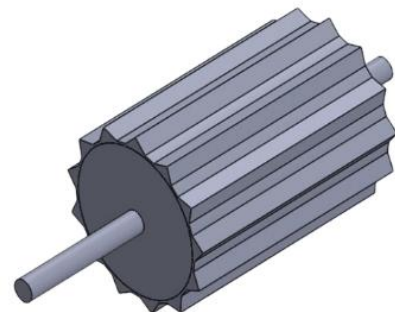
ในการทดลอง กากกล้วยแต่ละตัวอย่างถูกป้อนเข้าสู่เครื่องตีภายใต้รอบหมุนที่กำหนดไว้ โดยใช้ปริมาณวัสดุคงที่เพื่อลดความแปรปรวนของผลลัพธ์ ระหว่างการสกัดเส้นใยจะบันทึกเวลาในการสกัด และการใช้พลังงานไฟฟ้า หลังจากการสกัดเส้นใยเสร็จสิ้น น้ำหนักเส้นใยที่ได้จะถูกวัดเพื่อคำนวณผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y) คุณภาพของเส้นใยจะถูกประเมินด้วย Fiber Quality Index (FQI) โดยพิจารณาจากความยาวเส้นใยเฉลี่ย ความเรียงตัว และความละเอียดของเส้นใย ส่วนการใช้พลังงานต่อ

หน่วยเส้นใย (E) จะคำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปริมาณน้ำหนักเส้นใยที่สกัดได้

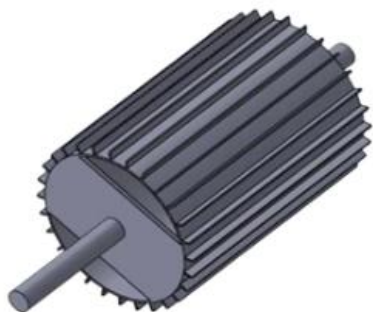
ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองช่วยในการเปรียบเทียบสมรรถนะของไบต์แต่ละแบบ และใช้เป็นแนวทางในการเลือกแบบไบต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเส้นใยจากกล้วยอย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [10-11]



รูปที่ 1 ไบต์แบบที่ 1



รูปที่ 2 ไบต์แบบที่ 2



รูปที่ 3 ใบตีแบบที่ 3

3.1. การออกแบบใบพัดและการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสกัดเส้นใยที่มีโครงสร้างหลักเป็นเหล็กกล้าเพื่อความมั่นคงขณะเดินเครื่อง โดยตัวเครื่องประกอบด้วยชุดโครงสร้างรองรับชุดเพลาลูกคอกากกล้วย ระบบส่งกำลังด้วยสายพาน และมอเตอร์ต้นกำลังขนาด 2 แรงม้า (HP) ซึ่งถูกจัดวางตำแหน่งเพื่อให้สามารถส่งแรงบิดไปยังชุดใบตีได้อย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของชุดใบตี (Beater Blade) ถูกออกแบบมา 3 รูปแบบ เพื่อศึกษาผลกระทบเชิงเรขาคณิตและจำนวนใบต่อประสิทธิภาพการสกัด ประกอบด้วย แบบที่ 1 (5 ใบ) แสดงดังรูปที่ 4 ใช้เหล็กกล่องขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว ยึดบนแกนท่อเหล็กขนาด 4 นิ้ว, แบบที่ 2 (13 ใบ) และ แบบที่ 3 (32 ใบ) แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบหลังใช้เหล็กฉากขนาด 1 x 1 นิ้ว ยึดบนแกนท่อเหล็กขนาด 6 นิ้ว โดยใบตีทุกชุดมีความยาว 28 เซนติเมตร ติดตั้งเข้ากับเพลาส่งกำลังขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ชุดเครื่องต้นแบบนี้สามารถปรับสภาวะการทดสอบความเร็วรอบได้ 2 ระดับ คือ 1,686 รอบต่อนาที (RPM) และ 2,121 รอบต่อนาที (RPM) ผ่านการเปลี่ยนขนาดพูลเลย์ขับเคลื่อนและตาม

โดยมีการควบคุมระยะห่างระหว่างใบตีกับแท่นรอง (Clearance) ที่ 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิเมตร เพื่อทำหน้าที่ขูดแยกเนื้อเยื่อออกจากเส้นใยกล้วยที่ถูกตัดเตรียมเป็นขนาดมาตรฐาน 10 x 60 เซนติเมตร ซึ่งการออกแบบเครื่องต้นแบบที่แสดงองค์ประกอบชัดเจนนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการสกัดและความสัมพันธ์ของแรงกระทำต่อใบตีได้อย่างเป็นระบบตามหลักวิศวกรรม [12]



รูปที่ 4 ใบตีแบบ 5 ใบ



รูปที่ 5 ใบตีแบบ 13 ใบ



รูปที่ 6 ใบตีแบบ 32 ใบ

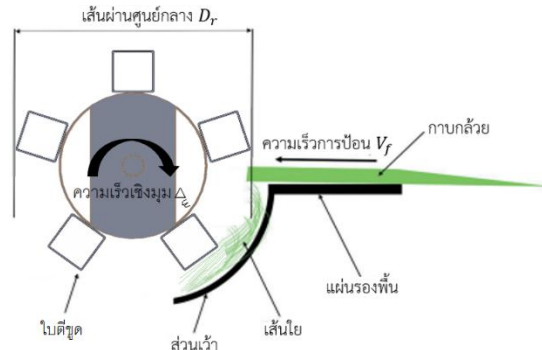
3.2. วิธีการทดลอง

เพื่อให้การประเมินสมรรถนะของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยกล้วยมีความชัดเจนและครอบคลุมทุกตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพและพลังงาน การดำเนินงานวิจัยจึงได้แบ่งขั้นตอนการทดลองและประเด็นการศึกษาออกเป็นส่วนตัวอย่าง ดังนี้

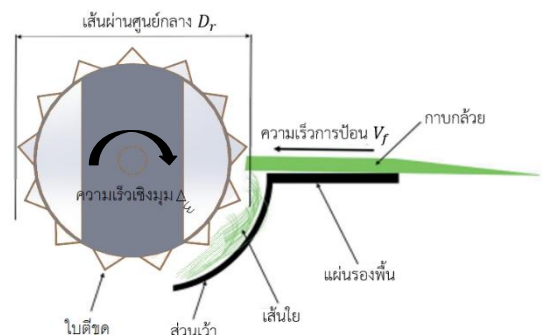
3.2.1. ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา (Experimental Factors)

ในการทดสอบจะมุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรหลักที่มีต่อกระบวนการสกัดเส้นใย ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ได้แก่ รูปแบบใบตี (5, 13 และ 32 ใบ) แสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ, ความเร็วรอบของเพลาใบตี (1,686 และ 2,121 รอบต่อนาที) และระยะห่างระหว่างใบตีกับแผ่นรอง (Clearance) ที่ระดับ 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิเมตร และตัวแปรควบคุม (Controlled Variables) ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์ของต้นกล้วย, ขนาดของกากกล้วย (กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร), น้ำหนักเฉลี่ยต่อชิ้น (0.6 กิโลกรัม) และกำลังมอเตอร์ต้นกำลัง เท่ากับ 2 HP หรือ 1.5 kW)

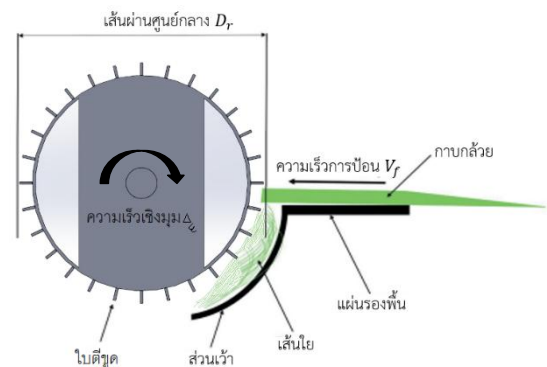
การสุ่มกลุ่มตัวอย่าง (Sampling Method): กากกล้วยที่ใช้ในการทดลองจะถูกคัดเลือกจากต้นกล้วยที่มีอายุและขนาดลำต้นใกล้เคียงกันจากแหล่งปลูกเดียวกัน โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเป็นระบบ (Systematic Random Sampling) จากตำแหน่งกากชั้นกลาง (ชั้นที่ 5-10 นับจากข้างนอก) เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติทางกายภาพสม่ำเสมอก่อนนำไปตัดแบ่งตามขนาดที่กำหนด



รูปที่ 7 การทำงานของใบตีแบบ 5 ใบ



รูปที่ 8 การทำงานของใบตีแบบ 13 ใบ



รูปที่ 9 การทำงานของใบตีแบบ 32 ใบ

3.2.2. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง (Procedures)

การทดลองเริ่มต้นจากการติดตั้งชุดโบบิตแต่ละแบบแยกกัน เพื่อความแม่นยำโดยนำกากกล้วยสดที่เตรียมไว้ป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง (Treatment) จะดำเนินการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง (3 Replications) เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ระหว่างการสกัดจะทำการบันทึกค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าแรงบิดที่ส่งจากมอเตอร์ไปยังเพลา เพื่อนำไปใช้คำนวณหาแรงเฉือน (Shear Force) และแรงตึงที่เกิดขึ้นจริงขณะสกัด โดยในแต่ละชุดการทดลองจะทำการทดสอบซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

3.2.3. ค่าชี้ผลและการประเมินสมรรถนะ (Performance Indicators)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาคำนวณและประเมินผลผ่านค่าตัวชี้วัด ดังนี้

3.2.3.1. ประสิทธิภาพการผลิตคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%) และอัตราการผลิตต่อชั่วโมง โดยบันทึกเวลาที่ใช้ในการสกัด (Extraction Time)

3.2.3.2. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยเส้นใย (Specific Energy Consumption\$) จากค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกได้ [13]

3.2.3.3. ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) ประเมินคุณภาพผ่านกระบวนการตรวจวัดทางห้องปฏิบัติการ โดยสุ่มตัวอย่างเส้นใยที่สกัดได้จากแต่ละชุดทดสอบ ชุดละ 50 เส้น เพื่อนำมาวัดความ

ยาวเฉลี่ย (Span Length) ด้วยเครื่องวัดความยาวเส้นใย, ตรวจวัดความสม่ำเสมอของขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D3822 ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาคำนวณรวมเป็นค่าดัชนี FQI ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) เพื่อเปรียบเทียบความสมบูรณ์ของเส้นใยที่ได้จากโบบิตแต่ละรูปแบบ

3.2.4. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่รวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโบบิตและพารามิเตอร์ต่างๆ โดยมุ่งเน้นการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของรูปแบบโบบิตที่ให้ค่าดัชนีคุณภาพเส้นใยสูงสุดภายใต้การใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เพื่อเป็นข้อสรุปเชิงวิศวกรรมสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

4. ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของชุดโบบิตสกัดเส้นใยกล้วยภายใต้พารามิเตอร์การทดสอบที่กำหนด โดยมุ่งเน้นการประเมินปฏิสัมพันธ์ระหว่างเรขาคณิตของโบบิตต่อเสถียรภาพทางกล สมรรถนะการผลิต ดัชนีคุณภาพเส้นใย และประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ ข้อมูลผลการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ได้ผ่านกระบวนการทำซ้ำทางสถิติเพื่อยืนยันความเที่ยงตรง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของผลลัพธ์ เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการพิสูจน์สมมติฐานของการวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1. ผลการออกแบบและหลักการทำงานของเครื่องสกัดเส้นใย

จากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสกัดเส้นใยกล้วยตามแนวคิดการสกัดทางกล (Mechanical Extraction) พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังผ่านระบบพูลเลย์เพื่อหมุนชุดใบตี (Beater Blade) ด้วยความเร็วรอบสูงเมื่อป้อนกากกล้วยเข้าสู่ช่องรับวัสดุ ชุดใบตีจะทำหน้าที่ “กระทบและขูด” (Beating and Scraping) เนื้อเยื่อส่วนเกิน (Parenchyma) ให้หลุดออกจากเส้นใย โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างขอบใบตีกับแผ่นรองรับวัสดุ ซึ่งระยะห่าง (Clearance) ที่ปรับตั้งไว้จะเป็นตัวควบคุมความหนาในการขูด เพื่อให้เส้นใยแยกตัวออกโดยไม่เกิดการขาดสะบั้น การออกแบบโครงสร้างที่มั่นคงช่วยลดการสั่นสะทอนขณะหมุนด้วยความเร็วสูงสุด 2,121 รอบต่อนาที ทำให้กระบวนการสกัดมีความเสถียรและสามารถดึงเส้นใยย้อนกลับออกมาได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งกลไกการดึงวัสดุย้อนกลับนี้ช่วยลดปัญหาเส้นใยพันติดแกนเพลามากพบในเครื่องจักรเชิงพาณิชย์ทั่วไป

4.2. ผลการวิเคราะห์ด้านความแข็งแรงทางกลของใบตี

จากการคำนวณความเค้นดัด (σ) ของใบตีทั้ง 3 แบบ พบว่าใบตีแบบ 5 ใบมีความเค้นต่ำสุดอยู่ที่ 19.4 เมกะปาสคาล (MPa) ในขณะที่แบบ 13 ใบ และ 32 ใบ มีความเค้นสูงขึ้นเป็น 83.8 เมกะปาสคาล (MPa) เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดรับแรงที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าความเครียด (ϵ) ยังคง

อยู่ในระดับปลอดภัยสำหรับวัสดุเหล็กกล้าโครงสร้าง ($E = 2 \times 10^{11}$ Pa) ซึ่งยืนยันได้ว่าวัสดุสามารถรองรับแรงกระทบทั่วๆ ไปได้โดยไม่เกิดการล้า (Fatigue) หรือการบิดตัวถาวรในช่วงเวลาการทดสอบ ดังแสดงผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

การคำนวณความเค้นและความเครียดของใบตี (Mechanics of Materials)

แบบใบตี	ขนาดหน้าตัด	M (N·m)	I (m ⁴)	y (m)	E (Pa)	σ (MPa)
5 ใบ	เหล็กกล่อง 1.5×1.5 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	4.91×10^{-8}	0.01905	2×10^{11}	19.4
13 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	7.58×10^{-9}	0.0127	2×10^{11}	83.8
32 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หนา 1.5 มม.	50	7.58×10^{-9}	0.0127	2×10^{11}	83.8

เมื่อพิจารณาแรงเฉือน (Shear Force) และแรงตัด (Cutting Force) ซึ่งเป็นปัจจัยวิกฤตในการแยกเส้นใย พบว่าแรงตัดที่เหมาะสมในกระบวนการอยู่ที่ประมาณ 108.93 นิวตัน และแรงบิด (Torque) ที่จำเป็นคือ 21.78 นิวตันเมตร [14] จากผลการจำลองในตารางที่ 4.2 พบว่า ใบตีแบบ 5 ใบที่มีพื้นที่หน้าตัดมากที่สุด (5.72×10^{-5} ตารางเมตร) ดังแสดงผลในตารางที่ 2 และมีความเค้นเฉือนต่ำสุดเพียง 1.90 เมกะปาสคาล (MPa) สะท้อนถึงความสามารถในการทนต่อแรงต้านทานการสกัดได้ดีกว่าแบบอื่น ขณะที่

ใบตีแบบ 13 และ 32 ใบ มีค่าความเค้นเฉือนสูงกว่าที่ 2.86 MPa เนื่องจากพื้นที่รับแรงของแต่ละใบลดลง แต่ยังคงอยู่ภายใต้เกณฑ์ปลอดภัยของค่าความเค้นคราด (Yield Strength ~ 250 MPa) [15]

ตารางที่ 2

การคำนวณแรงเฉือนและแรงตัด (Shear and Cutting Forces)

แบบใบตี	ขนาดหน้าตัด	พื้นที่หน้าตัด (A) (m ²)	แรงตัด (F) (N)	แรงบิด (Torque, N·m)	ความเค้นเฉือน $\tau = F/A$ (MPa)
5 ใบ	เหล็กกลอง 1.5×1.5 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	5.72×10^{-5}	108.93	21.78	1.90
13 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	3.81×10^{-5}	108.93	21.78	2.86
32 ใบ	เหล็กฉาก 1×1 นิ้ว หน้า 1.5 มม.	3.81×10^{-5}	108.93	21.78	2.86

4.3. สมรรถนะการผลิตและคุณภาพเส้นใย

จากการทดสอบ พบว่าอัตราการผลิตแปรผันตามจำนวนใบและระยะห่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้

อัตราการผลิต ใบตีแบบ 13 ใบ ให้ผลผลิตสูงสุดที่ 7.48 g/s (~2.08 kg/h) ที่ระยะห่าง 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าอัตราการผลิตเฉลี่ยของเครื่องสกัดพื้นฐานที่มักให้ผลผลิตเพียง 1.5-1.8 kg/h เนื่องจากการเพิ่มจำนวนใบช่วยเพิ่มความถี่ในการเฉือนรวม ทำให้สกัดได้เร็วขึ้น ขณะที่แบบ 32 ใบให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของใบมีดที่มากเกินไป ส่งผลให้แรงกระแทกเฉลี่ยต่อใบ

ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%) ใบตีแบบ 5 ใบ ให้ค่า Y (%) สูงที่สุดที่ระยะห่าง 0.8–0.9 mm ร่วมกับพูลเลย์ขนาด 5 นิ้ว เนื่องจากความสามารถในการจัดการวัสดุที่ดีกว่า แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

ผลผลิตเส้นใย (Fiber Yield, Y%)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่างใบมีด (mm)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักเส้นใย (g)	Y (%)
5	4	0.7	94.00	58.75
		0.8	124.67	77.92
		0.9	94.00	58.75
	5	0.7	117.33	73.33
		0.8	109.33	68.33
13	4	0.9	163.33	102.08
		0.7	104.00	65.00
		0.8	172.00	107.50
	5	0.9	126.00	78.75
		0.7	84.67	52.92
32	4	0.8	136.67	85.42
		0.9	120.00	75.00
		0.7	50.67	31.67
	5	0.8	153.33	95.83
		0.9	104.00	65.00
		0.7	126.67	79.17
		0.8	187.33	117.08
		0.9	114.00	71.25

ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI): ใบตีแบบ 5 ใบ ให้ค่า FQI สูงที่สุด สะท้อนถึงเส้นใยที่มีความยาวสม่ำเสมอและสมบูรณ์ที่สุด ในขณะที่แบบ 32 ใบให้ค่า FQI ต่ำสุด เนื่องจากจำนวนใบที่มากเกินไปส่งผลให้เส้นใยเกิดความเสียหายทางกายภาพสูง แสดงดังตารางที่ 4-5

4.4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption)

จากการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 2 HP หรือ 1.5 kW พบว่าใบตีแบบ 5 ใบมีความคุ้มค่าด้านพลังงานสูงที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ระยะห่าง 0.9 มิลลิเมตร และพูลเลย์ 5 นิ้ว มีค่าการใช้พลังงานเพียง 0.06 kWh/kg ในขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบมีการใช้พลังงานจำเพาะสูงที่สุดถึง 0.19 kWh/kg แสดงดังตารางที่ 6 เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างใบตีกับวัสดุที่มีความถี่สูงขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์ต้องทำงานหนักขึ้นในกระบวนการสกัด

ตารางที่ 4

เวลาในการสกัด (Extraction Time, T)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	ความสามารถ ผลิตเส้นใย (g/s)	T เฉลี่ย (วินาที)
5	4	0.7	2.83	33.19
		0.8	4.31	28.89
		0.9	4.50	20.88
	5	0.7	3.36	34.89
		0.8	3.50	31.26
		0.9	6.46	25.27
13	4	0.7	4.40	23.62
		0.8	7.48	23.00
		0.9	5.58	22.57
	5	0.7	2.31	36.62
		0.8	4.85	28.20
		0.9	4.38	27.39
32	4	0.7	2.16	23.45
		0.8	6.33	24.23
		0.9	3.88	26.79
	5	0.7	4.80	26.39
		0.8	5.66	33.09
		0.9	3.71	30.75

ตารางที่ 5

ดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	FQI
5	4	0.7	78.5
		0.8	82.3
		0.9	85.6
	5	0.7	80.1
		0.8	83.7
		0.9	87.2
13	4	0.7	75.2
		0.8	77.8
		0.9	79.5
	5	0.7	73.1
		0.8	76.4
		0.9	78.0
32	4	0.7	61.8
		0.8	65.2
		0.9	68.5
	5	0.7	63.0
		0.8	66.8
		0.9	69.2

ตารางที่ 6

การใช้พลังงานต่อหน่วยเส้นใย (Energy Efficiency, E)

ใบมีด	พูลเลย์ (นิ้ว)	ระยะห่าง ใบมีด (mm)	น้ำหนักเส้นใย (kg)	เวลา (hr)	E (kWh/kg)
5	4	0.7	0.094	0.0092	0.15
		0.8	0.125	0.0080	0.12
		0.9	0.094	0.0058	0.09
	5	0.7	0.117	0.0097	0.12
		0.8	0.109	0.0087	0.12
		0.9	0.163	0.0070	0.06
13	4	0.7	0.104	0.0066	0.10
		0.8	0.172	0.0064	0.05
		0.9	0.126	0.0063	0.07
	5	0.7	0.084	0.0102	0.18
		0.8	0.137	0.0078	0.09
		0.9	0.120	0.0076	0.09
32	4	0.7	0.051	0.0065	0.19
		0.8	0.153	0.0067	0.07
		0.9	0.104	0.0074	0.11
	5	0.7	0.127	0.0073	0.08
		0.8	0.187	0.0092	0.07
		0.9	0.114	0.0085	0.11

5. สรุปการทดลอง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรมของใบตีสกัดเส้นใยกล้วยที่มีลักษณะเรขาคณิตแตกต่างกัน 3 รูปแบบ เพื่อวิเคราะห์หาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านโครงสร้าง สมรรถนะการผลิต และประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเพาะ ผลการวิจัยที่ได้ผ่านกระบวนการทดสอบอย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะควบคุม สามารถสรุปสาระสำคัญและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสกัดเส้นใยธรรมชาติได้ดังนี้

5.1. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและการคำนวณสมรรถนะของใบตีสกัดเส้นใยจากกากกล้วยทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ใบตี 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ พบว่าใบตีแต่ละแบบมีผลต่อสมรรถนะเชิงวิศวกรรมและคุณภาพเส้นใยแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยใบตีแบบ 5 ใบ มีความเค้นดัดต่ำสุดที่ 19.4 MPa ซึ่งต่ำกว่าแบบอื่นถึง 4.3 เท่า แสดงถึงความปลอดภัยสูงสุดต่อการล้าและแตกร้าวขณะใช้งานจริง ในขณะที่แรงเฉือนและแรงดัดของใบตี 5 ใบ มีความเค้นเฉือนต่ำสุดเพียง 1.90 MPa ทำให้สามารถถ่ายทอดแรงดัดได้อย่างสม่ำเสมอ

ในด้านผลผลิตและคุณภาพ พบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเส้นใย (Y%) และค่าดัชนีคุณภาพเส้นใย (FQI) สูงที่สุด โดยเฉพาะที่ระยะห่างใบตี 0.8–0.9 มิลลิเมตร และพูลเล่ย์ขนาด 5 นิ้ว ในขณะที่ใบตีแบบ 32 ใบ แม้จะมีจำนวนใบมากที่ สุดแต่กลับให้ผลผลิตและคุณภาพต่ำที่สุดเนื่องจากความเสียหายของเส้นใยระหว่างสกัด ด้านประสิทธิภาพพลังงานพบว่าใบตีแบบ 5 ใบ ใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเพียง 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ต่อกิโลกรัม (kWh/kg) ซึ่งประหยัดพลังงานได้มากกว่าแบบ 32 ใบ ถึงร้อยละ 68.4 สรุปได้ว่าใบตีแบบ 5 ใบ ให้ความสมดุลระหว่างความปลอดภัยเชิงโครงสร้าง ผลผลิต คุณภาพเส้นใย และ ความประหยัดพลังงานได้ดีที่สุด

5.2. ข้อเสนอแนะเชิงเทคนิคและการนำไปใช้งาน

จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางปฏิบัติ สำหรับการออกแบบเครื่องสกัดเส้นใยในระดับวิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดย่อม ดังนี้

5.2.1. ขนาดต้นกำลังและรูปแบบใบตี : แนะนำให้ใช้ใบตีรูปแบบ 5 ใบ (หน้าตัดเหล็กกล่อง) ร่วมกับมอเตอร์ต้นกำลังขนาดไม่น้อยกว่า 2 HP หรือ 1.5 kW เพื่อให้มีแรงบิดที่เพียงพอและช่วยลดความร้อนสะสมในมอเตอร์ขณะสกัดต่อเนื่อง

5.2.2. การปรับตั้งค่าที่เหมาะสม : ควรปรับระยะห่างระหว่างใบตีและแผ่นรองรับ (Clearance) ที่ระดับ 0.8 mm สำหรับกากกล้วยสด เพื่อให้ได้ความสมดุลระหว่างความสะอาดของเส้นใยและอัตราการขาดที่ต่ำที่สุด

5.2.3. ความปลอดภัย : ควรตรวจสอบสภาพพื้นผิวหน้าสัมผัสของใบตีทุกๆ 100 ชั่วโมงการทำงาน เนื่องจากแม้ความเค้นจะต่ำแต่การเสียดสีกับยางกล้วยอาจส่งผลต่อความคมในการขูดแยกเส้นใย

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อยอด (Future Work)

เพื่อให้การพัฒนาเครื่องสกัดเส้นใยกล้วยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังต่อไปนี้

5.3.1. การศึกษาวัสดุทางเลือกสำหรับใบตี : ควรมีการทดสอบวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อประเมินผลกระทบของยางกล้วยที่มีต่ออายุการใช้งานและการปนเปื้อนของสีเส้นใย

5.3.2. การพัฒนาระบบป้อนวัสดุอัตโนมัติ : ควรมีการวิเคราะห์ความเร็วในการป้อน (Feed Rate Control) ที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบพูลเลย์ เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยทักษะความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องมากเกินไป

5.3.3. การทดสอบกับกล้วยสายพันธุ์อื่น ควรขยายขอบเขตการทดสอบกับกาบกล้วยสายพันธุ์ต่างๆ เพื่อสร้างฐานข้อมูล (Database) การปรับตั้งเครื่องจักรให้เหมาะสมกับลักษณะเส้นใยที่มีความเหนียวและขนาดแตกต่างกัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ruangnarong C, Khojtmate S, Srivorradatphisan S, Panyathikun N, Chonsakorn S. Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostem layers: a sustainable textile raw material. *Heliyon*. 2024;10:e39880. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39880.
- [2] Badanayaka P, Jose S, Bose G. Banana pseudostem fiber: a critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. *J Nat Fibers*. 2023;20(1):2168821. doi:10.1080/15440478.2023.2168821.
- [3] Liang D, Yu S, Fu W, Shen Y, Yang Z, Zeng W, et al. Design and experimental evaluation of a pulsating rubbing-based banana fiber extractor. *Agriculture*. 2025;15(16):1746. doi:10.3390/agriculture15161746.
- [4] Mahmoud WA El-Magd, Elkaoud NSM, Eissa AS, Mousa AMM. Mechanical processing of banana slices-stem for fiber extraction. *Agric Eng Int CIGR J*. 2023;25(4):236–45.
- [5] Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF. *Mechanics of materials*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2020. ISBN:978-1-260-11327-3.
- [6] Hibbeler RC. *Mechanics of materials*. 11th ed. Boston: Pearson Education; 2022.
- [7] Baye B, Tesfaye T. Optimization of extraction techniques for processing and utilization of *Cyperus dichrostachys* A. Rich plant as fiber. *Research Square [Preprint]*. 2022. doi:10.21203/rs.3.rs-1201864/v1.

- [8] Baye B, Tesfaye T. Optimization of extraction techniques for processing and utilization of *Cyperus dichrostachus* A. Rich plant as fiber. Research Square [Preprint]. 2022. doi:10.21203/rs.3.rs-1201864/v1.
- [9] Soomro AR, Rossi F. SOLIDWORKS™ design, fabrication and performance analysis of a banana fiber extraction machine and its components. *Mehran Univ Res J Eng Technol.* 2024;43(3):190–204. doi:10.22581/muet1982.3253.
- [10] Bordón P, Elduque D, Paz R, Javierre C, KusiĆ D, Monzón M. Analysis of processing and environmental impact of polymer compounds reinforced with banana fiber in an injection molding process. *J Clean Prod.* 2022;379(Pt 1):134476. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134476.
- [11] Khan BM, Jogdand SV, Joshi J, Naik RK, Victor. Performance evaluation of banana fiber production unit. *Int J Agric Food Sci.* 2025;7(7):86–92. doi:10.33545/2664844X.2025.v7.i7b.500.
- [12] Poudel S, Chapai S, Subedi RK, Giri TR, Adhikari S. Design, fabrication and testing of banana fibre extraction machine. *J Innov Eng Educ.* 2019;2(1). doi:10.3126/jjee.v2i1.36668.
- [13] Lal SB, Kushwaha S, Singh P, Yadav D, Singh R. Banana fiber extracting machine. *Int Adv Res J Sci Eng Technol.* 2022;9(5). doi:10.17148/IARJSET.2022.9536.
- [14] Pandey S, Naik RK, Patel KK. Design and development of cutting unit for the banana pseudostem using power screw mechanism. *Biol Forum Int J.* 2022;14(4):692–7.
- [15] ASM International. ASM handbook. Vol 1, Properties and selection—irons, steels, and high-performance alloys. Materials Park (OH): ASM International; 2021.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดทอด
เพื่อนำไปสู่การควบคุมคุณภาพการทอดด้วยระบบอัตโนมัติ

The Analysis of Physical Properties and Textural of Fried Cricket Products
for the Developing Automatic Frying Quality Control Systems

วุฒิพงศ์ ทองแห้ว^{1),(4),(5)}, ชัยยันต์ จันทร์ศิริ^{2),(4),(5)}, วิรุณ โมณะตระกูล³⁾, นครินทร์ แสนคำ^{2),(4),(5)}

และ จารุพล สุริยวานากุล^{1),(4)*}

Wuttiphong Thonghaeo^{1),(4),(5)}, Chaiyan Junsiri^{2),(4),(5)}, Wiroon Monatrakul³⁾, Nakarin Saemkam^{2),(4),(5)}

And Jarupol Suriyawanakul^{1),(4)*}

¹⁾สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³⁾สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁴⁾ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁵⁾ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

²⁾Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Khon Kaen University

³⁾Innovative Technology Machinery Program, Rajabhat Maha Sarakham University

⁴⁾Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University

Khon Kaen Province

⁵⁾Postharvest Technology Innovation Center, Science, Research and Innovation Promotion and Utilization Division,

Office of the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation

Received: 10 November 2025

Revised: 22 December 2025

Accepted: 24 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดพันธุ์สะตึงทอดจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องทอดอัตโนมัติให้ได้คุณภาพที่สม่ำเสมอ โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A (ผลิตภัณฑ์ทั่วไปในท้องตลาด) กลุ่ม B (ผลิตภัณฑ์ยอดขายสูงทางออนไลน์) และกลุ่ม C (ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมาตรฐาน อย.) ผลการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งสามกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกลุ่ม A มีขนาดเฉลี่ย 6.02×29.03 mm น้ำหนักเฉลี่ย 0.2 g กลุ่ม B ขนาดเฉลี่ย 5.78×22.16 mm น้ำหนักเฉลี่ย 0.4 g และกลุ่ม C ขนาดเฉลี่ย 5.75×19.33 mm น้ำหนักเฉลี่ย 0.1 g แสดงว่าขนาดไม่ใช่ปัจจัยหลักที่กำหนดคุณภาพ แต่ขึ้นอยู่กับวิธีการทอดและการดูดซึมน้ำมัน ค่าสีของผลิตภัณฑ์ทั้งสามกลุ่มมีค่าความสว่าง (L^*) 28.9–30.7 โดยกลุ่ม A และ C มีสีสว่างกว่า ส่วนกลุ่ม B มีสีเข้มกว่าเล็กน้อย กลุ่ม C มีค่า a^* สูงสุด (5.7) บ่งชี้ถึงสีแดง-น้ำตาลที่สม่ำเสมอซึ่งเหมาะสมต่อการทอด การทดสอบเนื้อสัมผัสพบว่ากลุ่ม B มีค่าความแข็งสูงสุด (230.980 N) และค่าความเหนียวแน่นภายในสูงสุด (0.482) แสดงถึงความกรอบแน่น ส่วนกลุ่ม C มีค่า Gumminess และ Chewiness ต่ำสุด (19.275 และ 0.737) แสดงถึงความกรอบเบา เคี้ยวง่าย โดยสรุป กลุ่ม A เหมาะกับผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่เน้นความคุ้มค่า กลุ่ม B เด่นด้านความแข็งแรงและแน่น เหมาะกับผู้บริโภคที่มีแนวโน้มชอบสัมผัสกรอบ ส่วนกลุ่ม C มีสีและเนื้อสัมผัสสม่ำเสมอ เหมาะต่อการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและการพัฒนาระบบทอดอัตโนมัติในอนาคต

คำสำคัญ: จิ้งหรีดทอด คุณลักษณะทางกายภาพ เนื้อสัมผัส ค่าสี ระบบควบคุมการทอดอัตโนมัติ

Abstract

This study aimed to investigate the physical and texture properties of crispy fried house cricket (*Acheta domesticus*) obtained from different sources, in order to provide fundamental data for designing an automatic frying control system to achieve consistent product quality. The samples were divided into three groups: Group A (general commercial products), Group B (top-selling online products), and Group C (products certified by the Food and Drug Administration). The results revealed significant physical differences among the three groups. Group A had an average size of 6.02×29.03 mm and an average weight of 0.2 g, Group B had 5.78×22.16 mm and 0.4 g, and Group C had 5.75×19.33 mm and 0.1 g. These results indicated that size is not the main factor determining product quality, which is more influenced by frying methods and oil absorption. The color values (L^*) ranged from 28.9–30.7, with Groups A and C exhibiting lighter colors, while Group B was slightly darker. Group C had the highest Red - Green (a^*) value (5.7), indicating a uniform reddish-brown color suitable for

frying. Texture analysis showed that Group B had the highest hardness (230.980 N) and cohesiveness (0.482), indicating a firm and dense texture, whereas Group C had the lowest gumminess and chewiness (19.275 and 0.737), reflecting a light and crispy texture. In conclusion, Group A represented general products emphasizing value, Group B distinguished by its firmness and dense crispness preferred by consumers, and Group C shows uniform color and texture, making it suitable for industrial production and the development of automatic frying control systems in the future.

Keywords: Crispy fried: cricket Physical properties: Texture analysis: Color values: Automatic frying control system

*ติดต่อ: jarupol@kku.ac.th , 043-362144

1. บทนำ

การเติบโตของประชากรโลกอย่างต่อเนื่องยังคงเป็นหนึ่งในแรงขับเคลื่อนที่สำคัญที่เพิ่มความต้องการอาหารทั้งในแง่ปริมาณ แคลอรี และสารอาหารของมนุษย์ การประมาณการขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ชี้ว่า หากไม่มีการปรับระบบการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ภาคเกษตรอาจต้องเพิ่มปริมาณการผลิตมากถึง 60% เมื่อเทียบกับปัจจุบัน เพื่อให้ทันต่อความต้องการในปี 2050 อย่างไรก็ตาม ระบบเกษตรกรรมปัจจุบันกำลังเผชิญกับข้อจำกัดของทรัพยากรธรรมชาติจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นที่ดินเพาะปลูกที่เสื่อมโทรม, แหล่งน้ำที่ถูกกีดกัน, และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลต่อผลผลิตซึ่งนำมาซึ่งความท้าทายอย่างรุนแรงในเรื่อง ความมั่นคงทางอาหาร (Food Security) [10]

หนึ่งในแนวทางการแก้ไขปัญหาด้านความมั่นคงทางอาหารที่ได้รับความสนใจ คือ อาหารแห่งอนาคต (Future Food) ซึ่งเป็นแนวคิดที่มุ่งเน้นการพัฒนาแหล่งอาหารที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีความยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถตอบสนองต่อความต้องการ

ของผู้บริโภค โดยองค์ประกอบสำคัญของ Future Food จึงกลายเป็นแนวทางแก้ไขที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะ "โปรตีนจากแมลง" (Insect-based Protein) ซึ่งมีศักยภาพสูง เนื่องจากแมลงให้โปรตีนในปริมาณที่สูงกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่น [7] ใช้เวลาเพาะเลี้ยงสั้น และที่สำคัญคือกระบวนการเลี้ยงยังปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าอุตสาหกรรมปศุสัตว์ทั่วไป [6]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมแมลงกินได้มีมูลค่าประมาณ 1,400 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือราว 33,900 ล้านบาท โดยมียุโรปและสหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำตลาด และมีธุรกิจที่เกี่ยวข้องมากกว่า 400 แห่ง [1] สำหรับประเทศไทย การบริโภคแมลงเป็นวัฒนธรรมดั้งเดิมที่สืบทอดต่อกันมา โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งนิยมบริโภคแมลงจากธรรมชาติและฟาร์มเพาะเลี้ยง อาทิ หนอนเยื่อไผ่ ตั๊กแตน หนอนด้วงมะพร้าว และจิ้งหรีด [13] โดยเฉพาะจิ้งหรีดบ้าน (*Acheta domesticus* L.) หรือที่เรียกกันว่า "จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)" ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมเลี้ยงในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายโดยในประเทศไทยมีเกษตรกรเกือบ 20,000

ครัวเรือนกระจายอยู่ทั่วประเทศ [4] ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)มีการแปรรูปหลายรูปแบบ แต่การ "ทอด" ถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุดในหมู่ผู้บริโภค สามารถหาซื้อได้ง่ายทั้งในตลาดท้องถิ่นและช่องทางออนไลน์ [16] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่พบในปัจจุบันคือ ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดที่มีจำหน่ายทั่วไปนั้นขาดความเป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งในด้านสีและเนื้อสัมผัส ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตที่หลากหลาย ความไม่สม่ำเสมอนี้ส่งผลกระทบต่อการยอมรับและความพึงพอใจของผู้บริโภค และอาจนำไปสู่การตัดสินใจไม่ซื้อซ้ำ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด สี และเนื้อสัมผัสของผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน เพื่อรวบรวมข้อมูลพื้นฐานซึ่งจะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบความคุ้มครองทอดด้วยระบบอัตโนมัติให้สามารถสร้างพัฒนาผลิตรากพืชให้มีมาตรฐานเดียวกันต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วิธีการทดลองมี ดังนี้

2.1. ผลิตรากพืชที่ใช้ในการวิเคราะห์

ผลิตรากพืชที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ จิ้งหรีดพันธุ์ สะตัง เนื่องจากในปัจจุบัน สะตังได้รับความนิยมในการบริโภคสูงที่สุด โดยจะแบ่งเป็นผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดจาก 3 แหล่งที่มา

โดยจะแบ่งกลุ่มเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มีขายทั่วไป กลุ่ม B ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ และ กลุ่ม C ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน ออย. ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลิตรากพืชจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดจาก 3 แหล่งที่มา

2.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.2.1. การวัดค่าสีระบบ CIE ($L^* a^* b^*$) ด้วยเครื่อง Color Reader รุ่น Konica Minolta (Model CR-10) (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ม.ขอนแก่น) รายงานค่าเป็น L^* ระบุความสว่าง (100: สีขาว, 0: สีดำ) a^* หมายถึงสีแดง (+) / สีเขียว (-) และ b^* หมายถึง สีเหลือง (+) / สีนํ้าเงิน (-) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการทดสอบการวัดสี เครื่อง Color Reader รุ่น Konica Minolta (Model CR-10)

โดยมีวิธีการทดสอบ

2.2.1.1. เริ่มจากการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบ เช่น ถาด ตารางสำหรับวัดค่า และเครื่องวัดสี

2.2.1.2. นำผลิตภัณฑ์ออกจากบรรจุภัณฑ์ที่ละกลุ่ม เทใส่ถาดและเกลี่ยให้ทั่วโดยไม่ให้เห็นชิ้นส่วนของถาด (ใช้ผลิตภัณฑ์ 300 กรัมต่อ 1 กลุ่ม)

2.2.1.3. วางตารางเพื่อกำหนดจุดในการวัดแต่ละจุด ดังรูปที่ 2

2.2.1.4. ใช้เครื่องวัดสีกดเพื่อบันทึกค่า L^* (ความสว่าง), a^* (เขียว-แดง), b^* (น้ำเงิน-เหลือง) ของแต่ละจุดจำนวนจุดละ 3 ครั้ง แล้วเฉลี่ยเป็นค่าของผลิตภัณฑ์ในช่องนั้นทำซ้ำจนครบทุกช่อง ทั้งหมด 12 ช่อง จำนวน 5 ซ้ำต่อ 1 กลุ่ม ดังรูปที่ 2

2.2.1.5. ใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมดในการรายงานผล

2.2.2. การวัดเนื้อสัมผัส

การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture Analysis (รุ่น Shimadzu Scientific Instruments EZ-SX texture analyzer) (วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น) ออกแบบมาเพื่อเสริมการทดสอบทางประสาทสัมผัสในการพัฒนาอาหารและการควบคุมคุณภาพ ให้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่เป็นรูปธรรมเกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของอาหาร เครื่องนี้มีเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่หลากหลาย ได้แก่ แรงอัด ความแข็ง แรงเฉือน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่อง Texture Analysis รุ่น Shimadzu Scientific Instruments EZ-SX texture analyzer

โดยมีวิธีการทดสอบ

2.2.2.1. เลือกวิธีการทดสอบแบบ Compression Test (การกดอัด) วัดแรงอัดสูงสุด (N) [2]

2.2.2.2. เลือกใช้หัวกดขนาด 49 mm และกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 40 mm

2.2.2.3. กำหนดความเร็วในการกด 100 mm/min

2.2.2.4. เตรียมผลิตภัณฑ์จำนวน 300 กรัม ต่อ 1 กลุ่ม นำผลิตภัณฑ์ใส่กระบอกทรงกรวย และชั่งน้ำหนัก 10 g (10 g ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 20-100 ตัว ต่อกลุ่มของผลิตภัณฑ์) ต่อ 1 การทดลอง ดังรูปที่ 4

2.2.2.5. เริ่มการทดสอบด้วยการกดอัด 2 จังหวะ โดยเมื่อถึง 50% แล้วคืนกลับแล้วกดซ้ำเพื่อหาพารามิเตอร์ให้ครบกระบวนการ

2.2.2.6. ทำซ้ำ 25 ซ้ำต่อ 1 กลุ่มตัวอย่าง (ออกแบบการทดลองตามปริมาณของตัวอย่าง) ตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างเบื้องต้น [12] ดังรูปที่ 5

2.2.2.7. ใช้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมดในการรายงานผล

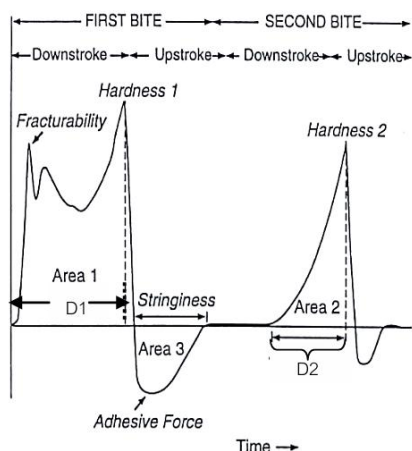


รูปที่ 4 การชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนการทดลอง



รูปที่ 5 การทดลองกดผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 กลุ่ม

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ในกระบวนการกดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) โดย TPA เป็นการทดสอบโดยใช้หัวทดสอบแบบแผ่นแบนซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของวัสดุเป็นการให้แรงกด (compression test) ลงบนตัวอย่างอาหารขนาดมาตรฐาน 2 ครั้ง เป็นการจำลองการใช้ฟันบดอาหาร การทดสอบด้วยวิธี texture profile analysis ประยุกต์ใช้วัดเนื้อสัมผัสของอาหารหลายชนิดและอาหารที่อยู่ในสภาวะที่พร้อมรับประทาน [13] โดยมีพารามิเตอร์ที่จะศึกษา ดังรูปที่ 6 ได้แก่ 1) Hardness แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดหรือเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรก 2) Adhesiveness หรือ stickiness เป็นพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่มีค่าเป็นลบของช่วงการกด หรือการเคี้ยว 3) Springiness หรือ elasticity เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการคืนตัวของรูปร่างจากการกดครั้งแรก 4) Cohesiveness เป็นพลังงานยืดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร 5) gumminess พลังงานหรือแรงที่ต้องใช้ในการทำให้อาหารกึ่งของแข็งแตกออกจนสามารถกลืนได้ 6) Chewiness พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร



รูปที่ 6 กราฟที่ได้จากการทำ Texture Profile Analysis ที่มา ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, [15]

จากคุณลักษณะดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณหาค่าคุณลักษณะเนื้อสัมผัสเพิ่มเติมได้ ดังนี้

$$\text{Cohesiveness} = \frac{\text{Area 2}}{\text{Area 1}} \quad (1)$$

$$\text{Springiness} = \frac{\text{Distance 2}}{\text{Distance 1}} \quad (2)$$

$$\text{Gumminess} = \text{Hardness}_1 \times \text{Cohesiveness} \quad (3)$$

$$\text{Chewiness} = \text{Gumminess} \times \text{springiness} \quad (4)$$

2.2.3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

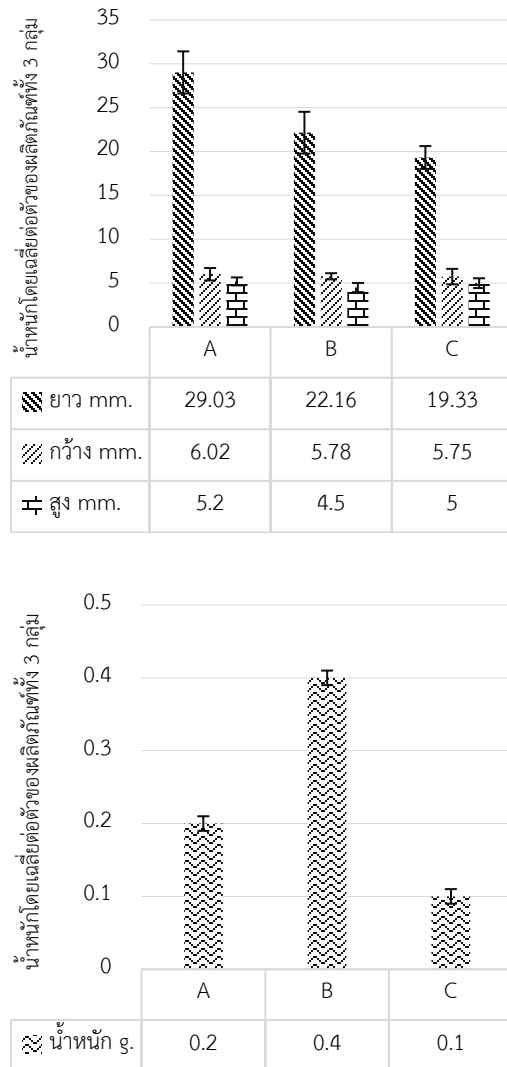
การวิจัยครั้งนี้ใช้กรอบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1. ลักษณะทางกายภาพ

ด้านขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์ สะดั่ง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา จากรูปที่ 7 พบว่า ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะดั่ง)ทอดจากทั้ง 3 กลุ่ม มีความแตกต่างกันทั้งด้านขนาดและน้ำหนัก โดยผลิตภัณฑ์กลุ่ม A มีความยาวมากที่สุด (6.02x29.03 mm) แต่มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อชิ้นเพียง 0.2 g และมีความหนาแน่นต่อปริมาตรอยู่ที่ 0.0726 g/cm³ ขณะที่กลุ่ม B แม้มีขนาดเล็กกว่า (5.78x22.16 mm) แต่มีน้ำหนักเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 0.4 g และมีความหนาแน่นต่อปริมาตรอยู่ที่ 0.0774 g/cm³ ในทางตรงกันข้าม กลุ่ม C ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมาตรฐาน อย. มีขนาดเล็กที่สุด

(5.75x19.33 mm) และมีน้ำหนักเฉลี่ยต่ำสุดที่ 0.1 g และมีความหนาแน่นต่อปริมาตรอยู่ที่ 0.0608 g/cm³



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบขนาดของผลิตภัณฑ์แต่ละ

กลุ่ม

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มีขายทั่วไป B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มี

ยอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน ออย.

จากผลการทดลองดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ความแตกต่างด้านขนาดไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกลุ่ม B มีขนาดเล็กกว่ากลุ่ม A แต่กลับมีน้ำหนักมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจากความแตกต่างในวิธีการแปรรูปและกระบวนการทอด เช่น ระดับความร้อนระยะเวลาในการทอด รวมถึงปริมาณน้ำมันที่ซึมเข้าสู่ตัวแมลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ [3] ที่ระบุว่าปริมาณน้ำและไขมันที่เหลืออยู่หลังการทอดมีผลโดยตรงต่อน้ำหนักสุดท้ายของแมลงทอด

ในด้านมาตรฐานคุณภาพ พบว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม C ที่ได้รับการรับรอง ออย. มีน้ำหนักและขนาดต่ำที่สุด แต่อาจแสดงถึงการควบคุมคุณภาพด้านความสม่ำเสมอและความกรอบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักน้อยกว่าอาจมีการสูญเสียน้ำและไขมันในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้ได้เนื้อสัมผัสที่กรอบและสีที่สม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม B ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ยอดขายสูงสุดทางออนไลน์ พบว่า มีแนวโน้มให้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักมากกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการรับรู้ของผู้บริโภคที่มองว่า “ตัวใหญ่และหนัก” มีความคุ้มค่ามากกว่า แม้ว่าด้านมาตรฐานคุณภาพอาจไม่สูงเท่ากลุ่ม C ก็ตาม

สรุปได้ว่า ลักษณะทางกายภาพด้านขนาดและน้ำหนักของจิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดมีความแตกต่างกันตามแหล่งผลิต โดยกลุ่ม A มีลักษณะยาวแต่เบา มีความแน่นเนื้ออยู่ในระดับกลาง กลุ่ม B มีลักษณะสั้นกว่าแต่หนักที่สุดมีความแน่นเนื้ออยู่ในระดับสูง และกลุ่ม C มีขนาดเล็กและเบาที่สุดมีความแน่นเนื้ออยู่ใน

ระดับต่ำ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของกระบวนการแปรรูปและมาตรฐานการผลิต ที่ส่งผลต่อคุณภาพความสม่ำเสมอ และการยอมรับของผู้บริโภคในเชิงพาณิชย์

3.2. ลักษณะทางกายภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอดทั้ง 3 แหล่งอยู่ในช่วง 28.9-30.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีความเข้มของสีค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยกลุ่ม A และ C มีค่าความสว่างสูงกว่า (30.7 และ 30.6 ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม B เท่ากับ 28.9 ซึ่งอาจสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการทอดหรือสภาวะการผลิตของกลุ่ม B ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเข้มกว่าเล็กน้อย อันเป็นผลจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทอด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล

ในด้านค่าความเป็นสีแดง – เขียว (a^*) พบว่ากลุ่ม C มีค่าสูงที่สุด (5.7) รองลงมาคือกลุ่ม B (4.9) และกลุ่ม A (4.0) แสดงว่าผลิตภัณฑ์จากกลุ่ม C มีโทนสีแดงเด่นชัดมากกว่า ซึ่งอาจมีผลต่อการรับรู้ความน่ารับประทานของผู้บริโภค เนื่องจากสีแดง – น้ำตาลมักสัมพันธ์กับการทอดที่เหมาะสมและเนื้อสัมผัสที่กรอบ

สำหรับค่าความเป็นสีเหลือง – น้ำเงิน (b^*) พบว่าของทั้งสามกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม A มีโทนสีเหลืองเด่นชัดมากที่สุด ขณะที่กลุ่ม B มีโทนสีเหลืองน้อยที่สุด ส่วนกลุ่ม C มีค่าอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่า a^* ซึ่งกลุ่ม C มีค่าสูงที่สุด จึงสะท้อนให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม C มีลักษณะสีแดง-น้ำตาลที่สม่ำเสมอมากกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งอาจเป็นผลจาก

กระบวนการทอดที่มีการควบคุมคุณภาพอย่างเหมาะสม

ตารางที่ 1

ลักษณะทางกายภาพด้านของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา

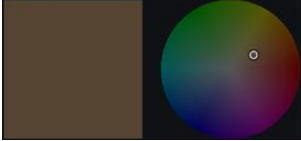
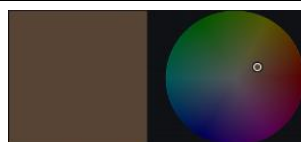
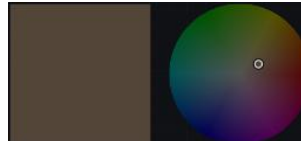
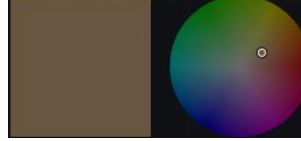
Group	L^*	a^*	b^*
A	30.7 ± 0.81 a	4.0 ± 1.14 c	14.4 ± 0.82 a
B	28.9 ± 1.92 a	4.9 ± 0.41 b	11.6 ± 0.59 c
C	30.6 ± 1.25 a	5.7 ± 0.31 a	12.3 ± 0.66 b
D1	37.8	4.7	15.5
D2	30.3	3.7	9.8

ค่าทั้งหมดแสดงถึงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 5 ครั้ง ($n=5$) ระบบสี CIE ถูกใช้เพื่อให้ได้ค่า L^* , a^* , b^* โดย a-c คือ ค่าเฉลี่ยภายในแถวที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) 1 และ D2 เป็นค่าสีมาตรฐานเพื่อการอ้างอิงและไม่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่มีขายทั่วไป B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน อย. D1 เป็นสีมาตรฐานแบบคว่ำทั้งหมด และ D2 เป็นสีมาตรฐานแบบหงายทั้งหมด

ตารางที่ 2

ลักษณะทางกายภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา

กลุ่ม	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	ลักษณะสี
A		
B		
C		
D1		
D2		

หมายเหตุ : ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่มีขายทั่วไป B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตึง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน ออย. D1 เป็นสีมาตรฐานแบบคว่ำทั้งหมด และ D2 เป็นสีมาตรฐานแบบหงายทั้งหมด ค่าทั้งหมดเป็นค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างทดสอบจำนวน 5 ซ้ำต่อกลุ่ม

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สีของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด (พันธุ์สะตึง)ทอดมีความแตกต่างระหว่างแหล่งที่มา ซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับมาตรฐาน ออย. ที่มีค่าสีแตกต่างอย่างชัดเจนในเชิงวิทยาศาสตร์การอาหาร

ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

3.3. ลักษณะทางกายภาพด้าน เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา

จากตารางที่ 3 พบว่า มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

Hardness (ค่าความแข็ง) ของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันชัดเจน โดยกลุ่ม B มีค่าความแข็งสูงที่สุด (230.980) เมื่อเทียบกับกลุ่ม A (106.061) และกลุ่ม C (89.882) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม B มีลักษณะกรอบแข็งกว่า อาจเกิดจากการใช้เวลาและอุณหภูมิในการทอดที่สูงกว่า ทำให้สูญเสียน้ำมันและมีการสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ขณะที่กลุ่ม C มีค่าความแข็งต่ำที่สุด แสดงถึงเนื้อสัมผัสที่กรอบน้อยกว่าแต่เบากว่า

Adhesiveness (ความเหนียวติดฟัน) และ Springiness (ความยืดหยุ่น) จากผลการเก็บข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างพบว่า ค่าความเหนียวติดฟันและค่าความยืดหยุ่นมีค่าที่สอดคล้องกับตัวอักษรทางสถิติ

Cohesiveness (ความเหนียวแน่นของเนื้อในตัวเอง) ของกลุ่ม B (0.482) สูงกว่ากลุ่ม A (0.289) และกลุ่ม C (0.215) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่สูง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างแน่นและคงรูปได้ดีกว่า

Gumminess และ Chewiness พบว่ากลุ่ม B มีค่า Gumminess สูงที่สุด (110.051) และค่า Chewiness สูงที่สุด (22.462) ซึ่งสัมพันธ์กับการมีความแข็ง ความเหนียวแน่น และความยืดหยุ่นสูง ทำให้ต้องใช้แรงเคี้ยวมากกว่ากลุ่มอื่นๆ ขณะที่กลุ่ม C มีค่า

Gumminess และ Chewiness ต่ำที่สุด (19.275 และ 0.737 ตามลำดับ) บ่งบอกว่ามีลักษณะกรอบเปราะเคี้ยวง่าย แต่ไม่คงโครงสร้างมากนัก

จากตารางที่ 3 และ รูปที่ 8 9 10 และ 11 สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอดจากกลุ่ม B ซึ่งเป็นสินค้าที่ขายดีที่สุดทางออนไลน์ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็ง เหนียวแน่น และต้องใช้แรงเคี้ยวมากที่สุด ขณะที่กลุ่ม A มีค่าปานกลาง ส่วนกลุ่ม C ที่ได้รับมาตรฐานอย. มีลักษณะกรอบเบา เคี้ยวง่าย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ [9] ที่กล่าวว่ากระบวนการทอดมีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งและความกรอบของแมลงกินได้ โดยอุณหภูมิและเวลาที่สูงจะเพิ่มค่าความแข็งและแรงเคี้ยวของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าการวิจัยนี้จะไม่ได้ทำการทดสอบการรับรู้ของผู้บริโภคโดยตรง แต่มีรายงานว่าค่าความแข็งและความกรอบที่สูงสัมพันธ์กับการรับรู้ความกรอบและความชอบของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์แมลงทอด [5]

ดังนั้น ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันของแต่ละกลุ่มมีความสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ ส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้ของผู้บริโภค โดยกลุ่ม B อาจตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่ชอบผลิตภัณฑ์กรอบแข็งและเคี้ยวได้มาก ขณะที่กลุ่ม C มีความโดดเด่นในด้านมาตรฐานและความง่ายในการบริโภค

ตารางที่ 3

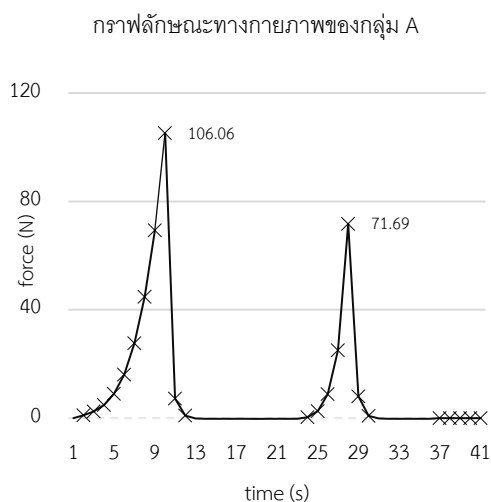
ลักษณะทางกายภาพด้าน เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด จาก 3 แหล่งที่มา

Trait	A	B	C
Hardness	106.06 ± 12.83 b	230.98 ± 36.25 a	89.88 ± 6.70 c
Adhesiveness	0.0072 ± 0.0198 c	0.348 ± 0.0535 a	0.0878 ± 0.0080 b
Springiness	0.0934 ± 0.0111 b	0.1908 ± 0.0322 a	0.0370 ± 0.0037 c
Cohesiveness	0.2888 ± 0.0092 b	0.4818 ± 0.0281 a	0.2152 ± 0.0090 c
Gumminess	30.46 ± 3.10 b	110.05 ± 11.86 a	19.28 ± 1.17 c
Chewiness	2.94 ± 0.60 b	22.46 ± 6.44 a	0.738 ± 0.101 c

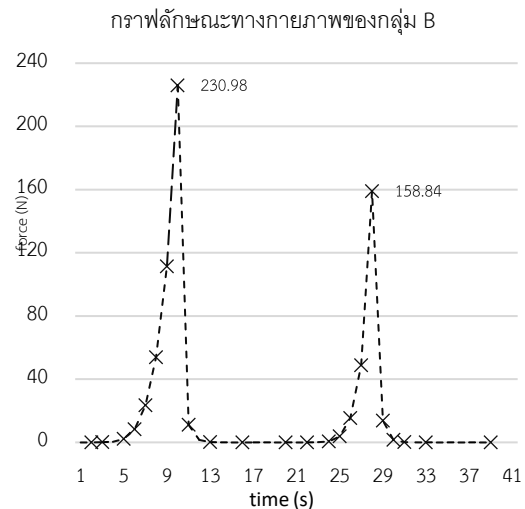
ค่าทั้งหมดแสดงถึงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 5 ครั้ง (n=5) และ a-c คือค่าเฉลี่ยภายในแถวที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ : A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มีขายทั่วไป B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน อย.

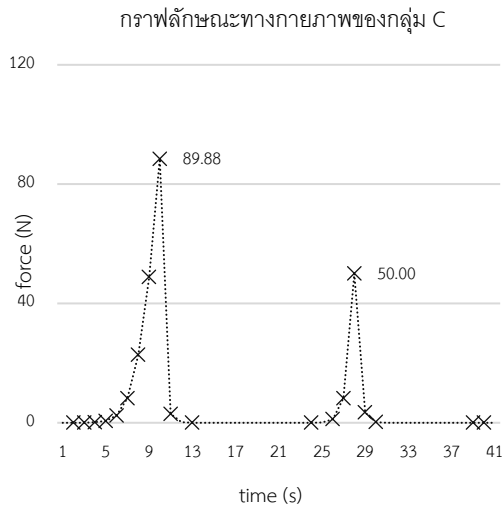
โดยกราฟที่ได้ของแต่ละกลุ่ม แสดงดังรูปที่ 8-11 ดังนี้



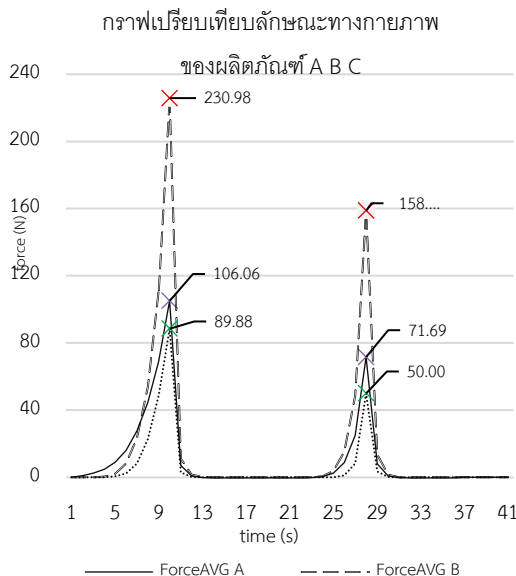
รูปที่ 8 กราฟลักษณะทางกายภาพด้าน เนื้อสัมผัสของ A ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มีขายทั่วไป



รูปที่ 9 กราฟลักษณะทางกายภาพด้าน เนื้อสัมผัสของ B ผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มียอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์



รูปที่ 10 กราฟลักษณะทางกายภาพด้าน เนื้อสัมผัส
ของ C ผลิตรภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด
ที่ได้รับมาตรฐาน อย.



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ
ด้าน เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด
จาก 3 แหล่งที่มา

หมายเหตุ : A ผลิตรภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มี
ขายทั่วไป B ผลิตรภัณฑ์จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่มี
ยอดขายสูงที่สุดในร้านค้าออนไลน์ C ผลิตรภัณฑ์
จิ้งหรีด(พันธุ์สะตัง)ทอด ที่ได้รับมาตรฐาน อย.

4. สรุป

ผลการศึกษาด้านลักษณะทางกายภาพพบว่า แม้
ผลิตรภัณฑ์จากทั้งสามกลุ่มจะมีความแตกต่างกันด้าน
ขนาดและน้ำหนัก แต่ขนาดไม่ใช่ว่าปัจจัยหลักที่กำหนด
คุณภาพของผลิตรภัณฑ์ โดยกลุ่ม B มีน้ำหนักเฉลี่ยสูง
ที่สุดแม้จะมีขนาดเล็กกว่ากลุ่ม A สะท้อนถึงอิทธิพล
ของกระบวนการทอดและการดูดซึมน้ำมันต่อ
คุณลักษณะของผลิตรภัณฑ์ ขณะที่กลุ่ม C ซึ่งเป็น
ผลิตรภัณฑ์ที่ได้รับมาตรฐาน อย. มีขนาดและน้ำหนัก
ต่ำที่สุด แสดงถึงการควบคุมกระบวนการผลิตที่ช่วย
ลดการคงเหลือน้ำและไขมัน ส่งผลให้ผลิตรภัณฑ์มี
ความสม่ำเสมอมากขึ้น

ในด้านลักษณะทางกายภาพของสี พบว่า ค่าความ
สว่าง (L^*) ของผลิตรภัณฑ์จากทั้งสามแหล่งไม่แตกต่าง
กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ค่า a^*
และ b^* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย
ผลิตรภัณฑ์กลุ่ม C มีค่า a^* สูงที่สุด สะท้อนถึงโทนสี
แดง-น้ำตาลที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะของการทอด
ที่เหมาะสม ในขณะที่กลุ่ม B มีค่า b^* สูงกว่า แสดงถึง
โทนสีเหลืองที่เด่นกว่า ความแตกต่างของค่าสีดังกล่าว
สะท้อนถึงความแตกต่างของกระบวนการทอดและ
การควบคุมคุณภาพในแต่ละแหล่งผลิต

ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile
Analysis (TPA) พบว่าผลิตรภัณฑ์จากทั้งสามกลุ่มมี
ความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในทุกพารามิเตอร์ โดย
กลุ่ม B มีค่าความแข็ง ความเหนียวแน่นภายใน

(cohesiveness) ความเหนียว (gumminess) และแรงเคี้ยว (chewiness) สูงที่สุด แสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็ง แน่น และต้องใช้แรงเคี้ยวมาก ขณะที่กลุ่ม C มีค่า gumminess และ chewiness ต่ำที่สุด บ่งชี้ถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบเบา เคี้ยวง่าย และมีความนุ่มเฝื่อนมากกว่า ส่วนกลุ่ม A มีค่าพารามิเตอร์อยู่ในระดับปานกลาง โดยสรุป ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของคุณลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดพันธุ์สะต๋องทอดมีความสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพในแต่ละแหล่งที่มา ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดเกณฑ์คุณภาพสำหรับการควบคุมกระบวนการทอด โดยเฉพาะการออกแบบและพัฒนากระบวนการทอดแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพนุ่มเฝื่อนและเหมาะสมต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกล เกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ คุชฌ์นิพนธ์หรือการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และทุนวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบ

งานนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Abajue MC, Wogu MN. Sustainable food systems: case studies of successful insect-based enterprises. In: Ogwu MC, Izah SC, editors. Edible insects: nutritional benefits, culinary innovations and sustainability. Cham: Springer; 2025. p. 1–20. doi:10.1007/978-3-031-90087-7_12.
- [2] Bourne MC, Kenny JF, Barnard J. Computer-assisted readout of data from texture profile analysis curves. J Texture Stud. 1978;9:481–94. doi:10.1111/j.1745-4603.1978.tb01219.x.
- [3] Halloran A, et al. Life cycle assessment of cricket farming in north-eastern Thailand. J Clean Prod. 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.017.
- [4] Hanboonsong Y, Jamjanya T, Durst PB. Six-legged livestock: edible insect farming, collection and marketing in Thailand. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. Available from: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i3246e>

- [5] Lee H, Kim Y. Color and consumer perception of fried insect foods: a sensory evaluation. *Food Sci Biotechnol*. 2019;28(3):787–95. doi:10.1007/s10068-019-00570-3.
- [6] Oonincx DGAB, et al. An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PLoS One*. 2010;5(12):e14445. doi:10.1371/journal.pone.0014445.
- [7] Rumpold BA, Schlüter OK. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol Nutr Food Res*. 2013;57(5):802–23. doi:10.1002/mnfr.201200735.
- [8] Smith J, Tan H, Wong M. Consumer acceptance of edible insects: effect of product presentation and information. *Appetite*. 2020;144:104478. doi:10.1016/j.appet.2019.104478.
- [9] Tan YL, Tan FA, Chye FY. Nutritional properties of selected edible insects. *Biolife Sci Forum*. 2024;4:43. doi:10.3390/blsf2024040043.
- [10] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World population prospects 2019 [Internet]. New York: United Nations; 2019 [cited 2025 Jul 13]. Available from: <https://www.un.org/development/desa/>
- pd/news/world-population-prospects-2019-0
- [11] van Huis A, et al. Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annu Rev Entomol*. 2013;58:563–83. doi:10.1146/annurev-ento-120811-153704.
- [12] Yamane T. *Elementary sampling theory*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1967.
- [13] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, จิราภา วิทยารักษ์. พจนานุกรมวิศวกรรมอาหาร (อังกฤษ–ไทย) [Internet]. ไม่ปรากฏปี [cited 2025 Jul 13]. Available from: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0987/texture-profile-analysis>
- [14] รุจิรา คุ่มทรัพย์, ธนาวรรณ สุขเกษม, รุ่งนภา สนั่นดี. พฤติกรรมการบริโภคแมลงกินได้ตามวิถีภูมิปัญญาท้องถิ่น: กรณีศึกษาตำบลปากช่อง อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*. 2018;3(2):23–32.
- [15] ศิริเลิศ ธ. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. *J Food Technol Siam Univ*. 2015;3(1):6–13. Available from: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFTSU/article/view/38437>

- [16] สุปาณี เลี้ยงพรพรรณ. บทความการบริโภค
แมลงส่งผลกระทบต่อมนุษย์อย่างไร. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2012;1(2):1–6.
Available from:
<https://ph02.tcithaijo.org/index.php/tsujournal/article/view/68352/55659>

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 ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินิจย่อหน้าใหม่ ให้พินิจบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินิจบทความ

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 , ... พินิจหมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ 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	3.4×10^4
		CV	3.3×10^4
R2	D2	ILIT	6.0×10^4

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

x	a_r / m_r	$2\zeta_r \omega_r$
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. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหมโดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาด สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [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>

