

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol.11 No.1 January — June 2025

Research Article

The Study on Biomass Production from Hyacinths Mixed with Mangosteen Peel 1

*Kritsana navarat Boonyarid Buarabut Surapong Sotong
Akkapong Sathavarinthu Buranee Rabiab Kasem Maantham
and Krisorn Ruaypom*

Semi Automatic Hydraulics Durian Peeling Machine 11

Krisorn Ruaypom Boomyarid Buarabut and Manasanan Bunpalwong

An Automatic Egg Collection System Using a Robotic Arm Controlled
by Machine Learning and Deep Learning in Free-Range Chicken Farming 19

Apiwat Boonkong Umaporn Phiwchomphoo and Jindarat Pikulsri

Finite Element Simulation of Acting Forces and Deformation of Beating Blades 30
in Banana Pseudostem Fiber Extraction Machines

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

Design of Programmable Logic Controller for Controlling Automation System 46
of Robot and Pneumatic Sorter

Piyawat Sritram Thanawat Laplea Phea Run Chhorn and Tossaporn Chamsai

Study on the Thermal Properties of Charcoal Briquettes from Durian Peel 57
5 Species

*Boonyarid Buarabut Krisorn Ruaypom Akkapong Sathavarinthu
and Surapong Sothong*

Eco-Friendly Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles 71
Using Margosa (*Azadirachta indica*) Leaf Extract for Sustainable Agricultural
Nanotechnology

Suttirak Pairoj and Bundit Boonkhao

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

FEAT JOURNAL

FEAT JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

Vol.11 No.1

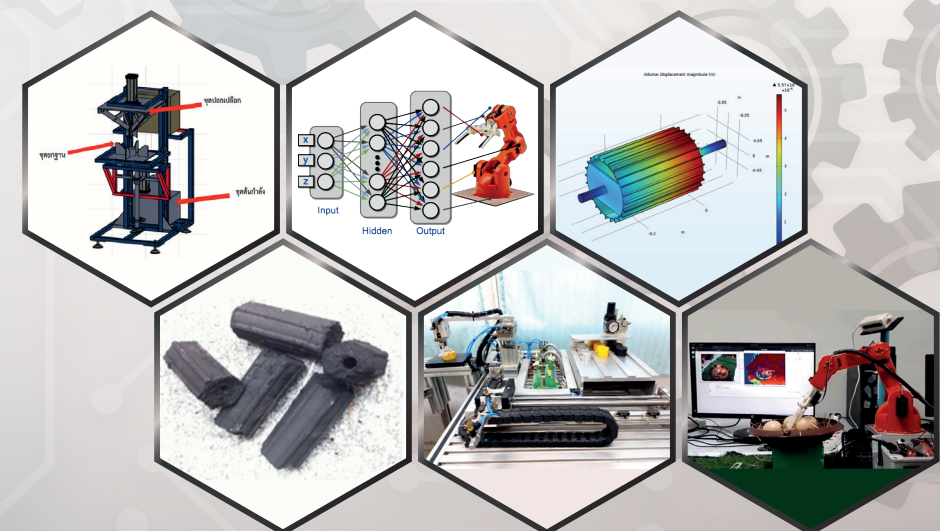


Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol.11 No.1 January – June 2025

ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

ISSN 2408-0985

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. ชัยยันต์	จันทร์ศิริ	สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. ชนิษฐา	คำวิลัยศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. กัลยากร	ขวัญมา	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร. วาอิส	ลีลาภัทร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. ธนา	ราชภรณ์ศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. วีระชัย	อาจหาญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร. นิยม	กำลังดี	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. คำธณ	พิทักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. วิภาดา	สนองราชบุรี	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. สิริวิชัย	เดชะเกษราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ. ฤกษ์ชัย	ศรีวรมาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. จักรมาศ	เลาหวนิช	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. จำเริญ	เกณท์สาคร	ภาควิชาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บรรณาธิการ

ฝ่ายจัดการวารสาร

สำนักงาน

รศ.ดร. รัชพล สันติวรการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น

นางสาวฉัตรเกล้า มะชะศรี

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น

จ.ขอนแก่น 40002

กำหนดเผยแพร่

พิมพ์ที่

ISSN

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

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

: 2408 - 0985



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและ เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

Farm Engineering and Automation Technology Journal

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.Chaiyan Chansiri	Department of Agricultral Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Khanita Khamwilaisak	Department of Chemical Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Kulyakorn Khunmar	Department of Environmental Engineering	Khon Kaen University
Dr.Watis Leelapatra	Department of Computer Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Thana Radpukdee	Department of Industrial Engineering	Khon Kaen University
Asst.Prof.Dr.Weerachai Arjharn	School of Mechanical Engineering	Suranaree University of Technology
Asst.Prof.Dr.Niyom Kamlangdee	School of Science	Walailak University
Asst.Prof.Kumron Pitaks	Department of Industrial Engineering	Prine of Songkla University
Asst.Prof.Dr.Wipada Sanongraj	Department of Environmental Engineering	Ubon Ratchathani University
Asst.Prof.Dr.Sirivit Taechajedcadarungsri	Department of Mechanical Engineering	Ubon Ratchathani University
Asst.Prof.Rerkchai Srivoramas	Department of Civil Engineering	Ubon Ratchathani University
Assoc.Prof.Dr.Juckamas Laohavanich	Department of Mechanical Engineering	Maharakham University
Asst.Prof.Dr.Rampai Gaensakoo	Department of Biotechnology	Maharakham University
Editor-in-chief	Assoc.Prof.Dr.Ratchaphon Suntivarakorn	Khon Kaen 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 และไม่ใช่ผลงานที่คัดลอกโดยวารสารมีกำหนดออกทุก 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 1 ประจำเดือน มกราคม – มิถุนายน 2568 ฉบับนี้เป็นปีที่ 11 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 7 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

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

รองศาสตราจารย์รัชพล สันติวรากร

บรรณาธิการ

ratchaphon@kku.ac.th

21 มิถุนายน 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. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่นหากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของตนเองรวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ
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

การศึกษาการผลิตชีวมวลจากผักตบชวาผสมเปลือกมังคุด	1
กฤษณะ นาวารัตน์ บุญฤทธิ์ บัวระบติ สุรพงษ์ โช้ทอง อัครพงศ์ สถาวรินทุ บุราณี ระเบียบ เกษม หมั่นธรรม และ ไกรสร รวยป้อม	
เครื่องปอกเปลือกทุเรียนระบบไฮดรอลิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ	11
ไกรสร รวยป้อม บุญฤทธิ์ บัวระบติ และ มนัสนันท์ บุญปลาวงศ์	
ระบบหยิบไข่ไก่อัตโนมัติด้วยแขนกลควบคุมจากการเรียนรู้ของเครื่อง และการเรียนรู้เชิงลึกในฟาร์มไก่แบบปล่อยอิสระ	19
อภิวัตร บุญกอง อุมารณณ์ ผิวชมพู และ จินดารัตน์ พิกุลศรี	
การจำลองแรงกระทำและการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	30
ธีรเชรินทร์ เลิศรักษ์วรกุล วีระพล แก้วก่า อติศักดิ์ บุตรวงษ์ คมสัน ตันติชูเกียรติ ธวัชชัย สีลาใส อภิชาติ ศรีชาติ และ กวีพงษ์ หงส์ทอง	
การออกแบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอัตโนมัติ ของหุ่นยนต์และเครื่องคัดแยกชิ้นงานนิวเมติกส์	46
ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม ธนวัฒน์ ลับแล เพ็ญ รุน ชอร์ และ ทศพร แจ่มใส	
การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนต้านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียน 5 สายพันธุ์	57
บุญฤทธิ์ บัวระบติ ไกรสร รวยป้อม อัครพงศ์ สถาวรินทุ และ สุรพงษ์ โช้ทอง	
การสังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมโดยใช้สารสกัดจากใบสะเดา (Azadirachta indica) เพื่อประยุกต์ใช้ในนาโน เทคโนโลยีทางการเกษตรอย่างยั่งยืน	71
สุทธิรักษ์ ไพโรจน์ และ บัณฑิต บุญขาว	

Research Article

The Study on Biomass Production from Hyacinths Mixed with Mangosteen Peel	1
<i>Kritsana navarat Boonyarid Buarabut Surapong Sotong</i>	
<i>Akkapong Sathavarinthu Buranee Rabiab Kasem Maantham</i>	
<i>and Krisorn Ruaypom</i>	
Semi Automatic Hydraulics Durian Peeling Machine	11
<i>Krisorn Ruaypom Boomyarid Buarabut and</i>	
<i>Manasanan Bunpalwong</i>	
An Automatic Egg Collection System Using a Robotic Arm Controlled by Machine Learning and Deep Learning in Free-Range Chicken Farming	19
<i>Apiwat Boonkong Umaporn Phiwchomphoo and Jindarat Pikulsri</i>	
Finite Element Simulation of Acting Forces and Deformation of Beating Blades in Banana Pseudostem Fiber Extraction Machines	30
<i>Theeratechin Lertrakworakul Weeraphon Kaewka</i>	
<i>Adisak Bootwong Komsan Tuntichukiad Tawatchai Seelaso</i>	
<i>Aphichat Srichat and Kaweepong Hongtong</i>	
Design of programmable logic controller for controlling automation system of robot and pneumatic sorter	46
<i>Piyawat Sriram Thanawat Laplea Phea Run Chhorn and</i>	
<i>Tossaporn Chamsai</i>	
Study on the Thermal Properties of Charcoal Briquettes from Durian Peel 5 Species	57
<i>Boonyarid Buarabut Krisorn Ruaypom Akkapong Sathavarinthu</i>	
<i>and Surapong Sothong</i>	
Eco-Friendly Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Margosa (<i>Azadirachta indica</i>) Leaf Extract for Sustainable Agricultural Nanotechnology	71
<i>Suttirak Pairoj and Bundit Boonkhao</i>	



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาการผลิตชีวมวลจากผักตบชวาผสมเปลือกมังคุด

The Study on Biomass Production from Hyacinths Mixed with Mangosteen Peel

กฤษณะ นาวารัตน์¹⁾, บุญฤทธิ์ บัวระบัต¹⁾, สุรพงษ์ โช้ทอง¹⁾, อัคมพงศ์ สดาวรินทร์¹⁾,
บุราณี ระเปียบ¹⁾, เกษม หมั่นธรรม¹⁾, ไกรสร รวยบ้อม¹⁾

Kritsana Navarat¹⁾, Boonyarid Buarabut¹⁾, Surapong Sotong¹⁾, Akkapong Sathavarinthu¹⁾,
Burane Rabiab¹⁾, Kasem Maantham¹⁾ and Krisorn Ruaypom¹⁾

¹⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตจันทบุรี, จันทบุรี, 22210

¹⁾ Department of Mechanical Technology, Faculty of Agro-Industrial Technology RMUTTO, Chanthaburi, 22210

Received: 5 November 2024

Revised: 31 March 2025

Accepted: 1 April 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

การผลิตชีวมวลจากผักตบชวามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพคุณสมบัติทางความร้อนและความ
คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากผักตบชวาผสมเปลือกมังคุด ในการผลิตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm และม
ีความยาวของแท่งชีวมวลระหว่าง 10-50 mm ในการผลิตชีวมวลจากผักตบชวาจะมีอยู่ 2 สูตร คือ สูตรไม่ผสมผ
งด้านมังคุด กับสูตรที่ผสมผงด้านมังคุด มีอัตราส่วนในการผสม คือ 1:4 จากการทดสอบหาค่าความร้อนพบว่า
ชีวมวลแบบแห้งไม่ผสมผงด้านลดความชื้น ให้ค่าความร้อนสูงสุดคือ 5,102.21 cal/g จากการทดสอบค่าความ
แข็งแรงชีวมวลแบบไม่ผสมผงด้านลดความชื้นมีความแข็งแรงสูงที่สุดคือ 10 Kg/cm² การทดสอบเวลาในการจุ
ดตีไฟแบบผสมผงด้านลดความชื้นให้เวลาในการจุดตีไฟนานที่สุดคือ 53.47 min การทดสอบอุณหภูมิในการจุ
ดตีไฟแบบไม่ผสมผงด้านลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 99 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของแบบ

ไม่ผสมถ่านลดความชื้นมีค่าน้อยที่สุด คือ 5.23% การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มีความคุ้มค่าที่ 5 ปี 7 เดือน 20 วัน

คำสำคัญ: ชีวมวล, ผักตบชวา, เปลือกมังคุด

Abstract

The purpose of producing biomass from water hyacinth is to study its physical characteristics, thermal properties, and economic worthiness if used in business from hyacinths mixed with mangosteen peel. In the production process, the diameter is 4 mm, and the length of the biomass sticks is between 10-50 mm. In the production of biomass from water hyacinth, there are two formulas: the formula without mixed mangosteen charcoal powder and the formula with mixed mangosteen charcoal powder. The mixing ratio is 1:4. From the calorific value test, it was found that the dried biomass without mixed charcoal powder provided the highest calorific value of 5,102.21 cal/g. From the strength test, the dried biomass without mixed charcoal powder had the highest strength, which was 10 kg/cm². The ignition time test of the dried biomass mixed with charcoal powder showed the longest ignition time, which was 53.47 minutes. The ignition temperature test of the dried biomass without mixed charcoal powder had the highest value, which was 99 degrees Celsius. From the ash content analysis, the dried biomass without mixed charcoal powder had the lowest ash content, which was 5.23%. The economic feasibility analysis indicated that the payback period was 5 years, 7 months, and 20 days.

Keywords: Biomass: Hyacinth: Mangosteen Peel

*ติดต่อ: kritsana_na@rmutto.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานในภาคการผลิตหรือแม้แต่ความต้องการการใช้พลังงานในครัวเรือนสำหรับการดำรงชีวิตของประชาชนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งสวนทางกับปริมาณพลังงานที่สามารถผลิตได้ในปัจจุบัน ทำให้แนวโน้มและทิศทางของพลังงานกำลังจะเข้าสู่วิกฤต โดยปัจจุบันหลายหน่วยงานรวมถึงประชาชนได้มีการตระหนักถึงความสำคัญของพลังงาน ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า

ซึ่งพลังงานที่ใช้ในภาคครัวเรือนของประชาชนส่วนมากเป็นพลังงานด้านความร้อนที่ใช้ในการดำรงชีพ ประกอบอาหารและมีแนวโน้มการใช้เพิ่มมากขึ้น และทิศทางของราคาก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ต้องการในการใช้อย่างมาก โดยกระบวนการในการผลิต ณ ปัจจุบันยังขาดประสิทธิภาพ โดยสังเกตจากปริมาณเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางเกษตรกรรมที่มีมาก พลังงานชีวมวล (Biomass Energy) จึงเป็นพลังงาน

สะอาด ทางเลือก ที่สามารถผลิตได้จากวัสดุชีวมวล และอินทรีย์วัตถุที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น ผลิตผล และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้และเศษไม้ หรือของเหลือจากชุมชนและภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังสอดคล้องกับ BCG Model ซึ่งเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวม ที่จะพัฒนา 3 เศรษฐกิจ ไปพร้อมกัน ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio economy) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรชีวภาพเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยเน้นการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เชื่อมโยงกับ เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่คำนึงถึงการนำวัสดุต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และ ทั้ง 2 เศรษฐกิจนี้ อยู่ภายใต้เศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) [1] ซึ่งเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจที่ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการพัฒนาเศรษฐกิจเท่านั้น แต่ต้องพัฒนาควบคู่ไปกับการพัฒนาสังคม และการรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุลให้เกิดความมั่นคงและยั่งยืนไปพร้อมกัน โดยเปลี่ยนข้อได้เปรียบที่ไทยมีจากความหลากหลายทางชีวภาพและวัฒนธรรม ให้เป็นความสามารถในการแข่งขันด้วยนวัตกรรม เพื่อให้เกิดเศรษฐกิจ BCG ที่เติบโตแข่งขันได้ในระดับโลก เกิดการกระจายรายได้ลงสู่ชุมชน ลดความเหลื่อมล้ำ ชุมชนเข้มแข็ง มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาที่ยั่งยืน

ผักตบชวาจัดได้ว่าเป็นวัชพืชน้ำที่กำลังสร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชากรและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย เนื่องจากมีการแพร่พันธุ์ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย และเจริญเติบโตได้รวดเร็วภายใน 4 เดือน โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ถึง 1,200 ต้น อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีอายุหลายฤดู ทนได้ทั้งอากาศร้อนและเย็น จึงทำให้ผักตบชวากลายมาเป็นวัชพืชน้ำที่ก่อให้เกิดปัญหาตามแหล่งน้ำใน

หลายพื้นที่ [2] ส่งผลกระทบในการสัญจรทางน้ำ เนื่องจากแม่น้ำลำคลองเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญของชาวบ้านตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เพราะต้องอาศัยแม่น้ำลำคลองในการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศโดยรวม เพราะผักตบชวาจะเจริญเติบโตได้ดีในหนองน้ำ บึง หรือ บริเวณที่น้ำนิ่ง เมื่อแหล่งน้ำนั้นมีผักตบชวาหนาแน่นจะบดบัง แสงแดด ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตใต้น้ำหรือพืชน้ำชนิดอื่นๆ ตายลง ปัญหาใหญ่ในปัจจุบัน คือ การระบายน้ำทำได้ยาก เพราะผักตบชวากีดขวางทางน้ำไหล มีผลให้ความเร็วในการระบายน้ำ ในคลองส่งน้ำลดลง รวมถึงปัญหาน้ำท่วมขังในพื้นที่เป็นเวลานาน อีกทั้งซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกันทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นที่อาศัยของสัตว์ร้าย เป็นผลกระทบต่อประชาชนในหลายส่วน

ในการนี้ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำผักตบชวามาอัดเป็นแท่งชีวมวลและเปลือกมังกุด [3]-[4] มาบริหารจัดการอย่างถูกต้องให้เป็นเป็นระบบ โดยการนำมาแปรรูปเป็นแท่งชีวมวล เพื่อลดต้นทุนทางด้านพลังงาน สร้างมูลค่า และใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งจากชุมชนและภาคอุตสาหกรรม ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิภาพ

2. วิธีการการวิจัย

2.1. การคำนวณหาค่าความร้อนตามมาตรฐาน (ASTM D5865) [5]

โดยวิธีการนำแท่งตัวอย่างแท่งชีวมวลมาทำการคำนวณหาค่าความร้อนแบบ Normal หาค่า Gross heat of combustion ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter โดยคำนวณค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (1)

$$Q_t = \frac{TW - C_1 - C_2 - C_3}{m} \quad (1)$$

โดยที่

Q_t = ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงรวม (cal g⁻¹)

T = ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)

W = ค่าสมมูลย์ทางพลังงานของแคลอรีมิเตอร์

(2,426 cal/°C)

m = มวลของแท่งชีวมวลตัวอย่าง (g)

C_1 = ค่าความร้อนที่เกิดจากการดไนตริก

(cal cm⁻¹)

C_2 = ค่าความร้อนที่เกิดจากการดซัลฟูริก

(cal cm⁻¹)

C_3 = ค่าความร้อนที่เกิดจากขดลวดไฟฟ้า

(cal cm⁻¹)

2.2. การคำนวณหาปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน (ASTM D3173) [6]

นำตัวอย่างแท่งชีวมวลมาทำการคำนวณหาค่าความชื้น ดังสมการที่ (2)

$$M = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

M = ปริมาณความชื้น (%)

A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

2.3. สูตรคำนวณหาปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน (ASTM D3174) [7]

นำตัวอย่างแท่งชีวมวลมาทำการคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการที่ (3)

$$As = \frac{(K-Dc)}{F} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

As = ปริมาณเถ้า (%)

K = น้ำหนักของเถ้าและถ้วยกระเบื้อง (g)

Dc = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (g)

F = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (g)

2.4. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องจักร OEE [8]

โดยใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์กระแสสลับ 220 V 50 Hz 13.7 A 2.2 kW คำนวณจากสมการที่ (4) และ (5)

$$I = \frac{P}{V} \times PF \times eff \quad (4)$$

$$P = V \times I \times PF \times eff \quad (5)$$

โดยที่

I = กระแสมอเตอร์ (A)

v = แรงดันไฟฟ้า (V)

P = กำลังไฟฟ้า (W)

PF = ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์

$eff.$ = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

2.5. การออกแบบหาอัตราทดและความเร็วรอบในการหมุนของสกรูขนถ่ายวัสดุ [9]

คำนวณจากสมการที่ (6) และ (7)

$$I = \frac{n_1}{n_2} \quad (6)$$

โดยที่

I = อัตราทด

n_1 = ความเร็วรอบพูลเลย์ขับ (rpm)

n_2 = ความเร็วรอบพูลเลย์ตาม (rpm)

$$Q_s = k \frac{\pi}{4} ((DF - D_s)^2 p n w) \quad (7)$$

โดยที่

Q_s = อัตราขนถ่ายวัสดุ (kg h^{-1})

k = ประสิทธิภาพในการบรรจุวัสดุลงระหว่างเกลียว = 1

D_f = เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียว (cm)

D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลเกลียว (cm)

p = ระยะห่างระหว่างเกลียว (cm)

n = ความเร็วรอบ (rpm)

w = น้ำหนักของวัสดุ (kg)

C = แฟคเตอร์เนื่องจากมุมเอียงตามแนวราบ = 1

2.6. การวิเคราะห์หาค่าความสามารถของเครื่องอัดแท่งชีวมวล [8]

ประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดแท่งชีวมวลและหาค่าความสามารถของเครื่องจักรกลคำนวณจากสมการ (8) ถึง (11)

$$Ar = \frac{L}{T} \times 100 \quad (8)$$

$$Pr = \frac{N}{T} \times 100 \quad (9)$$

$$Qr = \frac{o}{q} \times 100 \quad (10)$$

$$OEE = \frac{Ar}{100} \times \frac{Pr}{100} \times \frac{Qr}{100} \quad (11)$$

$$Cp = \frac{c}{t} \quad (12)$$

โดยที่

Pr = ประสิทธิภาพการทำงาน (%)

Ar = อัตราความพร้อมในการใช้งาน (%)

Qr = อัตราคุณภาพ (%)

OEE = ประสิทธิภาพเครื่องจักรโดยรวม (%)

Cp = ความสามารถของเครื่อง (%)

T = เวลาที่เครื่องจักรอัดแท่งชีวมวล (hr)

L = เวลาการเดินทางเครื่องอัดแท่งชีวมวล (hr)

N = เวลาเดินเครื่องสุทธิ (ชั่วโมง) = (hr-L)

o = จำนวนแท่งชีวมวลที่ได้ตามข้อกำหนด (rod)

q = จำนวนแท่งชีวมวลทั้งหมด (rod)

C = น้ำหนักวัตถุดิบ (kg)

t = เวลาในการอัดแท่งชีวมวล (hr)

2.7. ความสามารถเชิงวัสดุ [10]

ความหมายของความสามารถเชิงวัสดุ หมายถึง ความสามารถสูงสุดที่กำลังการผลิต โดยทั่วไปมีหน่วยเป็นปริมาณผลผลิตต่อเวลา เช่น ต้นต่อปี คันต่อวัน เป็นต้น คำนวณจากสมการที่ (13)

$$\text{ความสามารถเชิงวัสดุ} = \frac{\text{น้ำหนัก (กิโลกรัม)}}{\text{เวลา (ชั่วโมง)}} \quad (13)$$

2.8. จุดคุ้มทุน (Break Even Point) [7]

ทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ของการใช้เครื่องอัดแท่งชีวมวลดังสมการที่ (14) และสมการที่ (14) ระยะเวลาคืนทุนเครื่องอัดแท่งชีวมวล (Pay-back period)

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (14)$$

โดยที่

PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (hr year^{-1})

P = ราคาเครื่องจักร (bath)

R = กำไรสุทธิต่อปี (bath year-1)

จุดคุ้มทุนเครื่องอัดแท่งชีวมวล (Break-even point)

$$BEP = \frac{Fc}{Bc - Vc} \quad (15)$$

โดยที่

BEP = จุดคุ้มทุน (hr year⁻¹)

Fc = ค่าใช้จ่ายคงที่ (bath)

Bc = อัตราการรับจ้าง (bath hr⁻¹)

Vc = ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (bath hr⁻¹)

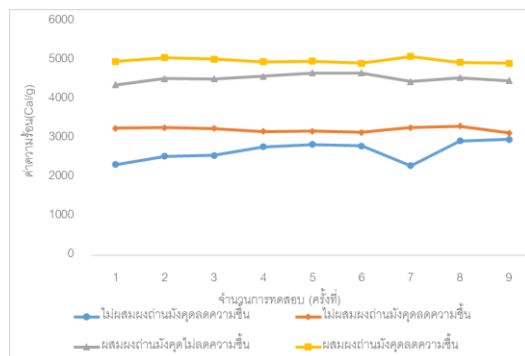
2.9. วิธีการศึกษาการผลิตชีวมวลจาก ผักตบชวาผสมเปลือกมังคุด

โดยมีปัจจัยในการทดสอบ คือ ผักตบชวาแบบแห้ง ความชื้นไม่เกิน 7-12% และแบบเปียกความชื้นไม่เกิน 60% w.d. แบบผสมกับถ่านและไม่ผสมถ่าน จากเปลือกมังคุด ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ และทดลองการต้มน้ำมาตรฐาน ASTM D5865

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1. ผลการทดสอบหาค่าความร้อนของแท่งชีวมวล

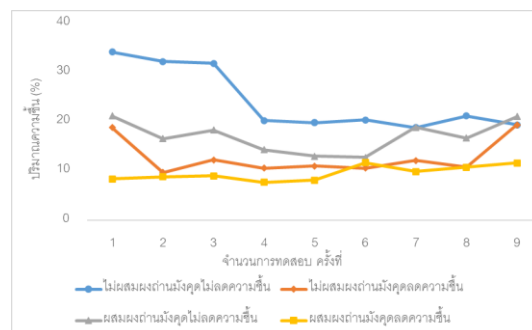
จากการหาปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเครื่อง BombCalorimeter พบว่าค่าความร้อนเฉลี่ยของแบบผสมผงถ่านมังคุดลดความชื้นมีค่าสูงสุด คือ 4,994.78 cal/g โดยแบบผสมถ่านลดความชื้นมีค่าความร้อนสูงสุด คือ 5,102.21 cal/g และค่าความร้อนเฉลี่ยของแบบไม่ผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าต่ำสุด คือ 2,677.46 cal/g และแบบไม่ผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าความร้อนต่ำสุด คือ 2,298.47 cal/g (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ค่าความร้อนเฉลี่ยของแท่งชีวมวล

3.2. ผลการทดสอบปริมาณความชื้นของแท่งชีวมวล

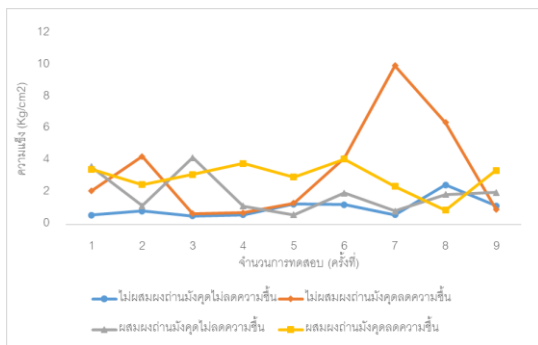
การทดสอบหาปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน (ASTM D 3173) แสดงให้เห็นว่าแบบผสมผงถ่านมังคุดลดความชื้นมีค่าเฉลี่ยร้อยละความชื้นต่ำที่สุด คือ 9.50% โดยแบบผสมผงถ่านมังคุดลดความชื้นมีร้อยละความชื้นต่ำที่สุด คือ 7.63% และแบบไม่ผสมถ่านไม่ลดความชื้นค่าเฉลี่ยร้อยละความชื้นสูงที่สุด คือ 24.14% โดยที่แบบไม่ผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าร้อยละความชื้นสูงที่สุด คือ 34.05% (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของแท่งชีวมวล

3.3. ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของแท่งชีวมวล

การทดสอบการคำนวณหาความแข็งแรงแสดงให้เห็นว่าแบบไม่ผสมผงถ่านลดความชื้นมีค่าเฉลี่ยร้อยละความแข็งแรงสูงสุด คือ 3.40 Kg/cm² โดยแบบไม่ผสมผงถ่านลดความชื้นมีความแข็งแรงสูงที่สุด คือ 10.00 Kg/cm² และแบบผสมถ่านไม่ลดความชื้นค่าเฉลี่ยร้อยละความแข็งแรงต่ำที่สุด คือ 1.03 Kg/cm² โดยที่แบบผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าร้อยละความแข็งแรงต่ำสุดคือ 0.52 Kg/cm² (รูปที่ 3)

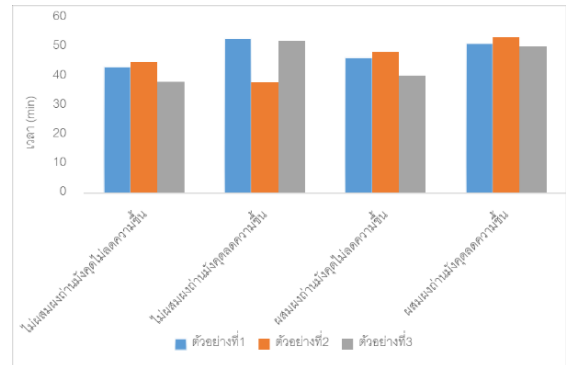


รูปที่ 3 ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแท่งชีวมวล

3.4. ผลการทดสอบการจุดติดไฟของแท่งชีวมวล

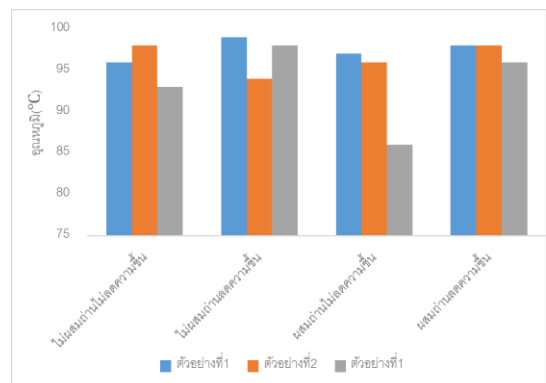
ผลการทดสอบ (เวลา) ในการติดไฟของแท่งชีวมวลที่ได้จากการทดลองต้มน้ำแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาในการจุดติดไฟของแบบผสมถ่านลดความชื้นให้เวลาในการจุดติดไฟนานที่สุด คือ 51.76 นาที โดยแบบผสมถ่านลดความชื้นให้เวลาในการจุดติดไฟนานที่สุด คือ 53.47 นาที และ ค่าเฉลี่ยเวลาในการจุดติดไฟของแบบไม่ผสมถ่านไม่ลดความชื้นให้เวลาในการจุดติดไฟเร็วที่สุด คือ 42.14 นาที โดย

แบบไม่ผสมถ่านลดความชื้นให้เวลาในการจุดติดไฟเร็วที่สุด คือ 38.08 นาที (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การทดสอบเวลาในการจุดติดไฟ

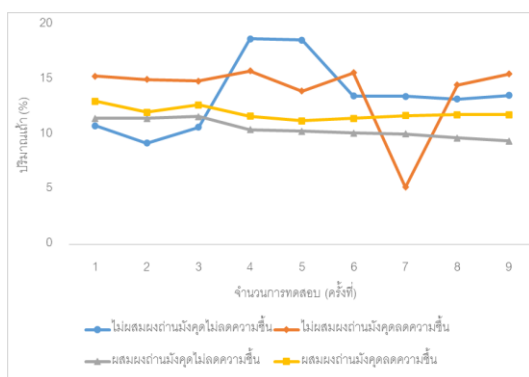
การทดสอบอุณหภูมิในการติดไฟของแท่งชีวมวลที่ได้จากการทดลองต้มน้ำ พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในการจุดติดไฟของแบบไม่ผสมถ่านลดความชื้นและผสมถ่านลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 97 องศาเซลเซียส โดยแบบไม่ผสมผงถ่านลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 99 องศาเซลเซียส และแบบผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิต่ำที่สุด คือ 93 องศาเซลเซียส โดยแบบผสมผงถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 86 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยในการจุดติดไฟ

3.5. ผลการทดสอบวิเคราะห์ปริมาณชี้เถ้าของแท่งชีวมวล

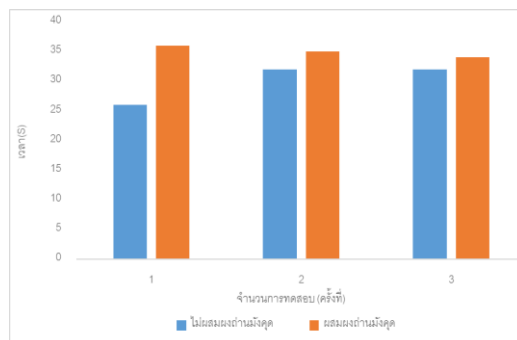
วิเคราะห์ปริมาณชี้เถ้าพบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณชี้เถ้าของแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้นมีค่าสูงสุด คือ 13.55% โดยปริมาณเถ้าของแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 18.73% และค่าเฉลี่ยปริมาณเถ้าของผสมถ่านไม้ลดความชื้นมีค่าน้อยที่สุด คือ 10.54% โดยที่ปริมาณเถ้าของแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้นมีค่าน้อยที่สุด คือ 5.23% (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ปริมาณเถ้าของแท่งชีวมวล

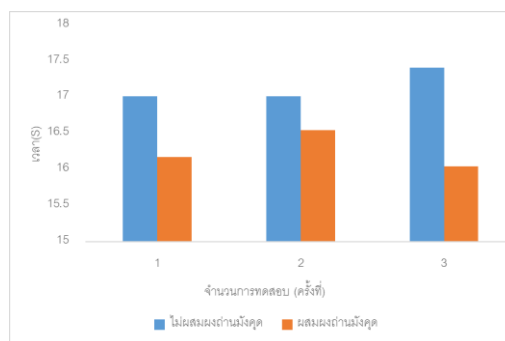
3.6. ผลการทดสอบการเปรียบเทียบเวลาที่แท่งชีวมวลติดไฟ

การวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาในการจุดไฟติดแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้น คือ 30 วินาที โดยแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้นให้เวลาในการไฟติดเร็วที่สุด คือ 26 วินาที และ ค่าเฉลี่ยเวลาในการไฟติดแบบผสมถ่านไม้ลดความชื้น คือ 33 วินาที โดยแบบผสมถ่านไม้ลดความชื้นให้เวลาในการไฟติดช้าที่สุด คือ 36 วินาที (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 เวลาแท่งชีวมวลจุดติดไฟ

วิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาในการติดไฟแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้น คือ 17.14 นาที โดยแบบไม่ผสมถ่านไม้ลดความชื้นให้เวลาในการไฟติดนานที่สุด คือ 17.41 นาที และ ค่าเฉลี่ยเวลาในการไฟติดแบบผสมถ่านไม้ลดความชื้น คือ 16.75 นาที โดยแบบผสมถ่านไม้ลดความชื้นให้เวลาในการติดไฟเร็วที่สุด คือ 16.04 นาที (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 เวลาแท่งชีวมวลติดไฟ

4. สรุป

4.1. ด้านคุณสมบัติทางกายภาพของแท่งชีวมวล

การผลิตชีวมวลมีขนาดในการผลิตชีวมวลมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm และมีความยาวขนาดแท่งชีวมวลระหว่าง 20-50 mm

4.2. ด้านสมบัติทางความร้อนของแท่งชีวมวล

การหาปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง พบว่า ค่าความร้อนเฉลี่ยของแบบผสมผงถ่านมั่งคุดลดความชื้นมีค่าสูงสุด คือ 4,994.78 cal/g ด้านผลการทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ โดยวิธีการทดสอบ ASTM: Coal and Coke, 2019, Volume 05.06 ชีวมวลผักตบชวาแบบผสมผงถ่านมั่งคุด มีค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 18.95 และค่าความร้อนแบบgrossมีค่า 4,043 cal/g ด้านทดสอบการจุดติดไฟจากการต้มน้ำค่าเฉลี่ยเวลาในการจุดติดไฟของแบบผสมถ่านลดความชื้นให้เวลาในการจุดติดไฟนานที่สุดคือ 51.76 นาที ด้านทดสอบการจุดติดไฟจากการต้มน้ำค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในการจุดติดไฟของแบบไม่ผสมถ่านลดความชื้นและผสมถ่านลดความชื้นมีค่าสูงที่สุด คือ 97 องศาเซลเซียส ด้านปริมาณเถ้าพบว่าปริมาณเถ้าของค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยปริมาณเถ้าของผสมถ่านไม่ลดความชื้นมีค่าน้อยที่สุด คือ 10.54%

4.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

จากวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า จะมีความคุ้มทุนของการผลิตชีวมวลอยู่ที่ 5 ปี 7 เดือน 20 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สถานการณ์พลังงานในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน; 2557.
- [2] โครงการวิทยาศาสตร์. เรื่องเชื้อเพลิงสุดว้าวจากเจ้าผักตบชวา [อินเทอร์เน็ต]. 2553 [เข้าถึงเมื่อ 20 ต.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.krusarawut.net/wp/?p=8478>
- [3] Phetchat N, Thatriwichit P, Tharaporn N, Chulok S, Seetapong N. สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. Wichcha J Nakhon Si Thammarat Rajabhat Univ. 2023;42(1):39–49.
- [4] นัฐวุฒิ เพ็ชรชาติ, พิมพ์ชนก ธาตรีวิชิต, หนึ่งทัย ธราพร, ศราวุฒิ ชูโลก, นวรัตน์ สัตตะพงษ์. สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวชิราวุธราชภัฏนครศรีธรรมราช. 2023;42(1):39–49.
- [5] ASTM International. ASTM D5865-21: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021. <https://doi.org/10.1520/D5865-21>

- [6] ASTM International. ASTM D3173-17: Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017. <https://doi.org/10.1520/D3173-17>
- [7] ASTM International. ASTM D3174-12: Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2012. <https://doi.org/10.1520/D3174-12>
- [8] สำนักโกลจิติกส์. ความสามารถเชิงวัสดุ. กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม; 2558.
- [9] กษิตีศ ปานสุทธิ, เขมรินทร์ เหล่าขุน, วิริยะ ลิ้มวัฒนชัย. งานวิจัยเครื่องอัดแท่งชีวมวล จากวัสดุทางการเกษตร. จันทบุรี: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก; 2565.
- [10] จตุรงค์ ลังกาพันธุ์. การวิเคราะห์เชิง เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการใช้ เครื่องจักรกลเกษตรเบื้องต้น. ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี; 2563. น. 2–5.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

เครื่องปอกเปลือกทุเรียนระบบไฮดรอลิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ

Semi Automatic Hydraulics Durian Peeling Machine

ไกรสร รวยป้อม¹⁾ บุญฤทธิ์ บัวระบัติ¹⁾ และ มนัสนันท์ บุญपालวงศ์^{2)*}Krisorn Ruaypom¹⁾, Boomyarid Buarabut¹⁾ and Manasanan Bunpalwong^{2)*}¹⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร²⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี¹⁾ Department of Mechanical Technology, Faculty of Agricultural Industry Technology.²⁾ Department of Information Technology, Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology

Tawan-ok Chanthaburi Campus.

Received: 11 February 2025

Revised: 9 April 2025

Accepted: 23 April 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

การทดสอบเครื่องปอกเปลือกทุเรียนระบบไฮดรอลิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาความสามารถของเครื่องและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลการทดสอบทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองที่มีน้ำหนักระหว่าง 2.5 ถึง 6 กิโลกรัม เส้นรอบวงระหว่าง 50-70 เซนติเมตร จำนวน 30 ลูก พบว่า การปอกทุเรียนหมอนทองแบบ ดิบ ใช้เวลาเฉลี่ย 18.68 วินาที ทุเรียนหมอนทองแบบ ปลิงแ้ม (เกือบสุก) ใช้เวลาเฉลี่ย 18.34 วินาที และ ทุเรียนหมอนทองแบบสุก ใช้เวลาเฉลี่ย 18.45 วินาที และความสามารถเฉลี่ยในการปอกทุเรียนหมอนทองแบบ ดิบ มีค่า 189.47 ลูกต่อชั่วโมง ความสามารถเฉลี่ยในการปอกทุเรียนหมอนทองแบบ ปลิงแ้ม (เกือบสุก) มีค่า 173.66 ลูกต่อชั่วโมง และความสามารถเฉลี่ยในการปอกทุเรียนหมอนทองแบบสุก มีค่า 195.12 ลูกต่อชั่วโมง ลักษณะทางกายภาพพบว่าการปอกทุเรียนแบบสุกสามารถปอกได้ดีและเหมาะสมกับเครื่องปอกที่สุด มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรอยู่ที่ 1.6 เดือนและมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 79.6 ชั่วโมงต่อปี

คำสำคัญ: เครื่องปอกเปลือก ทุเรียน ระบบไฮดรอลิกส์

Abstract

Semi-Automatic Hydraulic Durian Peeler Test The purpose is to test the capabilities of the machine and its economic value. The results of the test of 30 Golden Pillow durian species weighing between 2.5 and 6 kilograms with a circumference of 50–70 centimeters showed that peeling the raw Golden Pillow durian took an average of 18.68 seconds, the Golden Pillow durian ajar (almost ripe) took an average time of 18.34 seconds, and the ripe Golden Pillow durian took an average time of 18.45 seconds. The average time to peel the Golden Pillow durian raw was 189.47 balls per hour. The average ability to peel the golden pillow durian with leeches in an ajar (almost ripe) was 173.66 balls per hour, and the average ability to peel the golden pillow durian with ripe fruit was 195.12 balls per hour. Physical characteristics show that ripe durian peeling can be peeled well and is most suitable for the peeler. The payback period of the machine is 1.6 inches, and the break-even point is 79.6 hours per year.

Keywords: Peeling machine: Durian: Hydraulics system

*ติดต่อ: krisorn_ru@rmutto.ac.th

1. บทนำ

ในบรรดาผลไม้ส่งออกทั้งหมดของไทยทุเรียนเป็นราชาผลไม้ที่สร้างรายได้ให้แก่ไทยสูงที่สุด โดยการส่งออกทุเรียนสดมีมูลค่าแซงหน้าผลไม้อื่นๆ มาตั้งแต่ปี 2557 จนกระทั่งล่าสุดในเดือนพฤษภาคม 2564 ทำสถิติรายเดือนสูงที่สุดเป็นประวัติการณ์ที่ 934.9 ล้านดอลลาร์ฯ ขยายตัวร้อยละ 95.3 (YoY) รวมแล้วตลอดช่วง 5 เดือนแรกของปี 2564 ยังคงเร่งตัวร้อยละ 45.2 (%YoY) มีมูลค่า 1,839 ล้านดอลลาร์ฯ ทำให้การส่งออกทุเรียนกลายเป็นสินค้าเกษตรเศรษฐกิจส่งออกสำคัญในลำดับที่ 2 รองจากยางพารา แซงหน้าผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมาได้ นอกจากนี้ ในปี 2563 แม้จะประสบปัญหาการแพร่ระบาดของโควิด-19 แต่การส่งออกทุเรียนสดของไทยกลับเติบโตสวน

กระแสถึงร้อยละ 41.5 และมูลค่ารายปีสูงสุดเป็นประวัติการณ์ที่ 2,073 ล้านดอลลาร์ฯ ซึ่งในระยะข้างหน้ายังมียอดเติบโตทำสถิติใหม่อย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันผู้บริโภคในตลาดโลกเปิดใจให้แก่ทุเรียนอย่างชัดเจน สะท้อนโอกาสให้ทุเรียนไทยยิ่งทำตลาดได้ ซึ่งจีนเป็นผู้บริโภคทุเรียนรายใหญ่อันดับ 1 ของโลก คิดเป็นร้อยละ 70 ของตลาดโลก เมื่อรวมตลาดฮ่องกงที่มีส่วนแบ่งเกือบร้อยละ 20 ทำให้จีนตลาดเดียวที่ครองตลาดทุเรียนไปเกือบทั้งหมด ขณะที่ทุเรียนไทยก็มีศักยภาพสูง โดยไทยเป็นผู้ส่งออกทุเรียนรายใหญ่ทั้งด้านปริมาณและมูลค่าในอันดับ 1 ของโลก ด้วยส่วนแบ่งตลาดโลกขยับเพิ่มขึ้นต่อเนื่องมาอยู่ที่ร้อยละ 75.9 ในปี 2563 ที่ผ่านมา (จากร้อยละ 65.9 ในปี 2562) ซึ่งทุเรียนไทยได้เปรียบตรงที่ไทยมี

ความเชี่ยวชาญในการทำตลาดส่งออกผลไม้เป็นทุนเดิม ทำให้ที่ตั้งอยู่ใกล้ตลาดจีนทำให้การขนส่งทุเรียนสดถึงมือผู้บริโภคได้อย่างรวดเร็วในราคาที่ผู้บริโภคเองก็ยอมรับ อีกทั้ง รสชาติทุเรียนไทยได้รับการยอมรับในตลาดโลกแล้วจึงนับได้ว่าเป็นการสร้างมาตรฐานทางด้านรสชาติทุเรียนได้ก่อนชาติอื่น [1]

เนื่องจากทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีน้ำหนักมากเปลือกหนาและมีลักษณะเป็นหนามโดยรอบๆ ผลเปลือกหนาและแข็งแรงกว่าผลไม้อื่น ๆ ทำให้การปอกเปลือกทุเรียนแต่ละลูกต้องเสียเวลามาก และต้องอาศัยความชำนาญ และผู้ปอกต้องมีความแข็งแรงจึงจะสามารถเอาเนื้อทุเรียนออกมาจาก ผลได้ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสำหรับผู้บริโภค

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องปอกเปลือกทุเรียนระบบไฮดรอลิกส์แบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อลดเวลาการปฏิบัติงาน ลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานลงและไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานฝีมือ ลดต้นทุนและ เป็นเครื่องจักรที่มีความปลอดภัย ลดอันตรายที่อาจจะเกิดจากของมีคม และเป็นการใช้เทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์

2. วิธีการวิจัย

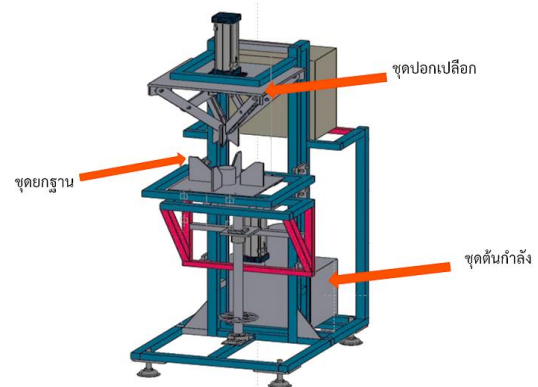
2.1. ออกแบบเครื่องต้นแบบและวงจรไฮดรอลิกส์

โดยเครื่องต้นแบบนั้นมีขนาดโครงสร้าง กว้าง 70 cm. x ยาว 70 cm. x สูง 200 cm.

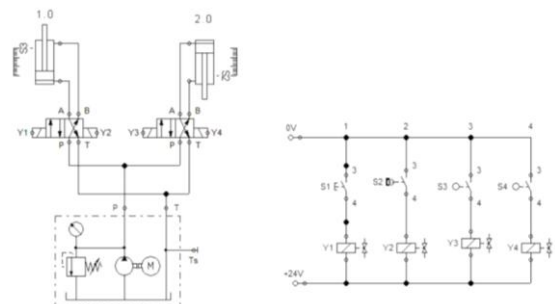
หลักการทำงาน

เมื่อเราทำการกดสวิทช์ s1 ทำให้กระบอกสูบ 1 เลื่อนออก เพื่อไปยกฐานขึ้นจนถึงตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้กระบอกสูบที่ 1 กดสวิทช์ลูกกลิ้ง s3 วาล์ว 1.3 จะทำให้กระบอกสูบ 2 ทำการเลื่อนออกทำให้กลไกการปอก

เปลือกทำงานฉีกเปลือก โดยวิธีการถ่างออกมากดสวิทช์ s2 เมื่อทำงานครบการทำงานกระบอกสูบที่ 1 และกระบอกสูบที่ 2 จะเลื่อนกลับสู่ตำแหน่งเดิมอัตโนมัติ [2], [3], [4]



(ก) เครื่องต้นแบบ



(ข) Power Circuit

(ค) Control Circuit

รูปที่ 1 เครื่องต้นแบบและวงจรควบคุม

2.2. คำนวณระบบการปอก

ทำการทดสอบแรงกดที่ทะลุเปลือกด้วยเครื่องทดสอบแรงดันแรงกด(force gauge) ได้ค่าเท่ากับ 67.95 กิโลกรัม หรือ 966.53 ปอนด์

2.2.1. เลือกขนาดกระบอกไฮดรอลิกส์ ต้องกำหนดความดันเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของกระบอกไฮดรอลิกส์ [5], [6], [7], [8]

$$A = \frac{D^2 \times \pi}{4} \quad (1)$$

โดยที่

A = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (cm^2)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ (mm)

ความดันสูงสุดของปั๊ม = 2,175 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

แรงที่ใช้ในการฉีกทุเรียน = 67.95 กิโลกรัม

= 966.53 ปอนด์

$$\text{จากสมการที่ 2.1 } A = \frac{F(\text{lb})}{P(\text{lb}/\text{in}^2)} = \frac{966.53 (\text{lb})}{2,175 (\text{lb}/\text{in}^2)} = 0.44 (\text{in}^2)$$

2.2.2. นำค่าพื้นที่ที่รองรับแรงดัน แทนในสมการ เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิกส์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ จากข้อที่ 1 โดย $A = 0.44 \text{ in}^2$

$$\text{จากสมการที่ } D = \sqrt{\frac{A(\text{in}^2)}{0.785}} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{0.44 (\text{in}^2)}{0.785}} = 0.74 \text{ in}$$

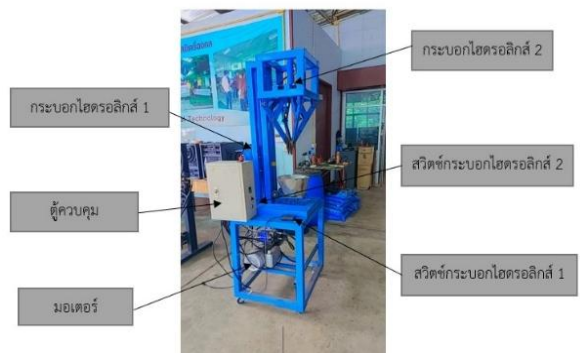
*เนื่องจากขนาดกระบอกไม่มีขนาด 0.74 นิ้ว จึงเลือกใช้กระบอกขนาด 1 นิ้ว

2.3. ออกแบบวงจรเครื่องและคำนวณระบบ

2.3.1. หลักการทำงานของเครื่อง

หลักการทำงานของเครื่องปอกทุเรียนระบบไฮดรอลิกส์ เริ่มจากการเปิดสวิตช์เครื่องปั๊มไฮดรอลิกส์ จากนั้นนำทุเรียนที่ใช้ในการทดสอบ ไปวางบนตัวจับทุเรียน จากนั้นหันหัวลูกทุเรียนตั้งขึ้น กดวาล์วควบคุม กระบอกสูบที่ 1 เพื่อเลื่อนขึ้น ยกตัวจับยกทุเรียนขึ้นไปชนกับใบมีดฉีกและให้สังเกตใบมีดว่าใบมีดฉีกทุเรียนลงไปลึกประมาณ 2 นิ้ว แล้วปล่อยวาล์วตัวที่ 1

กดวาล์วควบคุมกระบอกสูบที่ 2 ที่ต่อกับกลไกเพื่อให้ใบมีดฉีกเปลือกทุเรียนออกจนสุด เมื่อทุเรียนถูกฉีกเปลือกจนสุด กลไกการยกจะเลื่อนลงสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ชุดฉีกเปลือกก็จะเคลื่อนกลับสู่ตำแหน่งเดิมอัตโนมัติ จากนั้นปิดสวิตช์เพื่อปิดการทำงานเพื่อให้ใบมีดฉีกเปลือกทุเรียนออกจนสุด เมื่อทุเรียนถูกฉีกเปลือกจนสุด กลไกการยกจะเลื่อนลงสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ชุดฉีกเปลือกก็จะเคลื่อนกลับสู่ตำแหน่งเดิมอัตโนมัติ จากนั้นปิดสวิตช์เพื่อปิดการทำงาน



รูปที่ 2 เครื่องต้นแบบ

2.4. การเตรียมวัสดุทดสอบ

2.4.1. การเตรียมทุเรียนหมอนทอง โดยจะใช้ทุเรียนเกรด A B ในทดสอบการปอกทุเรียน เนื่องจากทุเรียนเกรด A จะมีน้ำหนัก 2.5-6 กิโลกรัม 4-5 พูเต็ม หรือ 3 พู และอีก 1-2 เม็ด เกรด B จะมีน้ำหนัก 2.5-6 กิโลกรัม 3 พู 1 เม็ด หรือ 2 พู และอีก 1-2 เม็ด จะทำให้ง่ายต่อการปอก และทุเรียนเกรด A B เป็นที่นิยมนำมาบริโภค เพราะเหตุนี้จึงนำทุเรียนเกรด A B มาทดสอบกับเครื่องปอกทุเรียนและจับเวลาในการปอก

2.4.2. แบ่งทุเรียนตามระดับของความสุก 3 ระดับ คือ ทุเรียนดิบ ทุเรียนปลิงแฉ่ำ ทุเรียนสุก และติดสัญลักษณ์ตรงหัวผล เพื่อให้ทราบว่ามีความกว้าง

น้ำหนัก ความสูง ของแต่ละลูก และให้ง่ายต่อการแบ่งตามระดับความสุกของแต่ละลูก เพราะทุเรียนแต่ละลูกมีระยะเวลาความสุกไม่เท่ากัน

2.4.3. นำผลทุเรียนมาวัดขนาด ความสูง ความกว้าง และชั่งน้ำหนักของผลทุเรียนแต่ละลูกต้องอยู่ระหว่าง 2.5-6 กิโลกรัม ความสูงไม่เกิน 30 เซนติเมตร ในการทดสอบเครื่อง



รูปที่ 3 การวัดขนาดของลูกทุเรียน



รูปที่ 4 การชั่งน้ำหนักและวัดแรงกดลูกทุเรียน

2.5. การทดสอบปอกทุเรียนดิบ

2.5.1. นำผลทุเรียนหมอนทองที่มีระดับความสุกดิบอย่างละ 10 ลูก มาทำการทดสอบเครื่องปอก และนำทุเรียนหมอนทองขึ้นแท่นเครื่องปอกโดยการนำขั้วทุเรียนคว่ำลงด้านล่างเพื่อทำการทดสอบ

2.5.2. เขี่ยบสวิตช์เพื่อให้ไฮดรอลิกส์ระบบที่ 1 ยกทุเรียนขึ้นไปจนถึงใบมีดให้ทะลุเปลือกเข้าไป 5 เซนติเมตร แล้วหยุดเขี่ยบสวิตช์และทำการกด

สวิตช์เขียวเพื่อให้ไฮดรอลิกส์ ระบบที่ 2 ทำการฉีกทุเรียน

2.5.3. เมื่อทำการฉีกทุเรียนเสร็จแล้วไฮดรอลิกส์ระบบที่ 1 และระบบที่ 2 จะกลับสู่ตำแหน่งเดิมโดยอัตโนมัติ และตรวจสอบลักษณะของทุเรียนหลังทำการปอกด้วยเครื่องปอกทุเรียน



รูปที่ 5 การปอกเปลือกทุเรียน



(ก)

(ข)



(ค)

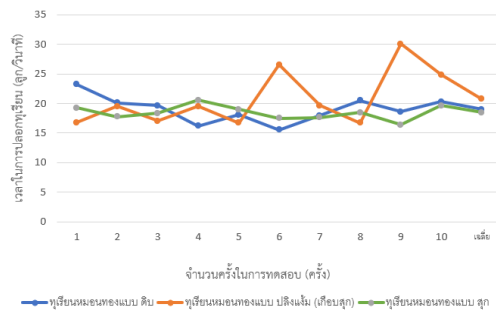
รูปที่ 6 ลักษณะของทุเรียนสุกหลังทำการปอก

(ก) ดิบ (ข) ปลิงแฉิม (ค) สุก

3. ผลการวิจัย

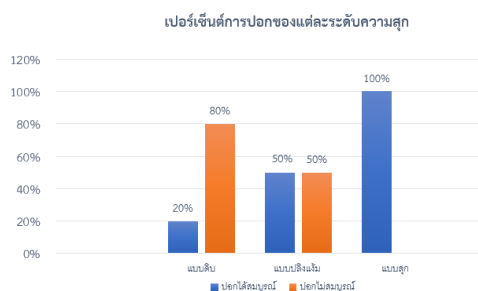
3.1. ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของเครื่อง

พบว่า การปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ จำนวน 10 ครั้ง เวลาในการปอกเปลือกเฉลี่ยอยู่ที่ 18.68 วินาที การปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก) จำนวน 10 ครั้ง เวลาในการปอกเปลือกเฉลี่ยอยู่ที่ 18.34 วินาที และการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบสุก จำนวน 10 ครั้ง เวลาในการปอกเปลือกเฉลี่ยอยู่ที่ 18.45 วินาที ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบระยะเวลาในการปอกเปลือกทุเรียน

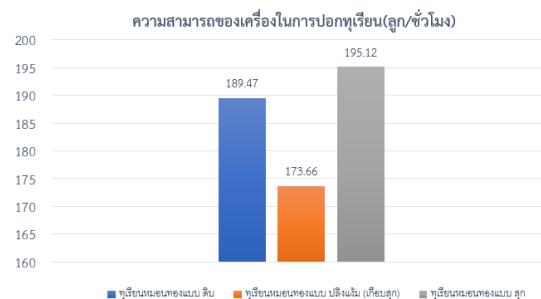
การปอกเปลือกทุเรียนแบบดิบปอกได้ 20% ซึ่งปอกได้น้อยกว่าแบบปลิงแฉ้มและแบบสุกมาก เพราะลูกทุเรียนยังแข็งอยู่ ส่วนการปอกเปลือกทุเรียนปลิงแฉ้มปอกได้ 50% และ ทุเรียนสุกปอกได้ 100% ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 เปอร์เซนต์การปอกของแต่ละระดับความสุก

3.2. ผลการหาสมรรถนะเครื่อง

การเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทอง จำนวนอย่างละ 10 ลูก ระหว่างทุเรียนหมอนทองแบบดิบ ทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก) และ ทุเรียนหมอนทองแบบสุก พบว่า ความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ มีค่า 189.47 ลูก/ชั่วโมง ความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก) มีค่า 173.66 ลูก/ชั่วโมง และความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบสุก มีค่า 195.12 ลูก/ชั่วโมง ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสามารถของเครื่อง

3.3. วิจัยนผลการศึกษาทดสอบ

3.3.1. เวลาในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ เฉลี่ย 18.68 วินาที/ลูก ทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก) เฉลี่ย 18.34 วินาที/ลูก และทุเรียนหมอนทองแบบสุก เฉลี่ย 18.45 วินาที/ลูก เนื่องจาก ทุเรียนหมอนทองแบบสุกและแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก) มีความเหนียวของเปลือกมากกว่า เครื่องปอกเปลือกทุเรียนนั้นไม่สามารถปอกเปลือกทุเรียนออกมาได้ทั้งหมด จึงทำให้ระยะเวลาในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบสุกเร็วกว่าทุเรียนหมอนทองแบบดิบ และทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแฉ้ม (เกือบสุก)

3.3.2. แรงดันในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบของกระบอกที่ 1 คือ 30 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 87 บาร์ ทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแถม (เกือบสุก) กระบอกที่ 1 คือ 25 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 72.39 บาร์ ทุเรียนหมอนทองแบบสุก กระบอกที่ 1 คือ 25 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 41.36 บาร์ เนื่องจากเปลือกของทุเรียนหมอนทองแบบสุก มีความเหนียวที่น้อยกว่า ทุเรียนหมอนทองแบบดิบ และทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแถม (เกือบสุก)

3.3.3. ความสามารถในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทอง จำนวนอย่างละ 10 ลูก ระหว่างทุเรียนหมอนทองแบบดิบ ทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแถม (เกือบสุก) และทุเรียนหมอนทองแบบสุก พบว่าความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ มีค่า 189.47 ลูก/ชั่วโมง ความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแถม (เกือบสุก) มีค่า 173.66 ลูก/ชั่วโมง และความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบสุก มีค่า 195.12 ลูก/ชั่วโมง พบว่า เครื่องปอกทุเรียนมีความสามารถในการปอกทุเรียนหมอนทองแบบสุก ได้ดีที่สุด

3.3.4. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ในเชิงธุรกิจนั้น เครื่องปอกเปลือกทุเรียนจะสามารถคืนทุนที่ประมาณ 1.6 เดือน และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 79.6 ชั่วโมง/ปี หลังจากการทำงาน เนื่องจากทุเรียนเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภค และมีราคาที่สูง จึงทำให้เครื่องปอกเปลือกทุเรียนคืนทุนได้เร็ว

วิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period)

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

โดยที่ PBP = 1.6 เดือน

P = ราคาเครื่องจักร 40,000 บาท

R = กำไรสุทธิต่อปี 290,000 บาท/ปี

วิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even point)

$$BEP = \frac{Fc}{B-Vc} \quad (4)$$

โดยที่ BEP = จุดคุ้มทุน 79.6 ชั่วโมงต่อปี

Fc = ค่าใช้จ่ายคงที่ 9,400 บาท

B = อัตราการรับจ้าง 168 บาท/ชม.

Vc = ค่าใช้จ่ายในการทำงาน 110,400 บาท/ชม.

4. สรุป

4.1. ผลการทดสอบการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองทั้ง 3 แบบ

พบว่า การปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ ใช้เวลาเฉลี่ย 18.68 วินาที ใช้แรงดันกระบอกที่ 1 คือ 30 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 87 บาร์ การปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบปลิงแถม (เกือบสุก) ใช้เวลาเฉลี่ย 18.34 วินาที ใช้แรงดันกระบอกที่ 1 คือ 25 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 72.39 บาร์ และการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบสุก ใช้เวลาเฉลี่ย 18.45 วินาที ใช้แรงดันกระบอกที่ 1 คือ 25 บาร์ กระบอกที่ 2 คือ 41.36 บาร์ ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพของการปอกเปลือกทุเรียนแบบสุกสามารถปอกเปลือกได้ดีและเหมาะสมกับเครื่องปอกเปลือกที่สุด

4.2. ผลการทดสอบความสามารถของเครื่องปอกเปลือกทุเรียนหมอนทอง

พบว่า ความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ มีค่า 189.47 ลูก/ชั่วโมง

ความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือกทุเรียน
หมอนทองแบบปลิงแฉิม (เกือบสุก) มีค่า 173.66 ลูก/
ชั่วโมง และความสามารถเฉลี่ยในการปอกเปลือก
ทุเรียนหมอนทองแบบสุก มีค่า 195.12 ลูก/ชั่วโมง
เครื่องปอกเปลือกทุเรียนสามารถปอกเปลือกทุเรียน
หมอนทองแบบสุกได้ดีที่สุด

4.3. ความสามารถเชิงวัสดุผลการวิเคราะห์ ที่ เครื่องสามารถผลิตได้ต่อชั่วโมง

พบว่า เครื่องปอกเปลือกทุเรียนมีกำลังการผลิต
195.12 ลูก/ชั่วโมง การทำงาน 8 ชั่วโมง/วัน มี
ระยะเวลาดิ้นทุนของเครื่องจักรอยู่ที่ 1.6 เดือน และมี
จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 79.6 ชั่วโมง/ปี

5. ข้อเสนอแนะ

5.1. การปอกเปลือกทุเรียนหมอนทองแบบดิบ แบบ
ปลิงแฉิม (เกือบสุก) มีลักษณะทางกายภาพที่ยังติด
เปลือกอยู่เล็กน้อยไม่สมบูรณ์ ต้องใช้แรงคนในการปอกอีก
รอบจึงจะนำไปจำหน่ายได้

5.2. เส้นรอบวงของทุเรียนที่ใช้กับเครื่องปอกทุเรียน
ควรอยู่ระหว่าง 50-70 เซนติเมตร

5.3. ควรเพิ่มวาล์วควบคุมแรงดันเพื่อลดความเร็ว

5.4. ควรมีการป้องกันใบมีดเพื่อป้องกันอันตราย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนสนับสนุน
การวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. ทุเรียน: ราชาผลไม้ไทย
ในตลาดโลก [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ:
ศูนย์วิจัยกสิกรไทย; [เข้าถึงเมื่อ 2564 พ.ค.
5] . เข้าถึงได้จาก :
<https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-econ/business/Pages/Durian-z3233.aspx>
- [2] ชีรศักดิ์ โกเมฆ. พัฒนาเครื่องคว้านเมล็ด
ลิ้นจี่. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร; 2559.
- [3] เดชฤทธิ์ มณีธรรม. คัมภีร์การใช้งานระบบ
นิวแมติกส์. กรุงเทพฯ: วี.พรินท์; 2560.
- [4] ปานเพชร ชินินทร. นิวแมติกส์อุตสาหกรรม.
กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น; 2521.
- [5] ภัทรวิรุฬ ภัทระธนกุลชัย. ไฮดรอลิกส์และนิว
แมติกส์. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น; 2559.
- [6] มาสสุภา ไพริรอด. การสร้างเครื่องแกะ
เปลือกเมล็ดบัวหลวง [วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. ปทุมธานี:
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี;
2559.
- [7] ศุภกิตต์ สายสุนทร. การออกแบบหัวคว้าน
และเครื่องคว้านเมล็ดเงาะ [วิทยานิพนธ์
ปริญญาเกษตรศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ:
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
บางเขน; 2560.
- [8] อำพล ชื่นตรง. งานนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริม
วิชาการ; 2556.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ระบบหยิบไข่ไก่อัตโนมัติด้วยแขนกลควบคุมจากการเรียนรู้ของเครื่อง
และการเรียนรู้เชิงลึกในฟาร์มไก่แบบปล่อยอิสระ

An Automatic Egg Collection System Using a Robotic Arm Controlled by Machine

Learning and Deep Learning in Free-Range Chicken Farming

อภิวัตร บุญกอง¹⁾, อูมาภรณ์ ผิวชมพู¹⁾, จินดารัตน์ พิกุลศรี¹⁾

Apiwat Boonkong¹⁾, Umaporn Phiwchomphoo¹⁾, and Jindarat Pikulsri¹⁾

¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม

¹⁾ Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom

Received: 10 May 2025

Revised: 28 May 2025

Accepted: 29 May 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการใชระบบแขนกลหยิบไข่ไก่ โดยคำนวณการทำงานและควบคุมมอเตอร์แขนกลผ่านการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ร่วมกับกล้องสามมิติประกอบการระบุตำแหน่งแบบอัตโนมัติจากวิธีการเรียนรู้เชิงลึก (YOLOv5s) ซึ่งภาพรวมของงานวิจัยเป็นการจำลองการหยิบเก็บไข่ไก่ ในสภาพแวดล้อมที่มีการเลี้ยงไก่แบบปล่อยอิสระและสร้างรังไข่ไว้สำหรับให้ไก่ไข่โดยเฉพาะ งานวิจัยสามารถนำไปต่อยอดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำหรับเดินเก็บไข่ไก่ในสถานการณ์ต่าง ๆ ต่อไปได้ โดยในงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงผลของประสิทธิภาพของการใช้การเรียนรู้ของเครื่องในการหยิบไข่ไก่ของแขนกล และความถูกต้องของตำแหน่งไข่ไก่จากโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก รวมถึงปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นในการทดลองการหยิบจับไข่ไก่ด้วย และจากการทดลองในกรณีที่มีโน้ดของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องที่แตกต่างกัน แขนกลหยิบไข่สามารถหยิบไข่ไก่ได้อย่างถูกต้องในช่วงร้อยละ 75-90

คำสำคัญ : หุ่นยนต์หยิบจับไข่ การเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก YOLO

Abstract

This research presents the use of a robotic arm system for collecting chicken eggs, with motor control and motion planning based on machine learning techniques. A 3D camera is integrated to enable automatic egg localization using a deep learning method (YOLOv5s). The overall framework simulates egg collection in a free-range chicken farming environment, where nests are specifically prepared for hens to lay eggs. This work lays the foundation for future development of mobile robots capable of navigating various environments to collect eggs. The study demonstrates the effectiveness of machine learning (FFNN) in controlling the robotic arm for egg picking and evaluates the accuracy of egg localization using the deep learning model. Challenges encountered during egg-picking experiments are also discussed. Based on experiments with varying numbers of hidden nodes in the machine learning model, the robotic arm achieved egg-picking accuracy between 75% and 90%.

Keywords: Egg-picking Robot: Machine learning: Deep learning: YOLO

*ติดต่อ: apiwat.boon@npu.ac.th, 042-503558

1. บทนำ

การเลี้ยงไก่ไข่ถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมปศุสัตว์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางอาหาร ซึ่งไข่ไก่เป็นแหล่งโปรตีนต้นทุนต่ำที่บุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ง่ายและบริโภคกันอย่างแพร่หลาย โดยปกติแล้วในเชิงพาณิชย์มีการเลี้ยงในหลายรูปแบบ และหนึ่งในนั้นคือรูปแบบของการเลี้ยงไก่แบบปล่อยอิสระ โดยที่ไก่สามารถไข่ตามพื้นที่ทั่วไปหรือไข่ตามสถานที่ผู้เลี้ยงกำหนดไว้ให้ [1] ซึ่งการเลี้ยงไก่ในลักษณะนี้ เป็นการเพิ่มมูลค่าของไข่ไก่สำหรับจำหน่ายให้กับผู้บริโภคเฉพาะกลุ่มที่มุ่งเห็นถึงความสำคัญกับคุณภาพชีวิตของสัตว์ [2] แม้ว่าการเลี้ยงปล่อยแบบอิสระ จะไม่ได้มีผลต่อคุณภาพของไข่ไก่อย่างมีนัยสำคัญก็ตาม [3]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา อุตสาหกรรมการเกษตรได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือระบบอัตโนมัติ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มรายได้ ลดรายจ่าย และลดการพึ่งพาแรงงานมนุษย์ [4] เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ เช่น การใช้เซนเซอร์ แชนกัล หุ่นยนต์ อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) [5] และ เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ถูกนำมาใช้กันมากขึ้น คือการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning: DL) ที่รู้จักกันในชื่อของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) [6] หนึ่งในแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ AI ในการพัฒนาด้านการเกษตร คือการพัฒนาหุ่นยนต์ที่มีการขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติ สามารถทำงานแทนแรงงานของมนุษย์ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ [7]

เช่น การใช้ ML ในการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง รวมถึงการวางแผนเส้นทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [8] ในขณะเดียวกันการใช้ DL ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการในการประมวลผลภาพ ถูกใช้งานทดแทนการมองเห็นของมนุษย์ผ่านกล้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบที่มีการตอบสนองในลักษณะของเวลาจริง (Real-time) ก็มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรมากขึ้นเช่นเดียวกัน

จากที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้หุ่นยนต์และแขนกลในการหยิบเก็บสิ่งของ โดยการควบคุมการเคลื่อนในแขนกลหุ่นยนต์ต่างๆ [9] รวมถึงการใช้ DL สำหรับช่วยในการมองเห็น [10] ประกอบกันเพื่อให้สามารถทำงานที่มีความถูกต้องมากขึ้น หรือแม้กระทั่งการนำมาประยุกต์ใช้ในการเลี้ยวไถในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย [11-13] โดยแต่ละรูปแบบอาจมีข้อจำกัดในบางประการ เช่น ต้องติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งเฉพาะจุดเท่านั้น หรือเครื่องมือหยิบจับไถไถมีการจำกัดการเคลื่อนที่ในมุมต่างๆ

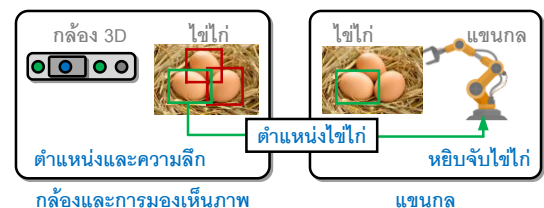
ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเห็นถึงข้อจำกัดของการใช้หุ่นยนต์หรือกลไกที่ถูกออกแบบให้มีความเฉพาะสำหรับแต่ละงาน จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการใช้แขนกลที่สามารถซื้อและเข้าถึงง่ายตามท้องตลาด ให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่โดยการสอนจากข้อมูลในโมเดลของ ML ร่วมกับภาพจากกล้องสามมิติ ในสภาพแวดล้อมการจำลองการเก็บไข่ไก่ที่มีการเลี้ยวแบบอิสระ และตำแหน่งของแขนกลหุ่นยนต์ที่อาจไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดิมเสมอ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยเห็นว่าการศึกษาวิจัยจะ

เป็นแนวทางในการพัฒนาแขนกลร่วมกับการใช้ DL ในการหยิบจับไข่ไก่ในรูปแบบต่างๆ ได้ พร้อมกับแสดงถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน

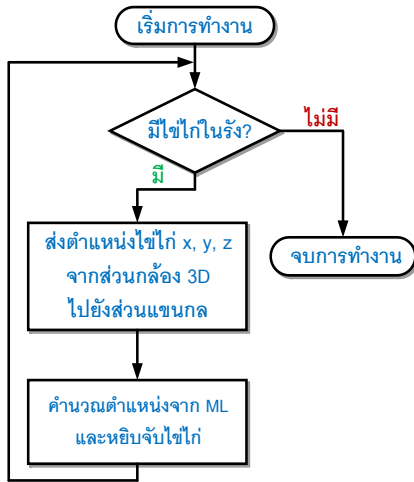
2. วิธีการการวิจัย

2.1. ภาพรวมการวิจัย

ภาพรวมในการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาหุ่นยนต์แขนกลหยิบจับไข่ไก่แบบอัตโนมัติ จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของกล้องการมองเห็นภาพและส่วนของแขนกลสำหรับการหยิบจับไข่ไก่ (รูปที่ 1) โดยที่การทำงานจะเริ่มจากการที่กล้องมองเห็นไข่ไก่ในรังไข่ พร้อมกับระบุตำแหน่งของไข่ไก่แต่ละใบบนรูปภาพในแนวแกนตั้ง แกนนอน และแกนลึก ซึ่งอ้างอิงจากตำแหน่งของตัวกล้องถึงรังไข่ จากนั้นส่งข้อมูลตำแหน่งของไข่ไก่ครั้งละ 1 ใบ ไปยังแขนกลเพื่อประมวลผลการเคลื่อนที่ และหยิบจับไข่ไก่เพื่อเก็บในตำแหน่งที่ต้องการต่อไป และจะดำเนินการในลักษณะนี้จนไม่เหลือไข่ไก่ในรังไข่ เป็นการเสร็จสิ้นการทำงาน แสดงผังงานการทำงานโดยรวม (รูปที่ 2)



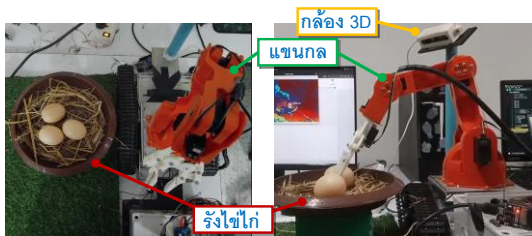
รูปที่ 1 ภาพรวมการทำงานของระบบ



รูปที่ 2 ภาพรวมผังการทำงาน

2.2. ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งและการวางอุปกรณ์ ประกอบไปด้วยการวางตำแหน่งอุปกรณ์ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ตำแหน่งของรังไข่ มีขนาดความกว้างประมาณ 20 ซม. และความยาว 20 ซม. วางห่างจากแขนกล 10 ซม. ตำแหน่งของแขนกลอยู่กึ่งกลางของรังไข่ และตำแหน่งของกล้องสามมิติอยู่ถัดจากแขนกล 10 ซม. (รูปที่ 3)



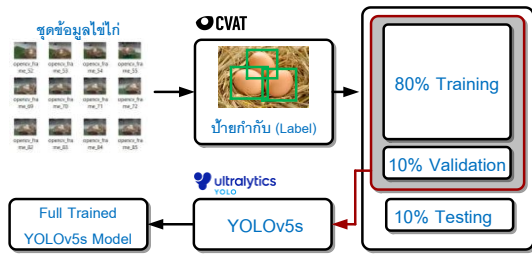
รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์

2.3. กล้องตรวจจับตำแหน่งไข่ไก่

ในการตรวจจับตำแหน่งของไข่ไก่ ใช้อุปกรณ์สำหรับการประมวลผลเป็น NVIDIA Jetson Xavier NX [14] ซึ่งเป็นชิปอุปกรณ์สำหรับการประมวลผล AI และอุปกรณ์กล้องสามมิติตรวจจับความลึก Intel

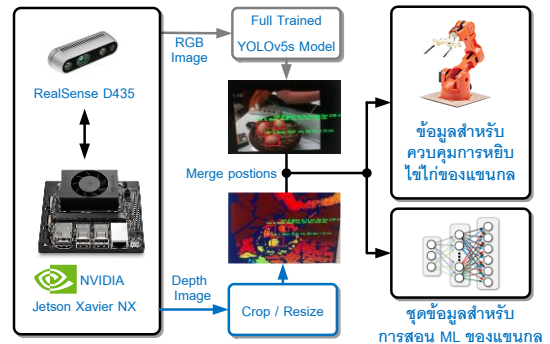
RealSense Depth Camera D435 ซึ่งเป็นกล้องวิดีโอที่มีการรวมส่วนของการรับภาพวิดีโอมีการอ่านข้อมูลแบบ RGB รวมถึงส่วนของการรับค่าความลึกประกอบเป็นข้อมูลสามมิติบนภาพ และในการพัฒนาส่วนนี้ ใช้เครื่องมือ Jupyter Notebook ในรูปแบบ web-based ที่สามารถพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา Python

การได้มาซึ่งตำแหน่งของไข่ไก่บนภาพนั้น เป็นกระบวนการจากการสร้างโมเดล DL ในที่นี้เลือกใช้เป็น YOLOv5s (เรียกแทนเป็น YOLO) จาก Open Source บนเฟรมเวิร์ค Ultralytics [15] ซึ่งเป็นโมเดลที่มีขนาดเล็กและมีความเร็วเพียงพอต่อการตอบสนองของระบบที่สามารถทำงานเป็นแบบ Real-time บน NVIDIA Jetson Xavier NX ได้เป็นอย่างดี ในด้านความเสถียรและการเข้ากันได้ระหว่างซอฟต์แวร์และคุณสมบัติของฮาร์ดแวร์ โดยกระบวนการเริ่มจากการเก็บภาพตัวอย่างไข่ไก่บนรังไข่ จำนวน 500 ภาพ แบ่งเป็น 80% สำหรับเป็นชุดข้อมูลการสอนโมเดล 10% สำหรับชุดข้อมูลเพื่อปรับปรุงโมเดล และอีก 10% สำหรับการทดสอบ ชุดข้อมูลทั้งหมดประกอบไปด้วยการกระจายตัวของจำนวนไข่ไก่จากการสุ่มวางตำแหน่งไข่บนรังไข่ เพื่อสร้างเป็นข้อมูลสำหรับการสอนโมเดล YOLO ให้มีตัวอย่างในหลายสถานการณ์ และไข่แต่ละใบบนภาพชุดข้อมูลจะถูกกำหนดป้ายตำแหน่ง (Label) ไข่ไก่ ในแกนนอนและแกนตั้ง โดยใช้เครื่องมือของ CVAT [16] เพื่อใช้ประกอบการสอนโมเดล YOLO และฝึกสอนให้ได้โมเดลที่ดีที่สุด สำหรับชุดข้อมูลภาพไข่ไก่ที่เตรียมไว้ด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลความเร็วสูงภายนอก (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การเตรียมและการสอนโมเดล YOLO

การได้มาซึ่งตำแหน่งของไข่ไก่บนภาพจากโมเดล YOLO จากการประมวลผลบน NVIDIA Jetson Xavier NX จะได้ตำแหน่งของไข่ไก่เฉพาะตำแหน่งในแนวแกนนอนและแกนตั้งเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลภาพในแนวแกนลึกมาระบุตำแหน่งที่ตรงกันด้วย เนื่องจากอุปกรณ์ Intel RealSense Depth Camera D435 มีส่วนของการเก็บภาพสี RGB และส่วนของภาพการเก็บข้อมูลความลึกแยกส่วนกัน มีขนาดมุมมองความกว้างของการเก็บภาพไม่ตรงกัน ซึ่งภาพความลึกสามมิติ มีมุมมองที่กว้างมากกว่า จึงจำเป็นต้องปรับขนาดของภาพ ด้วยการขยายภาพให้มีอัตราส่วนของวัตถุให้ใกล้เคียงกัน และตัดขอบภาพให้มีขนาดเท่ากับภาพ RGB เพื่อให้สามารถอ้างอิงตำแหน่งภาพทั้งสองส่วนได้ตรงกันมากที่สุด จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้สำหรับการฝึกสอนในกระบวนการในหัวข้อ 2.4. รวมถึงการนำไปเพื่อเป็นข้อมูลของการสอนโมเดล ML ในการเก็บไข่ไก่ของแขนกลในระบบต่อไป (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 การเตรียมข้อมูลสำหรับการสอน

โมเดล ML และการนำข้อมูลโมเดลไปใช้ในระบบ

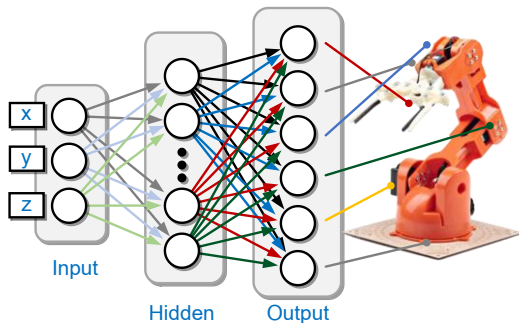
2.4. การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนวณองศาหรือคำนวณสมการสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากมอเตอร์แต่ละตัวโดยตรง แต่จะเป็นการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว โดยใช้ ML แบบ Artificial Neural Network (ANN) ในรูปแบบของ Feed Forward Neural Network (FFNN) ที่มีการส่งข้อมูลทางเดียว [17] โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งของไข่ไก่ในแนวแกนนอน แกนตั้ง แกนลึก และตำแหน่งของแขนกลโดยตรง ด้วยการเก็บข้อมูลองศาของมอเตอร์แต่ละตัวเมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งนั้น พร้อมกับใช้เป็นข้อมูลในการสอน FFNN เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหยิบจับไข่ไก่ได้โดยอัตโนมัติ โดยในที่นี้มีการเก็บข้อมูลค่าองศาที่ควบคุมมอเตอร์และตำแหน่งไข่ไก่จากภาพสำหรับการสอน FFNN ไว้จำนวน 100 ชุดข้อมูล

ในการควบคุม Servo มอเตอร์ ถูกควบคุมการทำงานโดยอุปกรณ์ ESP32 เนื่องจากในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องเลือกเป็นอุปกรณ์ที่มีจำนวนหน่วยความจำที่เพียงพอสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ของโมเดล FFNN เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมอื่นๆ ที่นิยมใช้กัน และใช้ตัวขับเคลื่อน 5 โวลต์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ พร้อมกับควบคุมการทำงานจากการส่งสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ที่มีความกว้างของคาบสัญญาณที่แตกต่างกันในการให้มอเตอร์หมุนไปยังองศาที่ต้องการ และใช้ภาษา C++ ที่มีการปรับปรุงให้สามารถใช้บน Arduino IDE ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีฟังก์ชันการทำงานพื้นฐานในการพัฒนา ควบคุม ความทิศทางและความเร็วของมอเตอร์

โมเดลของ FFNN ที่ใช้ประกอบไปด้วย 3 อินพุตโนด (Input Node) เป็นตำแหน่งแกนนอน แกนตั้ง และ แกนลึก และ 6 เอาต์พุตโนด (Output Node) ที่เป็นค่าองศาสำหรับการควบคุมมอเตอร์จำนวน 6 แกน และโนดซ่อน (Hidden Node) 1 ชั้น ที่มีจำนวนโนดแตกต่างกันตั้งแต่ 5 ถึง 30 โนด (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 โมเดล FFNN สำหรับการควบคุมแขนกล

ไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyper parameter) ที่ใช้ในทดลองประกอบไปด้วย 3 อินพุตโนด, 5 ถึง 30 สำหรับโนดซ่อน, 6 เอาต์พุตโนด, อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ความมาก/น้อย สำหรับควบคุม อัตราการเรียนรู้ของโมเดล อยู่ที่ 0.3 และรอบของการ

สอนโมเดลครบชุดข้อมูลการสอน 1 รอบ (Epoch) จำนวน 400,000 หรือน้อยกว่าหากฝึกสอนแล้วเกิดความผิดพลาด Sum of Squared Error (SSE) น้อยกว่า 0.001

ลักษณะของการหยิบไข้ไก่อ้นั้น 1 ใน 6 ของมอเตอร์คือมอเตอร์ที่ควบคุมการคืบ/หนีบไข้ไก่ เป็นการควบคุมการเข้าและหุบของอุปกรณ์หยิบไข้ไก่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ติดอุปกรณ์เพิ่มเติมบริเวณปลายของอุปกรณ์ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและเสริมอุปกรณ์ให้มีความนิ่มมากขึ้น เพื่อให้สามารถหยิบได้โดยไข้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ซึ่งปลายทางของโมเดล FFNN จะถูกกำหนดให้ส่วนหนีบมีการเข้าค้างไว้เสมอและอยู่บริเวณตำแหน่งที่พร้อมสำหรับหนีบไข้ไก่ จากนั้นจึงเป็นการควบคุมการหนีบโดยกำหนดให้มีความกว้างของอุปกรณ์หนีบ ประมาณ 75% ของขนาดไข้ไก่ ด้วยการส่งข้อมูลโดยตรงไม่ผ่านโมเดล FFNN พร้อมกับหมุนให้ตำแหน่งของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งปล่อยไข้ไก่ในจุดที่กำหนด

2.5. การส่งข้อมูลระหว่างส่วนมองภาพและส่วนแขนกล

ในการส่งข้อมูลระหว่างส่วนของการมองภาพและส่วนของแขนกลนั้น ในงานวิจัยนี้กำหนดการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ในรูปแบบ Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART) จาก NVIDIA Jetson Xavier NX ไปยัง ESP32 ผ่านพอร์ต USB โดยจะส่งข้อมูลตำแหน่งของไข้ไก่ 1 ใบในแนวแกนนอน แกนตั้ง และแกนลึก ในรูปของ x, y, และ z ตัวอย่าง

เช่น (พิกเซลที่ 120, พิกเซลที่ 150, ระยะความลึก 35.2 ซม.) ส่งข้อมูลเป็น string literal กำหนดการส่งเป็น “120x150y35.2z” ซึ่งฝั่งรับข้อมูลจะแกะข้อมูลตำแหน่งเพื่อนำไปดำเนินการต่อไป

2.6. การทดสอบความผิดพลาด

ในการทดสอบค่าความผิดพลาด ในงานวิจัยนี้ออกแบบไว้จำนวน 2 ส่วน คือส่วนของประสิทธิภาพของตำแหน่งของไข่ไก่จากภาพ และประสิทธิภาพการหยิบเก็บไข่ไก่ของแขนกล

ประสิทธิภาพของการประมวลผลตำแหน่งของไข่ไก่ จะใช้การประเมินค่าในรูปแบบ Confusion Matrix [18] โดยหาค่า Precision, Recall และ F1-score ที่คำนวณจากความถูกต้องของการตรวจสอบวัตถุบนภาพ จาก True Positive (TP), False Positive (FP) และ False Negative (FN)

ในส่วนของประสิทธิภาพของการหยิบจับไข่ไก่ของแขนกล ประเมินในรูปแบบของค่าเฉลี่ยความถูกต้องของจำนวนครั้งในการหยิบไข่ไก่ ที่มีโนดซ่อนในโมเดล FFNN แตกต่างกัน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

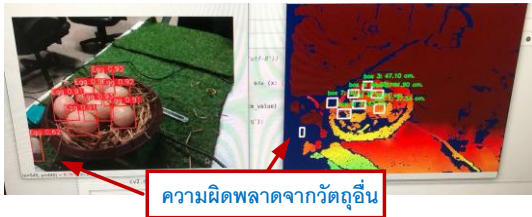
การทดลองส่วนของการประเมินประสิทธิภาพของตำแหน่งของไข่ไก่ ประกอบไปด้วยการทดสอบกับชุดข้อมูลที่แบ่งสำหรับการทดสอบ จำนวน 50 ภาพ และชุดข้อมูลภาพที่ได้รู้สุมจากวิดีโอการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างออกไปจำนวน 50 ภาพ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ผลการทำงานโมเดล YOLO

Source	GT	TP	FP	FN	Pre	Rec	F1
Test	239	215	6	24	0.97	0.90	0.93
VDOs	225	182	18	43	0.91	0.81	0.86

จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าชุดภาพสำหรับการทดสอบ (Test) จำนวน 50 ภาพ มีจำนวน Ground Truth (GT) คือจำนวนไข่ไก่จริง จำนวน 239 ใบ โมเดล YOLO สามารถทำนายว่าเป็นไข่ไก่ถูกต้อง (TP) จำนวน 215 ใบ ทำนายเป็นไข่ไก่แต่ผิดเป็นวัตถุอื่น (FP) จำนวน 6 ใบ และมีไข่ไก่จริงแต่ไม่ได้ถูกทำนาย (FN) จำนวน 24 ใบ แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายว่าเป็นไข่ไก่และเป็นไข่ไก่จริงมีค่า Precision ที่ 0.97 โมเดลพลาดการทำนาย (ไม่ได้ทำนาย) ไข่ไก่ที่มีอยู่จริง ได้ Recall อยู่ที่ 0.90 และค่า F1-score ซึ่ง เป็น ค่า Harmonic mean ของ Precision และ Recall อยู่ที่ 0.93 ส่วนชุดข้อมูลที่รู้สุมจากวิดีโอ (VDOs) และได้ภาพมาจำนวน 50 ภาพนั้น มีค่า Precision, Recall, และ F1-score เท่ากับ 0.91, 0.81 และ 0.86 ตามลำดับ ซึ่งจากการสังเกตค่าผลทดสอบจากชุดข้อมูล VDOs มีค่าต่ำกว่าชุดข้อมูลทดสอบ เนื่องจากไข่ไก่บางใบถูกบดบัง ทำให้โมเดล YOLO ไม่สามารถมองเห็นไข่ไก่ใบที่ถูกบังได้ ส่งผลให้เกิดจำนวน FN เพิ่มมากขึ้น และค่า FP นั้นเกิดจากวัตถุอื่นหรือภาพพื้นหลังที่มีขนาดและสีคล้ายไข่ไก่ ทำให้โมเดล YOLO เกิดการทำนายที่ผิดพลาด (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ตัวอย่างความผิดพลาดของโมเดล YOLO

การทดลองในส่วนของการหาประสิทธิภาพการหยิบไข่ไก่ของแขนกล ได้ออกแบบการทดลองจากการกำหนดในดช้อน จำนวน 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 โหนด พร้อมกับประเมินจากจำนวนครั้งที่สามารถหยิบจับไข่ไก่ได้ ทั้งหมด 40 ครั้ง โดยสุ่มวางจำนวนไข่ไก่แต่ละครั้งไม่เท่ากันในช่วง 1-5 ใบ ในรูปแบบที่มีการสุ่มวางให้ไข่ไก่กระจายตัว และการวางไข่ไก่ให้ชิดกันเป็นกลุ่ม ได้ผลดังตารางที่ 2

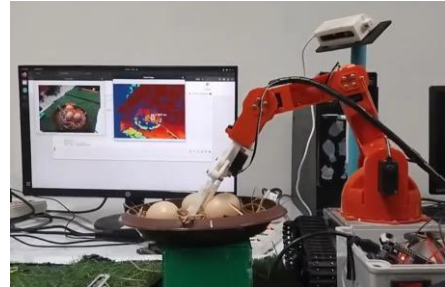
ตารางที่ 2

ผลการหยิบไข่ไก่ของแขนกล

Hidden	เก็บถูกต้อง	เก็บพลาด	% ความถูกต้อง
5	30	10	75%
10	32	8	80%
15	32	8	80%
20	35	5	87.5%
25	36	4	90%
30	36	4	90%

จากตารางที่ 2 เมื่อกำหนดจำนวนโนดช้อนที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้หยิบจับไข่ไก่ได้ถูกต้องเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้จำนวนโนดช้อนที่ 20 โหนดขึ้นไปสามารถหยิบจับไข่ไก่ได้ถูกต้องมากกว่า 85% โดยที่อาจจะไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนโนดไปมากกว่านี้

ทำให้เกิดการคำนวณและประมวลผลที่มากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อเวลาในการเก็บไข่ไก่ด้วยเช่นกัน (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ตัวอย่างภาพรวมการทำงานของระบบ

4. สรุป

จากการพัฒนาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แขนกลเก็บไข่ไก่โดยการใช้ ML ในการคำนวณการเคลื่อนที่ร่วมกับการใช้ YOLO สำหรับการประมวลผลภาพ เพื่อให้ได้ตำแหน่งของไข่ไก่ จากกล้องสามมิติที่ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่บนส่วนปลายสำหรับหนีบวัตถุของแขนกล ในกรณีการเลี้ยงไก่แบบปล่อยอิสระ และไข่ในสถานที่ที่กำหนดไว้

จากการทดลองเห็นได้ว่าแขนกลสามารถหยิบไข่ได้แม่นยำและถูกต้อง โดยไม่ต้องใช้สมการในการคำนวณองศาของมอเตอร์ เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิมที่ต้องกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ไว้เฉพาะที่ พร้อมกับค่าความแม่นยำในการหยิบจับไข่ไก่ขึ้นอยู่กับจำนวนโนดช้อนของโมเดล ML โดยที่จำนวนโนดช้อนที่มากยิ่งขึ้น ทำให้แขนกลหยิบจับไข่ไก่มีจำนวนครั้งที่ถูกต้องมากขึ้น แต่ก็ถูกแลกมาด้วยการประมวลผลที่มากขึ้นด้วย

ในส่วนของการใช้ YOLO สำหรับคำนวณหาตำแหน่งของไข่ไก่จากกล้องสามมิติ สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี แต่อาจเกิดการผิดพลาดในบางกรณี เช่น การปรับ/ตัดภาพความลึกและภาพสี RGB จากกล้องสามมิติไม่ตรงกัน อาจจะทำให้ตำแหน่งเป้าหมายที่ได้จริงมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งในการปรับภาพจะมีความแตกต่างกัน หากมีการติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดิม หรือการบดบังของไข่ไก่ใบอื่น ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจจะไม่ใช้ประเด็นที่ทำให้แขนกลหยิบไข่ไก่ผิดพลาด เนื่องจากไข่ใบด้านหน้าถูกหยิบไปแล้วทำให้ใบที่ถูกบดบังปรากฏขึ้นในวงรอบการหยิบไข่ใบต่อไป และส่วนของความผิดพลาดของ YOLO โดยส่วนใหญ่เกิดจากกรณีการทำนายวัตถุผิด เนื่องมาจากสีของพื้นหลังหรือวัตถุอื่นที่มีลักษณะและขนาดคล้ายไข่ไก่ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดปัญหาของระบบโดยรวมได้ จากการที่แขนกลหยิบไข่ไก่ในที่ไม่มีไข่ไก่จริงแบบไม่สิ้นสุด

งานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดในส่วนของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ติดแขนกลที่สามารถเดินทางไปยังส่วนพื้นที่เก็บไข่ในตำแหน่งที่หลากหลาย รวมถึงการหยิบจับวัตถุอื่น ๆ ที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายกันได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kittiwong K, Saeliw K. การผลิตและการตลาดไข่ไก่ในประเทศไทย. Kaen Kaset. 2019;47(Suppl 1):890–4.
- [2] Molee W, Khempaka S, Homta C. ผลของการเลี้ยงไก่ไข่แบบปล่อยต่อสมรรถนะการให้ผลผลิต คุณภาพไข่ ปริมาณคอเลสเตอรอล และองค์ประกอบของกรดไขมัน ใน ไข่ . Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2015.
- [3] Klompunya A, Srikitsasemwat K, Sitthikraipong R. ผลของระบบการเลี้ยงแบบปล่อยอิสระและแบบกรงตับต่อคุณภาพไข่ในไก่ไข่อายุ 19–31 สัปดาห์. Agric Sci J. 2017;35(2 Suppl 2):920–4.
- [4] Sharma A, Jain A, Gupta P, Chowdary V. Machine learning applications for precision agriculture: a comprehensive review. IEEE Access. 2021;9:4843–78.
- [5] Pitla S, Bajwa S, Bhusal S, Brumm T, Brown-Brandl TM, Buckmaster DR, et al. Ground and aerial robots for agricultural production: opportunities and challenges. CAST Issue Pap. 2020;70:1–20. Available from: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/727>
- [6] Benos L, Tagarakis AC, Dolias G, Berruto R, Kateris D, Bochtis D. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. Sensors (Basel). 2021;21(11):3758.

- [7] Spanaki K, Sivarajah U, Fakhimi M, Despoudi S, Irani Z. Disruptive technologies in agricultural operations: a systematic review of AI-driven AgriTech research. *Ann Oper Res.* 2021. doi:10.1007/s10479-020-03922-z
- [8] Wang CH, Xie BX, Chang CL. Design and implementation of livestock robot for egg picking and classification in the farm. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS)*; 2019 May 31–June 3; Okinawa, Japan. New York: IEEE; 2019. p. 161–5.
- [9] Jermann T, Kolvenbach H, Esquivel Estay F, Krämer K, Hutter M. An efficient multi-robot arm coordination strategy for pick-and-place tasks using reinforcement learning. *arXiv [Preprint]*. 2024 [cited 2025 May 29]. Available from: <https://arxiv.org/abs/2409.13511>
- [10] Tian X, Pan B, Bai L, Wang G, Mo D. Fruit picking robot arm training solution based on reinforcement learning in digital twin. *J ICT Stand.* 2023;11(3):261–82.
- [11] Wu Z, Zhang H, Fang C. Research on machine vision online monitoring system for egg production and quality in cage environment. *Poult Sci.* 2025;104:104552.
- [12] Yang X, Zhang J, Paneru B, Lin J, Bist RB, Lu G, et al. Precision monitoring of dead chickens and floor eggs with a robotic machine vision method. *AgriEngineering.* 2025;7(2):35.
- [13] Çevik KK, Koçer HE, Boga M. Deep learning based egg fertility detection. *Vet Sci.* 2022;9(10):574.
- [14] NVIDIA Corporation. Jetson Xavier NX: World's smallest AI supercomputer [Internet]. Santa Clara (CA): NVIDIA; [cited 2025 Feb 9]. Available from: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-xavier-nx/>
- [15] Jocher G. Ultralytics YOLOv5 [Internet]. 2020 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://github.com/ultralytics/yolov5>
- [16] CVAT.ai Corporation. CVAT: Computer Vision Annotation Tool [Internet]. Palo Alto (CA): CVAT.ai Corporation; [cited 2025 Jan 20]. Available from: <https://www.cvat.ai/>

- [17] Heymsfeld R. Arduino Neural Network [Internet]. Hobbizine; [cited 2025 Jan 19]. Available from: <http://robotics.hobbizine.com/arduinoann.html>
- [18] Everingham M, Van Gool L, Williams CKI, Winn J, Zisserman A. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge. *Int J Comput Vis.* 2009;88(2):303–38.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การจำลองแรงกระทำและการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Finite Element Simulation of Acting Forces and Deformation of Beating Blades in Banana Pseudostem Fiber Extraction Machines

ธีรเดชินทร์ เลิศรักษวรกุล^{1)*}, วีระพล แก้วกำ²⁾, อติศักดิ์ บุตรวงษ์²⁾, คมสัน ตันติชูเกียรติ²⁾,ธวัชชัย สีลาใส²⁾ อภิชาติ ศรีชาติ²⁾ และ กวีพงษ์ หงษ์ทอง²⁾Theeratechin Lertrakworakul^{1)*}, Weeraphon Kaewka²⁾, Adisak Bootwong²⁾, Komsan Tuntichukiad²⁾,Tawatchai Seelaso²⁾ Aphichat Srichat²⁾ and Kaweepong Hongtong²⁾^{1)*} วิศวกรเครื่องกล ฝ่ายออกแบบ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี 64 ถ.ทหาร ต.หมากแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

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

^{1)*} Mechanical Engineering, Udon Thani Rajabhat University, 64 Tahan road, Makang, Muang Udonthani, UdonThani, Thailand, 41000²⁾ 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, Thailand

Received: 5 May 2025

Revised: 31 May 2025

Accepted: 2 June 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองแรงกระทำและการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อเปรียบเทียบใบตี 3 แบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบ, 13 ใบ และ 32 ใบ ตลอดจนวิเคราะห์ความเค้น Von Mises, การเสียรูป, ความปลอดภัย (FoS) และอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าของใบตีในแต่ละแบบ ผลการทดลองพบว่า ใบตีแบบ 5 ใบมีค่าความเค้นต่ำสุดที่ 6.4 MPa และค่า

ความปลอดภัยสูงสุด (FoS Goodman = 12.87, FoS Soderberg = 12.42, FoS ทั่วไป = 4.69) พร้อมด้วยอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าสูงถึง 2.80×10^{21} รอบ ในขณะที่ใบตีแบบ 13 ใบและ 32 ใบมีค่าความเค้นสูงกว่าแต่กระจายแรงได้ดีกว่าและมีการเสียรูปน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ใบตีทั้งสามแบบยังคงอยู่ในช่วงเชิงยืดหยุ่นของวัสดุ ผลการศึกษานี้ช่วยสนับสนุนการออกแบบใบตีที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูง พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางการปรับปรุงรูปทรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดความเค้นสะสมในอนาคต

คำสำคัญ : ไฟไนต์เอลิเมนต์ เครื่องสกัดเส้นใย ใบตี กาบกล้วย ความเค้น ความปลอดภัย

Abstract

This research aims to investigate the stress and deformation behavior of banana fiber extraction machine blades using the Finite Element Method (FEM). Three blade configurations—5-blade, 13-blade, and 32-blade designs—were analyzed and compared in terms of Von Mises stress, deformation, safety factors, and fatigue life. The results indicate that the 5-blade configuration exhibited the lowest stress value of 6.4 MPa and the highest safety factors (Goodman = 12.87, Soderberg = 12.42, and general FoS = 4.69), along with an exceptionally long fatigue life estimated at 2.80×10^{21} cycles. While the 13-blade and 32-blade configurations experienced higher stress levels, they demonstrated better load distribution and less deformation. All blade designs operated within the elastic range of the material. The findings provide valuable insights for optimizing blade design to enhance structural integrity, safety, and operational performance of banana fiber extraction machines.

Keywords: Finite Element Method: fiber extraction machine: beating blade: banana pseudostem: stress: safety factor

*ติดต่อ: theeratechin59@gmail.com, 099-506-4450

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้เส้นใยจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กาบกล้วย (banana sheath) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นวัสดุหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม น้ำหนักเบา และมีสมบัติเชิงกลที่น่าสนใจ [1] การสกัดเส้นใยจากกาบกล้วยด้วยวิธีเชิงกล เช่น การตีด้วยใบตีของเครื่องจักร ถือเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้น

ใยที่ได้ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่ใช้ โดยเฉพาะ “ใบตี” (beater blades) ต้องเผชิญกับแรงกระทำสูงซ้ำๆ ต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสียรูปหรือความล้าทางกลในระยะยาว [2]

Finite Element Analysis (FEA) เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างทางกลภายใต้แรงกระทำต่างๆ ทั้งในเชิงสถิต (static) และเชิงไดนามิก (dynamic) เทคโนโลยี FEA ช่วยให้เราสามารถคาดการณ์ จุดวิกฤตของการเสียรูป ความเค้น

สะสม และการล้าของวัสดุได้อย่างแม่นยำ ก่อนการทดสอบจริงหรือการใช้งานในภาคสนาม [3]

งานวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมการล้าของใบมีดในระบบตัดวัสดุทางการเกษตร โดยใช้การจำลองแบบไดนามิก เพื่อประเมินแรงกระแทกและผลกระทบต่อการใช้งานของใบมีด [4] นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ความล้าของใบมีดเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับการทดสอบแบบไดนามิก ผลการศึกษาพบว่าใบมีดที่มีการออกแบบรูปทรงและเลือกใช้วัสดุอย่างเหมาะสมสามารถลดความเสียหายสะสมจากแรงกระทำซ้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ [5]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเส้นใยธรรมชาติและกระบวนการสกัดโดยรวม [6,7] แต่ยังคงขาดการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น ใบมีด ที่มีบทบาทสำคัญในการสกัดเส้นใยอย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์แรงกระทำและการเสียรูปของใบมีดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบเครื่องจักรที่มีความทนทานสูง และเพิ่มอายุการใช้งานโดยลดการเสียหายจากความเมื่อยล้าของวัสดุ (Fatigue failure) ซึ่งจะนำไปสู่การลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระยะยาว [8]

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองพฤติกรรม การเสียรูปของใบมีดเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยภายใต้สภาวะแรงกระแทกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินความเค้น ความเครียด และแนวโน้มการเสียรูปที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการใช้งานจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้ปรับปรุงการออกแบบใบมีดให้มีประสิทธิภาพและความทนทานสูงขึ้น

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ใช้การจำลอง

ในการศึกษานี้การจำลองพฤติกรรมการทำงานของแรงและการเสียรูปของใบมีดเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซึ่งรองรับการจำลองทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural Mechanics) ที่ช่วยให้สามารถประเมินแรงกระทำและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง และการเสียรูปภายใต้แรงต่างๆ ได้อย่างละเอียด [9]

2.1. ความเครียดและการเสียรูป (Stress and Deformation)

ใน COMSOL ความเครียดที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ ถูกคำนวณจากสมการความเครียดที่มีลักษณะดังนี้

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

โดยที่

σ = ความเครียด (Stress)

E = โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus)

ϵ = การเสียรูป (Strain)

การเสียรูปที่เกิดขึ้นจะถูกคำนวณจากความเครียดที่ได้รับจากแรงต่างๆ ที่กระทำกับใบมีด ซึ่ง COMSOL จะคำนวณการกระจายความเครียดนี้ในทุกจุดของโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น การกระแทก หรือแรงหมุน [10]

2.2. สูตรการคำนวณแรงกระทำ (Force Calculation)

สำหรับการคำนวณแรงที่กระทำใน COMSOL ซอฟต์แวร์จะใช้สมการสมดุลของแรง (Equilibrium Equations) สำหรับโครงสร้างที่ได้รับการจำลองในรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\int_V (B^T \sigma) dV = F \quad (2)$$

โดยที่

V = Volume ของโครงสร้างที่ได้รับการจำลอง

B = เมทริกซ์รูปทรง (Strain-displacement matrix)

σ = ความเครียดที่กระทำบนโครงสร้าง

F = แรงทั้งหมดที่กระทำบนโครงสร้าง

การคำนวณนี้จะช่วยให้สามารถคำนวณการกระจายของแรงในแต่ละจุดของโมเดลได้ รวมถึงแรงจากการกระแทกและการหมุนที่เกิดขึ้น [11]

2.3. การคำนวณ Von Mises Stress

COMSOL ใช้สูตร Von Mises Stress ในการประเมินการแตกหักและการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความเครียดที่สะสมในวัสดุ

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (3)$$

โดยที่

σ_v = Von Mises Stress

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = ความเครียดในทิศทางต่างๆ

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = ความเครียดเชิงเฉือน (Shear stress)

สูตรนี้ใช้ในการประเมินความเสี่ยงที่วัสดุจะเกิดการแตกหักเมื่อความเครียดสะสมเกินขีดจำกัดของวัสดุ [12]

2.4. ปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor)

COMSOL ยังสามารถคำนวณ Safety Factor หรือปัจจัยความปลอดภัยของวัสดุจากการเปรียบเทียบ

ระหว่างความเครียดที่วัสดุสามารถทนได้ (Yield Stress) และความเครียดที่เกิดจากการกระทำ

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_v} \quad (4)$$

โดยที่

SF = ปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor)

σ_{yield} = ความเครียดที่วัสดุสามารถทนได้ (Yield Stress)

σ_v = Von Mises Stress

การคำนวณนี้ช่วยให้ทราบว่ากรอบแบบโมเดลจะปลอดภัยจากการแตกหักหรือไม่ภายใต้แรงที่กระทำ [13]

2.5. ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ตามมาตรฐานทั่วไป

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor หรือ Factor of Safety, FoS) (ตารางที่ 1) เป็นอัตราส่วนระหว่างความต้านทานสูงสุดของวัสดุกับแรงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริง โดยทั่วไปแล้ว ค่า Safety Factor จะขึ้นอยู่กับประเภทของโหลดและลักษณะการใช้งาน

ตารางที่ 1

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ตามมาตรฐานทั่วไป

ประเภทการใช้งาน	Safety Factor ที่แนะนำ
โหลดคงที่ (Static Load)	1.5 – 2.0
โหลดสลับ (Fluctuating Load)	2.0 – 3.0
โหลดกระแทก/ไม่แน่นอน (Shock, Impact)	3.0 – 4.0+
อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย	> 4.0

ในงานวิจัยนี้ ค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วย โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อจำลองแรงกระทำและการเสียรูปจะอยู่ในช่วง 2.0-3.0 ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่มีการโหลดสลับหรือโหลดที่ไม่คงที่ คือ การหมุนและแรงกระแทกจากการตีเส้นใย โดยในกรณีนี้แรงที่กระทำบนใบตีมีค่า 384 นิวตัน การเลือก Safety Factor ในช่วงนี้จะช่วยให้มั่นใจว่าใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยมีความทนทานและปลอดภัยในการใช้งานจริง [14]

2.6. การคำนวณความเค้นเฉลี่ยและแอมพลิจูด (Mean & Amplitude Stress)

ในกรณีที่โหลดเป็นแบบคงที่ (constant repeated load) [15]

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{vm}}{2} \quad (5)$$

โดยที่

σ_{vm} = ความเค้น Von Mises จากผลการจำลอง

(หน่วย MPa)

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

2.7. ค่าความเค้นที่ทำให้เกิดความล้า (Endurance Limit)

ค่าความเค้นความล้า (S_e) ประมาณจากค่าความเค้นดึงของวัสดุ S_{ut} ด้วยสูตร [16]

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut} \text{ (สำหรับวัสดุโลหะทั่วไป)} \quad (6)$$

จากนั้นปรับค่า S'_e ด้วยปัจจัย correction factors

$$S_e = S'_e \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f$$

โดยที่

k_a = Surface factor (ขึ้นกับคุณภาพผิว)

k_b = Size factor (ขึ้นกับขนาด)

k_c = Load factor (โหลดประเภทต่างๆ)

k_d = Temperature factor

k_e = Reliability factor

k_f = Miscellaneous-effects factor

2.8. Goodman & Soderberg Criteria (ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย)

สมการ Goodman และ Soderberg เป็นวิธีวิเคราะห์ความปลอดภัยของวัสดุภายใต้การโหลดซ้ำ (fatigue loading) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยและความเค้นสลับ เพื่อประเมินความเสี่ยงการเกิดความล้าและการแตกร้าวของชิ้นงาน [17,18]

Goodman

$$FoS_{Goodman} = \left[\frac{S_e \cdot (S_{ut} - \sigma_m)}{\sigma_a \cdot S_{ut}} \right] \quad (7)$$

Soderberg

$$FoS_{Soderberg} = \left[\frac{S_e \cdot (S_y - \sigma_m)}{\sigma_a \cdot S_y} \right] \quad (8)$$

โดยที่

S_e = Endurance Limit

S_{ut} = Ultimate Tensile Strength

S_y = Yield Strength

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

σ_m = ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)

2.9. แปลง RPM เป็นจำนวนรอบต่อปี (Operating Cycles/Year)

รอบต่อนาที (RPM) คือความถี่ในการหมุนของใบตีภายในหนึ่งนาที ซึ่งใช้แสดงความเร็วเชิงกลของชิ้นงานในการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) จำเป็นต้องแปลงค่า RPM ให้เป็นจำนวนรอบต่อปี (Operating Cycles

per Year) เพื่อประเมินจำนวนรอบของการรับโหลดซ้ำที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการใช้งานจริง อันเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนภายใต้สภาวะการทำงานต่อเนื่อง [19]

$$N_{year} = RPM \times 60 \times \frac{hours}{day} \times \frac{days}{year} \quad (9)$$

โดยที่

RPM = รอบการหมุนของเพลลา (รอบต่อนาที)

2.10.การประมาณอายุการใช้งาน (Fatigue Life Estimation)

การประมาณอายุการใช้งาน (Fatigue Life Estimation) คือ การทำนายจำนวนรอบการใช้งานที่วัสดุสามารถรับแรงซ้ำได้ก่อนเกิดความเสียหายจากการล้า เพื่อประเมินความทนทานและวางแผนบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม [20,21]

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (10)$$

แปลงเป็นหา N_f

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

โดยที่

σ_a = ความเค้นแอมพลิจูด (Stress Amplitude)

N_f = จำนวนรอบก่อนเสียหายจากการล้า

$\sigma'_f \approx S_{ut}$ = Fatigue strength coefficient

b = Fatigue strength exponent (-0.08 ถึง -0.12)

3. เครื่องมือและวิธีการจำลอง (Materials and Simulation Methods)

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ในการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยภายใต้สภาวะแรงกระแทก (dynamic impact loading) การวิเคราะห์เน้นการประเมินค่าความเค้น (stress), ความเครียด (strain) และการกระจายตัวของการเสียรูปภายในชิ้นงาน [22,23]

โครงสร้างของใบตีถูกจำลองโดยใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ซึ่งมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus), ค่าความเค้นจำกั (Yield stress) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) [24] รูปแบบของแรงกระทำถูกกำหนดเป็นแรงกระแทก (impact force) ขนาดคงที่ที่จุดสัมผัสระหว่างใบตีกับเส้นใย เพื่อสะท้อนสภาวะการทำงานจริง

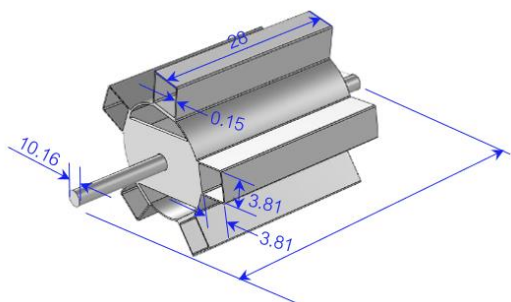
การสร้างโครงข่าย (Mesh generation) ใช้โครงข่ายประเภท Tetrahedral โดยเพิ่มความละเอียด (Refinement) บริเวณขอบคมของใบตีซึ่งคาดว่าจะเป็จุดเกิดความเค้นสูง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของโครงข่าย (Mesh Independence Test) โดยสร้างโมเดลด้วยโครงข่ายที่มีขนาดแตกต่างกันหลายระดับ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง เช่น ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) และการเสียรูปสูงสุด (Maximum Deformation) เพื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ตามลำดับความ

ละเอียดของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าผลลัพธ์มีความเสถียรในระดับที่เหมาะสม จึงเลือกโครงข่ายที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสุดท้าย [25] ผลการจำลองช่วยในการระบุจุดอ่อนของโครงสร้างใบตี และนำไปสู่แนวทางการออกแบบที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกและลดโอกาสการล้าของวัสดุในระยะยาว

3.1. การออกแบบใบตีและการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยจำนวน 3 แบบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นกับใบตีในกระบวนการสกัดเส้นใย โดยเฉพาะการกระทำของแรงกระแทกและแรงที่เกิดจากการติดต่อกับวัสดุที่ถูกสกัด ทั้ง 3 แบบประกอบด้วย

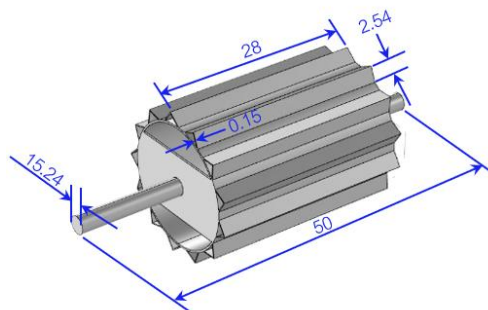
แบบ 5 ใบ ใช้เหล็กกล่องขนาด 3.81×3.81 ซม. หนา 0.15 ซม. ยาว 28 ซม. จำนวน 5 ท่อน ทำเป็นใบตีใช้ท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. ยาว 28 ซม. เป็นตัวยึดใบตีเข้ากับเพลาส่งกำลัง มีความเร็วรอบ 2,121 รอบต่อนาที (เพลายาว 50 ซม.) (รูปที่ 1)



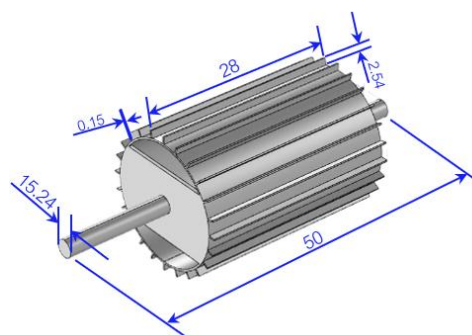
รูปที่ 1 ใบตีแบบที่ 1

แบบ 13 ใบ และ แบบ 32 ใบ ใช้เหล็กฉากขนาด 2.54×2.54 ซม. หนา 0.15 ซม. ยาว 28 ซม. จำนวน 13 และ 32 ท่อนตามลำดับ ทำเป็นใบตี ใช้ท่อเหล็กเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 15.24 ซม. เพลายาว 50 ซม. เป็นตัวยึดเข้ากับเพลาส่งกำลังขนาดเดียวกัน มีความเร็วรอบ 1,686 รอบต่อนาที (รูปที่ 2 และ รูปที่ 3)



รูปที่ 2 ใบตีแบบที่ 2



รูปที่ 3 ใบตีแบบที่ 3

การออกแบบใบตีทั้งสามแบบมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อแรงกระทำในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน การจำลองนี้ช่วยให้สามารถประเมินความเครียด การเสียรูป และพฤติกรรมการสะสมความเครียดที่อาจส่งผลให้เกิดการล้าของวัสดุในระยะยาว ผลลัพธ์จากการจำลองจะช่วยในการคัดเลือกรูปแบบใบตีที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถทนต่อแรงกระทำต่างๆ ในกระบวนการสกัดเส้นใยจากกากกล้วยได้ และช่วยลดความเสี่ยงจากการเสียหายหรือการล้าของวัสดุระหว่างการใช้งานในระยะยาว

นอกจากนี้ การใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ยังช่วยให้สามารถทดสอบใบตีภายใต้สภาวะแรงกระทำที่มีระดับแตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถนำไปปรับปรุงการออกแบบเครื่องสกัดเส้นใยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2. วิธีการจำลอง

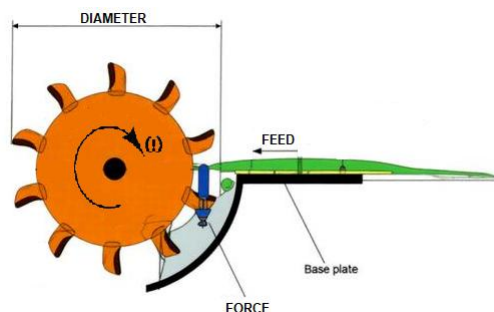
การจำลองพฤติกรรมของใบตีเครื่องสกัดเส้นใยจากกากกล้วยดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ในโหมด Stationary การตั้งค่าเริ่มต้นประกอบด้วย การคำนวณแรงที่ใบตีต้องการในการแยกเส้นใยจากกากกล้วย โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัย “Banana Fiber Extraction Machine” [26] ซึ่งคำนวณแรงที่ต้องการในการแยกเส้นใยและแรงบิดที่ใบตีต้องสร้าง ตามข้อมูลในงานวิจัย แรงที่ใบตีต้องใช้ในการแยกเส้นใยจากกากกล้วยถูกคำนวณได้เป็น 384 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงที่ต้องการในการตีเส้นใยจากวัสดุที่ถูกสกัดในกระบวนการนี้

จากนั้น ได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Model) ของใบตีในซอฟต์แวร์ COMSOL โดยกำหนดขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของใบตีตามข้อมูลจากงานวิจัย พร้อมทั้งระบุคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ซึ่งเลือกใช้ตามที่กำหนด เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการสึกหรอ และมีค่า Modulus of Elasticity อยู่ที่ 30 Mpa

การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ถูกกำหนดโดยการยึดติดจุดบางจุดของใบตี เพื่อจำลองการติดตั้งในเครื่องจักร โดยตำแหน่งการยึดติดจะอยู่บริเวณแกนกลางของใบตี ส่วนแรงกระทำ 384 N จะ

ถูกกำหนดที่บริเวณปลายใบตีในทิศทางตามแกน Y (แรงดันในแนวเดียวกับการตีเส้นใย) เพื่อจำลองการสัมผัสกับวัสดุในการสกัดเส้นใย (รูปที่ 4)

ในการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาความเครียดและการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบตีภายใต้แรงกระทำที่จำลอง พร้อมทั้งได้ดำเนินการวิเคราะห์แบบ Fatigue Analysis (Dynamic Loading) เพื่อประเมินอายุการใช้งานในระยะยาวของใบตีภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ ตามรอบการหมุนของเครื่องจักร โดยใช้โมดูล Fatigue ใน COMSOL [27]



รูปที่ 4 แรงกระทำกับใบตี

4. การวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis)

ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ได้ดำเนินการวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis) เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยเริ่มต้นจากการเลือกประเภทของเมชที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง โดยใช้เมชประเภท Tetrahedral ซึ่งสามารถรองรับรูปทรงทางเรขาคณิตที่ซับซ้อนของใบตีได้เป็นอย่างดี [28]

การตั้งค่าเมชถูกปรับให้มีความละเอียดสูงในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงหรือความเครียดสูง เช่น บริเวณที่ใบตีสัมผัสกับวัสดุที่ถูกสกัด ซึ่งจะช่วยให้

ความแม่นยำในการคำนวณแรงกระทำและการเสียรูปของวัสดุ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Test) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการใช้ขนาดเมชต่างๆ และเลือกขนาดที่ให้ผลลัพธ์ที่คงที่ โดยไม่เพิ่มภาระการประมวลผลเกินความจำเป็น [29]

การทดสอบความเป็นอิสระของเมชเป็นขั้นตอนสำคัญในการยืนยันว่าผลการจำลองไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเมชมากเกินไป และสามารถใช้ได้ในสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสม การทำการทดสอบนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยด้านการจำลองด้วย CFD (Computational Fluid Dynamics) และ FEA เพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำสูง

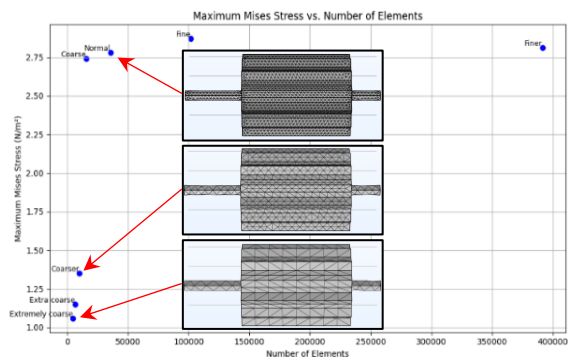
4.1. ผลการวิเคราะห์เมช

ผลการวิเคราะห์เมช พบว่า ความเร็วสูงสุดของอากาศเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเมช โดยเมชที่มีจำนวนองค์ประกอบเกิน 100,000 องค์ประกอบ แสดงถึงความเสถียรของผลการจำลอง จากการเปรียบเทียบความแม่นยำ พบว่า Mesh ระดับ Normal มีค่า %error เพียง 3.13% เมื่อเทียบกับระดับ Fine ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [20,21] ดังนั้น จึงเลือกใช้ Mesh ระดับ Normal เพื่อความสมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2

ผลการวิเคราะห์เมช (Mesh Analysis)

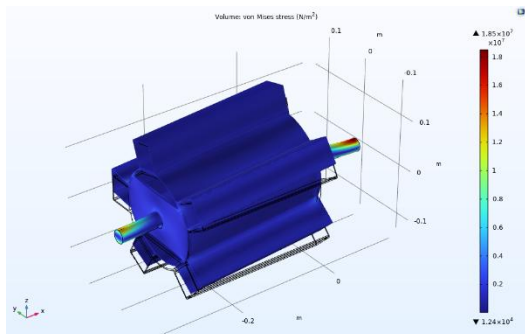
Mesh Analysis		
Element Size	Number of Element	Maximum Mises Stress (N/m ²)
Extremely	4,763	1.06
Extra coarse	6,529	1.15
Coarser	10,037	1.35
Coarse	15,717	2.74
Normal	35,746	2.78
Fine	101,693	2.87
Finer	391,402	2.81



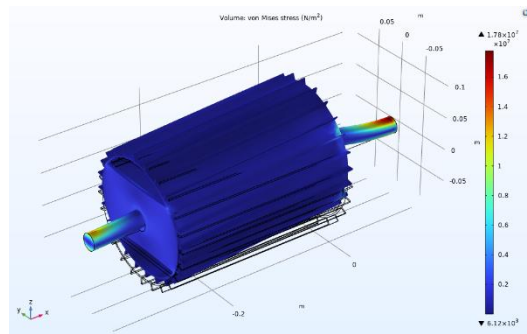
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์เมชระหว่างความเค้นสูงสุดและ จำนวน Element

5. ผลการทดลอง

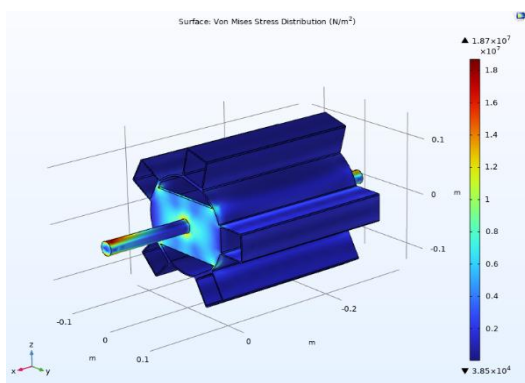
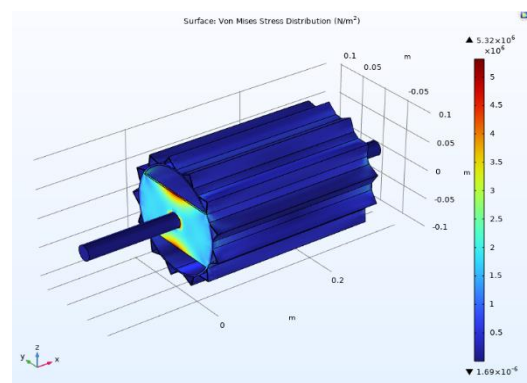
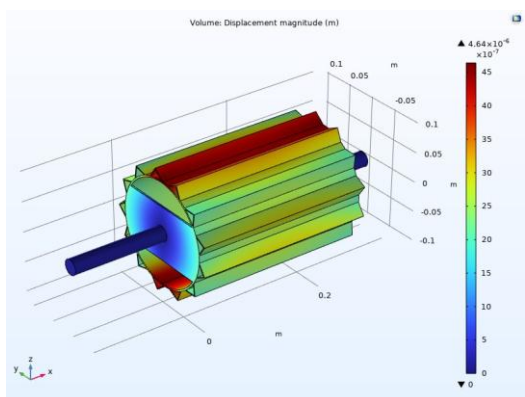
จากการจำลองแรงกระทำและการกระจายความเค้นในใบพัดทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบพัด, 13 ใบพัด และ 32 ใบพัด โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้น Von Mises ภายใต้แรงกระทำคงที่ขนาด 384 นิวตัน (รูปที่ 6-14) พบว่า มีความแตกต่างกันทั้งในด้านของค่าความเค้นสูงสุด ตำแหน่งที่เกิดความเค้น และค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานภายใต้โหลดซ้ำ (Fatigue)



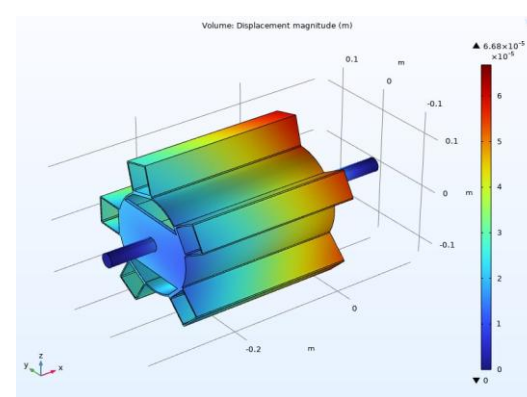
รูปที่ 6 ผลจำลอง Von Mises Stress ใบตีแบบที่ 1



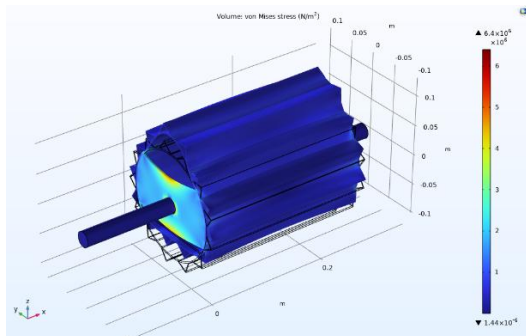
รูปที่ 9 ผลจำลอง Von Mises Stress ใบตีแบบที่ 2

รูปที่ 7 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution
ใบตีแบบที่ 1รูปที่ 10 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution
ใบตีแบบที่ 2

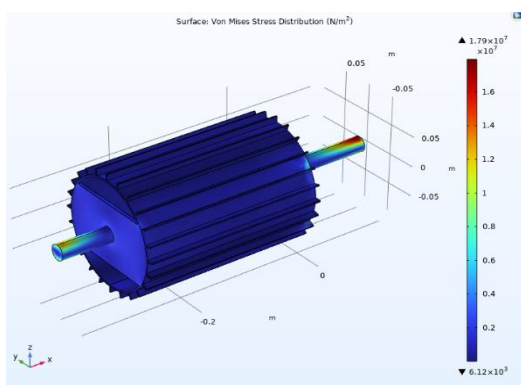
รูปที่ 8 ผลจำลอง Displacement ใบตีแบบที่ 1



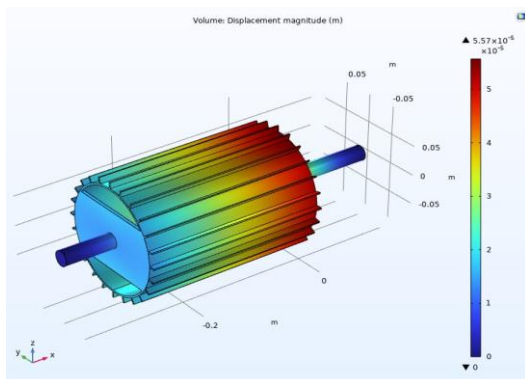
รูปที่ 11 ผลจำลอง Displacement ใบตีแบบที่ 2



รูปที่ 12 ผลจำลอง Von Mises Stress ไบต์แบบที่ 3



รูปที่ 13 ผลจำลอง Von Mises Stress Distribution ไบต์แบบที่ 3



รูปที่ 14 ผลจำลอง Displacement ไบต์แบบที่ 3

5.1. ความเค้นจากการจำลองและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุด

ผลการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า ไบต์แบบที่ 1 มี 5 ไบต์ ให้ค่าความเค้น Von Mises สูงสุดที่ 6.4 เมกะปาสคาล โดยตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่มุมเชื่อมต่อระหว่างไบต์และท่อนเหล็ก ซึ่งเป็นบริเวณรอยเชื่อมแนวตั้งที่รับแรงดัดมากที่สุด ในขณะที่ ไบต์แบบที่ 2 มี 13 ไบต์ ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 18.5 เมกะปาสคาล โดยตำแหน่งเกิดขึ้นที่ปลายไบต์ด้านหน้าซึ่งอยู่ใกล้กับแนวแรงกระทำ จุดนี้เป็นจุดที่รับแรงเฉือนสะสมสูงสุด และไบต์แบบที่ 3 มี 32 ไบต์ ให้ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 17.8 เมกะปาสคาล ซึ่งตำแหน่งความเค้นสูงสุดนั้นคล้ายกับแบบที่ 2 แต่มีการกระจายแรงได้ดีขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากจำนวนไบต์ที่มากกว่า

ทั้งนี้ค่าความเค้นในทุกแบบยังต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุที่ 30 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าไบต์ทั้ง 3 แบบ สามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยในระยะสั้น (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3

ข้อมูลแรงกระทำและความเค้นจากการจำลอง

รูปทรงไบต์	แรงกระทำ (N)	Von Mises Stress (σ_{vm}) [MPa]	Yield Strength (S_y) [MPa]
แบบที่ 1	384	6.4	30
แบบที่ 2	384	18.5	30
แบบที่ 3	384	17.8	30

5.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเชิงพลวัต (Dynamic Stress Analysis)

เมื่อนำค่าความเค้น Von Mises ที่ได้จากการจำลอง มาคำนวณเป็นค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress) และความเค้นแอมพลิจูด (Amplitude Stress) พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีค่าทั้งสองอยู่ที่ 3.20 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าไบตีแบบที่ 2 และ 3 ที่มีค่าเฉลี่ย 9.25 และ 8.90 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ไบตีแบบที่ 1 มีการถ่ายแรงสลับน้อยกว่า จึงส่งผลให้มีโอกาสเกิดความล้า่น้อยลง เมื่อเทียบกับไบตีที่มีจำนวนใบมากกว่า

ตารางที่ 4

ค่าความเค้นเฉลี่ยและความเค้นแอมพลิจูด

รูปทรงไบตี	Mean Stress (σ_m) [MPa]	Amplitude Stress (S_a) [MPa]
แบบที่ 1	3.20	3.20
แบบที่ 2	9.25	9.25
แบบที่ 3	8.90	8.90

5.3 ผลการประเมินความปลอดภัยต่อความล้า (Fatigue Safety Evaluation)

จากการประเมินความปลอดภัยของไบตีแต่ละแบบต่อความล้า โดยใช้เกณฑ์ Goodman, Soderberg และค่า Factor of Safety ทั่วไป (FoS General) พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีค่าความปลอดภัยสูงสุด ได้แก่ 12.87 (Goodman), 12.42 (Soderberg) และ 4.69 (General) ในขณะที่ไบตีแบบที่ 2 และ 3 มีค่าความปลอดภัยต่ำกว่าอย่างชัดเจน (ตารางที่ 5) ค่าความแตกต่างนี้เกิดจากรูปทรงที่มีผลต่อการกระจายความเค้น โดยไบตี

แบบที่ 2 และ 3 มีรูปทรงที่ก่อให้เกิดจุดความเค้นสูงบริเวณปลายใบตี และแรงที่กระทำไม่สม่ำเสมอ จึงแนะนำให้ปรับปรุงรูปทรง เช่น ลดมุมแหลม ใช้ปลายใบตีโค้งมน และเพิ่มความหนาเฉพาะจุดที่รับแรง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความล้า

ตารางที่ 5

Endurance Limit และ Factor of Safety (FoS)

รูปทรงไบตี	Endurance (σ_e) [MPa]	FoS Goodman	FoS Soderberg	FoS General
แบบที่ 1	200.71	12.87	12.42	4.69
แบบที่ 2	200.71	7.09	6.07	1.62
แบบที่ 3	200.71	7.37	6.38	1.62

5.4. ผลการประมาณอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้า (Fatigue Life Estimation)

การแปลงความเร็วรอบการทำงาน (RPM) เป็นจำนวนรอบต่อปี พบว่า ไบตีแบบที่ 1 มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในระยะยาว และเหมาะสมกับเครื่องจักรที่ทำงานต่อเนื่อง (ตารางที่ 6) อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ไบตีควรพิจารณาร่วมกับต้นทุนการผลิต โดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ในงานนี้ มีสมรรถนะดีแต่ต้นทุนค่อนข้างสูง จึงอาจพิจารณาวัสดุทดแทน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง หรือโลหะผสมอื่นที่มีความคุ้มค่ากว่า

ตารางที่ 6

รอบหมุนต่อปี และอายุการใช้งาน (Fatigue Life)

รูปทรง ใบดี	ความเร็วรอบ (RPM)	รอบต่อปี (รอบ/ปี)	อายุการใช้ งาน (N_f) รอบ
แบบที่ 1	2,121	305,424,000	2.80×10^{21}
แบบที่ 2	1,686	242,784,000	3.51×10^{15}
แบบที่ 3	1,686	242,784,000	5.10×10^{15}

ตารางที่ 7

การเสียรูปสูงสุดของใบดีแต่ละแบบ

รูปทรง ใบดี	จำนวน ใบดี	ตำแหน่งเสียรูป สูงสุด	ค่าการเสียรูป สูงสุด (เมตร)
แบบที่ 1	5 ใบดี	รอยเชื่อมฐานใบ ดีกับฟ่อ	6.68×10^{-5}
แบบที่ 2	13 ใบดี	ปลายใบดี ด้านหน้า	4.64×10^{-6}
แบบที่ 3	32 ใบดี	ปลายใบดีใกล้ แนวแรงกระทำ	5.57×10^{-5}

5.5. ผลการเสียรูปและผลกระทบเชิงกล (Deformation and Mechanical Impact)

การวิเคราะห์การเสียรูป (deformation) ของใบดีแต่ละแบบเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการทำงานและความทนทานของเครื่องจักร โดยจากผลการจำลองพบว่า ใบดีแบบที่ 1 มี 5 ใบดี แสดงค่าการเสียรูปสูงสุดที่บริเวณรอยเชื่อมฐานใบดีกับฟ่อ โดยมีค่าการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 6.68×10^{-5} เมตร ขณะที่ใบดีแบบที่ 2 มี 13 ใบดี แสดงค่าการเสียรูปต่ำที่สุดที่ปลายใบดีด้านหน้า โดยมีค่าเพียง 4.64×10^{-6} เมตร ส่วนใบดีแบบที่ 3 มี 32 ใบดี แสดงการเสียรูปสูงสุดที่ปลายใบดีใกล้แนวแรงกระทำ มีค่าเท่ากับ 5.57×10^{-5} เมตร (ตารางที่ 7)

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ใบดีแบบที่ 2 มีค่าการเสียรูปต่ำที่สุด อันเป็นผลมาจากการกระจายแรงที่ดีขึ้นจากจำนวนใบดีที่มากกว่า ขณะที่แบบที่ 1 และแบบที่ 3 มีการเสียรูปสูงกว่าซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการดีเส้นใยและทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของแรงกระทำ โดยเฉพาะในกรณีของแบบที่ 1 ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปอยู่ที่รอยเชื่อม อาจมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในระยะยาว

อย่างไรก็ตามการเสียรูปในทุกแบบยังอยู่ในช่วงเชิงยืดหยุ่นของวัสดุ จึงไม่เกิดการเสียหายถาวรในการใช้งานระยะสั้น

ค่าการเสียรูปเหล่านี้อาจมีผลสะสมในระยะยาวจนทำให้เกิดการล้าของวัสดุ (fatigue) หรือความคลาดเคลื่อนในระบบการทำงานของเครื่อง จึงควรมีการพิจารณาปรับรูปแบบของใบดีให้เหมาะสม เช่น การเสริมความแข็งแรงบริเวณจุดที่มีความเค้นสูง การปรับรูปทรงหรือความหนาของใบดี และการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

6. สรุปการทดลอง

จากการจำลองแรงกระทำและการกระจายความเค้นของใบดีทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบ 5 ใบดี, 13 ใบดี และ 32 ใบดี พบว่า ใบดีแบบที่ 1 ซึ่งมีจำนวน 5 ใบดี เป็นแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยให้ค่าความเค้น Von Mises ต่ำสุดที่ 6.4 MPa และค่าความปลอดภัยสูงสุด (FoS Goodman เท่ากับ 12.87, FoS Soderberg เท่ากับ 12.42, FoS ทั่วไป เท่ากับ 4.69) รวมถึงอายุการใช้งานจากความเมื่อยล้าสูงถึง 2.80×10^{21} รอบ โดยค่าการเสียรูปสูงสุดอยู่ที่ 6.68×10^{-5} เมตร ซึ่งยังอยู่

ในช่วงเชิงยึดหยุ่นของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ใบไม้แบบที่ 2 และ 3 มีค่าความเค้นสูงกว่าและค่าการเสียรูปต่ำกว่า แต่กระจายแรงได้ดีกว่า แต่มีค่าความปลอดภัยและอายุการใช้งานน้อยกว่า การเสียรูปที่ตรวจพบในแต่ละแบบชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการล้าและความผิดปกติในระยะยาว จึงควรมีการปรับปรุงรูปทรงใบไม้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดความเค้นสะสม นอกจากนี้ยังมีช่องว่างที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น ผลกระทบของการเสียรูปสะสมในระยะยาวต่อประสิทธิภาพการทำงานและความล้าของวัสดุ รวมถึงการทดสอบจริงในสภาพการใช้งานจริงเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าการเสียรูปที่จำลองได้ ทั้งนี้ ข้อมูลการเสียรูปที่ชัดเจนช่วยเติมเต็มการวิเคราะห์ความปลอดภัยและอายุการใช้งาน ทำให้ภาพรวมของผลวิจัยสมบูรณ์มากขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงใบไม้ในเชิงวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Patil SS, et al. Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostems as an alternative raw material for the textile industry. *Heliyon*. 2024;10(2):e12345.
- [2] European Commission. Final Report Summary - BADANA: Development of an automated process to extract fibres from the waste of banana food production for exploitation as a sustainable reinforcement in injection- and rotomoulded products [Internet]. Brussels: CORDIS; 2019 [cited 2025 May 2]. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/232287/reporting>
- [3] Kusić D, Božić U, Monzón M, Paz R, Bordón P. Thermal and mechanical characterization of banana fiber reinforced composites for its application in injection molding. *Materials*. 2020;13(16):3581. doi:10.3390/ma13163581
- [4] Influence of the extraction location on the physical and mechanical properties of banana pseudo-stem fibers. *J Nat Fibers*. 2023;20(3):123–35.
- [5] Design and simulation of banana pseudo-stem fibre extracting raspador using finite element analysis. *J Nat Fibers*. 2023;20(4):456–67.

- [6] Kim HJ, Cho J-R. Numerical analysis of fatigue life of wind turbine blades reinforced with graphene platelets. *Appl Sci*. 2025;15(4):1866.
- [7] Fatigue analysis of wind turbine composite blade using finite element method. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*. 2023;237(5):789–800.
- [8] Belytschko T, Liu WK, Moran B. *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Chichester: John Wiley & Sons; 2014.
- [9] COMSOL Inc. Analyze structural fatigue with the Fatigue Module [Internet]. Burlington, MA: COMSOL Inc.; [cited 2025 May 2]. Available from: <https://www.comsol.com/fatigue-module>
- [10] COMSOL Inc. *COMSOL Multiphysics® Reference Manual, Version 6.1*. Burlington, MA: COMSOL Inc; 2022.
- [11] Bathe KJ. *Finite element procedures*. 2nd ed. Watertown: Klaus-Jurgen Bathe; 2014.
- [12] Hibbeler RC. *Mechanics of materials*. 10th ed. Upper Saddle River: Pearson; 2017.
- [13] Shigley JE, Mischke CR, Budynas RG. *Mechanical engineering design*. 9th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
- [14] Juvinall RC, Marshek KM. *Fundamentals of machine component design*. 6th ed. Hoboken: Wiley; 2016.
- [15] Stephens RI, Fatemi A, Stephens RR, Fuchs HO. *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed. New York: Wiley; 2000.
- [16] Schijve J. *Fatigue of structures and materials*. 2nd ed. Dordrecht: Springer; 2009.
- [17] Suresh S. *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
- [18] Bannantine JA, Comer JJ, Handrock JL. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. New Jersey: Prentice Hall; 1990.
- [19] Budynas RG, Nisbett JK. *Shigley's mechanical engineering design*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
- [20] Dowling NE. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson; 2013.
- [21] Lee YL, Pan J, Hathaway RB, Barkey ME. *Fatigue testing and analysis: theory and practice*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2005.

- [22] Pavelko R, Smith J. Simulation of impact damage in a composite plate and its detection using COMSOL Multiphysics. *Int J Struct Integrity*. 2020;11(4):459–74. doi:10.1108/IJSI-12-2019-0150.
- [23] Garcia M, Lee T. An eXtended Finite Element Method implementation in COMSOL Multiphysics for solid mechanics. *Comput Mech*. 2022;68(3):905–20. doi:10.1007/s00466-021-02060-7.
- [24] Chen W, Zhang H. Mechanical properties and yield strength of carbon steel: experimental and numerical analysis. *Mater Sci Eng A*. 2019;763:138135. doi:10.1016/j.msea.2019.138135.
- [25] Kumar A, Singh R. Mesh independence study for finite element analysis of impact loading on steel plates. *J Appl Mech Eng*. 2021;10(3):202–10. doi:10.4236/jame.2021.103014.
- [26] 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):1–9.
- [27] COMSOL AB. COMSOL Multiphysics® Reference Manual, Fatigue Module. Burlington, MA: COMSOL AB; 2024.
- [28] Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zhu JZ. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013.
- [29] Roache PJ. *Verification and validation in computational science and engineering*. Albuquerque: Hermosa Publishers; 1998.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอัตโนมัติ ของหุ่นยนต์และเครื่องคัดแยกชิ้นงานนิวเมติกส์

Design of programmable logic controller for controlling automation system of robot and pneumatic sorter

ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม^{1)*}, ธนวัฒน์ ลับแล¹⁾, เพ็ญ รุน ชฮอร์¹⁾ และ ทศพร แจ่มใส¹⁾Piyawat Sritram^{1)*}, Thanawat Laplea¹⁾, Phea Run Chhorn¹⁾ and Tossaporn Chamsai¹⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Isan SURIN Campus.

Received: 9 May 2025

Revised: 2 June 2025

Accepted: 4 June 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมระบบนิวเมติกส์ในการคัดแยกชิ้นงานอัตโนมัติ โดยในเครื่องคัดแยกชิ้นงานนี้ได้ใช้ไฟเบอร์ออปติกเซนเซอร์ (Fiber Optic) ในการตรวจจับสีของวัสดุและอินดักทีฟพร็อกซิมิตีเซนเซอร์ (Inductive Proximity Sensors) ในการตรวจจับชิ้นงานที่เป็นโลหะ ซึ่งวัสดุมีสีที่ต่างกันสามสี ดังนี้คือ สีเงิน (อลูมิเนียม) สีเหลือง (ซูเปอร์ไลน์สีเหลือง) และสีดำ (ซูเปอร์ไลน์สีดำ) และรีดสวิตช์ (Reed Switch) ทำหน้าที่ในการตรวจจับตำแหน่งของกระบอกสูบ การทำงานของเซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณอินพุตไปยังพีแอลซี เพื่อทำการประมวลผลตามโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้ในเครื่อง แล้วส่งสัญญาณเอาต์พุตตามเงื่อนไขไปควบคุมควบคุมสัญญาณไฟฟ้าและวาล์วควบคุมทิศทางลมเพื่อทำการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์นิวเมติกส์ได้อย่างอัตโนมัติ ผลการทดสอบการใช้งานจะแสดงให้เห็นว่าเครื่องสามารถทำการแยกสีและเอาวัสดุไปจัดเก็บได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขที่กำหนด เครื่องจักรเริ่มทำงานที่ความดันลม 4.0 บาร์ ค่าเวลาที่ให้ทดสอบในการทำงานเฉลี่ยรวมต่อชิ้นคือ 25.20 วินาที และความดันลมสูงสุดที่ 7.0 บาร์ ค่าเวลาใน

การทำงานเฉลี่ยรวมต่อชิ้นคือ 18.19 วินาที สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีข้อผิดพลาด จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการสร้างหุ่นยนต์หรือระบบการให้อาหารสัตว์ในฟาร์มแบบอัตโนมัติ

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ นิวแมติกส์ หุ่นยนต์แขนกล

Abstract

This paper presents the application of Programmable Logic Controller to control pneumatic systems in automatic sorting. In this sorting machine, a fiber optic sensor detects the material color, and an inductive proximity sensor detects the metal target. Materials are available in three colors: silver (aluminum), yellow (light yellow superlene), and black (opaque black superlene), and the Reed Switch detects the position of the cylinder. The sensor operation sends an input signal to the PLC for processing according to the program set on the machine and then outputs conditional signals to control the control signal and the pneumatic directional valve to automatically control the operation of the pneumatic device. The results of functional testing will show that the machine can separate colors and store materials properly under specified conditions. The machine starts working at 4.0 bar air pressure, the average total working time per piece is 25.2 seconds, and the maximum air pressure is 7.0 bar, the average total working time per piece is 18.19 seconds, it can work 100 percent accurately without any errors. This research can be applied to create robots or automatic animal housing systems in farms.

Keywords: Automatic: Programmable Logic Controller: Pneumatic: Arm robotic

*ติดต่อ: Sritram_1111@hotmail.com, 099-174-1533

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automation system) เข้ามามีบทบาทอย่างมากในด้านอุตสาหกรรม เพื่ออำนวยความสะดวกและควบคุมการผลิต และยังช่วยลดความผิดพลาดในงานที่ต้องทำซ้ำๆ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุน สามารถควบคุมคุณภาพของการผลิตได้ดีขึ้นเหมือน David G. Alciatore and Michael B. Hstand ในปี 2012 [1] สามารถเพิ่มกำลังการผลิตและยังแก้ไขปัญหาต้นทุน

แรงงานที่เพิ่มสูงขึ้น ปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคอุตสาหกรรม สิ่งเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยระบบอัตโนมัติ ในปี พ.ศ. 2552 พงศธร และคณะ [2] ได้ทำการทดลองควบคุมชุดแขนกลนิวแมติกส์ใช้ถอดชิ้นงานสำหรับเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ หรือ PLC ต่อมาในปี พ.ศ. 2558 วิโรจน์ และคณะ [3] ได้ทำการทดลองควบคุมการทำงานของระบบจัดเก็บอุปกรณ์เข้าตู้เก็บของระบบอัตโนมัติ การควบคุมใช้ PLC และในปี พ.ศ. 2561 ไตรภพ และคณะ [4] ได้ทำการทดลองควบคุม

การเสียบไม้กับอาหารปิ้งย่างกึ่งอัตโนมัติ ใช้ระบบควบคุมด้วย PLC และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในปี พ.ศ. 2561 ปิยะวัฒน์ [5] ได้ทำการออกแบบและสร้างแขนกลจับชิ้นงานจากเครื่องตัดแยกวัสดุอัตโนมัติตามสายพานลำเลียงด้วยระบบนิวเมติกส์และควบคุมการทำงานด้วย PLC โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่องจักรกลที่มีการควบคุมในระบบอัตโนมัติ ที่มีต้นทุนการสร้างที่ต่ำและยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับผู้สนใจศึกษาระบบควบคุมเครื่องจักรอัตโนมัติด้วย PLC และในปี พ.ศ. 2563 อติศักดิ์ และคณะ [6] ได้ออกแบบเครื่องเทถึงน้ำนมดิบอัตโนมัติ โดยใช้การควบคุมการทำงานด้วย PLC เพื่อลดการใช้แรงงานคนและลดต้นทุนของกระบวนการแปรรูปน้ำนม จากวรรณกรรมข้างต้นพบว่า การควบคุมระบบนิวเมติกส์ในระบบอัตโนมัติของภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ PLC ในการควบคุม เพราะมีความคงทนสามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยมีผลกระทบน้อยจากระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่คงที่ได้มากกว่า Microcontroller ในส่วนการควบคุมระบบอัตโนมัติด้วย PLC สามารถออกแบบได้ง่าย ไม่ซับซ้อนมากและมีการทำงานที่เสถียร ดังนั้นโครงการนี้จึงมีเป้าหมายในการควบคุมระบบนิวเมติกส์ โดยการควบคุมแบบอัตโนมัติให้สามารถเคลื่อนย้ายและตัดแยกสีตามชนิดของชิ้นงานที่กำหนดด้วย PLC ในการออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานขึ้นมาใหม่ เพื่อให้ควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อนของระบบนิวเมติกส์ในระบบอัตโนมัติ แทนระบบเดิมที่ใช้การควบคุมด้วยวงจรไฟฟ้าและวงจรรีเลย์ โดยการควบคุมด้วย PLC นี้สามารถนำมาทดแทนและยังปรับแก้ไขและขยายการ

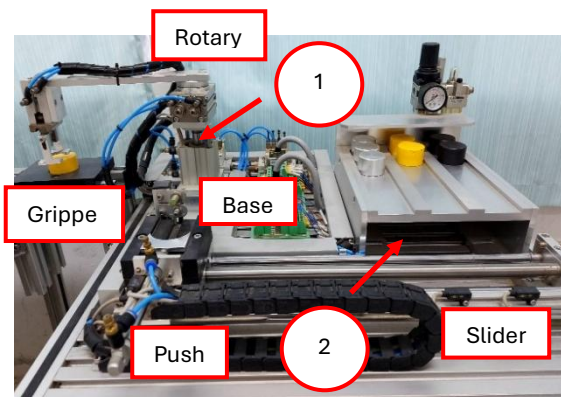
ควบคุมได้สะดวกและง่ายกว่าด้วยการออกแบบโปรแกรมการควบคุมใหม่ โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนการต่อสายไฟฟ้าและเพิ่มอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมใหม่เข้าไปในระบบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์แขนกลระบบคาร์ทีเซียน ให้จับชิ้นงานเพื่อให้เครื่องแยกชิ้นงานแบบวงเลื่อน โดยสามารถตัดแยกชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งใช้ PLC เป็นตัวควบคุมระบบการทำงานของเครื่องจักร

2. วิธีการวิจัย

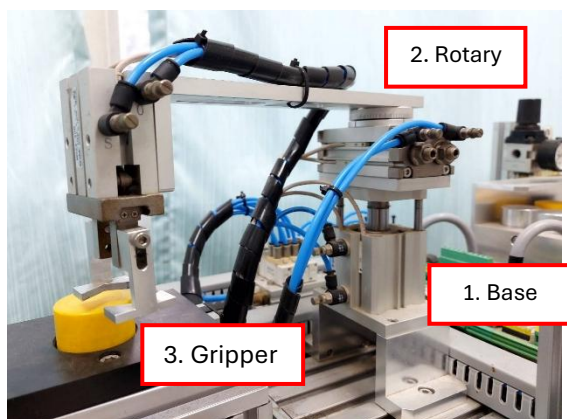
ในการวิจัยจะประยุกต์ใช้ PLC เพื่อควบคุมกระบวนการป้อนและการตัดแยกชิ้นงานแบบอัตโนมัติ โดยควบคุมให้เครื่องจักรสามารถตัดแยกชิ้นงานตามสี และประเภทของวัตถุ ซึ่งจะมุ่งเน้นการใช้ PLC เป็นตัวควบคุมระบบเป็นหลัก มีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาส่วนประกอบของเครื่องจักร
2. ศึกษาการควบคุม PLC ด้วยภาษาแลดเดอร์ หรือ Ladder Diagram
3. วิเคราะห์หลักการทำงานของระบบการป้อนและตัดแยกชิ้นงาน
4. ออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานใน PLC เพื่อควบคุมระบบการทำงานของเครื่องจักร
5. ทดสอบโปรแกรมระบบควบคุมที่ออกแบบ โดยควบคุมการทำงานของเครื่องจักรให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 1 เครื่องคัดแยกชิ้นงานและหุ่นยนต์แขนกล
คาร์ทีเซียนระบบนิวเมติกส์

ชิ้นงานในการทดลองการทำงานของเครื่องจักร
จากการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน ออกแบบ
ให้ใช้วัสดุในการทดลอง 3 ประเภท คือ โลหะสีเงิน
(อลูมิเนียม), อะโลหะสะท้อนแสงสีเหลือง (ซูเปอร์
ลีนสีเหลือง) และ อะโลหะทึบแสงสีดำ (ซูเปอร์ลินสี
ดำ) โดยตัวอย่างทั้ง 3 มีลักษณะที่คล้ายกันคือ เป็นรูป
ทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มม. สูง 25
มม. (รูปที่ 1)



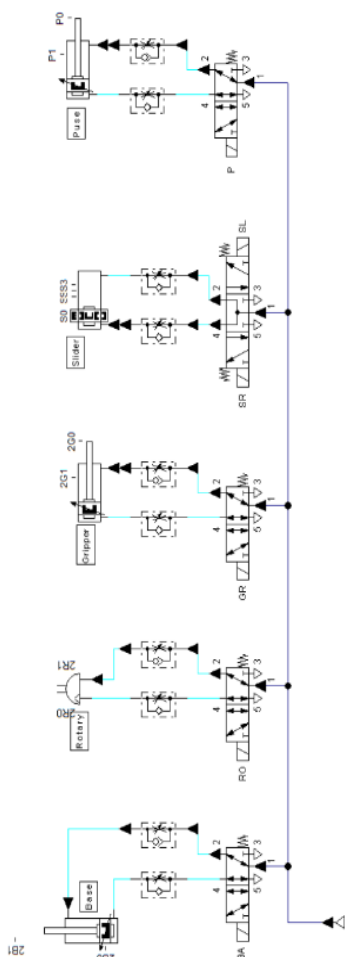
รูปที่ 2 หุ่นยนต์แขนกลระบบนิวเมติกส์

โครงสร้างหลักและส่วนประกอบของเครื่องจักร
(รูปที่ 1) เลข 1 คือ หุ่นยนต์แขนกล จะเปรียบเสมือน
แขนของมนุษย์ที่คอยหยิบจับชิ้นงานจากจุดวาง ไป
วางด้านบนเครื่องคัดแยก โดยแขนกลในโครงการนี้
เป็นแขนกลระบบคาร์ทีเซียนที่มีอุปกรณ์นิวเมติกส์
จำนวน 3 ตัว ประกอบเข้าด้วยกัน ดังนี้คือ ตัวที่ 1
กระบอกสูบทำหน้าที่เป็นฐาน (Base) ในการเคลื่อนที่
ขึ้น-ลงแขนจับชิ้นงาน ตัวที่ 2 กระบอกสูบลมแบบ
โรตารี (Rotary) ทำหน้าที่คอยหมุนแขนไปยังตำแหน่ง
ของชิ้นงาน ตัวที่ 3 กระบอกสูบลมแบบกริปเปอร์
(Gripper) ซึ่งอุปกรณ์นี้เปรียบเสมือนมือของมนุษย์ที่
คอยหยิบจับชิ้นงาน (รูปที่ 2) โดยอุปกรณ์ทั้งสามตัวเมื่อ
นำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นแขนกล ส่วนหมายเลข
2 คือ เครื่องคัดแยกชิ้นงาน มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ
ส่วนแรก มีลักษณะออกแบบเป็นรางเลื่อน (Slider) จะ
ใช้กระบอกสูบแบบไม่มีก้านสูบ (Rod less cylinder)
เป็นตัวเลื่อน ส่วนนี้จะรับชิ้นงานจากแขนกล โดยจะ
นำมาวางด้านบนและมีเซ็นเซอร์ตรวจจับเพื่อแยก
ประเภทของวัสดุ ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนดันชิ้นงาน
(Push) เป็นกระบอกสูบที่ใช้ดันชิ้นงานแต่ละชนิด
เข้าไปในช่องที่ออกแบบไว้แยกตามประเภทของวัสดุ
ทั้ง 3 ชนิด เมื่อส่วนรางเลื่อนเคลื่อนที่มาหยุดที่ช่อง
เก็บวัสดุของแต่ละชนิด

ระบบควบคุม PLC จะนิยมใช้ภาษาแลดเดอร์ใน
การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานเครื่องจักรกล
ในระบบนิวเมติกส์คล้ายกับปีศาจและคณะ ในปี
2564 [7] โดยใช้เครื่อง PLC เป็นตัวควบคุมและใช้
คำสั่งที่ออกแบบไปควบคุมโซลินอยด์ของวาล์ว
ควบคุมทิศทางการทำงานในระบบนิวเมติกส์ ใน

โครงการนี้เลือกใช้ PLC ของบริษัท OMRON โดยสามารถใช้รุ่นที่มีค่า I/O ตั้งแต่ 40 points ขึ้นไป และเขียนโปรแกรมการทำงานด้วยภาษาแลดเดอร์ที่รับสัญญาณ I/O เป็นแบบ Digital

การออกแบบการทำงานของระบบ (รูปที่ 3) เครื่องตัดแยกชิ้นงานจะทำงานได้ ต้องได้รับคำสั่งจากโปรแกรมที่เขียนลงในตัว PLC เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่อง



รูปที่ 3 วงจรระบบนิวเมติกส์ของเครื่องตัดแยกชิ้นงานและหุ่นยนต์แขนกล

ในการเขียนโปรแกรมจะออกแบบให้เริ่มจากการกดปุ่ม start จะทำให้หุ่นยนต์แขนกลจับชิ้นงานและทำการเคลื่อนย้ายชิ้นงานไปยังจุดรองรับชิ้นงานของเครื่องแยกชิ้นงานแบบรางเลื่อน ซึ่งจะมีเซ็นเซอร์ตรวจจับแบบ Proximity sensor และ diffused sensor เพื่อทำการตรวจประเภทชิ้นงาน จากนั้นรางเลื่อนจะนำชิ้นงานและทำการคัดแยกเอาชิ้นงานแต่ละประเภทไปไว้ตามที่ตำแหน่งที่ได้กำหนดที่มีอยู่ 3 ช่อง คือ ช่องที่ 1 ไว้เก็บชิ้นงานอะไหล่ทึบแสง (สีดำ) ส่วนช่องที่ 2 ไว้เก็บชิ้นงานชิ้นงานอะไหล่สะท้อนแสง (สีเหลือง) และช่องที่ 3 ไว้เก็บชิ้นงานโลหะอลูมิเนียม (สีเงิน) เมื่อกระบวนการเสร็จแล้ว เครื่องคัดแยกชิ้นงานจะกลับไปตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นจะเริ่มทำงานใหม่เมื่อแขนกลป้อนชิ้นงานเข้ามาตรงจุดรองรับชิ้นงานและเริ่มกระบวนการคัดแยก จนเมื่อกดปุ่ม stop จะหยุดการทำงานทั้งหมด ซึ่งหลักการในออกแบบโปรแกรมการทำงานของเครื่องจักร สามารถเขียนไดอะแกรมการทำงานพีแอลซี หรือ PLC program flow chart เหมือนกับงานวิจัยของ Ranjeeta S. and H.K V. ในปี 2018 [8] (รูปที่ 4)

สมการในการทดลอง [9] โดยที่ใช้หาค่าแรงที่ได้จากระบบนิวเมติกส์ คือ

$$F = P \times A \quad (1)$$

โดยที่

F คือ แรงที่กระทำที่ปลายก้านสูบ

P คือ ความดันลม

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับความดัน

จากความสัมพันธ์ของสมการจะเห็นว่าเมื่อต้องการแรงกระทำที่ได้จะแปรผันตามค่าของความดันและพื้นที่หน้าตัดรับความดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่จากขนาดของกระบอกสูบที่ติดตั้งในระบบ ดังนั้นแรงกระทำที่ได้จึงแปรผันตามค่าความดันลมที่เปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

สมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความดันในระบบของไหลหาได้จากสมการของเบอร์นูลลี คือ

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (2)$$

โดยที่

P_1 และ P_2 คือ แรงดันที่จุดสองจุดในระบบของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

v_1 และ v_2 คือ ความเร็วของของไหลที่จุดสองจุด

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

h_1 และ h_2 คือ ความสูงของของไหล ณ จุดทั้งสอง

สมการที่ใช้หาอัตราการไหล (Q) ได้โดยใช้สมการ

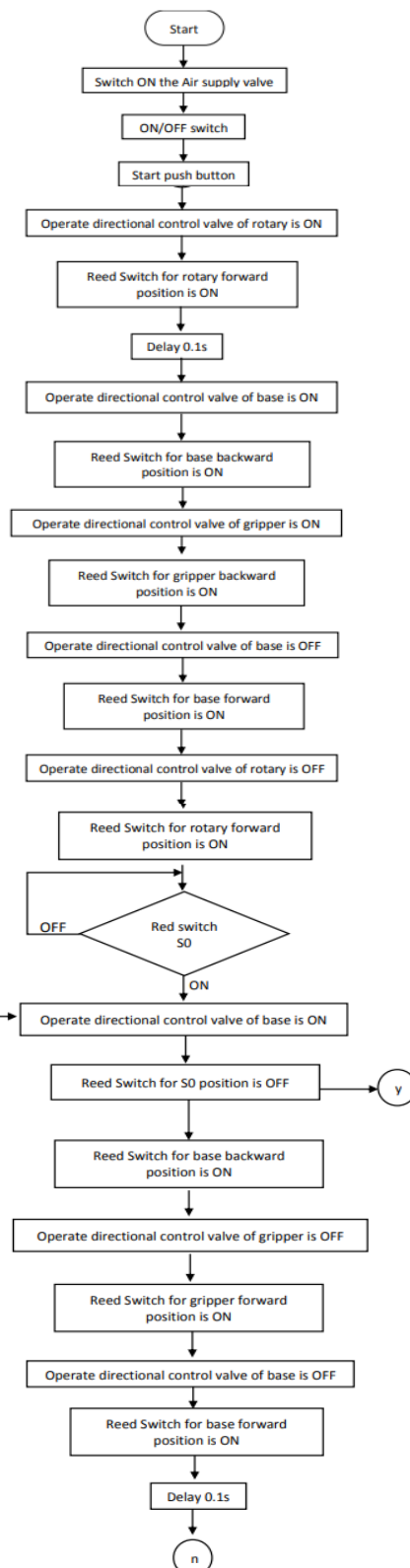
$$Q = A \times v \quad (3)$$

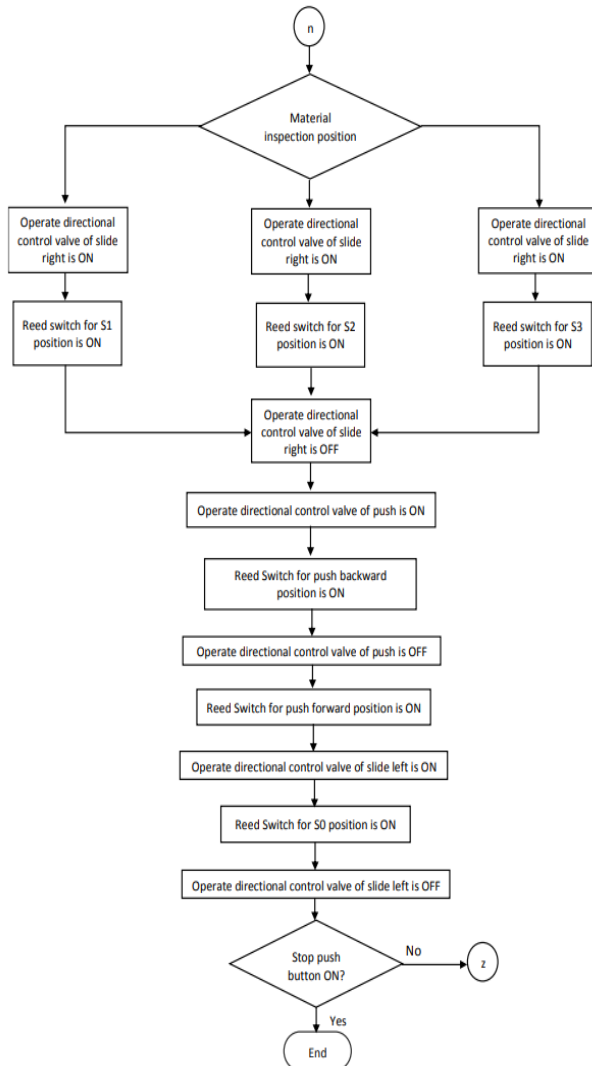
โดยที่

Q คือ อัตราการไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

v คือ ความเร็วของของไหล



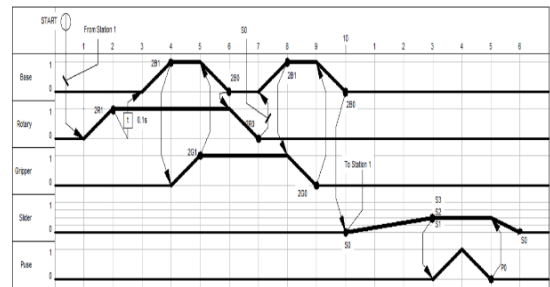


รูปที่ 4 การออกแบบ flow chart ระบบการทำงาน

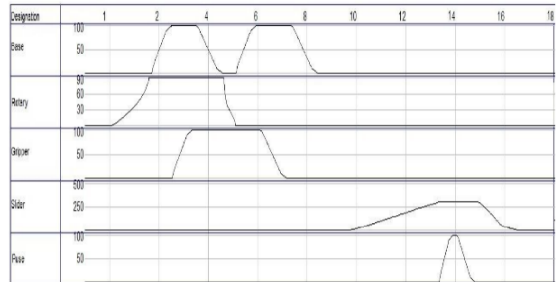
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการการแสดงผลการทำงานของเครื่องจักร โดยแสดงแผนภาพการทำงานแบบ Timing diagram จากการเขียนโปรแกรมการควบคุมที่ออกแบบควบคุมระบบ เพื่อที่จะบอกถึงขั้นตอนการทำงาน รวมถึงระยะเวลาการทำงานของแต่ละอุปกรณ์

จากรูปที่ 6 เป็นไดอะแกรมการทำงานจริงที่ได้จากการออกแบบเขียนโปรแกรมการควบคุมเครื่องจักร โดยใช้โปรแกรม Fluid SIM แสดงผลการทำงานจาก Timing diagram ในการทำงานจริงของเครื่องจักรซึ่งมีความคล้ายคลึงกับรูปที่ 5 ที่ได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบตามไดอะแกรมการทำงานไว้



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการทำงานที่ออกแบบ



รูปที่ 6 ไดอะแกรมการทำงานจริง

รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานของเครื่องคัดแยกชิ้นงานสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้ เมื่อนำชิ้นงานมาวางในตำแหน่งหุ่นยนต์แขนกลจะมาหยิบชิ้นงานไปให้เครื่องคัดแยกชิ้นงาน โดยมีลักษณะการทำงานของส่วนประกอบแต่ละอุปกรณ์ คือ กระบอกสูบ rotary จะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2R0 ไปยังตำแหน่ง 2R1

และจะถูกส่งให้รอ 0.1 วินาที เพื่อที่กระบอกลูกสูบ base จะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2B0 ไปยังตำแหน่ง 2B1 ซึ่งเป็นการเลื่อนลงมาหาชิ้นงาน หลังจากนั้นกระบอกลูกสูบ gripper จะเคลื่อนที่จากจุด 2G0 ไปยัง 2G1 เพื่อทำการจับชิ้นงาน แล้วกระบอกลูกสูบ base จะเคลื่อนที่ขึ้นมายังตำแหน่งเดิม สังเกตจากจุด 2B1 จะเคลื่อนที่ไปยัง 2B0 ดั้งเดิม จากนั้นกระบอกลูกสูบ rotary จะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2R1 ไปยัง 2R0 ในจุดนี้ก่อนที่กระบอกลูกสูบ base จะเริ่มทำงานต่อ ระบบจะทำการตรวจสอบว่า เซ็นเซอร์ S0 หรือก็คือกระบอกลูกสูบ slider อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่กระบอกลูกสูบ base จะไม่ทำงาน แต่ถ้า slider อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด กระบอกลูกสูบ base จะเคลื่อนที่จาก 2B0 ไปยัง 2B1 เพื่อวางชิ้นงาน จากนั้นกระบอกลูกสูบ gripper จะเคลื่อนที่จาก 2G1 ไปยัง 2G0 เป็นการปล่อยชิ้นงานลงบนแท่นรองรับของกระบอกลูกสูบแบบ slider จากนั้นเซ็นเซอร์จะตรวจจับชิ้นงานและทำการเคลื่อนย้ายเพื่อส่งขึ้นไปจัดเก็บ โดยที่ S1 คือ สีดำ S2 คือ สีเหลือง และ S3 คือ สีเงิน เมื่อเคลื่อนมาถึงตำแหน่งที่ต้องการแล้ว กระบอกลูกสูบ push จะเคลื่อนที่จาก P0 ไปยัง P1 เพื่อดันชิ้นงานออกจากแท่นไปยังที่เก็บและจะเคลื่อนที่จาก P1 ไปยัง P0 เพื่อกลับมายังตำแหน่งเดิม

ผลการทดลองในตารางที่ 1 ชิ้นงานอะลูมิเนียมชุบเปอร์ลิโนสีเหลือง และชุบเปอร์ลิโนสีดำ ที่ความดันที่ 0.5 ถึง 3.5 บาร์ การทำงานผิดพลาดทั้งหมดเครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากความดันลมในระบบนั้นน้อยเกินไป ชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ความดันลม 4.0 บาร์ ผลการทดลองพบว่าเครื่องจักรจะกลับมาทำงานได้ เนื่องจากความดันลมมีค่าเหมาะสม

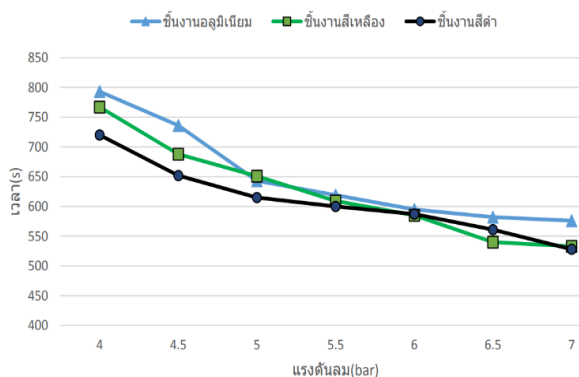
และไม่มีชิ้นงานที่ทำงานผิดพลาด แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 4.0 บาร์ คือ ความดันลมต่ำสุดที่เครื่องจักรเริ่มทำงานได้และไม่ผิดพลาด จากนั้นทำการปรับแรงดันลมเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 บาร์ โดยพบว่าระยะเวลาในการทำงานจะลดลงเรื่อยๆ ตามค่าความดันลมที่เพิ่มขึ้น 4.5 บาร์ เวลาอยู่ที่ 736 วินาที ที่ 5.0 บาร์ ได้เวลา 643 วินาที และที่ 5.5 บาร์ ได้เวลา 619 วินาที จนมาถึงความดันลมสูงสุดที่กำหนดในการทดลอง คือ 7.0 บาร์ มีระยะเวลาในการทำงานอยู่ที่ 576 วินาที ผลการทดลองชิ้นงานชุบเปอร์ลิโนสีเหลือง ที่ความดัน 4.0 บาร์ มีระยะเวลาในการทำงาน ที่ 767 วินาที ที่ 4.5 บาร์ ใช้เวลา 688 วินาที ที่ 5.0 บาร์ ใช้เวลา 651 วินาที และที่ 5.5 บาร์ ใช้เวลา 609 วินาที จนถึงความดันลมสูงสุดในการทดลองที่ 7.0 บาร์ ใช้เวลา 533 วินาที และผลการทดลองชุบเปอร์ลิโนสีดำ ความดันลม 4.0 บาร์ ใช้เวลา 720 วินาที ที่ 4.5 บาร์ ใช้เวลา 652 วินาที ที่ 5.0 บาร์ อยู่ที่ 615 วินาที และที่ 5.5 บาร์ เวลา คือ 600 วินาที จนถึง 7.0 บาร์ ใช้เวลาที่ 528 วินาที โดยไม่มีชิ้นงานที่ทำงานผิดพลาด จะเห็นว่าความดันลมที่เพิ่มขึ้นจะแปรผกผันกับเวลาการทำงานที่ทำได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบความดันลมเริ่มต้นการทำงานที่ 4.0 บาร์ ค่าเวลาที่ใช้เฉลี่ยรวมต่อชิ้น คือ 25.20 วินาที และความดันลมในการทำงานสูงสุดที่ 7.0 บาร์ เวลาที่ใช้เฉลี่ยรวมต่อชิ้น คือ 18.19 วินาที ซึ่งทำงานได้เร็วกว่าเฉลี่ยรวมต่อชิ้น คือ 7.01 วินาที หรือเร็วกว่า 27.82% แต่ใช้ความดันในการทำงานมากกว่า 3 บาร์ หรือ ใช้ความดันมากกว่า 42.86% โดยไม่มีชิ้นงานที่ทำงานผิดพลาดหรือทำงานถูกต้อง 100% ตั้งแต่ความดันเริ่มต้นทำงานที่ 4.0 บาร์

ตารางที่ 1

ผลการคัดแยกชิ้นงานของเครื่องจักร

ประเภท ชิ้นงาน	แรงดัน ลม (บาร์)	จำนวน ชิ้นงาน (อัน)	ผิด ผลาด (อัน)	เวลา ทำงาน (วินาที)	เวลา เฉลี่ย (วินาที)
อลูมิเนียม	0.5	30	30	0	0
	1.0	30	30	0	0
	1.5	30	30	0	0
	2.0	30	30	0	0
	2.5	30	30	0	0
	3.0	30	30	0	0
	3.5	30	30	0	0
	4.0	30	0	793	26
	4.5	30	0	736	24
	5.0	30	0	643	21
	5.5	30	0	619	20.6
	6.0	30	0	595	19.8
	6.5	30	0	582	19.4
ซูเปอร์ ลีน สีเหลือง	7.0	30	0	576	19.2
	0.5	30	30	0	0
	1.0	30	30	0	0
	1.5	30	30	0	0
	2.0	30	30	0	0
	2.5	30	30	0	0
	3.0	30	30	0	0
	3.5	30	30	0	0
	4.0	30	0	767	25.60
	4.5	30	0	688	23.00
	5.0	30	0	651	22.00
	5.5	30	0	609	20.30
	6.0	30	0	585	19.50
ซูเปอร์ ลีน สีดำ	6.5	30	0	540	18.00
	7.0	30	0	533	17.77
	0.5	30	30	0	0
	1.0	30	30	0	0
	1.5	30	30	0	0
	2.0	30	30	0	0
	2.5	30	30	0	0
	3.0	30	30	0	0
	3.5	30	30	0	0
	4.0	30	0	720	24.00
	4.5	30	0	652	21.70
	5.0	30	0	615	20.50
	5.5	30	0	600	20.00
	6.0	30	0	587	19.50
	6.5	30	0	561	18.70
	7.0	30	0	528	17.60

จากรูปที่ 7 เส้นกราฟแต่ละเส้น คือ ระยะเวลาในการทำงานของแต่ละชิ้นงาน พบว่าที่ความดันเริ่มต้นการทำงานของเครื่องจักรอยู่ที่ 4.0 บาร์ โดยชิ้นงานแต่ละประเภทมีระยะเวลาในการทำงานแตกต่างกัน เนื่องจากระยะห่างระหว่างช่องเก็บชิ้นงานที่ใกล้-ไกล นั้นไม่เท่ากัน ค่าเริ่มต้นเวลาต่ำสุด คือ ชิ้นงานสีดำที่มีตำแหน่งช่องเก็บอยู่ใกล้สุด ตามมาด้วยชิ้นงานสีเหลือง และ ใกล้สุดคืออลูมิเนียม



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลมกับเวลาในการทำงาน

จากสมการที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความดัน และการไหล อธิบายได้โดยหลักการของเบอร์นูลลีและสมการความต่อเนื่องตามหลักการของเบอร์นูลลี เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลดลง ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านจะเพิ่มขึ้น และความดันจะลดลง ในทางกลับกันเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น ความเร็วจะลดลงและความดันจะเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในระบบจะเห็นว่า อัตราการไหลและความดันในระบบของไหลมีความสัมพันธ์กันโดยตรง และหากความดันเพิ่มขึ้น อัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อตัวแปรอื่นๆ ทั้งหมด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและความหนืดของของไหลมีค่าคงที่ โดยสิ่งนี้อธิบายไว้ในหลักการของเบอร์นูลลี ซึ่งระบุว่า การเพิ่มขึ้นของความดันของไหลส่งผลให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นดังสมการที่ 3 มีผลให้เวลาในการทำงานลดลง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7

4. สรุป

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ค่าความดันลมที่ 0.5 ถึง 3.5 บาร์ เครื่องจักรทำงานผิดพลาด เนื่องจาก ค่าความดันลมไม่เพียงพอที่จะขับเคลื่อนอุปกรณ์ นิวเมติกส์ที่เป็นอุปกรณ์หลักของเครื่องจักร และพบว่า ที่ความดันลม 4.0 บาร์ เครื่องจักรสามารถกลับมาทำงานได้ โดยไม่มีชิ้นงานที่ผิดพลาดเลย แสดงให้เห็นว่าที่ความดันลม 4.0 บาร์ นี้คือ ช่วงความดันต่ำสุดที่สามารถเริ่มทำงานได้ และเมื่อเพิ่มความดันลมขึ้นไปช่วงระยะเวลาของกระบวนการทำงานจะใช้เวลาอันน้อยลง ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ความดันลมสูงสุดได้ที่ 7.0 บาร์ หากเพิ่มความดันลมให้มากขึ้น จะทำให้เวลาการทำงานลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มมากเกินไป กระบวนการคัดแยกชิ้นงานอาจจะเริ่มทำงานผิดพลาดได้ เนื่องจากค่าความดันลมมากเกินไปจนทำให้อุปกรณ์ขับเคลื่อนทำงานรวดเร็วมากเกินไปจนเซ็นเซอร์ไม่สามารถตรวจจับชิ้นงาน

และตอบสนองได้ทัน ส่งผลให้ขั้นตอนการทำงานอาจเกิดข้อผิดพลาดได้

เครื่องจักรสามารถทำงานได้ที่ความดันในการทำงานของระบบได้ถูกต้องที่ 100% โดยมีความดันเริ่มต้นการทำงานที่ 4.0 บาร์ และความดัน 7.0 บาร์ วัสดุที่ใช้ทดลองทุกชนิดจะทำงานได้เร็วที่สุด เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของความดันลมที่จะนำไปใช้จะอยู่ประมาณ 4.5 ถึง 5.5 บาร์ เนื่องจากระยะเวลาในการทำงานใกล้เคียงกันมาก โดยการใช้ค่าความดันลมสูงสุดนั้นเมื่อคำนึงถึงการใช้งานระยะเวลานาน จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและมีผลต่อการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์

ข้อเสนอแนะ เครื่องจักรนี้สามารถอัพเกรดเพิ่มระบบให้ทันสมัยยิ่งขึ้นได้ โดยอาจเปลี่ยนเซ็นเซอร์ให้เป็นกล้องดิจิตอลเพื่อให้สามารถตรวจจับวัสดุได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น และเพิ่มการใช้ระบบให้เป็น supervisory level ที่สามารถแสดงผลบนจอภาพแบบสัมผัสเพื่อควบคุมการทำงานได้ง่ายขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย Advanced Control System & Robotics and Automation System ของ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงาน โครงการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] David GA, Michael BH. Introduction to mechatronics and measurement systems. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill; 2012.
- [2] Athit C, Thotsaporn T, Phongsathon T. Releasing moulding injection using robot [thesis]. Bangkok: Sri Pathum University; 2010. Thai.
- [3] Wirote B, Kampon P. Automatic storage cabinet using a pneumatic system. In: Proceedings of the 7th NPRU National Academic Conference; 2015 Mar 30–31; Nakhon Pathom, Thailand. Nakhon Pathom: Nakhon Pathom Rajabhat University; 2015. p. 1192–1201.
- [4] Tripop S, Wiswa S, Boonthong S. Positioning control system for semi-automatic barbeque skewer machine. In: Proceedings of the 7th National Conference on Technology and Innovation Management (NCTIM 2018); 2018 Mar 5–6; Maha Sarakham, Thailand. Maha Sarakham: Rajabhat Maha Sarakham University; 2018. p. 452–8.
- [5] Piyawat S. Robot arm picked up the material from the automatic sorting machine with conveyor belt. FEAT J. 2018;4(1):19–27. Thai.
- [6] Adisak B, Tawatcha S, Kaweepong H. Development of the automatic pouring raw milk storage tank machine. FEAT J. 2020;6(1):21–8. Thai.
- [7] Piyawat S, Nattapong B, Weerachi B, Sanong D. Automatic material separator in conveyor by PLC controlled system. FEAT J. 2021;7(1):49–52. Thai.
- [8] Ranjeeta S, HK V. Development of PLC-based controller for pneumatic pressing machine in engine-bearing manufacturing plant. Procedia Comput Sci. 2018;125:449–58.
- [9] Yunus AC, John MC. Fluid mechanics: fundamentals and applications. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2010.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียน 5 สายพันธุ์

Study on the Thermal Properties of Charcoal Briquettes from Durian Peel 5 Species

บุญฤทธิ์ บัวระบัด^{1)*} ไกรสร รวยป้อม¹⁾ อัคมพงศ์ สถาวรินทุ¹⁾ และ สุรพงษ์ โชทอง¹⁾Boonyarid Buarabut^{1)*} Krisorn Ruaypom¹⁾ Akkapong Sathavarinthu¹⁾ and Surapong Sothong¹⁾¹⁾สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตรสาขา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก¹⁾Department of Mechanical Technology Faculty of Agro-Industrial Technology

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

Received: 22 May 2025

Revised: 11 June 2025

Accepted: 12 June 2025

Available online: 21 June 2025

บทคัดย่อ

จากการศึกษาคุณสมบัติถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียน 5 สายพันธุ์ ด้วยเครื่องอัดแท่งชีวมวลแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่ความเร็วรอบ 290 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบในการอัดแท่งที่ดีที่สุด โดยมีค่าความสามารถในการอัดแท่ง 84.7 kg h⁻¹ หรือประมาณ 692 kg day⁻¹ มีประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรโดยรวม (OEE) 97.38% ลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่านมีขนาดความกว้าง 5 cm ยาว 10 cm รูกลองด้านใน 1 cm มีค่าความร้อนระหว่าง 5,117-5,656 cal g⁻¹ โดยเปลือกทุเรียนสายพันธุ์นี้ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 5,656 cal g⁻¹ สำหรับ Moisture content, Volatile matter, Ash content, และ Fixed carbon เป็นไปตามมาตรฐาน มผช.238/2547 และทำการทดสอบต้มน้ำสามารถทำให้น้ำปริมาตร 1,000 ml มีอุณหภูมิสูงสุด 91 °C ในช่วงระยะเวลา 26-34 minutes มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรอยู่ที่ 105.14 days และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 210.60 h year⁻¹

คำสำคัญ: คุณสมบัติทางความร้อน ถ่านอัดแท่ง ลักษณะทางกายภาพ เปลือกทุเรียน

Abstract

This research aims to study of the properties of charcoal briquettes from durian shells. 5 varieties with semi-automatic biomass briquettes at 290 rpm, which is the best briquetting speed. The briquetting capacity is 84.7 kg h^{-1} or about 692 kg day^{-1} . The physical characteristics of the charcoal rod are 5 cm wide, 10 cm long, 1 cm hollow hole, with a calorific value between $5,117\text{--}5,656 \text{ cal g}^{-1}$ by the Chanee durian shell varieties, which provides a maximum calorific value of $5,656 \text{ cal g}^{-1}$ for Moisture content, Volatile matter, Ash content, and Fixed carbon. In accordance with the MPA 238/2004 standard. And the boiling test can make a volume of 1,000 ml of water with a maximum temperature of 91 degrees Celsius. During the period of 26-34 minutes, the payback period of the machine is 105.14 days and the breakeven point is $210.60 \text{ h year}^{-1}$

Keywords: Thermal properties: Charcoal briquettes: Physical characteristics of durian peel

*ติดต่อ: Boonyarid_bu@rmutto.ac.th, 087-148-3234

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานในภาคการผลิต หรือ แม้แต่ความต้องการการใช้พลังงานในครัวเรือน สำหรับการดำรงชีวิตของประชาชนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น โดยการคาดการณ์ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่คาดการณ์ความต้องการพลังงาน เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.4 [1] เช่นเดียวกันกับหลายประเทศ ที่มีความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2] ซึ่งสวนทางกับปริมาณพลังงานที่สามารถผลิตได้ใน ปัจจุบัน ทำให้แนวโน้มและทิศทางของพลังงานกำลัง จะเข้าสู่วิกฤต โดยปัจจุบันหลายหน่วยงานรวมถึง ประชาชนได้มีการตระหนักถึงความสำคัญของ พลังงาน ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ซึ่ง พลังงานที่ใช้ในภาคครัวเรือนของประชาชนส่วนมาก เป็นพลังงานด้านความร้อนที่ใช้ในการดำรงชีพ ประกอบอาหารและมีแนวโน้มการใช้เพิ่มมากขึ้น และ ทิศทางของราคาก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุผล

นี้ทำให้เกิดผู้ประกอบการด้านพลังงานเพิ่มขึ้น มากมาย เช่นผู้ประกอบการผลิตถ่าน ซึ่งในปัจจุบัน เป็นที่ต้องการในการใช้อย่างมาก โดยกระบวนการใน การผลิต ณ ปัจจุบันมีการนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งทาง การเกษตรหลายชนิดมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงใช้ ในชีวิตประจำวัน และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นจำนวน มาก ซึ่งเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตที่เป็น ปัญหาในช่วงเดือน มีนาคม ถึง มิถุนายน คือ ปริมาณ เปลือกทุเรียนจากกระบวนการแปรรูปที่มีปริมาณ มาก โดยประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกทุเรียนทั้งสิ้น $1,551,473$ ไร่ ให้ผลผลิตราว $1,475,978$ ตัน [3] ซึ่งเป็นปริมาณที่มีจำนวนมาก และเป็นปัญหาที่ ผู้ประกอบการต้องแบกรับภาระในการจัดการกับเศษ เปลือกทุเรียนในกระบวนการผลิตในหลายพื้นที่

ในการนี้ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเอาเปลือก ทุเรียนเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป มาบริหาร จัดการอย่างถูกต้อง และ ยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับ

เกษตรกรหรือผู้ประกอบการอีกทางหนึ่ง โดยการนำมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งใช้ในครัวเรือนเพื่อลดต้นทุนในการครองชีพและเป็นอาชีพเสริมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต ต้นทุนทางด้านเวลา ด้านแรงงาน ในการวิจัยมีการนำกระบวนการไบโอรีไฟน์ริ มาเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อเปลี่ยนเปลือกทุเรียนให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูงขึ้น [4] จากการศึกษาพบว่า เปลือกทุเรียนสามารถให้ค่าความร้อน $6,274.29 \text{ kcal kg}^{-1}$ ซึ่งมีค่าความร้อนใกล้เคียง [5] กับที่ได้ใช้แป้งสาคูผสมเปลือกทุเรียนค่าความร้อนที่ได้ $5,189.128 \text{ cal g}^{-1}$ [6] และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ทำการทดสอบโดยใช้เปลือกทุเรียนที่มีเซลลูโลสสูงถึง 64.51% ผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำมันดินโดยให้ค่าความร้อน $9,694.53 \text{ cal g}^{-1}$ [7] และในการวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในการจัดการกับเศษเปลือกทุเรียน ให้มีประโยชน์ต่อเกษตรกรหรือผู้ประกอบการมากที่สุด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนจำนวน 5 สายพันธุ์ ว่ามีค่าความร้อนแตกต่างกันหรือไม่ และเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน

2. วิธีการวิจัย

2.1. เตรียมเครื่องจักรสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่ง

ด้วยเครื่องจักรจำนวน 5 ชุด ประกอบด้วย

- 1) ชุดเตาเผาเป็นแบบเตาเดียว ปริมาตรความจุของเตา 0.2 m^3
- 2) ชุดลดขนาด เป็นการลดขนาดวัตถุดิบโดยอาศัยหลักการแบบ Hammer mill และมีตะแกรงกรองขนาด

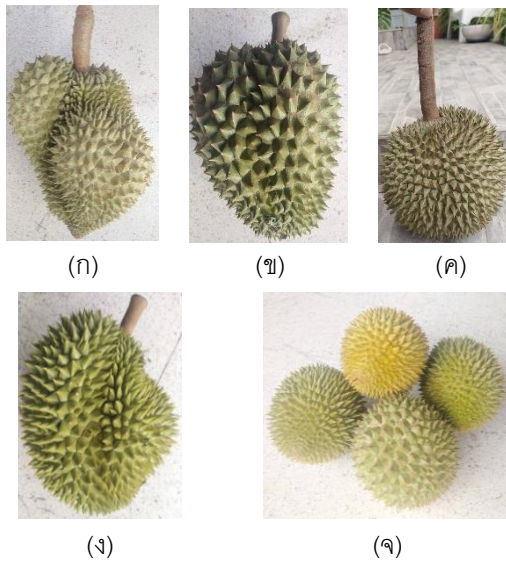
ของผงวัสดุทดสอบขนาด 20 mesh เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่ตั้งไว้

3) ชุดผสมวัตถุดิบ เป็นการผสมแบบใช้สกรูใบเกลียวในการผสม โดยห้องผสมมีปริมาตรไม่น้อยกว่า 0.5 m^3 ในการผสมมีการควบคุมเวลาในการผสมด้วย Timer เพื่อให้ส่วนผสมในแต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอ

4) ชุดเครื่องอัดแท่ง เป็นวิธีการแบบอัดเย็นด้วยสกรูอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm โดยรับแรงมาจาก Motor Ac 220 V 2,500 watt ส่งกำลังด้วยสายพานและกระบวนการตัดแท่ง ใช้กระบวนการ Pneumatic รับลมจากปั๊มลม ส่งกำลังไปยังกระบอกลูกสูบ และตั้งระยะการตัดด้วย Limit Switch และชุดลดความชื้นเป็นลักษณะห้องอบให้ความร้อนด้วย Heater type K ส่งลมร้อนด้วย Blower เพื่อกระจายความร้อนให้ทั่วถึงเพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีความชื้นตามมาตรฐาน [8] สำหรับการนำเครื่องอัดแท่งแบบกึ่งอัตโนมัติเข้ามาใช้สามารถช่วยให้แท่งถ่านที่ได้มีความยาวสม่ำเสมอด้วย Limit Switch ที่ติดตั้งกระบอกลม Pneumatic ซึ่งแบบเดิมผู้ผลิตใช้วิธีการกะระยะความยาวแล้วทำการหักแท่งถ่านด้วยมือ ทำให้แท่งถ่านมีความยาวไม่เท่ากัน ยากต่อการบรรจุหีบห่อ

2.2. การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบสำหรับการทดสอบ

ทุเรียนที่ใช้ในการทดสอบ 5 สายพันธุ์ มีแหล่งกำเนิดจากจ.จันทบุรี ประกอบด้วยสายพันธุ์หมอนทอง (รูปที่ 1 ก) สายพันธุ์ชะนี (รูปที่ 1 ข) สายพันธุ์ก้านยาว (รูปที่ 1 ค) สายพันธุ์พวงมณี (รูปที่ 1 ง) และ สายพันธุ์กระดุม (รูปที่ 1 จ) มีช่วงอายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 95-120 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวเฉลี่ยของทุเรียนในแต่ละสายพันธุ์



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของทุเรียนทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเปลือกทุเรียนแต่ละสายพันธุ์นำมาทำการชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าความชื้นก่อนทำการเผาลดความชื้น (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การนำเปลือกทุเรียนแต่ละสายพันธุ์มาทำการชั่งน้ำหนักและหาค่าความชื้นก่อนการทดสอบ

2.2.1. การเตรียมเปลือกทุเรียนสำหรับการเผาไล่ความชื้นเพื่อเตรียมเป็นวัตถุดิบในการอัดแท่งถ่าน

โดยทำการเผาด้วยเตาเผาแบบเตาเดี่ยวให้ความร้อนจากด้านล่างของเตา ปริมาตรความจุของเตา 0.2 m³ มีช่องระบายควัน 3 ทิศทาง และมีช่องดักน้ำส้มควันไม้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เผาครั้งละ 50 กิโลกรัมเป็นเวลา 10 ชั่วโมง (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 เตาเผา และลักษณะภายในเตา

2.2.2. หลังจากผ่านกระบวนการเผาไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้ว

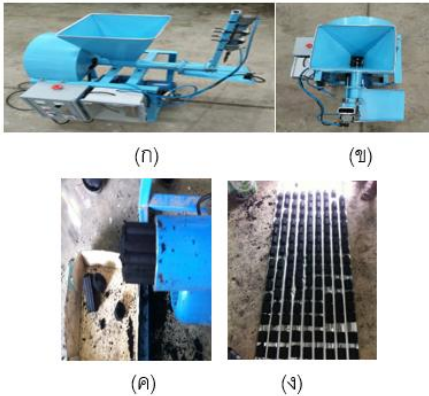
นำเข้าสู่เครื่องบดย่อยลดขนาด โดยผงถ่านที่ได้มีความละเอียดมากกว่า 20 mesh ตามขนาดของตะแกรงที่กำหนด

2.2.3. จากนั้นเข้าสู่กระบวนการผสม

จากการทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการอัดแท่ง จากทั้งหมด 3 อัตราส่วนผสม คือ 1:1:0.5 1:0.5:0.5 และ 1:0.25:0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนผสม ผงถ่าน : แป้งมัน : น้ำเปล่า ในอัตราส่วน 1:0.25:0.5 ตามลำดับ อัตราส่วนผสมนี้เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดสำหรับการขึ้นรูป โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ และการจับตัวของส่วนผสมเป็นเวลา 15 นาที และทำการทดสอบอัดแท่งจากเครื่องอัดแท่ง ที่ให้ลักษณะการจับตัวของแท่งถ่านที่มีความแข็งแรง

2.2.4. นำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูป

กำหนดความเร็วรอบของเครื่องอัดแท่งถ่าน (รูปที่ 4) คือ 240, 290 และ 360 rpm ตามลำดับ โดยลักษณะของแท่งถ่านที่ผลิต (รูปที่ 4ง) มีลักษณะแท่งหกเหลี่ยม รูกลองด้านใน 1 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm



รูปที่ 4 ลักษณะของเครื่องอัดแท่งถ่าน

การหาขนาดต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

$$I = \frac{P}{V} \times PF \times \text{eff.} \quad (1)$$

$$P = V \times I \times PF \times \text{eff.} \quad (2)$$

โดยที่

I = กระแสมอเตอร์ (A)

V = แรงดันไฟฟ้า (V)

P = กำลังไฟฟ้า (Watt)

PF = ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์

eff. = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

การหาอัตราทดและความเร็วรอบในการหมุนของสกรู

$$I = \frac{n_1}{n_2} \quad (3)$$

โดยที่

I = อัตราทด (rpm)

n_1 = ความเร็วรอบพูลเลย์ขับ (rpm)

n_2 = ความเร็วรอบพูลเลย์ตาม (rpm)

การหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ

$$Q = k \frac{\pi}{4} ((D-d)^2 p n w C) \quad (4)$$

โดยที่

Q = อัตราขนถ่าย (kg h⁻¹)

k = ประสิทธิภาพในการบรรจุวัสดุลงระหว่างเกลียว

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียว (cm)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากลียว (cm)

p = ระยะห่างระหว่างเกลียว (cm)

n = ความเร็วรอบ (rpm)

w = น้ำหนักของวัสดุ (kg)

C = แฟคเตอร์ จากมุมเอียงตามแนวรอบ = 1

จากการทดสอบหาความเร็วรอบที่เหมาะสมจำนวน 3 ความเร็วรอบ คือ 240, 290 และ 360 rpm ซึ่งมีช่วงความเร็วรอบในการอัดใกล้เคียงกับ [10] ที่มีช่วงความเร็วรอบ อยู่ในช่วง 200 – 500 rpm พบว่า การอัดแท่งถ่านด้วยความเร็วรอบของสกรูอัดที่ 290 rpm เป็นความเร็วรอบที่ให้ค่าความสามารถของเครื่องอัดและลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่านได้ดีที่สุด โดยพลูเลย์ขับ (n_1) ขนาด 2 inch หมุนด้วยความเร็ว 1,450 rpm ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนขนาดพูลเลย์ตัวตาม (n_2) เป็น 8, 10 และ 12 Inch ตามลำดับ ดังสมการที่ 3 และทำการทดสอบอัดวัตถุดิบเปลือกทุเรียนทั้ง 5 สายพันธุ์ ละ 3 ซ้ำ เพื่อทำการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่าน และหาค่าความสามารถของเครื่อง ดังสมการที่ (5) (6) (7) (8) และ (9) [11] ดังนี้

$$\text{Availability Rate (A)} = \frac{L}{T} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Performance Efficiency (P)} = \frac{N}{T} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Quality Rate (Q)} = \frac{O}{q} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{OEE} = \frac{A}{100} \times \frac{P}{100} \times \frac{Q}{100} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{Capacity (C)} = \frac{c}{t} \quad (9)$$

โดยที่

T = เวลาที่เครื่องจักรอัดแท่งถ่าน (h)

L = เวลาการเดินเครื่องอัดแท่งถ่าน (h)

N = เวลาเดินเครื่องสุทธิ (h)

= (เวลาเดินเครื่องเปล่า - L)

O = จำนวนแท่งถ่านที่ได้ตามข้อกำหนด

q = จำนวนแท่งถ่านทั้งหมด (Rods)

OEE = Overall Equipment Effectiveness

c = น้ำหนักวัตถุดิบ (kg)

t = เวลาในการอัดแท่งถ่าน (h)

แล้วทำการเก็บและบันทึกผลข้อมูล เวลา น้ำหนัก ความชื้น และลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่าน ดังสมการที่ (10) (11) และ (12)

$$\text{Mean } (\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

$$\text{Standard Deviation (S.D.)} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (11)$$

$$\text{Coefficient of Variation (C.V.)} = \frac{\text{S.D.}}{\bar{x}} \times 100 \quad (12)$$

โดยที่

$\sum_{i=1}^n x_i$ = ผลรวมของข้อมูลจากการวัดแท่งถ่าน
(ความยาว, ความกว้าง)

n = จำนวนแท่งถ่านทั้งหมด (Rods)

2.2.5. นำตัวอย่างที่ผ่านการอัดแล้วนำเข้าเครื่องอบ

เพื่อลดความชื้นโดยใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่าน

2.2.6. หลังจากที่ผ่านมากระบวนการอบลดความชื้นเรียบร้อยแล้ว

นำตัวอย่างทดสอบไปทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ดังสมการที่ (13) (14) (15) (16) (17) และ (18) ตามลำดับ การคำนวณหาค่าความร้อน ตามมาตรฐาน (ASTM D5865) ทดสอบโดยวิธี Isoperibol โดยใช้สมการการหาค่า t ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างถูกต้อง โดยแทนค่าลงในสมการ ซึ่งทำการทดสอบเพื่อให้เป็นไปตาม มผช.238/2547

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) - r_2(c-b) \quad (13)$$

โดยที่

a = ช่วงเวลาที่ใช้ในการ ignite (min)

b = ช่วงเวลาที่อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นร้อยละ 60 จากอุณหภูมิเริ่มต้น

c = เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลาที่อุณหภูมิ กลับมาคงที่ภายหลังการสันดาป (min)

t_a = อุณหภูมิขณะเริ่ม ignite

t_c = Correction Temperature ที่ c

r_1 = อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วง 5 นาที
ก่อนการ ignite

r_2 = อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่าง
5 นาทีจากเวลา c ถ้าอุณหภูมิ ลดลง r_2 จะเป็นค่าลบ
ค่า $[-r_2 (c-b)]$ จะเป็นบวก

นำตัวอย่างแท่งถ่านมาทำการคำนวณหาค่าความร้อนแบบ Normal หาค่า Gross heat of combustion [12] ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter โดยคำนวณค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงได้ ดังสมการ (14)

$$Q = \frac{TW - c_1 - c_2 - c_3}{m} \quad (14)$$

โดยที่

Q = ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงรวม (cal g^{-1})

W = ค่าสมมูลย์ทางพลังงานของแคลอรีมิเตอร์ มีค่า
(2,426 $\text{cal } ^\circ\text{C}^{-1}$)

T = ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($^\circ\text{C}$)

m = มวลของเชื้อเพลิงตัวอย่าง (g)

c_1 = ค่าความร้อนที่เกิดจากการดไนตริก (cal cm^{-1})

c_2 = ค่าความร้อนที่เกิดจากการดซัลฟูริก (cal cm^{-1})

c_3 = ค่าความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟฟ้า (cal cm^{-1})

นำแท่งชีวมวลมาทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น
ตามมาตรฐาน (ASTM D3173) ดังสมการ (15)

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (15)$$

โดยที่

A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

นำแท่งชีวมวลมาทำการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าโดย
วิธีมาตรฐาน (ASTM D3174) ดังสมการ (16)

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = \frac{(A-B)}{C} \times 100 \quad (16)$$

โดยที่

A = น้ำหนักของเถ้าและถ้วยกระเบื้อง (g)

B = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (g)

C = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (g)

นำแท่งถ่านมาทำการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย
ตามมาตรฐาน (ASTM D3175) ดังสมการ (17)

$$\text{น้ำหนักตัวอย่างที่หายไป} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (17)$$

โดยที่

A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (g)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (g)

ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ) = น้ำหนักตัวอย่างที่
หายไป (ร้อยละ) – ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)

นำแท่งถ่านมาทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคง
ตัว ตามมาตรฐาน (ASTM D3172) ดังสมการ (18)

ปริมาณคาร์บอนคงที่ (%) =

(ปริมาณความชื้น + ปริมาณเถ้า + ปริมาณสารระเหย)
(18)

การวิเคราะห์ความหนาแน่น ดังสมการ (19)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (19)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของแท่งถ่าน (g cm^{-3})

m = มวลของแท่งถ่าน (g)

v = ปริมาตรของแท่งถ่าน (cm^3)

นำแท่งถ่านมาทำการหาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน (หุงต้ม) [13] ดังสมการ (20)

$$HU = \frac{[m_1 c (T_2 - T_1)] + (m_1 - m_2)L}{MH} \times 100 \quad (20)$$

โดยที่

HU = ร้อยละประสิทธิภาพการใช้งาน

m_1 = น้ำหนักเริ่มต้นของน้ำ (g)

m_2 = น้ำหนักน้ำที่เหลือ (g)

c = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($1 \text{ cal } ^\circ\text{C}^{-1}$)

L = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 cal g^{-1})

M = มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่งเริ่มต้น (g)

T_1 = อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น ($^\circ\text{C}$)

T_2 = อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย ($^\circ\text{C}$)

H = ค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดแท่ง (cal g^{-1})

และทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมวิเคราะห์การใช้เครื่องอัดแท่งถ่าน [14] ดังสมการ (21) และ (22)

ระยะเวลาคืนทุนกระบวนการอัดแท่งถ่าน (Pay-back period)

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (21)$$

โดยที่

PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (year)

P = ราคาเครื่องจักร (Baht)

R = กำไรสุทธิต่อปี (Baht year^{-1})

จุดคุ้มทุนกระบวนการอัดแท่งถ่าน (Break-even point)

$$BEP = \frac{Fc}{B - Vc} \quad (22)$$

โดยที่

BEP = จุดคุ้มทุน (h year^{-1})

Fc = ค่าใช้จ่ายคงที่ (Baht)

B = อัตราการรับจ้าง (Baht h^{-1})

Vc = ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (Baht h^{-1})

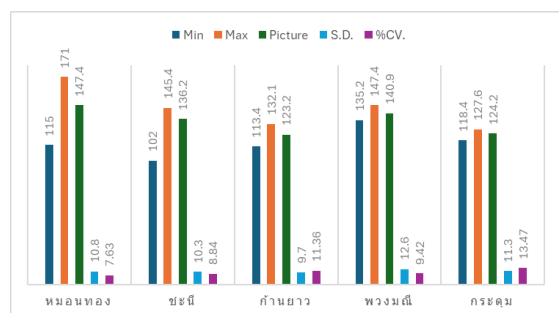
3. ผลการวิจัย

จากการทดสอบอัดแท่งถ่านจากทุเรียน 5 สายพันธุ์ ประกอบด้วยสายพันธุ์หมอนทอง สายพันธุ์ชะนี สายพันธุ์ก้านยาว สายพันธุ์พวงมณี และสายพันธุ์กระดุม ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

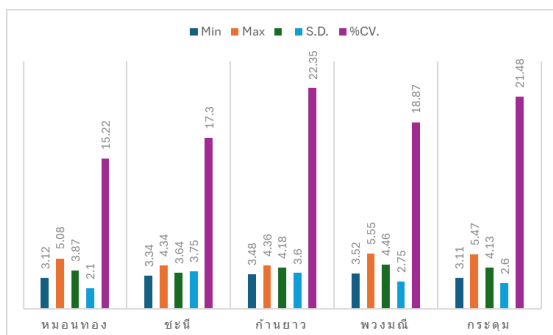
1) การเปรียบเทียบรายละเอียด ลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่าน น้ำหนัก ความเร็ว และความสามารถในการอัดแท่งถ่าน จากการทดสอบแท่งถ่านจำนวน 300 แท่ง (รูปที่ 6-8)

2) ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

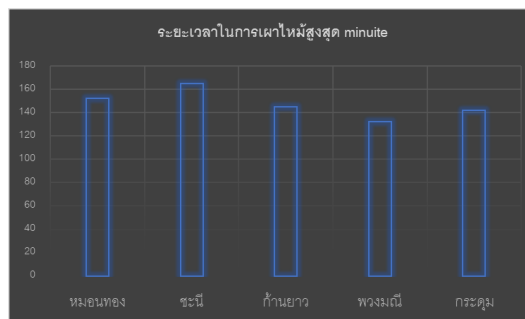
3) ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1



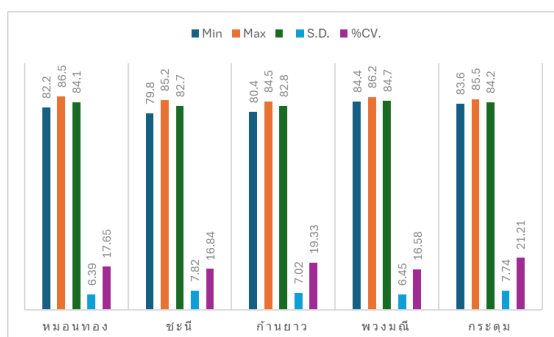
รูปที่ 6 น้ำหนักของแท่งถ่าน (g)



รูปที่ 7 ความเร็วเฉลี่ยของการอัดแท่งถ่าน (sec)

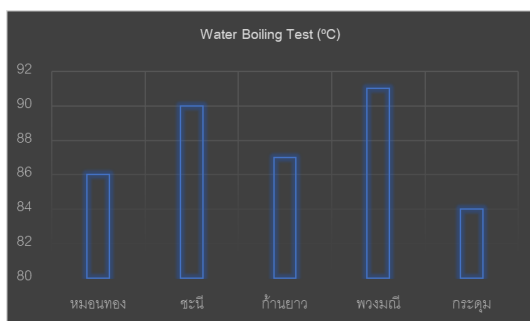


รูปที่ 10 ระยะเวลาในการเผาไหม้สูงสุด



รูปที่ 8 ความสามารถในการอัดแท่งถ่าน (Kg h⁻¹)

จากผลการทดสอบต้มน้ำ 1,000 ml สามารถทำให้น้ำก่อนทำการต้มน้ำที่ 25 °C (ควบคุมอุณหภูมิในห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ) มีอุณหภูมิสูงสุด 91 °C และมีระยะเวลาในการเผาไหม้สูงสุด 165 min (รูปที่ 9-10)



รูปที่ 9 อุณหภูมิน้ำสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนในแต่ละสายพันธุ์

ตารางที่ 1

อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาในการต้มน้ำ เริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิของน้ำสูงสุด และลักษณะแท่งถ่านขณะเผาไหม้

Type	water	Time	Temperature	Characteristic
	maximum	(min)	rise rate	while
	Temperature	Avg.	(°C min ⁻¹)	burning
	(°C)		Avg.	1,000g Time ¹
หมอนทอง	86	26.30	3.26	ติดไฟง่าย เผาไหม้เร็ว
ชะนี	90	30.23	2.97	ติดไฟง่าย เผาไหม้เร็ว
ก้านยาว	87	28.66	3.03	ติดไฟง่าย เผาไหม้เร็ว
พวงมณี	91	32.18	2.82	ติดไฟง่าย เผาไหม้เร็ว
กระดุม	84	34.16	2.45	ติดไฟง่าย เผาไหม้เร็ว

4) การวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดแท่งถ่าน ซึ่งทำให้สามารถผลิตถ่านอัดแท่งออกมาได้ตามมาตรฐาน ทั้ง Performance and Quality รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

Overall Machine Effectiveness (OEE)

Availability Rate (%)	Performance Efficiency (%)	Quality Rate (%)	OEE (%)
98.57	98.57	95.00	97.38

จากการทดสอบถ่วงน้ำหนักจากเปลือกทุเรียนทั้ง 5 สายพันธุ์ มีต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ประกอบด้วย อายุการใช้งานเครื่องจักร 10 ปี อัตราดอกเบี้ยรายปี ราคาขายเครื่องจักรต่อปี ค่าเสื่อมราคาร้อยละ 5 ต่อปี และค่าเสียโอกาสต่อปี มีต้นทุนผันแปร (Variable cost) ประกอบด้วย ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าวัตถุดิบ ผลการประเมินความคุ้มค่าในการทำงานของเครื่องพบว่า มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักร รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

ผลการประเมินความคุ้มค่าในการทำงาน

	PBP h year ⁻¹	BEP h year ⁻¹
หมอนทอง	835.42	209.06
ชะนี	855.43	214.40
ก้านยาว	853.97	214.04
พวงมณี	827.12	206.85
กระดุม	834.02	208.69

ตารางที่ 4

ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง

	Wbc	Wac	Mc	ρ	Hv	As	Vc	Fc
หมอนทอง	147.4	133.45	5.50	0.029	5327	3.11	39.36	52.03
ชนะ	136.2	123.20	6.02	0.031	5656	3.28	40.06	50.64
ก้านยาว	123.2	114.64	7.08	0.030	5632	4.16	38.10	50.66
พวงมณี	140.9	132.45	7.10	0.022	5235	3.87	39.99	49.04
กระดุม	124.2	112.21	7.35	0.013	5117	3.91	37.58	51.16

โดยที่

Wbc = Weight wet (g)

Wac = Weight dryness (g)

Mc = Moisture content (%)

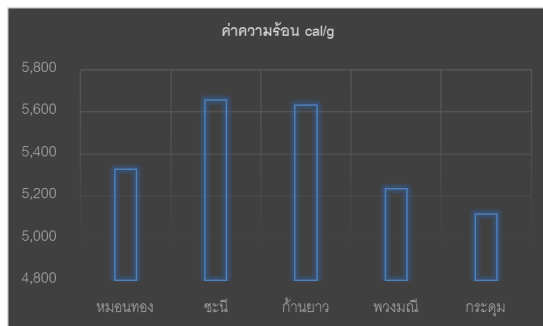
 ρ = Density (value (g cm⁻³))Hv = Heating value (cal g⁻¹)

As = Ash content (%)

Vc = Volatile content (%)

Fc = Fixed Carbon content (%)

การเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนแต่ละสายพันธุ์ (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนแต่ละสายพันธุ์

4. อภิปรายผลการทดสอบ

จากการทดสอบอัดแท่งถ่านจากเปลือกทุเรียน ทั้ง 5 สายพันธุ์ นำมาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรในการคำนวณ พบว่า มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรอยู่ที่ 105.14 day และ มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 210.60 h year⁻¹ ซึ่งแท่งถ่านที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 5 ชนิด จากการเปรียบเทียบกับค่าความร้อนที่ได้กับ เศรษฐศาสตร์การเกษตรชนิดอื่นๆ [15] พบว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกับเศรษฐศาสตร์การเกษตรชนิดอื่นๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้ความร้อนทางเลือกให้กับเกษตรกรได้ และหากมีเศรษฐศาสตร์การเกษตรที่มีปริมาณมากพอก็สามารถผลิตแท่งเชื้อเพลิงถ่านแท่ง ในเชิงอุตสาหกรรมได้ โดยเกณฑ์มาตรฐานในการรับซื้อถ่านแท่ง [16] จะต้องมีความร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 cal g⁻¹ จากวัตถุดิบที่ทำการทดสอบมีความร้อนอยู่ระหว่าง 5,117-5,656 cal g⁻¹ หรือ 21,409-23,644 KJ kg⁻¹ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ [8]

โดยอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่ซื้อขาย โดยน้ำหนักของถ่านอัดแท่ง ความเร็วในการอัดแท่ง และความสามารถในการอัดแท่ง ไม่ส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนแต่ส่งผลกับปริมาณที่ผลิตได้ หากมีการนำไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรม แต่ค่าความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งส่งผลกับค่าความร้อนที่มีทิศทางสูงขึ้น โดยผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันกับ [5-7] ที่มีค่าความร้อนมากกว่า 5,000 cal g⁻¹ ซึ่งหากนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรมจะเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรอีกทางหนึ่งด้วย ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ หากเปรียบเทียบกับการใช้งานเครื่องอัดแท่งถ่านในปัจจุบัน ที่ใช้การอัดแท่งแบบกะระยะและทำการหักแท่งถ่านด้วยมือ เครื่องอัดถ่านแท่งชุดนี้มีความสามารถในการตัดที่ทำให้แท่งถ่านมีความยาวสม่ำเสมอที่ 10 cm ทำให้งานต่อการบรรจุ อีกทั้งยังใช้แรงงานเพียง 1 คนในการทำงาน และมีกำลังการผลิตสูงถึง 692 kg day⁻¹ หากเปรียบเทียบกับพลังงาน LPG ที่จำหน่าย 28.2 baht kg⁻¹ ถ่านอัดแท่งถือว่ามีความคุ้มค่ามากกว่าซึ่งมีราคาจำหน่ายที่ 15 baht kg⁻¹ จึงทำให้การทำถ่านอัดแท่งมีความเหมาะสมสำหรับการจัดการเศษเปลือกทุเรียน สำหรับการเพิ่มมูลค่า

5. สรุปผลการทดสอบ

กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนทั้ง 5 สายพันธุ์ ลักษณะทางกายภาพของแท่งถ่านมีลักษณะ หกเหลี่ยม กว้าง 5 cm ยาว 10 cm รูกลองด้านใน 1 cm ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว เป็นไปตามมาตรฐาน มผช.238/2547 และ มีค่าความร้อน ระหว่าง 5,117-5,656 cal g⁻¹

เครื่องจักรมีกำลังการผลิตสูงสุด 86.5 kg h^{-1} หรือประมาณ 692 kg day^{-1} ทดสอบต้มน้ำสามารถทำให้น้ำ ปริมาตร 1000 ml มีอุณหภูมิสูงสุด 91°C ในช่วงระยะเวลา 26-34 minutes มีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรอยู่ที่ 105.14 day และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ $210.60 \text{ h year}^{-1}$ โดยถ่านอัดแท่งมีราคาถูกกว่าเชื้อเพลิง LPG ถึง 53.2% หากมีการนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรม ก็สามารถเพิ่มรายรับ รวมถึงเพิ่มศักยภาพในการผลิตให้กับเกษตรกรหรือผู้ประกอบการ สำหรับการแข่งขันทางธุรกิจได้

6. กิตติกรรมประกาศ

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. สถานการณ์พลังงานปี 2566 และแนวโน้มปี 2567. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน; 2567.
- [2] Irfan M, Zhao ZY, Panjwani MK, Mangi FH, Li H, Jan A, et al. Assessing the energy dynamics of Pakistan: Prospects of biomass energy. *Energy Rep.* 2020;6:80–93.
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2566. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2567.
- [4] Ly TB, Trinh AM, Tran HP, Dang KN, Nguyen TD, Tran VT, et al. Evaluation of an operating durian shell charcoal briquette manufacturing line and development of a biorefinery process for higher value products. *Energy.* 2024;307:132727.
- [5] Nuriana W, Anisa N, Martana. Synthesis preliminary studies durian peel bio briquettes as an alternative fuels. *Energy Procedia.* 2014;47:295–302.
- [6] Rahmawati S, Santoso T, Sangkota VD, Abram PH. The utilization of durian peels (*Durio zibethinus*) for the manufacturing of charcoal briquettes as alternative fuel. *J Nat Resour Environ Manag.* 2023;13(1):76–87.
- [7] Fahrulsyah F, Ningtyas KR, Agassi TN, Harahap MM. Evaluating the quality and added value of durian peel briquettes using tar waste as adhesive. *Asian J Appl Res Community Dev Empowerment.* 2023;7(3):183–9.
- [8] ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์, ศิริวรรณ แก้วสวิง, อมรประภา ทิศกระโทก. การผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกทุเรียน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.* 2563;39(5):580–6.

- [9] บุญฤทธิ์ บั้วระบัติ. เครื่องอัดแท่งชีวมวลจากเศษวัสดุทางการเกษตรแบบกึ่งอัตโนมัติ. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. 2565;8(1):21–31.
- [10] พงษ์ศักดิ์ อยู่มน. การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. 2559;9(1):34–48.
- [11] อนุศักดิ์ ฉันทไพศาล. การบำรุงรักษา. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น; 2557. p.42–4.
- [12] Department of Mechanical Technology. Fuel calorimetry test. Chanthaburi: Faculty of Agricultural Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok; 2025.
- [13] Thanapol T. Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf. J Sci Technol. 2015;23(3):418–31.
- [14] จตุรงค์ ลังกาพินธุ์. การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการใช้เครื่องจักรกลเกษตรเบื้องต้น. ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2563. p.2–5.
- [15] นฤมล ภาณุอำภา. การหาค่าความร้อนของไม้และถ่าน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: พี.เพรส จำกัด; 2553. p.34–52.
- [16] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง. มผช.238/2547. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2567.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

Eco-Friendly Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Margosa (*Azadirachta indica*) Leaf Extract for Sustainable Agricultural Nanotechnology

Suttirak Pairoj^{1)*} and Bundit Boonkhao²⁾

¹⁾ Division of Applied Foundation, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, Thailand

²⁾ Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, Thailand

Received: 10 May 2025

Revised: 10 June 2025

Accepted: 16 June 2025

Available online: 21 June 2025

Abstract

This study presents a sustainable method for synthesizing zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using aqueous leaf extracts of *Azadirachta indica* (Margosa), serving as natural reducing and capping agents. The green synthesis approach aligns with environmentally conscious practices by eliminating harmful chemicals and minimizing toxic byproducts. The physicochemical characteristics of the ZnO NPs were thoroughly investigated using established analytical techniques. UV-Vis spectroscopy identified a distinct absorption peak at 363 nm, and the direct band-gap energy was calculated as 3.4 eV. FTIR analysis confirmed the involvement of biomolecules, such as proteins, aromatic compounds, and alcohols, in the reduction and stabilization processes. SEM imaging revealed the formation of agglomerated nanoparticles, while EDX confirmed the elemental composition of zinc and oxygen. DLS measurements estimated the average particle size to be approximately 47.2 nm. The results support the viability of using agricultural plant-based materials for the eco-friendly and cost-efficient production of metal oxide nanoparticles, contributing to advancements in green nanotechnology within agricultural and farm engineering applications.

Keywords : Green synthesis: Zinc oxide nanoparticles: Margosa leaves: *Azadirachta indica*

*contact: e-mail: suttirak_sp@npu.ac.th, 064-154-4469

1. Introduction

Nanotechnology is an emerging field that has garnered considerable attention due to its broad spectrum of applications across various sectors, including textiles, cosmetics, food processing, and agriculture. Among the nanomaterials explored, zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) have been extensively investigated for their multifunctional properties. These include their roles as antimicrobial agents [1] and their applications in catalysis [2-4], electronics [5], optoelectronics [6], and photochemical responses [7]. Additionally, ZnO NPs function as essential cofactors in plant metabolic processes, particularly in protein and tryptophan synthesis [8]

In recent years, the agro-industrial sector has increasingly utilized ZnO nanoparticles (ZnO NPs) as plant growth enhancers [8] and nano-scale fertilizers [9]. Due to their ultra-small size, these nanoparticles are more readily absorbed by plants compared to conventional bulk materials, enabling easier penetration into plant tissues. The application of ZnO NPs can lead to a range of physiological responses in plants, including the stimulation or inhibition of seed germination and seedling development [10,11], activation of metabolic genes [12-14],

enhancement of photosynthetic activity [15-18], generation of reactive oxygen species [19], and even chromosomal alterations [20]. Zinc, a vital micronutrient for plant development, is instrumental in regulating key metabolic functions and activating enzymes such as carbonic anhydrase, aldolase, and hydrogenase [21]. A deficiency in zinc, particularly during the early stages of growth, can significantly hinder seedling development and water uptake. Pre-soaking seeds in zinc-enriched solutions has been shown to improve moisture retention and promote more effective germination [8]. Moreover, zinc contributes to the biosynthesis of tryptophan and auxin, crucial plant hormones that play a significant role in improving crop yield and quality [22]

Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) can be synthesized through various chemical and biological methods, each offering distinct advantages and limitations. Chemical methods typically involve precipitation, sol-gel, or hydrothermal techniques using zinc salts and strong chemical reducing agents [23-26], which often require high energy input and may produce toxic byproducts. In contrast, biological or green synthesis methods employ microorganisms or plant extracts as eco-friendly reducing and capping agents, minimizing environmental

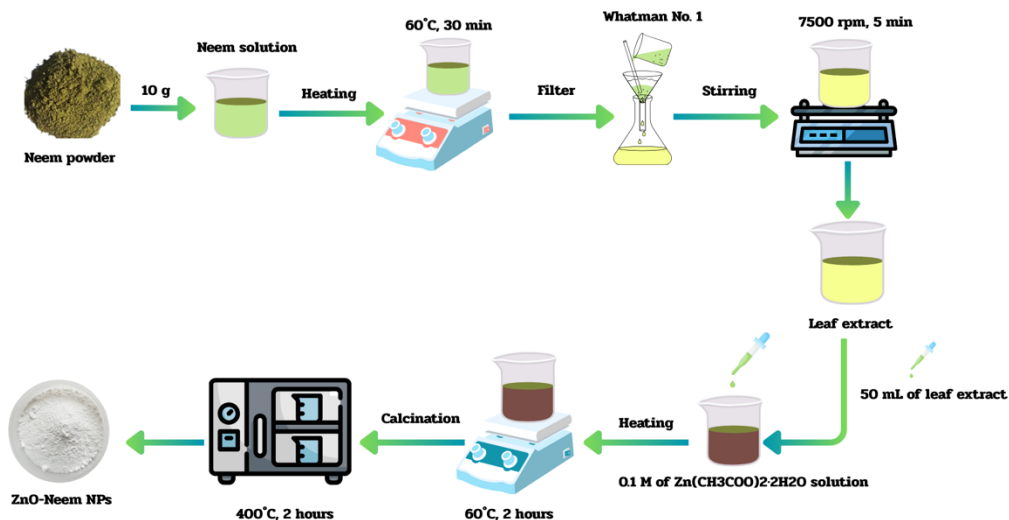


Figure 2 Procedure for synthesizing ZnO from Margosa leaf.

impact [27,28]. Among these, plant-mediated synthesis is gaining popularity due to its simplicity, cost-effectiveness, and the rich presence of bioactive compounds that facilitate nanoparticle formation [29]. The abundance and diversity of plant species provide a wide range of natural reagents for ZnO NP synthesis, making this method both scalable and sustainable. In particular, Thailand is rich in Margosa trees (in Thai: สะเดา), whose leaves (Fig. 1) are known to contain phytochemicals suitable for green synthesis, presenting a valuable local resource for environmentally friendly ZnO nanoparticle production.



Figure 1 Margosa leaves (*Azadirachta indica*)

Margosa, commonly referred to as neem (*Azadirachta indica*), is a tree species within the mahogany family (*Meliaceae*), native to the Indian subcontinent. It has a long history of use in traditional medicine, owing to its wide range of therapeutic properties. The leaves of the Margosa tree are rich in bioactive compounds, including flavonoids, terpenoids, and alkaloids,

which have been shown to possess anti-inflammatory, antifungal, antibacterial, antiviral, and anticancer effects [30]

The primary aim of this study is to develop zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) through an environmentally friendly and simple green synthesis approach using leaf extracts from *Margosa*. This method offers a sustainable and cost-efficient alternative to conventional nanoparticle synthesis techniques. To evaluate the characteristics of the resulting ZnO NPs, several advanced analytical instruments were employed, including Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), Dynamic Light Scattering (DLS), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). These tools provide essential insights into the structural and physicochemical properties of the nanoparticles, enhancing the overall understanding of the synthesized material.

2. Materials and Methods

2.1. Preparation of extract

Leaves of *Margosa* were collected from Nakhon Phanom University, located in Nakhon Phanom, Thailand. The aqueous extract was prepared following the procedure outlined by Sekhar et al. [31], with minor adjustments. Initially, the leaves were thoroughly cleaned multiple times using double-distilled water to

remove surface contaminants. Then, *Margosa* leaves were dried in ambient temperature (25 - 30°C) for 7 – 10 days. Note that, this process must avoid direct sunlight to preserve bioactive phytochemicals. To ensure complete moisture removal, the dried leaves were further dried in a hot-air oven at 50°C for 4 hr. The fully dried leaves were ground using a clean electric grinder into fine powder, sieved through a 60-mesh sieve to ensure uniformity. The resulting *Margosa* powder was stored in an airtight amber glass bottle at room temperature until used for aqueous extraction.

2.2. Green Synthesis of ZnO NPs

The synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using *Neem* (*Margosa*) leaf extract, as illustrated in Fig. 2, begins with 10 grams of *Neem* powder, which is mixed with distilled water and heated at 60°C for 30 minutes to obtain a *Neem* solution. This solution is then filtered using Whatman No. 1 filter paper to remove solid residues, followed by centrifugation at 7500 rpm for 5 minutes to separate the supernatant, which serves as the *Neem* leaf extract. Subsequently, 50 mL of this extract is added to 100 mL of 0.1 M zinc acetate dihydrate $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ solution. The mixture is then heated at 60°C for 2 hours under constant stirring to facilitate the reaction between the phytochemicals in the

Neem extract and zinc ions. The resulting mixture is subjected to calcination at 400°C for 2 hours in a hot air oven to convert the reaction product into a white ZnO nanopowder. The final product, ZnO-Neem nanoparticles, is collected and ready for further characterization and application.

2.3. Characterization of ZnO NPs

The green-synthesized ZnO nanoparticles were characterized using a UV-Vis spectrophotometer, with measurements taken in the wavelength range of 300–700 nm (Avaspec-EDU). The surface morphology and elemental composition were analyzed using a scanning electron microscope (SEM) coupled with an energy dispersive X-ray spectrometer (EDX, Quanta 250 FEI Company, Eindhoven, The Netherlands). Particle size distribution was determined using dynamic light scattering (Malvern Zetasizer ZSP, Worcestershire, UK). The functional groups present in both the synthesized nanoparticles and the leaf extract were identified using a Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectrophotometer (PerkinElmer Inc., Buckinghamshire, UK), employing the KBr pellet method within the spectral range of 4000–500 cm^{-1} for comparative analysis.

3. Results and Discussion

Plants, due to the presence of secondary metabolites, can reduce zinc ions in a solution to form zinc oxide. The plant extract not only acts as a reducing agent but also stabilizes the nanoparticles. This was confirmed through UV-Vis spectroscopic analysis conducted in the range of 280 nm to 800 nm. The ZnO nanoparticles displayed a characteristic absorption peak at 363 nm, attributed to the surface plasmon resonance effect and the electronic transitions between the conduction and valence bands, corresponding to the intrinsic band gap of the ZnO nanoparticles as shown in Fig. 3. The band gap energy was calculated using the equation $E_g = 1240/\lambda$ eV and found to be 3.4 eV, which is consistent with previously reported values for ZnO nanoparticles. Additionally, the purity of the synthesized ZnO nanoparticles was validated by the absence of any extra peaks in the absorption spectra that could be linked to bioactive compounds from the extract. This finding aligns with earlier studies where the absorption peaks of ZnO nanoparticles synthesized using *Monsonia burkeana* were observed at 325 nm [32], 360 nm for *Aloe barbadensis* (Aloe vera) [33], and 389 nm for *Trianthema portulacastrum* (Desert horsepurslane) [34] extract.

As suggested by Khan et al. [35], the hydroxyl and phenolic compounds in the leaf extracts play a critical role in reducing Zn^{2+} ions to Zn^+ ions, facilitating the nanoparticle formation. Similarly, Ezealisiji et al. [36] proposed that zinc nitrate undergoes ionization in the aqueous medium and is reduced to Zn^+ by the phytochemicals in the extract, with the hydroxyl group in polyphenols potentially forming zinc hydroxide via hydrolysis.

The observed surface morphology confirms the successful synthesis of nanoparticles, which appear in an agglomerated form. Several studies have highlighted the influence of nanoparticle morphology on the enhanced functional properties of ZnO.

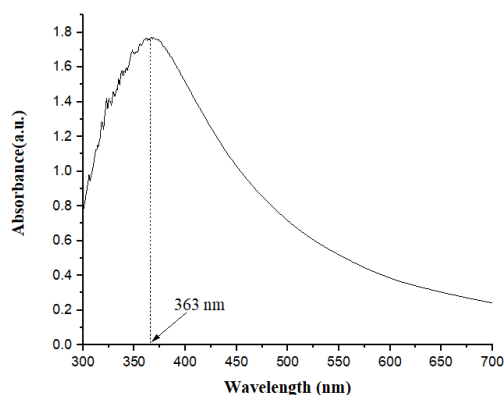
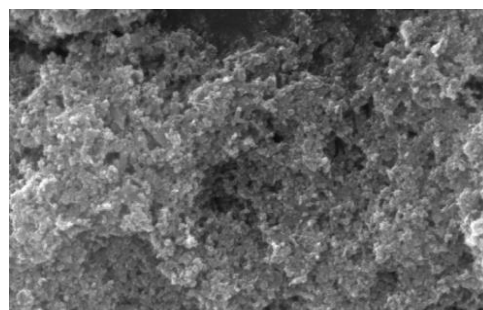


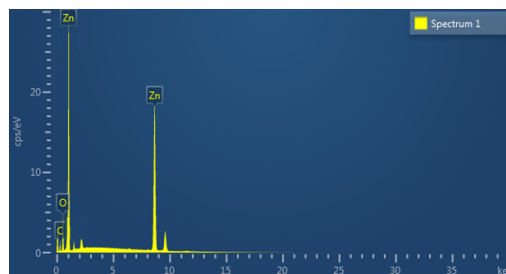
Figure 3 UV-Vis absorption spectra of ZnO NPs.

The SEM analysis in this study is consistent with previous research, which reported that extracts from *Albizia lebbbeck* (Indian siris) stem bark [37] also led to the formation of similarly spherical ZnO nanoparticles. A key advantage of

spherical nanoparticles is their improved ability to penetrate cellular walls more effectively. ZnO nanoparticles have also been widely recognized for their potent antibacterial, antifungal, and anticancer properties.



(A)



(B)

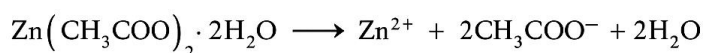
Figure 4 (A) SEM photographs and (B) EDX pattern of ZnO NPs.

Energy Dispersive X-ray (EDX) analysis was performed to assess the elemental composition and structural characteristics of the synthesized ZnO nanoparticles. The detected signals for zinc and oxygen, as shown in Fig. 4, confirm the chemical purity of the nanoparticles. The elemental composition was determined to be 80.24% zinc and 19.76% oxygen.

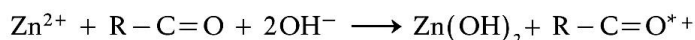
These results are in close agreement with the findings of Saputra and Yulizar [38], who reported Zn (80.3%) and O (19.65%) during the green synthesis of ZnO NPs using *Imperata cylindrica* (Cogon grass) leaf extract. In contrast, Ngoepe et al. [39] observed a higher zinc content relative to oxygen when synthesizing ZnO NPs with *Trianthema portulacastrum* (Desert

horsepurslane) extract. The underlying mechanism of ZnO nanoparticle formation involves the reduction of Zn^{2+} ions through interactions with bioactive compounds present in the plant extracts. This includes electron donation from carbonyl groups via ligand bonding, which facilitates the conversion of Zn^{2+} into ZnO nanoparticles. The mechanism of Zn^{2+} reduction to ZnO is shown in Fig. 5.

Ionization of Zinc Acetate in Aqueous Medium

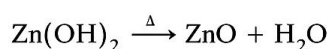


Reduction by Phytochemicals (e.g., carbonyls, phenolics)



Let R-C-O represent a phytochemical with a carbonyl group capable of electron donation.

Thermal Decomposition during Calcination (at 400 °C)



Net Reaction (Simplified Overall Equation)

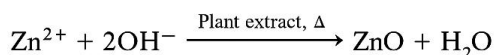


Figure 5 Reduction mechanism of Zn^{2+} to ZnO

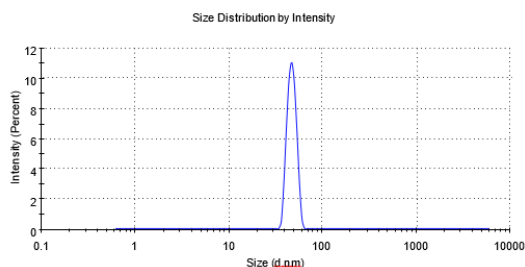


Figure 6 Size distribution of green synthesized Zinc oxide nanoparticles.

Particle size of ZnO NPs was characterized by DLS. Fig. 6 shows particle size distribution which mean size is 47.2 nm. Moreover, the deviation of the size is monomodal distribution. This implies that the synthesizing is archive to obtained monodisperse ZnO NPs.

Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy was employed to identify the functional groups involved in the synthesis of ZnO nanoparticles. The results indicate that the formation of ZnO NPs is facilitated by interactions with bioactive compounds such as phenolics, alkynes, terpenoids, and flavonoids. As shown in Fig. 7, the FT-IR spectrum of the synthesized nanoparticles, recorded in the 400–4000 cm^{-1} range, displays characteristic absorption bands. These bands correspond to various vibrational modes of functional groups, which played a crucial role in the reduction of zinc ions and the stabilization of ZnO nanoparticles.

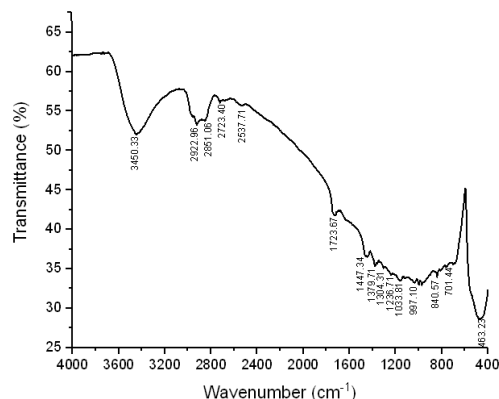


Figure 7 FTIR spectrum of green synthesized Zinc oxide nanoparticles.

The broad absorption band near 3450 cm^{-1} is associated with the O–H stretching vibration of phenolic compounds. A peak around 1723 cm^{-1} indicates the presence of alkene groups, while the band at 1379 cm^{-1} is related to C–N stretching vibrations of amine groups. The C–O stretching vibrations of ester and carboxylic acid functional groups are observed between 1000 and 1300 cm^{-1} . Additionally, the sharp peaks at 701 cm^{-1} and 463 cm^{-1} confirm the presence of Zn–O stretching vibrations, indicating successful formation of zinc oxide nanoparticles.

4. Conclusion

This study effectively demonstrated an eco-friendly synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) utilizing Margosa (*Azadirachta indica*) leaf extract as both a reducing and stabilizing agent.

The structural and chemical characteristics of the nanoparticles were analyzed using various techniques such as UV–Vis spectroscopy, FTIR, SEM, EDX, and DLS. The synthesized ZnO NPs showed an average particle size of approximately 47.2 nm and a distinct UV–Vis absorption peak at 363 nm. FTIR analysis suggested the involvement of proteins, aromatic compounds, and alcohols in the nanoparticle formation. SEM and EDX confirmed the agglomerated structure of the nanoparticles and their composition of zinc and oxygen. These findings support the viability of Margosa leaf extract as a sustainable, low-cost method for producing ZnO NPs, with potential applications across sectors like agriculture, medicine, and industry. Future investigations are recommended to refine the synthesis protocol and further explore the biocompatibility and safety of the nanoparticles.

5. Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by Thailand Science Research and Innovation (TSRI) on the Fundamental Fund Project.

6. References

- [1] Mohd Yusof H, Mohamad R, Zaidan UH, Abdul Rahman NA. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *J Anim Sci Biotechnol*. 2019;10:57.
- [2] Li N, Jiao F, Pan X, Ding Y, Feng J, Bao X. Size effects of ZnO nanoparticles in bifunctional catalysts for selective syngas conversion. *ACS Catal*. 2018;9(2):960–6.
- [3] Strunk J, Kähler K, Xia X, Muhler M. The surface chemistry of ZnO nanoparticles applied as heterogeneous catalysts in methanol synthesis. *Surf Sci*. 2009;603(10–12):1776–83.
- [4] Wahab R, Hwang IH, Kim YS, Musarrat J, Siddiqui MA, Seo HK, et al. Non-hydrolytic synthesis and photo-catalytic studies of ZnO nanoparticles. *Chem Eng J*. 2011;175:450–7.
- [5] Hegde VN, MV V, PT M, HB C. Study on structural, morphological, elastic and electrical properties of ZnO nanoparticles for electronic device applications. *J Sci Adv Mater Devices*. 2024;9(3).

- [6] Djurišić AB, Ng AMC, Chen XY. ZnO nanostructures for optoelectronics: material properties and device applications. *Prog Quantum Electron.* 2010;34(4):191–259.
- [7] Gbur T, Čuba V, Múčka V, Nikl M, Knížek K, Pospíšil M, et al. Photochemical preparation of ZnO nanoparticles. *J Nanopart Res.* 2011;13(10):4529–37.
- [8] Sun L, Wang Y, Wang R, Wang R, Zhang P, Ju Q, et al. Physiological, transcriptomic, and metabolomic analyses reveal zinc oxide nanoparticles modulate plant growth in tomato. *Environ Sci Nano.* 2020;7(11):3587–604.
- [9] Garza-Alonso CA, Juarez-Maldonado A, Gonzalez-Morales S, Cabrera-De la Fuente M, Cadenas-Pliego G, Morales-Diaz AB, et al. ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon.* 2023;9(1):e12787.
- [10] Lin D, Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ Pollut.* 2007;150(2):243–50.
- [11] Tymoszuik A, Wojnarowicz J. Zinc oxide and zinc oxide nanoparticles impact on in vitro germination and seedling growth in *Allium cepa* L. *Materials (Basel).* 2020;13(12):2744.
- [12] Mirakhorli T, Ardebili ZO, Ladan-Moghadam A, Danaee E. Bulk and nanoparticles of zinc oxide exerted their beneficial effects by conferring modifications in transcription factors, histone deacetylase, carbon and nitrogen assimilation, antioxidant biomarkers, and secondary metabolism in soybean. *PLoS One.* 2021;16(9):e0256905.
- [13] Xun H, Ma X, Chen J, Yang Z, Liu B, Gao X, et al. Zinc oxide nanoparticle exposure triggers different gene expression patterns in maize shoots and roots. *Environ Pollut.* 2017;229:479–88.
- [14] Pejam F, Ardebili ZO, Ladan-Moghadam A, Danaee E. Zinc oxide nanoparticles mediated substantial physiological and molecular changes in tomato. *PLoS One.* 2021;16(3):e0248778.

- [15] Faizan M, Bhat JA, Chen C, Alyemeni MN, Wijaya L, Ahmad P, et al. Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato. *Plant Physiol Biochem.* 2021;161:122–30.
- [16] Wang XP, Li QQ, Pei ZM, Wang SC. Effects of zinc oxide nanoparticles on the growth, photosynthetic traits, and antioxidative enzymes in tomato plants. *Biol Plant.* 2018;62(4):801–8.
- [17] Pedruzzi DP, Araujo LO, Falco WF, Machado G, Casagrande GA, Colbeck I, et al. ZnO nanoparticles impact on the photosynthetic activity of *Vicia faba*: effect of particle size and concentration. *NanoImpact.* 2020;19:100246.
- [18] Faizan M, Faraz A, Yusuf M, Khan ST, Hayat S. Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. *Photosynthetica.* 2018;56(2):678–86.
- [19] Yin H, Casey PS, McCall MJ, Fenech M. Effects of surface chemistry on cytotoxicity, genotoxicity, and the generation of reactive oxygen species induced by ZnO nanoparticles. *Langmuir.* 2010;26(19):15399–408.
- [20] Kumari M, Khan SS, Pakrashi S, Mukherjee A, Chandrasekaran N. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *J Hazard Mater.* 2011;190(1–3):613–21.
- [21] Malik A, Alshehri MA, Alamery SF, Khan JM. Impact of metal nanoparticles on the structure and function of metabolic enzymes. *Int J Biol Macromol.* 2021;188:576–85.
- [22] A S, A S, N M. Role of zinc nutrition for increasing zinc availability, uptake, yield, and quality of maize (*Zea mays* L.) grains: an overview. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2020;51(15):2001–21.
- [23] Xie J, Wang H, Duan M, Zhang L. Synthesis and photocatalysis properties of ZnO structures with different morphologies via hydrothermal method. *Appl Surf Sci.* 2011;257(15):6358–63.
- [24] Gerbreder V, Krasovska M, Sledovskis E, Gerbreder A, Mihailova I, Tamanis E, et al. Hydrothermal synthesis of ZnO nanostructures with controllable morphology change. *CrystEngComm.* 2020;22(8):1346–58.

- [25] Laudise RA, Ballman AA. Hydrothermal synthesis of zinc oxide and zinc sulfide. *J Phys Chem*. 2002;64(5):688–91.
- [26] Hasnidawani JN, Azlina HN, Norita H, Bonnia NN, Ratim S, Ali ES. Synthesis of ZnO nanostructures using sol-gel method. *Procedia Chem*. 2016;19:211–6.
- [27] Brayner R, Dahoumane SA, Yepremian C, Djediat C, Meyer M, Coute A, et al. ZnO nanoparticles: synthesis, characterization, and ecotoxicological studies. *Langmuir*. 2010;26(9):6522–8.
- [28] Jadoun S, Chauhan NPS, Zarrintaj P, Barani M, Varma RS, Chinnam S, et al. Synthesis of nanoparticles using microorganisms and their applications: a review. *Environ Chem Lett*. 2022;20(5):3153–97.
- [29] Mutukwa D, Taziwa RT, Khotseng L. A review of plant-mediated ZnO nanoparticles for photodegradation and antibacterial applications. *Nanomaterials* (Basel). 2024;14(14):1097.
- [30] Khanpara P, Jadeja Y. A complete review on medicinal plant: margosa tree. *J Med Plants Stud*. 2022;10(5):131–40.
- [31] Sekhar EC, Rao KSVK, Rao KMS, Alisha SB. A simple biosynthesis of silver nanoparticles from *Syzygium cumini* stem bark aqueous extract and their spectrochemical and antimicrobial studies. *J Appl Pharm Sci*. 2018;8(1):73–9.
- [32] Bhuyan T, Mishra K, Khanuja M, Prasad R, Varma A. Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles from *Azadirachta indica* for antibacterial and photocatalytic applications. *Mater Sci Semicond Process*. 2015;32:55–61.
- [33] Sangeetha G, Rajeshwari S, Venckatesh R. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by *Aloe barbadensis* Miller leaf extract: structure and optical properties. *Mater Res Bull*. 2011;46(12):2560–6.
- [34] Hassan MS, Naz N, Ali H, Ali B, Akram M, Ali B, et al. Morphoanatomical and physiological adaptations of *Triticum aestivum* L. against allelopathic extract of *Trianthema portulacastrum* L. (Horse purslane). *ACS Omega*. 2023;8(39):35874–83.
- [35] Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: properties, applications and toxicities. *Arab J Chem*. 2019;12(7):908–31.

- [36] Ezealisiji KM, Siwe-Noundou X, Maduelosi B, Nwachukwu N, Krause RWM. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Solanum torvum* (L) leaf extract and evaluation of the toxicological profile of the ZnO nanoparticles–hydrogel composite in Wistar albino rats. *Int Nano Lett.* 2019;9(2):99–107.
- [37] Gharpure S, Ankamwar B. *Albizia lebbeck*-mediated ZnO phytosynthesis and their non-antimicrobial and biocompatibility studies. *Appl Nanosci.* 2022;13(6):4497–513.
- [38] Saputra IS, Yulizar Y. Biosynthesis and characterization of ZnO nanoparticles using the aqueous leaf extract of *Imperata cylindrica* L. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2017;188:012014.
- [39] Ngoepe NM, Mbita Z, Mathipa M, Mketo N, Ntsendwana B, Hintsho-Mbita NC. Biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using *Monsonia burkeana* for use in photocatalytic, antibacterial and anticancer applications. *Ceram Int.* 2018;44(14):16999–7006.

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 ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินทุยย่อหน้าใหม่ ให้พินทุยบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินทุยบทความ

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 ตัวสัญลักษณ์ให้ใช้ 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 รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับใต้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2 , ... พินทุยหมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความจะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

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. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหมโดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2553.

3. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

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

4. การอ้างอิงเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

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

