

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol. 8 No. 2 July - December 2022

Research Article

- Kriging Mathematical Modelling of a Biogas Production from Anaerobic 78
Co-digestion of Napier Glass Silage, Cassava Pulp, Chicken Manure and Cow Dung
Supranee Laokhunkar and Thana Radpukdee
- Application of Artificial Intelligence to Product Forecasting in an 88
Beverage Industry
Terapong Chumanee and Komkrit Pitiruek
- Appropriate Thin Layer Drying Model for Paddy Drying with Pneumatic Dryer 99
Aphisik Pakdeekaew Krawee Treeamnuak and Tawarat Treeamnuak
- A Study on Sweet Basil Essential Oil Extraction using Microwave-Steam 110
Distillation System
Worapot Ngamchompoo and Siwadol Kanyakam
- Removal of Brilliant Green by Kaolin and Fly Ash Based Geopolymer 120
Saisamorn Lumlong Nuanyai Buapa Jakkrawut Kongon and Pornpan Pungpo
- Influence of Pulse Flow Drying Air on Paddy Drying with Pneumatic Dryer 131
Nuttapong Wongbubpa Krawee Treeamnuak and Tawarat Treeamnuak
- Comparative Study on Performance of Passive and Active Solar Dryer 144
*Sirichai Sirichana Songsupa Pumchumpol Umphisak Teeboonma
Apinunt Namkhat and Pathiwat Waramit*
- Study on Performance of Small Solar Water Pump for Household 157
*Kittiyaphon Pongpeera Songsupa Pumchupol Umphisak Teeboonma
Apinunt Namkhat and Praphanpong Somsila*
- A Study on the Mechanical Properties of Maize plant for Design 169
Cutting Machine of Maize Plant
*Chainarong Lomchangkum Chaiyan Junsiri Prayoon Jomlaperatikul
Arapon Jomlaperatikul Dechawut Manklang and Prasit Sopa*
- Development of Trajectory Control Algorithm for a Para Rubber 179
Tapping Manipulator
*Yongyuth Sengdang Kamonchanon Vongstan Chattarin Ruangchoho
Mongkol Kataphan and Payungsak Junyusen*



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร

วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี

การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol. 8 No. 2 July - December 2022

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

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
ผศ.ดร. กัลยากร	ขวัญมา	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.วาธิส	ลีลาภัทร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ธนา	ราษฎร์ภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.วีรชัย	อาจหาญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.นิยม	กำลังดี	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.คำรณ	พิทักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.วิภาดา	สนองราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.สิริวิชัย	เดชะเจษฎารังสี	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ฤกษ์ชัย	ศรีวรมาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.จักรมาศ	เลาหวนิช	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.จำเริญ	เกณท์สาคร	ภาควิชาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บรรณาธิการ

ฝ่ายจัดการวารสาร

สำนักงาน

รศ.ดร. รัชพล สันติวรการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น

นางสาวบุญญา ไชยบท

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

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
Asst.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
Asst.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.Bhunyisa Chaiyabot

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. 090-024-4998 Email: feat.kku@gmail.com

บทบรรณาธิการ

เรียน ท่านสมาชิกวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
และผู้อ่านทุกท่าน



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (Farm Engineering and Automation Technology Journal: FEAT Journal) ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 ฉบับนี้เป็นปีที่ 8 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 10 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

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

รองศาสตราจารย์ ดร.รัชพล สันติวรากร

บรรณาธิการ

ratchaphon@kku.ac.th

23 ธันวาคม 2565

จริยธรรมของการตีพิมพ์ (Publication Ethics)

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติจะแต่งตั้งผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาคุณภาพของบทความบทความ บทความ อย่างน้อย 3 ท่าน ที่มีความเชี่ยวชาญหรือเกี่ยวข้องกับเนื้อหาของบทความและไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้แต่งบทความ โดยการประเมินผู้ทรงคุณวุฒิเป็นแบบ double blinded คือ มีการปกปิดชื่อเจ้าของบทความแก่ผู้ทรงคุณวุฒิ และเจ้าของบทความไม่ทราบชื่อของผู้ทรงคุณวุฒิ ผลการประเมินมี 5 แบบ คือ รับผิดชอบบทความ ให้ผู้แต่งแก้ไขโดยให้บรรณาธิการพิจารณาต่อ ให้ผู้แต่งแก้ไขโดยผู้ประเมินขอพิจารณาอีกครั้ง ให้ผู้แต่งส่งบทความให้วารสารอื่น และไม่รับผิดชอบบทความ ดังนั้น เพื่อให้การสื่อสารทางวิชาการเป็นไปอย่างถูกต้อง สอดคล้องกับมาตรฐานการตีพิมพ์นานาชาติ จึงได้กำหนดจริยธรรมของการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยไว้สำหรับการดำเนินงานของวารสาร โดยทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์อย่างเคร่งครัด ตามบทบาทหน้าที่ดังนี้

บทบาทหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผลงานของผู้เขียนต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่นหากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของตนเองรวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ

3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสาร
4. ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคนต้องเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัยจริง
5. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมาเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาบทความของตนเอง

6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ทุหลังจากการได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว

7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์กับวารสารทุกบทความโดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
2. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้เขียนในด้านเชื้อชาติ เพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้เขียน
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียนหรือผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
4. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประโยชน์ของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่แจ้งแลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียน
5. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องคำนึงถึงคุณภาพบทความเป็นหลักพิจารณาบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการโดยปราศจากอคติหรือความคิดเห็นส่วนตัว และไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียน
2. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากผลงานทางวิชาการที่ตนเองได้ทำการประเมิน
3. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานวิชาการที่รับประเมินอย่างแท้จริง
4. หากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบพบว่าบทความที่รับประเมินเป็นบทความที่คัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
5. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาประเมินที่กำหนด รวมถึงไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องได้รับรู้

บทความวิจัย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจริงของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของหญ้าเนเปียร์ไซเลจ กากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัวสุปรานี เหล่าขุนคำ และ ธนา ราชวรวิภา	78
การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการพยากรณ์สินค้าในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม	88
ธีระพงษ์ ชุมณี และ คมกฤษ ปิติฤกษ์	
แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	99
อภิลิณี รักดีแก้ว กระวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค	
การศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาโดยใช้ระบบกลั่นแบบใช้อิอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ	110
วรวจน์ งามชมภู และ ศิวดล กัญญาคำ	
การกำจัดสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและถั่วลย	120
สายสมร ลำลอง นวลใย บัวภา จักรวาล คงอ่อน และ พรพรรณ พึ่งโพธิ์	
อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	131
ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา กระวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค	
การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติและแบบบังคับ	144
ศิริชัย ศิริชนะ ทรงสุภา พุ่มชุมพล อำไพศักดิ์ ทีปัญญา	
อภิวัฒน์ นามเขต และ ปฎิวัติ วรามิตร	
การศึกษาสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับครัวเรือน	157
กิตติยาพร พงศ์พีระ ทรงสุภา พุ่มชุมพล อำไพศักดิ์ ทีปัญญา	
อภิวัฒน์ นามเขต และ ประพันธ์พงษ์ สมคิด	
การศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพดเพื่อออกแบบเครื่องสับต้นข้าวโพด	169
ชัยณรงค์ หล่มช้างคำ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ ประยูร จอมหล้าพิริติกุล	
อาภาภรณ์ จอมหล้าพิริติกุล เดชาวัต มั่นกลาง และ ประสิทธิ์ ไสภา	
การพัฒนาขั้นตอนวิธีในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับแขนกลกรีดยางพารา	179
ยงยุทธ์ เสียงดัง กมลชนน วงศ์สถาน ฉัตริน เรืองจอหอ	
มงคล คราพันธ์ และ พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ	

Research Article

Kriging Mathematical Modelling of a Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Napier Glass Silage, Cassava Pulp, Chicken Manure and Cow Dung	78
<i>Supranee Laokhunkar and Thana Radpukdee</i>	
Application of Artificial Intelligence to Product Forecasting in an Beverage Industry	88
<i>Terapong Chumanee and Komkrit Pitiruek</i>	
Appropriate Thin Layer Drying Model for Paddy Drying with Pneumatic Dryer	99
<i>Aphisik Pakdeekaew Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk</i>	
A Study on Sweet Basil Essential Oil Extraction using Microwave-Steam Distillation System	110
<i>Worapot Ngamchompoo and Siwadol Kanyakam</i>	
Removal of brilliant green by kaolin and fly ash based geopolymer	120
<i>Saisamorn Lumlong Nuanyai Buapa Jakkrawut Kongon and Pompan Pungpo</i>	
Influence of Pulse Flow Drying Air on Paddy Drying with Pneumatic Dryer	131
<i>Nuttapong Wongbubpa Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk</i>	
Comparative Study on Performance of Passive and Active Solar Dryer	144
<i>Sirichai Sirichana Songsupa Pumchumpol Umphisak Teeboonma</i>	
<i>Apinunt Namkhat and Pathiwat Waramit</i>	
Study on Performance of Small Solar Water Pump for Household	157
<i>Kittiyaphon Pongpeera Songsupa Pumchupol Umphisak Teeboonma</i>	
<i>Apinunt Namkhat and Praphanpong Somsila</i>	
A Study on the Mechanical Properties of Maize plant for Design Cutting Machine of Maize plant	169
<i>Chainarong Lomchangkum Chaiyan Junsiri Prayoon Jomlaperatikul</i>	
<i>Arpapon Jomlaperatikul Dechawut Manklang and Prasit Sopa</i>	
Development of Trajectory Control Algorithm for a Para Rubber Tapping Manipulator	179
<i>Yongyuth Sengdang Kamonchanon Vongstan Chattarin Ruangchoho</i>	
<i>Mongkol Kataphan and Payungsak Junyusen</i>	



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจิงของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก ร่วมของหญ้าเนเปียร์ไซเลจ กากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัว

Kriging Mathematical Modelling of a Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of
Napier Glass Silage, Cassava Pulp, Chicken Manure and Cow Dung

สุปราณี เหล่าขุนคำ^{1)*} และ ธนา ราชภูริภักดี²⁾

Supranee Laokhunkar¹⁾ and Thana Radpukdee²⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹⁾ Department of Innovation Engineering Faculty of Engineering Khon Kaen University

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

Received: 30 March 2022

Revised: 16 August 2022

Accepted: 22 September 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจิงมาหาความสัมพันธ์ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการเดินระบบที่ใช้วัตถุดิบหลายชนิดเติมผสมกันในสัดส่วนไม่คงที่ขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาลของวัตถุดิบ ทำให้ความสัมพันธ์ของระบบมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีความไม่แน่นอนสูง แบบจำลองครึ่งจิงมีประสิทธิภาพในการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นใช้ในการประมาณค่าฟังก์ชันจากข้อมูลผลเฉลย จึงได้นำข้อมูลที่มีปัจจัยต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากระบบอัตโนมัติของระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ และปริมาณการเติมวัตถุดิบแต่ละชนิด (หญ้าเนเปียร์ไซเลจ กากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัว) นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจิง พบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแบบจำลองผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนมากที่สุดคือ กากมันสำปะหลัง และมีผลน้อยที่สุดคือ มูลวัว จากนั้นได้สอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลการทำงานจริงจากระบบ พบว่า แบบจำลองทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 1.42% และ

1.25% ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) 0.9981 และ 0.9973 ตามลำดับ แบบจำลองที่ได้จึงสามารถใช้ทำนายได้ และสามารถใช้แทนพฤติกรรมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การย่อยสลายร่วม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองคริจิจ

Abstract

In this paper, a Kriging model was applied to determine the relationship of a biogas production system. The operating system used various raw materials mixed and was not fed in constant proportion depending on the season of the raw materials. This causes the relationship of the system to be non-linear and highly uncertain. The Kriging model was chosen because it is highly efficient for describing nonlinear relationships and is an interpretable model that was trained to approximate the predictions of a black-box model. Therefore, the data that affects a biogas production factor from the automation system was used. Napier grass silage, cassava pulp, chicken manure, cow dung and the biogas production temperature were variables to build the Kriging model. As a result, the most significant variables affecting biogas production model and methane content model was cassava pulp and the least effect was cow dung. The models were calibrated with actual operating data. As a result, the biogas production prediction model and methane content prediction model had an RMSE (root mean square error) of 1.42% and 1.25% respectively and had an r^2 (correlation coefficient) of 0.9981 and 0.9973 respectively. Therefore, the models can predict. Moreover, it can also represent the behavior of biogas production systems for optimization to control the biogas production system effectively in the future.

Keywords: Biogas system: Anaerobic co-digestion: Mathematical modelling: Kriging model

*ติดต่อ: E-mail: tthanar@gmail.com, supranee.l@kkumail.com

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญของการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย ซึ่งแหล่งกำลังการผลิตภายในประเทศมีอยู่อย่างจำกัดจึงได้ตระหนักในการแสวงหาพลังงานทดแทน ก๊าซชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่ง ผลิตจากพืช น้ำเสียและของเสีย

จากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร ชุมชน และฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียและช่วยในการรักษาสังแวดล้อม [1] ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซจากการย่อยสลายอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) 50-70%, คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 30-45%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), แอมโมเนีย (NH_3) 1-2% และความชื้น

1-5% [1] วัสดุดิบแต่ละชนิดประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันจึงทำให้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณและองค์ประกอบแตกต่างกัน [2-3] การใช้วัสดุดิบชนิดเดียวในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่อาจทำให้ระบบไม่เสถียรเนื่องจากจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ [4] หากใช้วัสดุดิบมากกว่า 2 ชนิด ทำให้ระบบมีความสมดุลของธาตุอาหารยิ่งขึ้น [5] การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดเปลี่ยนสารอินทรีย์กลายเป็นก๊าซชีวภาพ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จึงต้องการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ค่า pH และอุณหภูมิ [3] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกมาเกี่ยวข้อง เช่น การกวนผสมช่วยให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารอาหารมากขึ้น และช่วยระบายก๊าซชีวภาพที่อยู่ในช่องเหลว [6] โดยความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้มีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองคริจิจเป็นแบบจำลองที่ใช้หาความสัมพันธ์ของตัวแปรออกแบบและตัวแปรตามด้วยการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจะไม่เป็นอิสระแต่เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรออกแบบทำให้การประมาณค่าฟังก์ชันด้วยแบบจำลองคริจิจทำได้จากการเชื่อมโยงระหว่างการประมาณค่าแบบเฉพาะที่ (Local) และแบบวงกว้าง (Global) [7] นอกจากนี้ยังช่วยในการวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรออกแบบต่อผลการตอบสนอง [8-9] ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีในการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีนักวิจัยนิยมนำไปใช้ในการออกแบบงานวิศวกรรมที่ซับซ้อน [10] เช่น Lu et al. (2020) ใช้แบบจำลองคริจิจในการวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญและประยุกต์ใช้

ร่วมกับการหาค่าเหมาะสมสุดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบคานสะพาน [11] Zhao et al. (2021) ได้นำแบบจำลองคริจิจมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของไบโอชาร์ (Biochar) ได้อย่างแม่นยำ และได้ทราบถึงตัวแปรสำคัญของการดูดซับโลหะ [12] และ Zaefferer et al. (2016) ประยุกต์ใช้แบบจำลองคริจิจแทนพฤติกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพจากการเติมวัสดุดิบร่วมกันหลายชนิดเพื่อใช้ในการหาแนวทางการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด [13] การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่นิยมสร้างจากการออกแบบการทดลองแล้วนำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานจริง แต่ในการทำงานจริงก็ประสบปัญหาด้านข้อจำกัดต่างๆ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามผลการทดลอง

การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของบริษัทนอร์ทอีสต์รับเบอร์ จำกัด (มหาชน) มีการเติมวัสดุดิบผสมกันหลายชนิดในสัดส่วนไม่คงที่ขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาลของวัสดุดิบทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมีความไม่แน่นอน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำฐานข้อมูลการทำงานจริงของระบบผลิตก๊าซชีวภาพมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้แบบจำลองคริจิจ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจะช่วยให้สามารถควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิจัย

การศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ร่วมกับกากมันสำปะหลังและมูลวัว ได้ดำเนินการวิจัยดังนี้

2.1. ศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ มีลักษณะบ่อหมักเป็นถังปฏิกรณ์ 2 บ่อ วางซ้อนกันเป็นลักษณะวงแหวน แบ่งเป็นบ่อหมักวงนอกขนาด 7,500 ลบ.ม. และบ่อหมักวงในขนาด 4,200 ลบ.ม. มีการติดตั้งใบกวนรอบบ่อหมัก เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างทั่วถึง บ่อวงนอกติดตั้งใบกวนชนิด Paddle wheel เป็นใบกวนที่ผสมวัตถุดิบในแนวตั้งหรือผสมวัตถุดิบแบบบนลงล่าง ขนาด 25 แรงม้า ความเร็วพิกัด 1,000 รอบต่อนาที จำนวน 5 ชุด บ่อวงในติดตั้งใบกวนชนิด Long shaft เป็นใบกวนที่ทำให้เกิดการผสมวัตถุดิบรอบด้าน ขนาด 30 แรงม้า ความเร็วพิกัด 1,000 รอบต่อนาที จำนวน 5 ชุด ภายในบ่อหมักมีการติดตั้งท่อน้ำร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในบ่อหมักช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลาย วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ คือหญ้าเนเปียร์ไซเลจร่วมกับกากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัว ถูกบดลงบ่อหมักวงนอก น้ำหมักชีวภาพจากบ่อหมักวงนอกส่งเข้าไปยังบ่อหมักวงในด้วยการไหลล้น (Over flow) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากบ่อหมักวงนอกจะถูกส่งเข้าไปผสมกับก๊าซชีวภาพที่เกิดจากบ่อหมักวงในเพื่อทำให้อากาศชีวภาพมีคุณภาพใกล้เคียงกัน เก็บไว้ในโดมผ้าใบแบบ 2 ชั้นคลุมบนบ่อหมักวงใน น้ำหมักชีวภาพจากบ่อหมักวงในจะถูกส่งยังเครื่องแยกกากตะกอน น้ำและกากตะกอนที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ย และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะส่งไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า

2.2. เตรียมข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบคริจจิง (Kriging model) เป็นการประมาณค่าฟังก์ชันเป้าหมายจากจุดเทรนนิ่ง ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง

เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลการเดินระบบย้อนหลัง ในช่วงวันที่ 1 พฤษภาคม 2564 – 31 มกราคม 2565 ตัวแปรที่ใช้พิจารณาจากตัวแปรที่ถูกควบคุมผ่านระบบอัตโนมัติของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่ ปริมาณการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิ และการทำงานของใบกวน ในช่วงระยะเวลาดังกล่าวระบบมีการกวนสมบูรณ์ทำให้ไม่มีการปรับการทำงานของใบกวน ดังนั้นจึงไม่นำตัวแปรด้านการการทำงานของใบกวนมาพิจารณา ข้อมูลที่เก็บมาจากรู้นข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ หากสุ่มข้อมูลมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Train model) อาจทำให้แบบจำลองที่ได้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้นจึงนำข้อมูลมาทำการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี K-mean clustering เพื่อแบ่งกลุ่มให้ข้อมูลที่มีลักษณะใกล้เคียงกันจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน แล้วคัดเลือกข้อมูลที่เป็นจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Train model) ช่วยทำให้ข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองครอบคลุมโดเมนมากยิ่งขึ้น ในการทดลองนี้ได้แบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-mean clustering จำนวน 40 กลุ่ม ดังนั้นจึงได้ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองจำนวน 40 ชุด โดยมีข้อมูลสำหรับนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 1

2.3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบคริจจิง

สมการที่ใช้ในการทำนาย คือ

$$\hat{y}(x) = \hat{\mu} + \Psi^T \Psi^{-1}(y - 1\hat{\mu}) \quad (1)$$

เมื่อฟังก์ชันฐานหลัก (Basis function) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองคริจจิง (Kriging model) อยู่ในรูปแบบ

$$\psi^{(i)} = \exp\left(-\sum_{j=1}^k \theta_j |x_j^{(i)} - x_j|^{p_j}\right) \quad (2)$$

เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(n)}\}^T$ เมื่อ $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}^T$ และค่าฟังก์ชันของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ $\mathbf{y} = \{\mathbf{y}^{(1)}, \mathbf{y}^{(2)}, \dots, \mathbf{y}^{(n)}\}^T$ เมื่อ n คือจำนวนชุดข้อมูล และ k คือจำนวนตัวแปรของ $\mathbf{x}$ การหาค่าการทำนายที่จุด $\mathbf{x}$ ใหม่ ที่มีผลตอบแทนหรือค่าฟังก์ชันเป็นกระบวนการสุ่มแบบสุ่ม (Stochastic process) โดยใช้เซตของเวกเตอร์ตัวแปรสุ่ม แสดงดังนี้

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y(\mathbf{x}^{(1)}) \\ \vdots \\ Y(\mathbf{x}^{(n)}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

ในการสุ่มจะมีค่าเฉลี่ยเป็น $\mathbf{1}\mu$ ($\mathbf{1}$ คือเวกเตอร์ของ 1 ขนาด $n \times 1$) มีฟังก์ชันสหสัมพันธ์ใดๆ จากผลเฉลี่ยในเมทริกซ์ออกแบบ แสดงโดยใช้ฟังก์ชันฐานหลักดังนี้

$$\text{cor}[Y(\mathbf{x}^{(i)}), Y(\mathbf{x}^{(l)})] = \exp\left(-\sum_{j=1}^k \theta_j |x_j^{(i)} - x_j^{(l)}|^{p_j}\right) \quad (4)$$

สามารถสร้างเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation matrix) ขนาด $n \times n$ ของข้อมูลทั้งหมด ได้ดังนี้

$$\Psi = \begin{pmatrix} \text{cor}[Y(\mathbf{x}^{(1)}), Y(\mathbf{x}^{(1)})] & \dots & \text{cor}[Y(\mathbf{x}^{(1)}), Y(\mathbf{x}^{(n)})] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cor}[Y(\mathbf{x}^{(n)}), Y(\mathbf{x}^{(1)})] & \dots & \text{cor}[Y(\mathbf{x}^{(n)}), Y(\mathbf{x}^{(n)})] \end{pmatrix} \quad (5)$$

และมีเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม คือ

$$\text{Cov}(\mathbf{Y}, \mathbf{Y}) = \sigma^2 \Psi \quad (6)$$

เมื่อเซตของตัวแปรสุ่ม ($\mathbf{Y}$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ร่วมกันบางอย่างและได้อธิบายในรูปเมทริกซ์ Ψ ซึ่งฟังก์ชันสหสัมพันธ์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างจุดตัวอย่าง $|x_j^{(i)} - x_j^{(l)}|$ ตัวแปร $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}^T$ เมื่อ $p_j \in [1, 2]$ และตัวแปร $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}^T$ เพื่อ

ลดความซับซ้อนในการคำนวณ ได้กำหนดให้ $\hat{\mathbf{p}}$ เป็นค่าคงที่ จากนั้นหาค่า $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ ด้วยวิธี Likelihood maximization โดยมีสมการ Likelihood คือ

$$L(\mathbf{Y}^{(1)}, \dots, \mathbf{Y}^{(n)} | \mu, \sigma) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp\left[-\frac{\sum (\mathbf{Y}^{(i)} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมเมทริกซ์สหสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$L = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2} |\Psi|^{1/2}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)^T \Psi^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

หา Likelihood maximization ด้วยการเพิ่มลอการิทึมแบบธรรมชาติ ดังนี้

$$\ln(L) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{n}{2} \ln(\Psi) - \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)^T \Psi^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{1}\mu)}{2\sigma^2} \quad (9)$$

หาอนุพันธ์สมการ (9) จะได้ค่า Maximum likelihood estimates (MLS) เมื่อ

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{1}^T \Psi^{-1} \mathbf{1}} \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu})^T \Psi^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{1}\hat{\mu})}{n} \quad (11)$$

แทนค่า $\hat{\mu}$ และ $\hat{\sigma}^2$ ในสมการ (9) และตัดเทอมของค่าคงที่ จะได้สมการที่เรียกว่า Concentrated ln-likelihood function ดังนี้

$$\ln(L) \approx -\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{n}{2} \ln(\Psi) \quad (12)$$

จากสมการ (12) พบว่าค่า $\ln(L)$ ขึ้นอยู่กับค่า Ψ เพียงอย่างเดียว โดยมีตัวแปรไม่ทราบค่าคือ $\boldsymbol{\theta}$ หาได้จากทำให้ Concentrated ln-likelihood function มีค่าสูงสุด ดังนี้

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \text{argmax}\left(-\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{n}{2} \ln(\Psi)\right) \quad (13)$$

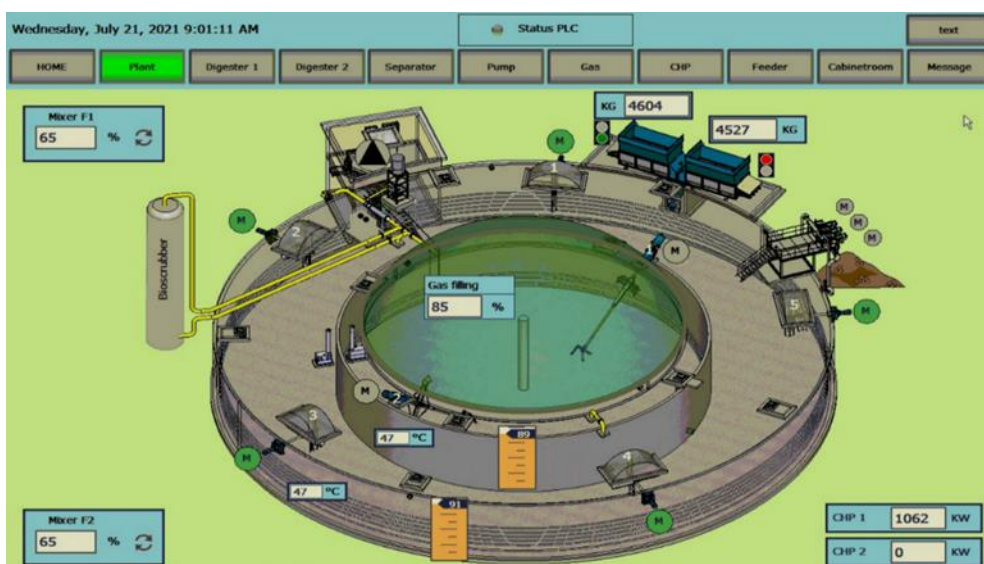
2.4. การสอบเทียบแบบจำลอง

จากแบบจำลองที่ได้นำมาสอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลการเดินระบบจริง โดยสุ่มจากข้อมูลในวันที่ 1 พฤษภาคม 2564 – 31 มกราคม 2565 จำนวน 40 วัน มาใช้ในการสอบเทียบ และวัดความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วยการหาค่า %RMSE และ r^2 ดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2}{n}} \quad (14)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \times 100\% \quad (15)$$

$$r^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n y^{(i)} \hat{y}^{(i)} - \sum_{i=1}^n y^{(i)} \sum_{i=1}^n \hat{y}^{(i)}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n y^{(i)2} - (\sum_{i=1}^n y^{(i)})^2][n \sum_{i=1}^n \hat{y}^{(i)2} - (\sum_{i=1}^n \hat{y}^{(i)})^2]}} \right)^2 \quad (16)$$



รูปที่ 1 ระบบควบคุมอัตโนมัติของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	คุณภาพวัตถุดิบ	
X	ตัวแปรออกแบบ					%TS	%VS
x_1	หญ้าเนเปียร์ไซเลท	ตัน/วัน	15.4	60.7 ± 18.3	112.8	23-30	85-90
x_2	กากมันสำปะหลัง	ตัน/วัน	-	20.5 ± 17.5	60.7	12-14	94-98
x_3	มูลไก่	ตัน/วัน	-	15.6 ± 10.3	40.9	50-70	80-85
x_4	มูลวัว	ตัน/วัน	-	3.5 ± 2.0	9.4	24-30	65-75
x_5	อุณหภูมิบ่อหมัก	°C	42.5	47.3 ± 3.3	52.5		
y	ค่าฟังก์ชันของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ						
y_1	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ลบ.ม./วัน	2,794	$8,005 \pm 3,586$	15,564		
y_2	มีเทน	%V/V	49.5	53.5 ± 1.6	56.3		

ตารางที่ 2 ค่า θ ของตัวแปรออกแบบ

ตัวแปร	หญ้าเนเปียร์ไซเลจ	กากมัน	มูลไก่	มูลวัว	อุณหภูมิตัวแปร
θ_{y_1} : ปริมาณก๊าซชีวภาพ	0.0274	0.8260	0.0970	0.0011	0.2317
θ_{y_2} : มีเทน	0.9883	3.1690	1.2711	0.1188	0.6481

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีครีจิจิงได้แบบจำลองสำหรับการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทน และได้ผลค่า θ เพื่อใช้วิเคราะห์ตัวแปรสำคัญต่อผลการตอบสนองของแบบจำลอง มีผลดังนี้

3.1. ตัวแปรสำคัญต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทน

จากผลการสร้างแบบจำลองครีจิจิง ได้ค่า θ ของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 2 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกความสำคัญของตัวแปรต่อผลการตอบสนอง แต่ไม่สามารถบอกปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ โดยตัวแปรที่มีค่า θ มาก แสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองมาก หากตัวแปรที่มีค่า θ น้อย แสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองน้อย

ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด คือ คือกากมันสำปะหลัง อุณหภูมิ มูลไก่ หญ้าเนเปียร์ไซเลจ และมูลวัว เรียงตามลำดับ กากมันสำปะหลังมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของกากมันสำปะหลังมีความไม่ซับซ้อนสามารถย่อยสลายง่าย เมื่อมีการเติมลงบ่อ หมักจึงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว

[14] เมื่อเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่น แต่มูลวัวมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด เนื่องจากมูลวัวเป็นวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วในกระเพาะวัวและนำมาย่อยต่อในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพจึงลดลง [15]

ตัวแปรที่มีผลต่อมีเทนมากที่สุด คือ กากมันสำปะหลัง มูลไก่ อุณหภูมิ หญ้าเนเปียร์ไซเลจ และมูลวัว เรียงตามลำดับ เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ไซเลจเป็นวัตถุดิบหลักมีการเติมในปริมาณมากเมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่น ทำให้ค่ามีเทนในระบบประมาณ 52-55% แต่เมื่อมีการเติมกากมันสำปะหลังซึ่งถูกย่อยสลายเร็วใน 1-2 วัน [14] ทำให้ค่ามีเทนลดลง 2-5% ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติม เพราะกากมันสำปะหลังมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก 60-75% [16] จากสมการ Stoichiometry [3] แป้งมีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลักเมื่อผ่านการย่อย สลายจึงได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มากทำให้สัดส่วนของมีเทนลดน้อยลง ส่วนมูลวัวส่งผลต่อมีเทนน้อยที่สุด เนื่องจากมูลวัวมีค่ามีเทนใกล้เคียงกับหญ้าไซเลจและผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อย [2] จึงทำให้มีเทนที่ผลิตแทบจะไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 3 ข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	คุณภาพวัตถุดิบ	
X	ตัวแปรรอบแบบ					%TS	%VS
x_1	หญ้าเนเปียร์ไซเลท	ตัน/วัน	16.2	51.2 ± 20.1	108.8	23-30	85-90
x_2	กากมันสำปะหลัง	ตัน/วัน	-	20.1 ± 15.4	56.5	12-14	94-98
x_3	มูลไก่	ตัน/วัน	-	11.5 ± 9.3	38.4	50-70	80-85
x_4	มูลวัว	ตัน/วัน	-	3.8 ± 2.4	9.1	24-30	65-75
x_5	อุณหภูมิบ่อหมัก	$^{\circ}\text{C}$	42.6	47.5 ± 3.2	52.2		
y	ค่าฟังก์ชันของเวกเตอร์ตัวแปรรอบแบบ						
y_1	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ลบ.ม./วัน	2,914	$7,971 \pm 4,114$	15,064		
y_2	มีเทน	%V/V	49.8	53.4 ± 1.6	56.3		

3.2. ผลการสอบเทียบแบบจำลอง

สอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลจากการเดินระบบจริง โดยสุ่มจากข้อมูลในวันที่ 1 พฤษภาคม 2564 – 31 มกราคม 2565 จำนวน 40 วัน โดยมีข้อมูลสำหรับนำมาสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ผลการทำนายของแบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่นำมาทดสอบ แบบจำลองทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 1.42% และ 1.25% ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) 0.9981 และ 0.9973 ตามลำดับ แบบจำลองครึ่งจริงถือเป็นหนึ่งในแบบจำลองทดแทน (Surrogate model) ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทดแทนที่ยอมรับได้เมื่อ %RMSE ไม่เกิน 10% Forrester et al. (2008) แนะนำว่า ค่า r^2 มากกว่า 0.8 ทำให้แบบจำลองทดแทนมีความสามารถในการทำนายได้ดี [8] ดังนั้นแบบจำลองทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนที่สร้างขึ้นจึงสามารถทำนายพฤติกรรมของระบบจริงได้

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจริง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเติมวัตถุดิบหลายชนิดผสมกัน (หญ้าเนเปียร์ไซเลท กากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัว) และอุณหภูมิต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้และค่ามีเทน ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลตอบแทนของแบบจำลองทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนมากที่สุด คือ กากมันสำปะหลัง และตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลตอบแทนน้อยที่สุด คือ มูลวัว แบบจำลองทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และสามารถทำนายการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ ประโยชน์จากการสร้างแบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) เพื่อควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท นอร์ทอีส รับเบอร์ จำกัด (มหาชน) ที่เชื้อเพื่อสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และ ข้อมูลในการทำวิจัย และโครงการแพลตฟอร์ม การศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนา นักศึกษาปริญญาโทและการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหาร และจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาการวิจัยและการสร้าง นวัตกรรม (บพค.) สำนักงานสภานโยบายการ อุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์บริการข้อมูลโครงการศึกษาวิจัย ต้นแบบวิสาหกิจชุมชนพลังงานสีเขียวจาก พืชพลังงาน (ก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน). คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืช พลังงาน. มิตรภาพการพิมพ์ 1995: กรุงเทพฯ; 2556.
- [2] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Guide to Biogas From production to use. 5th ed. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Gülzow-Prüzen; 2010.
- [3] Leung DYC, Wang J. An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. International journal of Green Energy 2016; 13(2): 119-31.
- [4] Pöschl M, Ward S, Owende P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. Applied Energy 2010; 87: 3305-21.
- [5] Parawira W, Murto M, Zvauya R, Mattiasson B. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. Renewable Energy 2004; 29: 1811-23.
- [6] Kariyama ID, Zhai X, Wu B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. Water Research 2018; 143: 503–17.
- [7] สุจินต์ บุรีรัตน์. การหาค่าเหมาะที่สุดของ ระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น: ขอนแก่น; 2556.
- [8] Forrester AIJ, Söbester A, Keane AJ, Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practice Guide. John Wiley & Sons: United Kingdom; 2008.
- [9] Gao Y, Wang X. An effective warpage optimization method in injection molding based on the Kriging model. International Journal Advance Manufacturing Technology 2008; 37: 953–60.
- [10] Simpson TW, Peplinski JD, Koch PN, Allen JK. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. Engineering with Computers 2001; 17: 129–50.

- [11] Lu P, Xu Z, Chen Y, Zhou Y. Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures* 2020; 214: 110641.
- [12] Zhao Y, Li Y, Fan D, Song J, Yang F. Bioresource Technology Application of kernel extreme learning machine and Kriging model in prediction of heavy metals removal by biochar. *Bioresource Technology* 2021; 329: 124876.
- [13] Zaefferer M, Gaida D, Bartz-beielstein T. Multi-fidelity modeling and optimization of biogas plants. *Applied Soft Computing* 2016; 48: 13–28.
- [14] Witchayapong C. The study for increasing of methane content in biogas production from cassava pulp [MSc Thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2017.
- [15] Kavuma C. Variation of Methane and Carbon dioxide yield in a biogas plant [MSc Thesis]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2013.
- [16] Lerdlattapom R, Phalakomkule C, Trakulvichean S, Songkasiri W. Implementing circular economy concept by converting cassava pulp and wastewater to biogas for sustainable production in starch industry. *Sustainable Environment Research* 2021; 31: 20.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการพยากรณ์สินค้าในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม Application of Artificial Intelligence to Product Forecasting in an Beverage Industry

ธีระพงษ์ ชูมณี^{1)*} และ คมกฤช ปีติฤกษ์²⁾Terapong Chumanee^{1)*} and Komkrit Pitiruek²⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹⁾ Program of Innovation Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand²⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Received: 23 March 2022

Revised: 20 May 2022

Accepted: 22 June 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับ การสร้างแบบการพยากรณ์ความต้องการและการกำหนดนโยบายสินค้าคงคลังที่เหมาะสมโดยนำข้อมูลการขายสินค้า 3 ปี ย้อนหลังตั้งแต่ ปี 2561-2663 มาพิจารณาถึงความเหมาะสมการกำหนดหรือจัดเก็บสินค้าคงคลังโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในรูปแบบเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) ในการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า หลังจากนั้นได้ทำการสร้างตัวแบบจำลองระดับคงคลังเป้าหมาย (Order Up to Level Model : OUL) ในการกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลสินค้าคงคลังในการลดต้นทุนในการบริหารจัดการสินค้าได้ ซึ่งผู้วิจัยพบว่าจากการทดสอบการนำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมาพยากรณ์สินค้าให้ค่าแม่นยำสูงโดยใช้การวัดค่าความคลาดเคลื่อน Root Mean Squared Error (RMSE) สำหรับสินค้าเบียร์ขนาด 620 มิลลิลิตร (CC 620 ml.) ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.1137 และสุราขนาด 700 มิลลิลิตร (BL 700 ml.) เท่ากับ 12.3654 ซึ่งหากค่าผลลัพธ์ค่า RMSE น้อยจะส่งผลให้ค่าพยากรณ์มีความแม่นยำยิ่งขึ้น หลังจากนั้นได้นำค่าพยากรณ์ที่ได้จากโมเดลการพยากรณ์

นำเข้ามากำหนดนโยบายสินค้าคงคลัง โดยพบว่าสามารถลดการจัดเก็บสินค้าคงคลังจากเดิมได้ถึง 40.84% ของการจัดเก็บสินค้าคงคลังแบบเดิมและหากพิจารณาถึงต้นทุนการจัดเก็บสามารถลดต้นทุนได้ถึง 280,278 บาทต่อเดือน โดยไม่ก่อผลให้เกิดภาวะสินค้าขาดมือทำให้สูญเสียโอกาสทางการขายได้

คำสำคัญ: การพยากรณ์ ปัญญาประดิษฐ์ โครงข่ายประสาทเทียม การจัดการสินค้าคงคลัง

Abstract

The purposes of this study were to represent the process of making the forecasting model and the appropriate setting of inventory management policy. The 3-years retrospective selling data from 2018 to 2020 were analyzed by artificial intelligence (AI) in Artificial Neural Networks (ANN) to predict the need of customer and then set up the Order Up to Level Model (OUL) to make proper inventory level management methods for increasing the efficiency while decreasing the cost of product and inventory cost. We found that the test using ANN to predict the product demands resulted in high accurate as Root Mean Squared Error (RMSE) criteria. As the results, it indicated that, for example, CC 620 ml provided RMSE of 0.1137 comparing to that of liquor BL 700 ml. which is 12.3654. The less of RMSE value, the more precision of forecasting result using this method. After obtained the results, we used these results as an input the inventory policy setting. Consequently, the percentage of inventory storage was decreased by 40.84% compared to the existing method. In the cost saving aspect, the storage cost was approximately reduced by 280,278 baht monthly without confronting the inventory shortage problem that causes the opportunity loss.

Keywords: Forecasting Model: Artificial Intelligence: Artificial Neuron Network: Inventory Management

*ติดต่อ: E-mail: tanterapong@gmail.com

1. บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มในการแข่งขันทางธุรกิจในตลาดอุตสาหกรรมเครื่องดื่มมีการแข่งขันค่อนข้างสูงจากข้อมูลในตลาดอุตสาหกรรมเครื่องดื่มในปี 2560 จะเห็นได้ว่าตลาดเครื่องดื่มในประเทศไทยมีปริมาณการบริโภคสินค้ารวมกว่า 7,477 ล้านลิตร โดยแบ่งเป็นตลาดเครื่องดื่มไม่มีแอลกอฮอล์และเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ สัดส่วน 72:28 คิดเป็นมูลค่าประมาณกว่า 5.7 แสนล้านบาทต่อปี ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้ม

การขายตัวและมีการแข่งขันอย่างรุนแรงทำให้ภาคอุตสาหกรรมเครื่องดื่มในปัจจุบันต้องมีการปรับตัวเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคให้รวดเร็วที่สุดในต้นทุนการบริหารจัดการที่ต่ำที่สุดและมีประสิทธิภาพประสิทธิผลสูงสุดในหลายๆ โดยการนำเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในการดำเนินธุรกิจเพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการแข่งขันทางธุรกิจส่งผลช่วยทำให้ธุรกิจมีการพัฒนาเติบโตอย่างต่อเนื่องในยุคปัจจุบัน ซึ่งการลงทุนเทคโนโลยีในการบริหารจัดการ

งานด้านโลจิสติกส์ถือเป็นหนึ่งอย่างที่หลากหลาย ๆ บริษัทให้ความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างมากในการนำเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการ ตั้งแต่การจัดซื้อ การผลิต การจัดการสินค้าคงคลัง การขนส่ง การบริการลูกค้า เป็นต้นตลอดทั้งซัพพลายเชนจะเห็นได้ว่าในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มมีการนำเทคโนโลยีหลากหลายเข้ามาประยุกต์หลากหลายมิติเพื่อสร้างความได้เปรียบให้กับธุรกิจ ซึ่งปัจจุบันหนึ่งในเทคโนโลยีที่เริ่มเข้ามามีบทบาทที่สำคัญคือการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาเพื่อสร้างความได้เปรียบในตลาดได้ดี ปัจจุบันเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มีหลากหลายขึ้นอยู่กับข้อมูลหรือเงื่อนไขที่จะมาทำการทำนายผลลัพธ์ในอนาคตที่ให้ความเหมาะสมและแม่นยำมากที่สุดเช่น 1. Decision Tree เหมาะสำหรับการจำแนกประเภทข้อมูล 2. Clustering เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม 3. Artificial Neural Network เหมาะสำหรับแก้ปัญหาการพยากรณ์ต่าง ๆ ข้อมูลทางสถิติให้มีความถูกต้อง

การพยากรณ์หรือการทำนายความต้องการสินค้าในอนาคตที่ถูกต้องและแม่นยำถือเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่จะใช้ในการวางแผนที่ส่งผลต่อการตัดสินใจการบริหารความเสี่ยงในด้านต่าง ๆ ของธุรกิจตลอดทั้งห่วงโซ่อุปทานขององค์กรได้อย่างเช่น วางแผนผลิต วางแผนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง วางแผนขนส่ง เป็นต้น หากการพยากรณ์มีถูกต้องแม่นยำจะส่งผลนำไปสู่ความได้เปรียบในการแข่งขันทางธุรกิจต่อไปในอนาคต(เอกจิตต์ จิงเจริญ.2560) ซึ่งในการพยากรณ์ด้วยวิธีทางสถิติเป็นวิธีการที่ใช้กันมาจนถึงในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ โดยผู้ที่ทำการพยากรณ์ทางสถิติจะต้องมีความรู้ความเข้าใจและความชำนาญอย่างมากเกี่ยวกับวิธีการเลือกใช้เทคนิคในการพยากรณ์ให้

เหมาะสมกับข้อมูลและหากขาดทักษะทางสถิติจะส่งผลทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นทำให้ผู้วิจัยจำนวนมากเริ่มหันมาใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Network) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์หรือการทำนายข้อมูลโดยที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่สนใจว่าข้อมูลมีความแจ่มแจ้งอย่างไรข้อมูลมีปัจจัยหรือสิ่งรบกวนภายนอกอย่างไรบางวิธีนี้จึงมีความยืดหยุ่นและให้ค่าความแม่นยำสูงกว่าการใช้เทคนิคทางสถิติและทางคณิตศาสตร์ทั่วไปโดยโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบการทำงานของโครงข่ายสมองมนุษย์ทำให้ผลที่แบบจำลองจะคล้ายคลึงกับการตัดสินใจของมนุษย์(บุษรา ลัมพิพัฒนางกูร.2549) ซึ่งผู้วิจัยจึงได้สนใจการนำเทคนิค Artificial Neural Network ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคด้านปัญญาประดิษฐ์ดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้กับการพยากรณ์การความต้องการสินค้าในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม โดยผู้วิจัยมองว่าหากมีการพยากรณ์การขายที่ดีจะส่งผลให้ทำให้สามารถลดต้นทุนการบริหารจัดการสินค้าคงคลังลงได้และยังสามารถตอบสนองความต้องการให้กับลูกค้าได้อย่างเหมาะสมและรวดเร็วซึ่งสร้างความได้เปรียบในธุรกิจได้ในอนาคต

ดังนั้นงานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการประยุกต์ปัญญาประดิษฐ์ในการพยากรณ์ยอดขายสินค้าและสร้างตัวแบบคณิตศาสตร์ในการจัดเก็บสินค้าให้เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง ซึ่งได้นำเสนอวิธีการพยากรณ์โดยนำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถในการเรียนรู้มาใช้ในการออกแบบจำลองการพยากรณ์ยอดขายสินค้า โดยใช้ข้อมูลจากการขายสินค้า

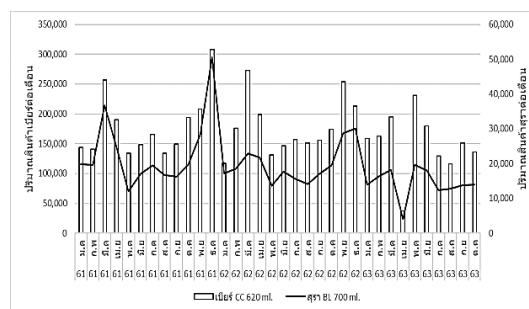
ย้อนหลัง 3 ปี ได้แก่ ข้อมูลยอดการขายสินค้าแบบรายเดือนและข้อมูลแบบรายปี เป็นต้น หลังจากนั้นได้ทำการสร้างตัวแบบจำลองระดับคงคลังเป้าหมาย (Order Up to Level Model : OUL) เพื่อกำหนดนโยบายระดับสินค้าคงคลังในการจัดเก็บสินค้าที่เหมาะสมเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าต่อไปในอนาคต

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งได้แก่ การพยากรณ์ยอดขายสินค้าเครื่องดื่มโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและนำผลลัพธ์จากการพยากรณ์ที่ให้ผลคลาดเคลื่อนที่แม่นยำไปกำหนดนโยบายสินค้าคงคลังโดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

2.1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษา มีการขายและจัดเก็บสินค้ามากกว่า 250 รายการโดยสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทได้แก่ กลุ่มสินค้าสุรา กลุ่มสินค้าเบียร์ และกลุ่มสินค้าไม่มีแอลกอฮอล์ ซึ่งหากพิจารณา ยอดการขายและยอดการจัดเก็บสินค้าจากทั้งหมดพบว่าสินค้าสุรา เบียร์ขนาด 620 มิลลิลิตร (CC 620 ml.) และสุราขนาด 700 มิลลิลิตร (BL 700 ml.) ซึ่งมีผลอย่างมากกับต้นทุนการจัดเก็บสินค้าที่มีสต็อกสินค้าค่อนข้างสูงดังนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มพิจารณาทำการวิจัยกับรายการสินค้าดังกล่าวโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลการขายสินค้าในอดีตย้อนหลัง 3 ปี ตั้งแต่ มกราคม พ.ศ.2561 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2563 ในฐานข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลการขายสินค้าเบียร์

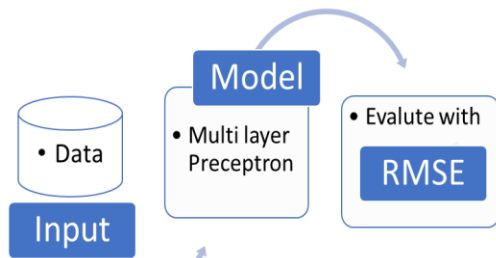
ขนาด 620 มิลลิลิตร และสุรา 700 มิลลิลิตร

ย้อนหลังตั้งแต่ปี 2561-2563

สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนบริหารจัดการคลังสินค้าซึ่งได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าจัดเก็บ ค่าเช่า โฟล์คลิฟท์ (Forklift) และอื่นๆ โดยทางบริษัทกรณีศึกษาได้คิดค่าบริหารจัดการคลังสินค้าในอัตรา 8 บาทต่อพาเลทต่อวัน ตามนโยบายของบริษัทซึ่งจะนำไปคำนวณต้นทุนการจัดเก็บต่อไป

2.2. การดำเนินการทดลอง

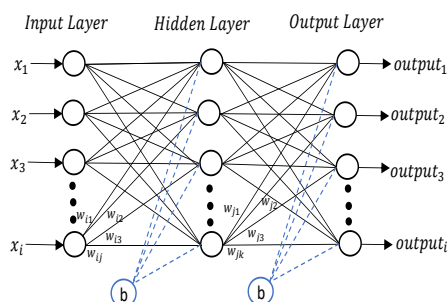
ในการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลในงานวิจัยนี้โดยใช้โปรแกรม Weka (Waikato Environment For Knowledge Analysis) เป็นโปรแกรมที่ทำเหมืองข้อมูลที่นิยมใช้ในการศึกษาและวิจัย โดยการใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมในลักษณะ Multilayer Perceptron ในการศึกษาประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ สำหรับการพยากรณ์หรือทำนายข้อมูลในอนาคต (เอ ดีหลี่. 2560.) ผู้วิจัยได้นำข้อมูลในข้อ 2.1 เข้าโปรแกรมเพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ จากนั้นวัดประสิทธิภาพของเทคนิคการพยากรณ์ด้วย Root Mean Squared Error (RMSE) ของความคลาดเคลื่อน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

2.3 การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนนี้มีส่วนสำคัญมากกับผลลัพธ์ของการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยต้องเลือกโมเดลที่มีความแม่นยำที่ดีที่สุดและค่าที่ได้ต้องผิดพลาดน้อยที่สุดซึ่งในการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์จะใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมหรือเรียกว่า (Artificial Neural Networks) มาใช้ในการสร้างโมเดลในรูปแบบลักษณะ Multilayer Perceptron จะมีการรับข้อมูลขาเข้าจาก Training Set แล้วส่งต่อข้อมูลในชั้นถัดไปผ่านทางเครือข่ายที่กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ในแต่ละเส้นทางเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ในแต่ละนิวรอลแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ในลักษณะ Multilayer Perceptron

โดยที่ X_i คือ ค่าของข้อมูลนำเข้าที่ i

w คือ ค่าของน้ำหนักระหว่างโหนด

i คือ จำนวนโหนดในชั้น Input Layer

j คือ จำนวนโหนดในชั้น Hidden Layer

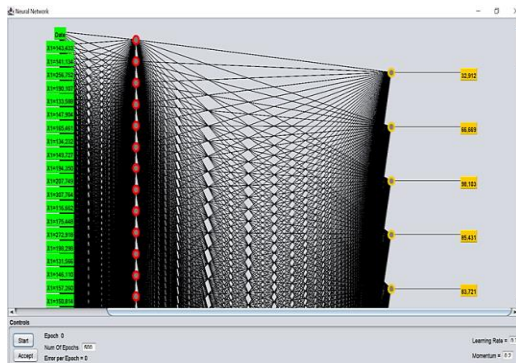
k คือ จำนวนโหนดในชั้น Output Layer

b คือ ค่าเบี่ยงเบน bias

กำหนดสมการเป้าหมาย แสดงดังสมการที่ (1)

$$k = \sum_{i=1}^n X_i * W_{ij} + b \quad (1)$$

โดยที่ k คือ ผลลัพธ์ของการพยากรณ์ และหลักการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียมเมื่อมีข้อมูลนำเข้า (Input) เข้ามายังเครือข่ายประสาทเทียม (Network) ก็นำ Input มาคูณกับค่าน้ำหนัก (Weight) ของแต่ละขาผลที่ได้จาก Input ทุก ๆ ขาของ Neuron จะมารวมกันแล้วนำมาเปรียบเทียบกับระดับการกระตุ้นต่ำสุดทำให้เกิดการตอบสนอง (Threshold) ที่กำหนดไว้ ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่า Threshold แล้ว Neuron จะส่งค่าผลลัพธ์ (Output) ออกไปและ Output ก็จะถูกส่งไปยัง Input ของ Neuron อื่น ๆ ก็จะเชื่อมใน Network จนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการจากนั้นจะต้องตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงใด หากพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงจะต้องมีการนำค่าความคลาดเคลื่อนนี้ไปปรับน้ำหนักการเรียนรู้ใหม่ (Weight) ซึ่งการเรียนรู้แบบนี้อาจจะต้องอาศัยการทำซ้ำหลายรอบจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนด จากนั้นทางผู้วิจัยได้เริ่มทำการทดสอบการสร้างโมเดลการพยากรณ์โดยใช้โปรแกรม Weka หลังจากนำข้อมูลเข้าระบบแล้วทางโปรแกรมจะทำการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังภาพที่ 4



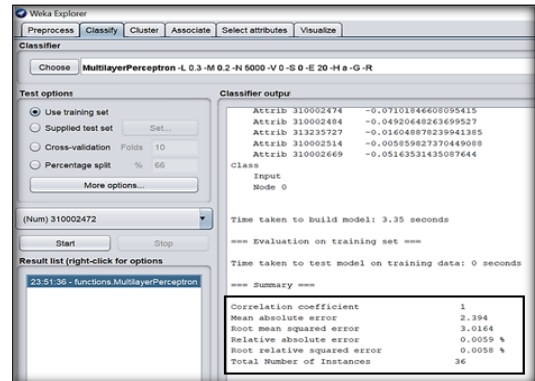
ภาพที่ 4 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากโปรแกรม Weka

โดยผู้วิจัยได้กำหนดค่าในการทดลอง ดังนี้ Learning rate 0.3, ค่า Momentum 0.2, ค่า Hidden Layer ไม่ได้กำหนดและสำหรับค่า Training Time จะแบ่งการทดสอบ ออกเป็น 4 ครั้ง โดยแบ่งเป็น 5000 รอบ, 6000 รอบ, 7000 รอบ และ 8000 รอบ ตามลำดับ เนื่องจากหากผู้วิจัยทดสอบด้วยจำนวนรอบที่ต่ำจะทำให้ข้อมูลการพยากรณ์ยิ่งมีความคลื่อนสูงและผลลัพธ์จะขาดความแม่นยำในการพยากรณ์ข้อมูลได้ โดยที่แบ่งสัดส่วนข้อมูลการทดสอบเป็นการเรียนรู้ (Train) และทดสอบ (Test) เท่ากับ 90:10 ซึ่งค่าที่ได้จากการสร้างโมเดลพยากรณ์มีผลต่อค่าความแม่นยำในทั้งการพยากรณ์ยอดขายและการกำหนดนโยบายการจัดเก็บสินค้าในอนาคตของบริษัทได้ โดยผู้วิจัยได้พิจารณาการวัดผลค่าความคลาดเคลื่อนจาก Root Mean Squared Error (RMSE) แสดงดังสมการที่ (2) โดยกำหนดให้ N คือจำนวนชุดข้อมูล ในการหาความแม่นยำโดยใช้โปรแกรม Weka

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{ค่าพยากรณ์}_i - \text{ค่าจริง}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

หากค่า RMSE มีค่าความคลาดเคลื่อนยิ่งน้อยจะส่งผลให้ค่าพยากรณ์มีความแม่นยำที่สูงและสามารถนำโมเดลดังกล่าวไปทำการทดสอบในการพยากรณ์ต่อไปได้ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ

การพยากรณ์จากโปรแกรม Weka

หลังจากนั้นโปรแกรมได้แสดงค่าพยากรณ์จากการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมได้แสดงดังภาพที่ 6

ARFF-Viewer - C:\Users\1026150\Desktop\33333.arff

33333.arff

Relation: data Test Set ALL MT 22_predicted

No	1: Month	2: 310002472	3: 310002474	4: 310002484	5: predicted313235727	6: 313235727
	Nominal	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric
1	Jan-18	143433.0	156936.0	61680.0	20615.411404	19772.0
2	Feb-18	141134.0	189759.0	70159.0	20133.510553	19661.0
3	Mar-18	256752.0	234912.0	92345.0	35946.998632	36664.0
4	Apr-18	190107.0	231440.0	73077.0	23981.357607	24545.0
5	May-18	133588.0	185334.0	66398.0	12007.196998	12009.0
6	Jun-18	147904.0	209225.0	74918.0	16170.772026	16966.0
7	Jul-18	165461.0	203198.0	73413.0	21271.826424	19480.0
8	Aug-18	134232.0	180155.0	68035.0	15749.926804	16743.0
9	Sep-18	149727.0	191336.0	72639.0	18236.580425	16160.0
10	Oct-18	194350.0	215326.0	74076.0	19900.355302	19665.0
11	Nov-18	207749.0	241767.0	90488.0	29351.049452	28406.0
12	Dec-18	307764.0	303200.0	110190.0	45689.477283	50516.0
13	Jan-19	116652.0	191475.0	74147.0	19089.15847	17192.0
14	Feb-19	175448.0	208674.0	84263.0	18727.400426	18507.0
15	Mar-19	272918.0	229714.0	86063.0	23444.296359	22954.0
16	Apr-19	198298.0	240800.0	89421.0	20742.854421	21758.0
17	May-19	131666.0	205280.0	66093.0	14699.132802	13674.0
18	Jun-19	145110.0	212152.0	77190.0	17432.696493	17575.0
19	Jul-19	157260.0	209081.0	80050.0	17747.437103	15561.0
20	Aug-19	150814.0	194315.0	73171.0	16173.690574	14109.0

ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างค่าที่ได้พยากรณ์

จากโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรม Weka

2.4 สร้างตัวแบบสินค้าคงคลัง (Inventory Model)

การกำหนดนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังภายในบริษัทกรณีศึกษายังเป็นการเก็บสินค้าโดยอาศัย Inventory Cover Day (CVD) ในการกำหนดนโยบายของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งการบริหารแบบดังกล่าวเป็นการนำ Stock มาหารกับข้อมูลการขายเฉลี่ยย้อนหลัง 30 วันเท่านั้นเพื่อดูความสามารถในการขายสินค้าได้กี่วัน โดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวนของยอดขายระหว่างวันและ Leadtime การขนส่งและการผลิตแต่อย่างใด ซึ่งส่งผลทำให้บริษัทพบปัญหาสินค้าขาด Stock (Out of Stock) ในบางช่วงเวลาอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าการกำหนดนโยบายดังกล่าวควรจะปรับเปลี่ยนนโยบายการจัดเก็บสินค้าในรูปแบบจำลองระดับคงคลังเป้าหมาย (Order Up to Level Model : OUL) แทนการจัดเก็บรูปแบบเดิมซึ่งโมเดล OUL ได้นำความแปรปรวนของยอดขายและ Leadtime การขนส่งและการผลิต มาพิจารณาเพิ่มเติมในการจัดเก็บสินค้าเพื่อรักษาระดับ Inventory ที่เหมาะสมในแต่ละสินค้าและสามารถช่วยตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ในอนาคตตามรายละเอียดดังภาพที่ 7

ความต้องการวัสดุแปรผัน เวลามาแปรผัน



ภาพที่ 7 แสดงแบบจำลอง

แบบจำลองระดับคงคลัง เป้าหมาย : OUL Model

โดยกำหนดให้

OUL คือ แบบจำลอง Order up to Level

ROP คือ จุดสั่งซื้อสินค้า

SS คือ สต็อกเพื่อความปลอดภัย (Safety Stock)

D คือ ค่าพยากรณ์อัตราความต้องการสินค้า

ต่อเดือน (ANN)

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยความต้องการสินค้าต่อวัน

LT คือ ระยะเวลารอคอยขนส่ง

LP คือ ระยะเวลารอคอยรอบการผลิต

σ_L คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะเวลานำ
ต่อวัน

σ_d คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการ
ต่อวัน

Z คือ ระดับการให้บริการ (Service Level
95%=1.64)

สามารถกำหนดสมการ ดังนี้

$$OUL = ROP + SS \quad (3)$$

$$ROP = \bar{d} * (LP + LT) \quad (4)$$

$$SS = Z * \sqrt{LT\sigma_d^2 + d^2 \sigma_L^2} \quad (5)$$

$$OUL = \bar{d} * (LP + LT) + Z * \sqrt{LT\sigma_d^2 + d^2 \sigma_L^2} \quad (6)$$

หลังจากนั้นได้นำค่าการทำนายข้อมูลการพยากรณ์จาก model โปรแกรม Weka นำค่าที่ได้แทนค่าในสมการโมเดล Inventory โดยใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณหาระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมในการจัดเก็บสินค้าให้เพียงพอต่อความต้องการลูกค้าต่อไป

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

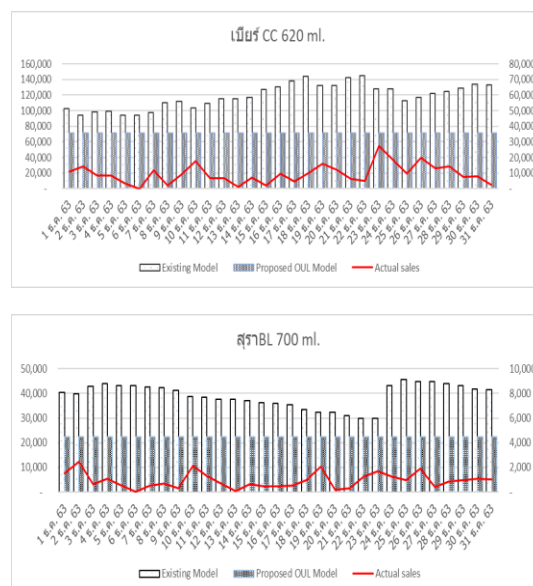
จากการศึกษาการพยากรณ์ยอดขายสินค้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์พบว่าจากโมเดลในการทดสอบ 4 ครั้ง ในรูปแบบลักษณะ Multilayer Perceptron โดยแบ่งเป็น 5000 รอบ, 6000 รอบ, 7000 รอบ และ 8000 รอบ ตามลำดับดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลค่า RMSE จากการทดลอง

ครั้งที่	ค่า Training Time (รอบ)	ค่า RMSE เปียร์ CC 620 ml.	ค่า RMSE สุรา BL 700 ml.
1	5,000	3.0164	191.4533
2	6,000	1.0178	112.8426
3	7,000	0.2608	43.9675
4	8,000	0.1137	12.3654

พบว่าสินค้าเปียร์ขนาด 620 มิลลิลิตร (CC 620 ml.) หากต้องการนำโมเดลการพยากรณ์ไปใช้ควรใช้ค่า Training Time 8000 รอบ ให้ค่าความคลาดเคลื่อน $RMSE = 0.1137$ สำหรับสินค้าสุราขนาด 700 มิลลิลิตร (BL 700 ml.) ควรใช้ค่า Training Time 8000 รอบ ให้ค่าความคลาดเคลื่อน $RMSE = 12.3654$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดจากการทดสอบ ทั้งหมด 4 รอบ โดยสังเกตจากค่า Root Mean Squared Error (RMSE) ซึ่งค่ายังมีค่าน้อยจะส่งผลทำให้โมเดลมีความคลาดเคลื่อนน้อย เนื่องจากจำนวนการวนรอบของค่า Training Time ที่สูงยิ่งทำให้ข้อมูลต้องมีการปรับน้ำหนักการเรียนรู้ใหม่ (Weight) ซึ่งการเรียนรู้แบบนี้จะต้องอาศัยการทำซ้ำหลายรอบจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนดเพื่อทำให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

หลังจากได้โมเดลการพยากรณ์และค่าผลลัพธ์ดังกล่าวแล้วนำค่าพยากรณ์จากโมเดลที่ได้เข้าไปทดสอบในแบบจำลอง Order Up to Level Model :OUL ต่อไปและจากข้อมูลบริษัทกรณีศึกษาในช่วงเดือนธันวาคม 2563 เนื่องจากเป็นช่วงที่ขายดีและมีการเก็บสินค้าที่สูงกว่าทุกเดือน รวมทั้งยอดความต้องการสินค้ามีความแปรปรวนสูงเพราะเป็นช่วง Hi-Season ของบริษัท ทางผู้วิจัยจึงได้สนใจนำข้อมูลช่วงเวลาดังกล่าวเข้ามาพิจารณาในการศึกษาและพบว่าสามารถลดปริมาณการการจกเก็บสินค้าได้โดยที่ไม่เกิดปัญหาสินค้าขาดมือ (Out of Stock) แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบระดับสินค้าคง

คลังก่อนและหลังการปรับปรุง

จากการเปรียบเทียบหลังจากการปรับปรุงพบว่าทางบริษัทกรณีศึกษาสามารถลดต้นทุนบริหารจัดการได้สินค้าคงคลังโดยไม่ก่อให้เกิดภาวะสินค้าขาดมือซึ่งจะทำให้สูญเสียโอกาสทางการขายสินค้าให้กับลูกค้าได้ถึง 40.84% ในเดือนธันวาคม 2563 ซึ่งบริษัทกรณีศึกษามีต้นทุนการจัดเก็บสินค้าที่ 8 บาทต่อพาเลทต่อวัน และเมื่อพิจารณาจากจำนวนพาเลทที่ลดลงสะสมตลอดเดือนเท่ากับ 35,034 พาเลทต่อเดือน นำจำนวนพาเลทที่ลดลงมาคูณด้วยต้นทุนการจัดเก็บสินค้าต่อวันบริษัทสามารถลดต้นทุนบริหารจัดการในการจัดเก็บ 280,278 บาทต่อในเดือนธันวาคม 2563

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอประสิทธิภาพของการพยากรณ์โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และได้มีการวัดค่าความคลื่อนของตัวแบบการพยากรณ์ RMSE ในการหาความแม่นยำผ่านโปรแกรม Weka ในการทดสอบพบว่า สินค้าเบียร์ขนาด 620 มิลลิลิตร (CC 620 ml.) ที่ค่า Training Time 8,000 รอบ ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE = 0.1137 และสำหรับสินค้าสุราขนาด 700 มิลลิลิตร (BL 700 ml.) ค่า Training Time 8,000 รอบ ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE = 12.3654 ซึ่งเป็นค่าที่ดีและแม่นยำที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพของตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากสำหรับการสร้างตัวแบบหากมีข้อมูลที่น้อยจะทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ลดลงได้ เมื่อได้ผลลัพธ์ค่าพยากรณ์จากโมเดลดังกล่าวแล้วนำค่าพยากรณ์ดังกล่าวเข้าไปทดสอบโมเดลตัวแบบสินค้าคงคลังพบว่าหลังจากมีการปรับปรุงนโยบาย

การจัดเก็บสินค้าในรูปแบบใหม่ Order Up to Level Model สามารถลดการจัดเก็บสินค้าคงคลังสำหรับสินค้าเบียร์ขนาด 620 มิลลิลิตร (CC 620 ml.) และ สุรา BL 700 ml. ได้ถึง 35,034 พาเลท คิดเป็น 40.84% ของสินค้าคงคลังที่ลดลงเมื่อเทียบกับเดือน ธันวาคม 2563 หากพิจารณาถึงต้นทุนการจัดเก็บสินค้าตามนโยบายบริษัทที่คิดในอัตราการจัดเก็บ 8 บาทต่อพาเลทต่อวันสามารถลดต้นทุนได้ถึง 280,278 บาทต่อเดือน โดยไม่ก่อผลให้เกิดภาวะสินค้าขาดมือทำให้สูญเสียโอกาสทางการขายได้

ซึ่งหลังจากนี้ผู้วิจัยมีแผนที่จะวิจัยเพิ่มเติมกับการขยายกลุ่มสินค้านายอื่น ๆ ต่อไปนอกจากนี้ยังต้องมีการพัฒนาโมเดลพร้อมกับทดสอบตัวแบบการพยากรณ์อยู่เสมอเพื่อให้ตัวแบบมีความแม่นยำในการพยากรณ์และมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมดผู้วิจัยขอกราบขอบขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ คมกฤช ปิติฤกษ์ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาในงานวิจัยที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยตั้งแต่การเริ่มต้นพร้อมเสนอแนะแนวทางการทำงานวิจัยได้เป็นอย่างดีเพื่อให้งานวิจัยออกมามีคุณภาพและขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาและคณะทำงานในกลุ่มงานโครงการพัฒนาประสิทธิภาพของบริษัท กรณีที่ให้การสนับสนุนในทุนวิจัยหรือค่าปรึกษาที่ดีเสมอมาเพื่อให้การเขียนงานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ที่สุดจนกระทั่งสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กานต์สินี เจริญกิจวัชรชัย. ปัญญาประดิษฐ์กับการพยากรณ์ค่าจ้างแรงงานไทย. [วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2561.
- [2] นิพนธ์ ไตอินทร์. การพยากรณ์ความต้องการและการวางแผนสินค้าคงคลัง สำหรับสินค้าเครื่องดื่ม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต; 2556.
- [3] บุษรา ลัมพิพัฒนางกูร. การพยากรณ์โอกาสการสำเร็จการศึกษาของนักเรียน โดยใช้จินตคณิตกอธิมแบบหลายวัตถุประสงค์เปรียบเทียบกับระบบโครงข่ายประสาทเทียม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2549.
- [4] รสริน โคตรเสนา. การพยากรณ์ความต้องการสินค้าโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมของโรงงานผลิตขนมแห่งหนึ่ง. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต; 2563.
- [5] ไววิทย์ พานิชอักษร และ มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ. การพยากรณ์ยอดขายปลีกแก๊สรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาและโครงข่ายประสาทเทียม. วารสารวิทยาการและเทคโนโลยี 2560; 7(1): 42-9
- [6] ศุภเชษฐ์ กันนัม. การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพัฒนารูปแบบการพยากรณ์ยอดขายรถจักรยานยนต์ภายในประเทศไทย. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [7] นภัสสร สกุลประดิษฐ์. การจัดการสินค้าคงคลังในโรงงานผลิตและกระจายสินค้าแช่แข็ง. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2560.
- [8] ศุภโชค แสงสว่าง. การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับงานทางด้านการเกษตร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2559; 26(2): 319-31.
- [9] วรวิรัตน์ สงฆ์แป้น. การทำเหมืองข้อมูล Data Mining. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2560.
- [10] อัจฉรา จันวดี. วิธีการปรับปรุงการพยากรณ์ความต้องการวัตถุดิบและนโยบายการเติมเต็มวัตถุดิบคงคลังสำหรับโรงงานผลิตชิ้นรูปเหล็กหล่อแบบออกแบบตามคำสั่งซื้อ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2561.
- [11] เอ ดิห์ลี. การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ราคาบิตคอยน์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยโครงข่ายประสาทเทียม และการโปรแกรมเชิงพันธุกรรม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา; 2560.

- [12] David Scuse. Peter Reutemann. WEKA Experimenter Tutorial for Version 3-5-8. WEKA Manual; 2008.
- [13] Taghavifar H, Mardani A, HalehKarim-Maslak H and Kalbkhani H. Artificial neural network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil. *Applied Soft Computing*. 2013; 13(8): 3544–51.
- [14] Witchayapong C. The study for increasing of methane content in biogas production from cassava pulp [MSc Thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2017.
- [15] Kavuma C. Variation of Methane and Carbon dioxide yield in a biogas plant [MSc Thesis]. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2013.
- [16] Lerdlattaporn R, Phalakornkule C, Trakulvichean S and Songkasiri W. Implementing circular economy concept by converting cassava pulp and wastewater to biogas for sustainable production in starch industry. *Sustainable Environment Research* 2021; 31: 20.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

Appropriate Thin Layer Drying Model for Paddy Drying with Pneumatic Dryer

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว^{1)*} กระวี ตรีอำนรรค¹⁾ และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค²⁾Aphisik Pakdeekaew^{1)*} Krawee Treeamnuk¹⁾ and Tawarat Treeamnuk²⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี¹⁾ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.²⁾ School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

Received: 31 March 2022

Revised: 30 August 2022

Accepted: 6 September 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางแบบสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพาหะลม ข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น 26%w.b. ปริมาณ 20 kg อัตราการป้อนข้าวเปลือกเป็น 8.45 kg/min และอัตราการไหลของอากาศอบแห้งเท่ากับ 0.0631 m³/s คงที่ตลอดการทดสอบ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศ 70°C และ 80°C ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่นโดยมีค่า R² สูงถึง 0.999 และ 0.998 สำหรับการอบแห้งที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ และค่า RMSE ต่ำสุดเป็น 0.0083 และ 0.0115 สำหรับการอบแห้งที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง แบบจำลองเอมพิริคัล การอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องอบแห้งพาหะลม

Abstract

This research aims to evaluate an appropriate empirical thin layer mathematical model for the moisture ratio of paddy prediction in drying process with a pneumatic dryer. A 20 kg of paddy with initial moisture content 26%w.b. was used as a sample in this experiment. The drying process were tested at drying air temperature 70°C and 80°C under condition of paddy feed rate 8.45 kg/min and drying air flow rate of 0.0631 m³/s (constant throughout the experiment). The result found that Midilli s' model was most suitable for predicting the drying characteristics of paddy by a pneumatic dryer under drying air temperature conditions, 70°C and 80°C when compared to the other empirical models in this study. The highest R² of prediction from Midilli s' model is 0.999 and 0.998 for drying at 70°C and 80°C, respectively and the lowest RMSE is 0.0083 and 0.0115 for drying at 70°C and 80°C, respectively.

Keywords: Thin layer drying model: Empirical model: Drying of paddy: Pneumatic dryer

*ติดต่อ: aphisik.pdk@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 061-114-7950

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยมาอย่างช้านาน นอกจากนี้ ข้าวหอมมะลิของไทย ยังได้รับการขนานนามว่าเป็นข้าวดีที่สุดในโลกประจำปี 2020 และ 2021 จากการประกวดข้าวโลกซึ่งจัดขึ้นโดยผู้ค้าข้าวของสหรัฐอเมริกา [1] รางวัลที่ได้รับนี้เป็นหนึ่งในความภาคภูมิใจของคนไทยทั้งประเทศ จากยอดรวมสถิติการส่งออกสินค้ามาตรฐานข้าวหอมมะลิไทย ตามใบรับรองมาตรฐานสินค้า ปี 2564 (มกราคม - กันยายน) มีปริมาณการส่งออก 0.919 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่ารวมกว่า 24,290.33 ล้านบาท [2] ซึ่งสร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก

โดยทั่วไปแล้วเกษตรกรมักเก็บเกี่ยวข้าวเมื่อถึงระยะเวลาที่เหมาะสม โดยข้าวเปลือกซึ่งถูกเก็บเกี่ยวใหม่จะมีความชื้นสูงประมาณ 20 ถึง 25% มาตรฐานเปียก เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายและการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องดำเนินการลดความชื้นของข้าวเปลือกลงสู่ความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาอย่างทันท่วงที โดย International Rice Research Institute ได้ระบุถึงความชื้นข้าวเปลือกที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บในระยะเวลา 8 ถึง 12 เดือน ว่าข้าวเปลือกควรมีความชื้นไม่เกิน 14% นอกจากนี้หากต้องการเก็บไว้ใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ จำเป็นต้องลดความชื้นข้าวลงให้ต่ำกว่า 12% เพื่อรักษาข้าวไว้โดยไม่เสื่อมคุณภาพเมื่อเก็บรักษา

ในสภาพอากาศแวดล้อมทั่วไป [3] ด้วยข้อจำกัดของการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Conventional drying) ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกล (Mechanical drying) สำหรับอบแห้งข้าวเปลือกในปัจจุบันมากขึ้น [4]

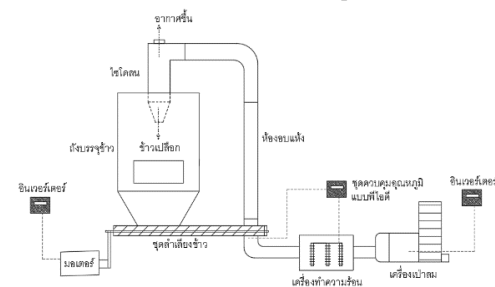
เครื่องอบแห้งพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งรูปแบบหนึ่งซึ่งได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นิยมใช้ทำแห้งวัสดุความชื้นสูงที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเนื่องจากเทคนิคการอบแห้งรูปแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง ทำให้การลดความชื้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว [5] ถึงแม้ว่าเทคนิคการอบแห้งพาหะลมจะมีข้อดีที่สามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว แต่การดำเนินการของเครื่องอบแห้งยังจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) ที่นิยมใช้กันอยู่ในระดับอุตสาหกรรม [6] ดังนั้นจึงมีความพยายามในการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการอบแห้งแบบพาหะลมน้อยอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน อาทิเช่น ศึกษาอิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม [7] การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม [8] การศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยพาหะลมและเกลียวลำเลียง [9] การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมหมุนเวียน [10] เป็นต้น การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งนับเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งในการพัฒนาระบบเครื่องอบแห้ง เพราะช่วยในการออกแบบและจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำกา

รทดลองได้ [11-13] การสร้างสมการเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับปัญหาการอบแห้งชั้นบางจึงเป็นที่นิยมน้อยกว่าแพร่หลายในปัจจุบัน [14-16] เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการใช้งานเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาแบบจำลองเอมพิริคัลแบบชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยแบบจำลองที่ได้จะมีประโยชน์ในการทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลม ซึ่งจะมีประโยชน์แก่การจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ต่อไป

2. วิธีการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

เครื่องอบแห้งพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมแก่การลดความชื้นวัสดุแบบอนุภาคด้วยหลักการทำงานที่ทำให้อนุภาคของแข็งประพติดตัวคล้ายคลึงกับของไหล ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลที่มีค่าค่อนข้างสูง [5] ทั้งนี้ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพาหะลมแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 1

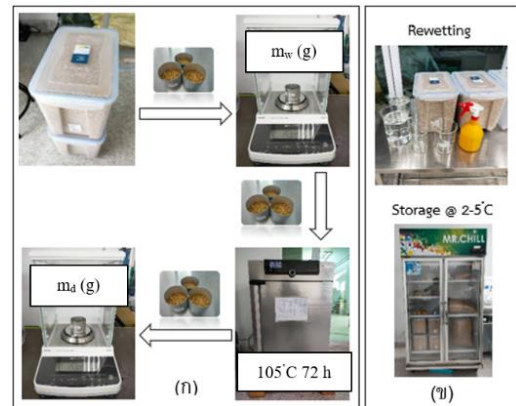


รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพาหะลม

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมดำเนินการโดยใช้เครื่องเป่าลมความดันสูงขนาด 1.5 kW ในการขับเคลื่อนอากาศผ่านเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาด 3 kW ความเร็วรอบของเครื่องเป่าลมและอุณหภูมิของอากาศอบแห้งถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Hitachi รุ่น WJ200 ขนาด 2.2 kW และชุดควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี รุ่น REX – C100 ตามลำดับ ในขณะที่ข้าวเปลือกจากถังบรรจุข้าวถูกลำเลียงด้วยชุดลำเลียงข้าวแบบสกรู มีต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 746 W ควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Hitachi รุ่น WJ200 ขนาด 2.2 kW เมื่อข้าวเปลือกถูกป้อนมายังทางเข้าของห้องอบแห้งจะถูกกระแสน้ำร้อนซึ่งมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) ทำให้ข้าวเปลือกลอยตัวขึ้นและมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับของไหล ขั้นตอนนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศร้อนกับข้าวเปลือกขึ้นตลอดความยาวของห้องอบแห้ง จนกระทั่งข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งถูกแยกออกจากกันโดยไซโคลน ข้าวเปลือกซึ่งมีมวลมากกว่าอากาศจะไหลเข้าสู่ถังบรรจุข้าวเพื่อรอการลำเลียงเข้าสู่ห้องอบแห้งในรอบถัดไป ขณะที่อากาศซึ่งมีมวลน้อยจะถูกแยกออกทางด้านบนดังรูปที่ 1

2.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับทดลอง

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับทดลอง โดยปรับความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีเติมน้ำกลับสู่วัสดุ (Rewetting) ในการทดลองนี้กำหนดให้ข้าวเปลือกมีค่าความชื้นเป็น 26%w.b. ใกล้เคียงกับข้าวชั้นข้าวเปลือกเก็บเกี่ยวใหม่



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับทดลอง

กระบวนการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มจากการนำข้าวเปลือกซึ่งผ่านการทำความสะอาดแล้วมาตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นตามสมการที่ 1 [4] ด้วยวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลากว่า 72 ชั่วโมง (แสดงดังรูปที่ 2ก) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมกลับเข้าไปยังข้าวเปลือก (Rewetting) ตามสมการที่ 2 [4] เพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ

$$M_{wb,initial} = \left(\frac{m_w - m_d}{m_w} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$m_{water} = \frac{0.01(m_w - m_d) - (M_{wb,target} \times m_w)}{(M_{wb,target} - 0.01)} \quad (2)$$

โดยที่

$M_{wb,initial}$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (%w.b.)

$M_{wb,target}$ คือ ความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (%w.b.)

m_w คือ มวลชื้นของข้าวเปลือก (g)

m_d คือ มวลแห้งของข้าวเปลือก (g)

m_{water} คือ มวลน้ำที่ใช้กำหนดความชื้นข้าว (g)

ทำการพ่นละอองน้ำตามปริมาณที่คำนวณได้ลงในข้าวเปลือก คลุกเคล้าให้ทั่วถึงกันแล้วเก็บข้าวเปลือกในภาชนะปิดสนิทและนำไปเก็บในห้องเย็น อุณหภูมิ 2 - 5°C เป็นเวลากว่า 24 ชั่วโมง ดังรูป 2ข ทำการนำข้าวเปลือกออกมาคลุกเคล้าวัสดุทุก 4 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นข้าวเกิดการแพร่กระจายตัวทั่วทั้งภาชนะบรรจุ [17]

2.3 การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C ตามลำดับ กำหนดอัตราการป้อนข้าวเปลือก 8.45 kg/min และอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งกับความเร็วของกระแสอากาศร้อน (วัดค่าโดย Digital Anemometer ยี่ห้อ BENETECH รุ่น GM8901) มีค่าเป็น 0.0631 m³/s คงที่ตลอดการทดสอบ ข้าวเปลือกซึ่งผ่านการเตรียมความชื้นเริ่มต้นดังหัวข้อ 2.2 ถูกนำมาอบแห้งแบบเป็นงวด (Batch) งวดละ 20 kg เป็นจำนวน 3 ซ้ำ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจากทางออกของไซโคลน จำนวน 3 ตัวอย่างทุก 10 นาที เพื่อนำไปหาค่าความชื้นด้วยวิธีอบลมร้อน ดังรูปที่ 2ก เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับพัฒนาแบบจำลองอบแห้งขึ้นบางต่อไป การทดลองนี้ดำเนินการไปจนกระทั่งข้าวเปลือกเหล่านั้นมีความชื้นเข้าสู่ความชื้นสมดุล จึงเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ

2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองอบแห้งขึ้นบาง

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับการอบแห้งแบบขึ้นบาง [16]

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pebis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
Two term	$MR = a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t)$
Midilli et al.	$MR = a \cdot \exp(-kt) + bt$
Wang and Singh	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) ที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลา (t) ในกระบวนการอบแห้ง ได้ถูกคัดเลือกมาจำนวน 7 แบบจำลอง (ตารางที่ 1) โดยที่ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เหลืออยู่ภายในวัสดุขณะกำลังอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำหรือความชื้นทั้งหมดที่อยู่ภายในวัสดุซึ่งสามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3

$$MR = \frac{M_{\text{time}} - M_{\text{eq}}}{M_{\text{initial}} - M_{\text{eq}}} \quad (3)$$

โดยที่

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_{time} คือ ความชื้นข้าวเปลือก ณ เวลาใด ๆ (%w.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%w.b.)

M_{initial} คือ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (%w.b.)

คำนวณหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองในตารางที่ 1 จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Levenberg - Marquardt Estimation Method) และสถิติด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

2.5 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

ประเมินแบบจำลองทั้ง 7 แบบ ด้วยการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ [16]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i, \text{experiment}} - MR_{i, \text{prediction}})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{i, \text{experiment}} - MR_{i, \text{average}})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{i, \text{experiment}} - MR_{i, \text{prediction}})^2}{n}} \quad (5)$$

โดยที่

$MR_{i, \text{experiment}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง

$MR_{i, \text{prediction}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทำนาย

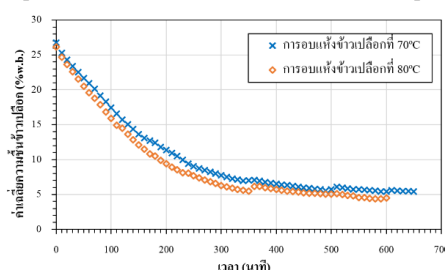
MR_{average} คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทำนายจำนวน n ตัวอย่าง

หากค่า R² ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 มากจะหมายถึงค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมาก โดยที่ค่า RMSE จะต้องมีความต่ำที่สุดแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมในการอธิบาย

การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลม พิจารณาได้จากการประเมินค่า R² ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดและค่า RMSE ที่เข้าใกล้ 0 มากที่สุด

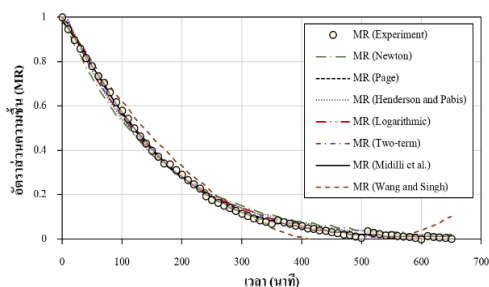
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง จากการทดลอง 3 ครั้ง ณ อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 3

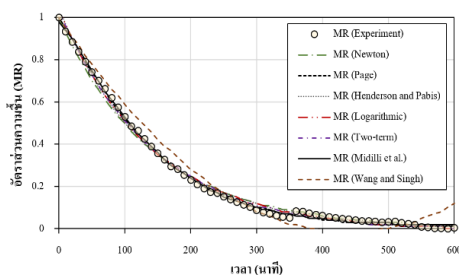


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกต่อเวลา ณ อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน

ความชื้นสมดุล (M_{eq}) จากข้อมูลการทดลอง ณ นาฬิกาที่ 600 ถูกนำมาใช้คำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (MR) และเปรียบเทียบผลกับรูปแบบสมการเอมพิริคัลให้ผลดังตารางที่ 2 โดยที่ 5.35%w.b. เป็นความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และ 4.36%w.b. เป็นความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 80°C ผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกที่เวลาใด ๆ ของการอบแห้งด้วยแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4 สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และรูปที่ 5 สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศ 80°C



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C



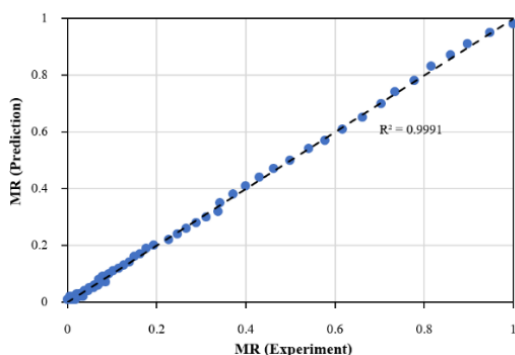
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการและผลความแม่นยำของแบบจำลองเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ

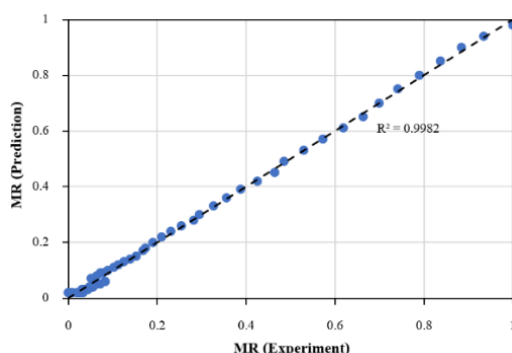
ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE
Newton	70°C	k = 0.006	0.990	0.0277
	80°C	k = 0.007	0.994	0.0222
Page	70°C	k = 0.002, n = 1.200	0.999	0.0093
	80°C	k = 0.003, n = 1.135	0.998	0.0127
Henderson and Pabis	70°C	k = 0.007, a = 1.064	0.994	0.0221
	80°C	k = 0.007, a = 1.046	0.995	0.0192
Logarithmic	70°C	k = 0.006, a = 1.077, c = -0.031	0.996	0.0178
	80°C	k = 0.007, a = 1.051, c = -0.013	0.996	0.0179
Two term	70°C	k ₁ = 0.004, k ₂ = 0.004, a = 43.594, b = -42.556	0.997	0.0161
	80°C	k ₁ = 0.005, k ₂ = 0.005, a = 43.228, b = -42.196	0.996	0.0167
Midilli et al.	70°C	k = 0.002, a = 0.980, b = 0.00000374, n = 1.241	0.999	0.0083
	80°C	k = 0.003, a = 0.982, b = 0.00002440, n = 1.200	0.998	0.0115
Wang and Singh	70°C	a = -0.004, b = 0.000004398	0.979	0.0411
	80°C	a = -0.005, b = 0.000005259	0.966	0.0509

เมื่อพิจารณาความสอดคล้องกันระหว่างผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นข้าวจากแบบจำลองที่วิเคราะห์ได้กับผลการทดลองจริง พบว่า แบบจำลองของ Page และ แบบจำลองของ Midilli et al. มีค่า R^2 สูงถึง 0.998 - 0.999 สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงอุณหภูมิ 70°C - 80°C และมีค่า RMSE ต่ำกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลแบบอื่น ๆ ผลที่กล่าวมานี้มีความสอดคล้องกับรูปที่ 4 และ 5 ถึงแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบ สามารถให้ผลการทำนายที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงในระดับที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาค่า R^2 ประกอบกับ RMSE จะเห็นว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C มากที่สุด เนื่องจากลักษณะกราฟของผลการทดลอง (การลดลงของ MR) มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างคงที่ในช่วงตั้งแต่ 0 - 100 นาที สำหรับการอบแห้ง ณ อุณหภูมิอากาศ 70°C และช่วงเวลาตั้งแต่ 0 - 50 นาที สำหรับการอบแห้งข้าว ณ อุณหภูมิอากาศ 80°C ภายหลังจากระยะเวลาดังกล่าว การถ่ายเทความชื้นจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือกจะถ่ายเทได้น้อยลง ทำให้เส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นกับเวลา มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลการทดสอบนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง [13]

ที่ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก ในลักษณะเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการของ Midilli et al. ($MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$) พบว่ารูปแบบดังกล่าวเป็นผลรวมระหว่างความสัมพันธ์แบบ Exponential (พจน์ $a \cdot \exp(-kt^n)$) กับความสัมพันธ์เชิงเส้น (พจน์ bt) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบบจำลองดังกล่าวเหมาะสมแก่การอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมจากการทดลอง นอกจากนี้ยังให้ค่า R^2 สูงถึง 0.999 และ 0.998 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และ 80°C ตามลำดับ และค่า RMSE ต่ำที่สุด (0.0083 และ 0.0115 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และ 80°C ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่นที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการศึกษานี้ สำหรับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลองถูกเปรียบเทียบดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้เหมาะสมกับการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 26%w.b. ภายใต้เงื่อนไขของป้อนข้าวเปลือกที่ 8.45 kg/min อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.0631 m^3/s และสภาวะอากาศควบคุมคงที่ 70°C และ 80°C ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพาหะลม ซึ่งใช้อบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 26% w.b. 20 kg

ซึ่งกำหนดให้อัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลของอากาศอบแห้งคงที่ตลอดการทดสอบ โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เงื่อนไขควบคุมอากาศอบแห้งคงที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ แบบจำลองอบแห้งชั้นบางได้รับการพัฒนาขึ้นจากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับสมการเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ เพื่อหาค่าคงที่ของสมการในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือก จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C มากที่สุดเมื่อเปรียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่นที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการศึกษานี้ ทั้งนี้ แบบจำลองดังกล่าวสามารถประเมินผลอัตราส่วนความชื้นข้าว ให้ค่า R² สูงถึง 0.999 และ 0.998 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และ 80°C ตามลำดับ และค่า RMSE ต่ำสุดเป็น 0.0083 และ 0.0115 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70°C และ 80°C ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ Agricultural Machinery Research Laboratory สาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยและให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association, editors. HOM MALI NAMED BEST RICE IN WORLD: Thai Hom Mali Rice was named the world's best rice at the 2021 World Rice Conference held in Dubai [Internet]. [cited 2022 Feb 12]. Available from: http://www.thairiceexporters.or.th/default_eng.htm
- [2] สถิติการส่งออกข้าวหอมมะลิไทย (รายประเทศ / เปรียบเทียบรายปี) เดือน กันยายน 2564. (สืบออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dft.go.th/th-th/DFT-Service-Service-Data-Information/Statistic-Import-Export/Detail-dft-service-data-statistic/ArticleId/20700/20700>.
- [3] Rice Knowledge Bank, IRRI. Moisture content for safe storage [Internet]. [cited 2022 March 12]. Available from: <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/storage/moisture-content-for-safe-storage>.
- [4] Chakraverty A and Singh RP. Postharvest technology and food process engineering. CRC Press; 2014.
- [5] สมชาติ โสภณธนฤทธิ. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: กรุงเทพฯ; 2540.
- [6] พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชนาค, มุสตาฟา ยะภา และ ประชา บุญยวนิชกุล. การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2557; 9(1): 68-74.
- [7] ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ตันภูสี, ฉัตรชัย นิยมผล, กิตติ สถาพรประสาธน์. อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2559; 11(1): 1-9.
- [8] จิตรารัตน์ จอกกิว. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2559.
- [9] วิโรจน์ ฤทธิ์ทอง, ไพศาล การถาง และ วัลลภ ภูผา. รายงานการวิจัยเรื่อง การศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยพาหะลมและเกลียวลำเลียง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2557.

- [10] เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, กระวี ตรีอำนาจ, เกียรติศักดิ์ ใจโต, จิตรารัตน์ จอกกิว, ธีรวัฒน์ ชื่นอัสดงคต, นากชนก ปรางปฐ และ เบญจวรรณ วานมนตรี. รายงานการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเทคนิคพาหะลมหมุนเวียน. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2562.
- [11] ปฎิวัติ วรามิตร, บัณฑิต กฤตาคม, นันทวัฒน์ วีระยุทธ, อำไพศักดิ์ ทินูญา และ โสภณ สิ้นสร้าง. แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2556; 6(1): 1-8.
- [12] ศิวกร ศรีัญญากร, กิรติ สุลักษณ์ และ ทวิช จิตรสมบุญ. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร. 2563; 14(2): 183-97.
- [13] กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด. วิศวกรรมลาดกระบัง. 2560; 34(4): 22-9.
- [14] ปฎิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อำไพศักดิ์ ทินูญา. การเปรียบเทียบแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนระหว่างแบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2553; 3(1): 60-8.
- [15] Pratummasoot N and Mundpookier T. The Study of Thin Layer Drying Model of Chili. Journal of Applied Research on Science and Technology. 2021; 20(2): 137-46.
- [16] สุเนตร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพูน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2554; 17(1): 59-66.
- [17] ประชา บุญยวานิชกุล. การประเมินกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2556; 5(9): 47-55.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากโหระพา
โดยใช้ระบบกลั่นแบบไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

A Study on Sweet Basil Essential Oil Extraction
using Microwave-Steam Distillation System

วรพจน์ งามชมภู^{1)*} และ ศิวดล กัญญาคำ¹⁾

Worapot Ngamchompoo^{1)*} and Siwadol Kanyakam¹⁾

¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

¹⁾ Management Engineering Sector, Faculty of Engineering, Rajabhat Mahasarakham University, THAILAND.

Received: 3 April 2022

Revised: 26 August 2022

Accepted: 27 August 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากโหระพา โดยใช้ระบบการกลั่นแบบไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยที่พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) ชุดกลั่นน้ำมันหอมระเหย 2) ชุดผลิตไอน้ำ และ 3) ชุดควบแน่นน้ำมันหอมระเหย เพื่อศึกษาศักยภาพของเทคนิคการสกัดนี้ สมรรถนะของกระบวนการกลั่นแบบไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ จึงถูกเปรียบเทียบกับกระบวนการกลั่นแบบไอน้ำอย่างเดียวแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการกลั่นแบบไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบไอน้ำอย่างเดียว สามารถผลิตน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่กระบวนการกลั่นแบบไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ใช้ระยะเวลาในการกลั่นน้อยกว่ากระบวนการกลั่นแบบไอน้ำอย่างเดียว โดยคิดเป็นร้อยละ 34.36 ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในการกลั่นลดลงร้อยละ 32.37%

คำสำคัญ: โหระพา น้ำมันหอมระเหย การกลั่นน้ำมันหอมระเหย คลื่นไมโครเวฟ

Abstract

This research aims to study on sweet basil essential oil extraction by using microwave-steam distillation system. The distillation system consisted of three main parts: 1) essential oil distillation unit, 2) steam generator unit and 3) essential oil separator condensing unit. To demonstrate the potential of a new technique, microwave-steam distillation method (MSD) has been compared with conventional steam distillation method (SD). Results show that the essential oil extracted by MSD process was quantitatively (oil yield) similar to those obtained by SD process, but MSD was better than SD in terms of process rapidity (34.36% lower distillate time), thereby allowing substantial saving of electric consumption (32.37% lower electric consumption).

Keywords: Sweet Basil: Essential Oil: Essential Oil Distillation: Microwave

*ติดต่อ: worapot_1@hotmail.com, 081-048-6600

1. บทนำ

การกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาเป็นแนวทางการแปรรูปเพิ่มมูลค่าโหระพาที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง ซึ่งน้ำมันหอมระเหยจากโหระพามีสรรพคุณทางยา ในการช่วยย่อยอาหาร ขับลม ปรับสมดุลประจำเดือน และ บำรุงร่างกาย เป็นต้น [1] และเนื่องจากน้ำมันหอมระเหยจากโหระพามีกลิ่นเฉพาะตัว จึงมีสรรพคุณใช้ นวดแก้ความเมื่อยล้าและเพิ่มความสดชื่นได้ จึงเป็นที่ ต้องการของธุรกิจสปาเป็นอย่างมาก การกลั่นน้ำมันหอมระเหยด้วยไอน้ำ เป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อนและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลาในการกลั่นที่ค่อนข้างยาวนาน ประมาณ 10 ถึง 12 ชั่วโมง [2] ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างสูง ทำให้มีผลโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิต เทคโนโลยีการกลั่นน้ำมันหอมจากพืชแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ โดยสามารถลดเวลาการกลั่นลงได้ ซึ่งคุณสมบัติของ

น้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ ไม่แตกต่างจากกรณีการใช้ไอน้ำอย่างเดียวแบบดั้งเดิม [3-6] เนื่องจาก คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงวัตถุและจะถูกดูดกลืนจากโมเลกุลของน้ำ และองค์ประกอบของสารในพืช จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนต่อไป จึงเป็นผลให้ไอน้ำสามารถระเหยของค์ประกอบของสารในพืชได้รวดเร็ว ยิ่งขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาในการกลั่นลดลง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากโหระพา โดยใช้เทคโนโลยีการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟและ ทำการเปรียบเทียบกับกรณีการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียวแบบดั้งเดิม ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและสามารถใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. วิธีการวิจัย

2.1 ระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

ระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) ชุดห้องกลั่น (Distillation Unit) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากวัสดุเซรามิก โดยมีระบบจ่ายคลื่นไมโครเวฟ ติดตั้งอยู่ภายใน และมีการติดตั้งชุดใบกวนภายใน ห้องกลั่น เพื่อช่วยในการกระจายคลื่นไมโครเวฟ 2) ชุดผลิตไอน้ำ (Steam Generator Unit) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อจ่ายเข้าไปในห้องกลั่น โดยเป็นระบบผลิตไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) และ 3) ชุดควบแน่น (Condenser Unit) ซึ่งระบบนี้เป็นระบบควบแน่นแบบท่อขด (Coil Condenser) โดยทำหน้าที่ควบแน่นน้ำมันหอมระเหย ซึ่งจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น และมีเครื่อง Cooling Tower เป็นระบบระบายความร้อนของน้ำหล่อเย็น โดยน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้จากระบบ จะไหลลงชุดเก็บน้ำมันด้านล่าง และแยกเป็นชั้นกับน้ำ โดยลักษณะของระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ แสดงได้ดังรูปที่ 1 ส่วนรูปถ่ายจริงของระบบแสดงได้ในรูปที่ 2

2.2. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานี้วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองการกลั่น คือ โหระพาแบบเด็ดใบ ซึ่งหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดยก่อนการทดลองโหระพาจะถูกสับนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้น โดยผลการทดสอบการหา

ปริมาณความชื้นของโหระพาตามมาตรฐานของ ASTM E790-87 พบว่ามีค่าเท่ากับ 91.24%wb.

2.3 การหาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้

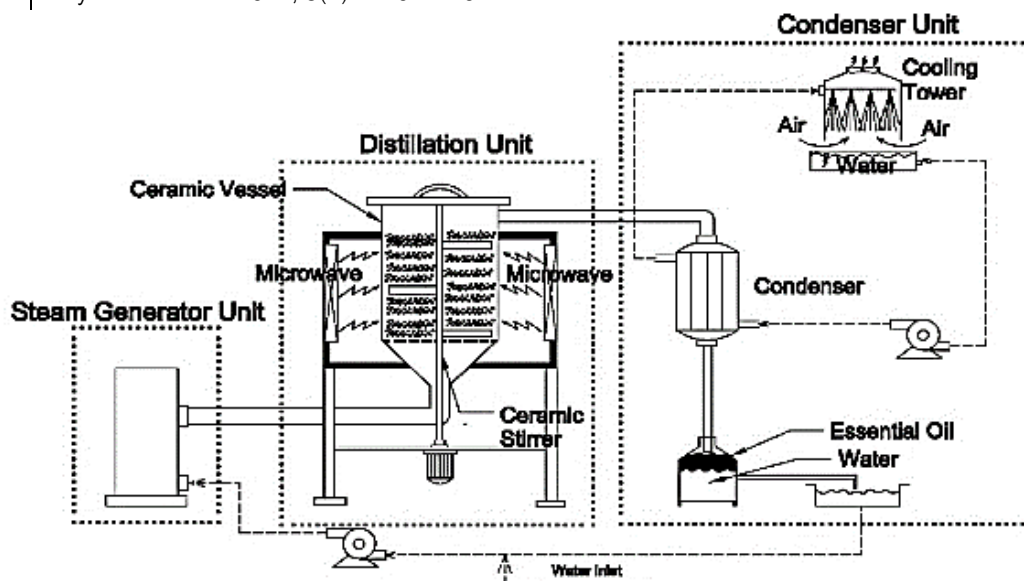
ในการแยกน้ำมันหอมระเหยออกจากน้ำ จะใช้กรวยแยกสาร (Separatory Funnel) ซึ่งมีขนาด 1000 ml โดยน้ำมันหอมระเหยที่ถูกแยกออกจากน้ำแล้วจะถูกนำไปชั่งเพื่อหามวลและบันทึกผลต่อไป

การหา %Yield ของน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ โดยหาได้จากสมการที่ (1)

$$\%Yield = \frac{\text{mass of essential oil (g)}}{\text{mass of sweet basil (g)}} \times 100 \quad (1)$$

2.4 การหาเวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย

ในการหาเวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจะเริ่มต้นการจับเวลาตั้งแต่เริ่มดำเนินการเปิดระบบไปจนกระทั่งไม่มีน้ำมันหอมระเหยออกมาจากกระบวนการกลั่น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะความสูงของชั้นน้ำมันหอมระเหยที่แยกตัวออกมาจากน้ำในขวดแก้วใสผลิตภัณฑ์ (แสดงลักษณะได้ในรูปที่ 3) โดยทำการวัดความสูงของชั้นน้ำมันหอมระเหย ซึ่งหากความสูงของชั้นน้ำมันหอมระเหย ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั้นแสดงว่ากระบวนการกลั่นไม่มีน้ำมันหอมระเหยออกมาแล้ว ดังนั้น จึงทำการหยุดกระบวนการกลั่นและบันทึกเวลาที่ใช้ในการกลั่น



รูปที่ 1 ระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 2 ภาพถ่ายของระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากโหระพาแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3 ลักษณะของชั้นน้ำมันหอมระเหย
ที่แยกตัวออกมาจากน้ำ

2.5 การหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่น น้ำมันหอมระเหย

การหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่นน้ำมัน
หอมระเหย จะใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ค่าพลังงาน
ไฟฟ้า ซึ่งเครื่องดังกล่าวสามารถบันทึกค่าผลการใช้
พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบกลั่นได้
โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้ จะอยู่ในหน่วยกิโลวัตต์-
ชั่วโมง (kWh)

2.6 วิธีการทดลองกรณีการกลั่นน้ำมัน หอมระเหยแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Steam Distillation; MSD)

ในการทดลองในส่วนนี้ จะดำเนินการกลั่น
น้ำมันหอมระเหยจากใบโหระพาปริมาณ 2 kg โดยใช้
ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา
ประกอบไปด้วย 1) อัตราการจ่ายไอน้ำเข้าห้องกลั่น
ซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลง 4 ระดับ คือ 1 kg/h 2 kg/h
4 kg/h และ 6 kg/h ตามลำดับ และ 2) กำลังไมโครเวฟ
ซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงที่ 200 W 400 W 600 W และ
800 W ตามลำดับ โดยจะทำการทดลองกลั่น

จนกระทั่งไม่มีน้ำมันหอมระเหยออกมาจากระบบ
ซึ่งจะทำการเก็บข้อมูลจากระบบวนการกลั่น
โดยประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำมันหอมระเหย
ที่กลั่นได้ เวลาที่ใช้ในการกลั่น และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้
ในการกลั่น

2.7 วิธีการทดลองกรณีการกลั่นน้ำมัน หอมระเหยแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว (Steam Distillation; SD)

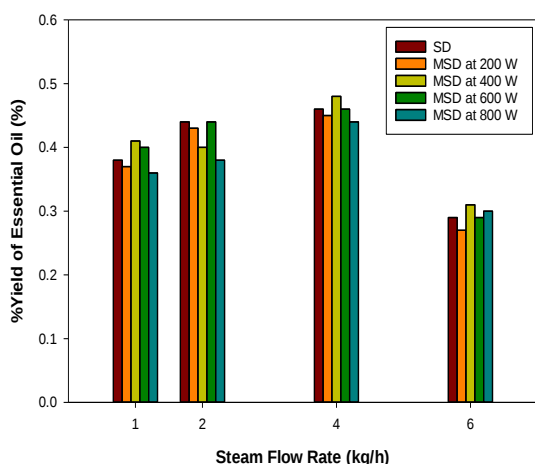
ส่วนกรณีนี้เป็นการทดลองกลั่นน้ำมันหอมระเหย
จากใบโหระพาปริมาณ 2 kg โดยใช้ไอน้ำอย่างเดียว
เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับกรณีการกลั่นแบบใช้
ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยพารามิเตอร์
ของการศึกษานั้น อัตราการจ่ายไอน้ำจะถูก
เปลี่ยนแปลงที่สภาวะเดียวกันกับกรณีการกลั่นแบบ
ใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ นั่นคือ ที่สภาวะ 1 kg/h
2 kg/h 4 kg/h และ 6 kg/h ตามลำดับ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้

จากการเปรียบเทียบการกลั่นน้ำมันหอมระเหย
ระหว่างกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่น
ไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำ
อย่างเดียว ซึ่งไม่มีการจ่ายคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้
โหระพาแบบเด็ดใบปริมาณ 2 kg เป็นวัตถุดิบ
ในการกลั่น ภายใต้เงื่อนไขอัตราการจ่ายไอน้ำและ
กำลังไมโครเวฟที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งดำเนินการกลั่น
พืชวัตถุดิบ ไปจนกระทั่งไม่มีน้ำมันหอมระเหยออกมา
ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้

จากทั้ง 2 กระบวนการดังกล่าว แสดงได้ในรูปที่ 4 โดยที่สัญลักษณ์ SD คือ กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว (Steam Distillation) ส่วนสัญลักษณ์ MSD คือ กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Steam Distillation)



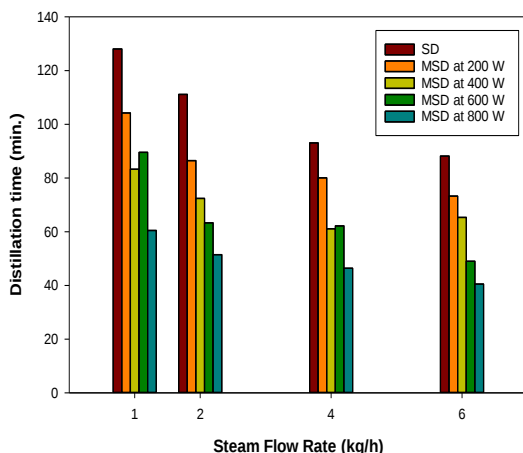
รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันหอมระเหย ที่กลั่นได้จากการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว (SD) ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้มี %Yield อยู่ระหว่าง 0.29 ถึง 0.46 โดยที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณ %Yield สูงที่สุด คือ 0.46 (9.21 g) ส่วนกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (MSD) พบว่า สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้

โดยมี %Yield อยู่ระหว่าง 0.27 ถึง 0.48 โดยที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h และกำลังไมโครเวฟ 400 W สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณ %Yield สูงที่สุด คือ 0.48 (9.63 g) จากข้อมูลผลการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะที่ดีที่สุดของทั้งจากการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้สูงสุด มีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chemat et al. [3] และงานวิจัยของ Sahraoui et al. [4] ซึ่งพวกเขาได้รายงานผลการเปรียบเทียบกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากดอกลาเวนเดอร์ (lavender flowers) แบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟและแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว ซึ่งผลการศึกษาของพวกเขาพบว่า %Yield ของน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ จากทั้งสองกระบวนการมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

3.2 เวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย

ผลการบันทึกเวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยในกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว โดยดำเนินการกลั่นไปจนกระทั่งไม่มีน้ำมันหอมระเหยออกมาจากระบบภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงได้ในรูปที่ 5



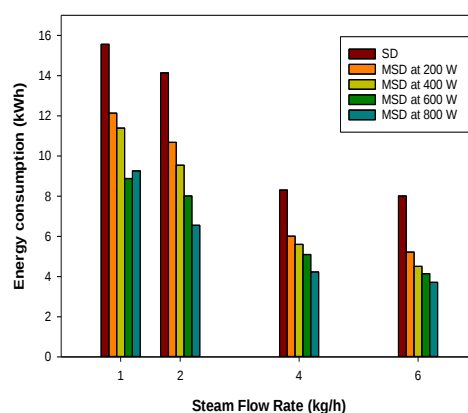
รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยในการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว

จากผลการบันทึกเวลาที่ใช้ในการกลั่นน้ำมันหอมระเหยในกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะอัตราการจ่ายไอน้ำที่ 1 kg/h 2 kg/h 4 kg/h และ 6 kg/h กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียวจะใช้เวลาในการกลั่นมากกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียวใช้เวลาในการกลั่นอยู่ระหว่าง 88.18 นาที ถึง 128.03 นาที ส่วนกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการกลั่นอยู่ระหว่าง 40.52 นาที ถึง 104.22 นาที โดยในกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียวสามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ %Yield สูงสุดเท่ากับ 0.46 (ที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h) ซึ่งพบว่า ที่สภาวะดังกล่าว ใช้เวลาในการกลั่นเท่ากับ 93.08 นาที ในขณะที่กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ %Yield

สูงสุดเท่ากับ 0.48 (ที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h และกำลังไมโครเวฟ 400 W) ซึ่งพบว่า ใช้เวลาในการกลั่นเท่ากับ 61.09 นาที จากผลการศึกษาี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย สามารถลดระยะเวลาในการกลั่นลงได้ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ สามารถทะลุทะลวงวัตถุและจะถูกดูดกลืนจากโมเลกุลของน้ำและองค์ประกอบของสารในพืช จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนต่อไป จึงเป็นผลให้ไอน้ำสามารถระเหยองค์ประกอบของสารในพืชได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

3.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่น

ผลการบันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยใช้เครื่องบันทึกพลังงานไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 6



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว

จากผลการศึกษาในรูปที่ 6 ซึ่งให้เห็นว่าที่สภาวะ อัตราการจ่ายไอน้ำที่ 1 kg/h 2 kg/h 4 kg/h และ 6 kg/h กระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียวกู้พลังงานไฟฟ้าในการกลั่นมากกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ โดยกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียวกู้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่นมีค่าอยู่ระหว่าง 8.01 kWh ถึง 15.56 kWh ส่วนกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.71 kWh ถึง 12.13 kWh และในกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียวกู้กลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ %Yield สูงสุด เท่ากับ 0.46 (ที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h) ซึ่งพบว่าที่สภาวะดังกล่าวใช้พลังงานไฟฟ้าในการกลั่นเท่ากับ 8.31 kWh ในขณะที่กระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ สามารถกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้ %Yield สูงสุดเท่ากับ 0.48 (ที่สภาวะการจ่ายไอน้ำ 4 kg/h และกำลังไมโครเวฟ 400 W) ซึ่งพบว่าพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ในการกลั่นมีค่าเท่ากับ 5.61 kWh

3.4 สภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย

เมื่อพิจารณาสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดซึ่งสามารถผลิตปริมาณน้ำมันหอมระเหยได้สูงที่สุดของทั้งกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1

จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะการทำงานที่ดีที่สุด กระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียว สามารถผลิตน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันและเมื่อทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกลั่นของทั้งสองกระบวนการ พบว่า กระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟจะใช้เวลาในการกลั่นน้อยกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียว โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ลดลงเท่ากับ 34.36% ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sahraoui et al. [4] ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ ช่วยในกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากดอกลาเวนเดอร์แบบใช้น้ำจะใช้เวลาในการกลั่นน้อยกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียว และเมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกลั่น พบว่า กระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำอย่างเดียว โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเท่ากับ 32.37% ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการกลั่นแบบใช้น้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ใช้เวลาในการกลั่นที่น้อยกว่า

ตารางที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันหอมระเหย

กระบวนการกลั่น	ปริมาณใบโหระพาที่ใช้ในการกลั่น	สภาวะการทำงานที่สามารถผลิตน้ำมันหอมระเหยได้ ปริมาณสูงสุด	ผลการกลั่น			
			ปริมาณน้ำมันหอมระเหย (g)	%Yield (%)	เวลาที่ใช้ในการกลั่น (min.)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกลั่น (kWh)
SD	2 kg	- อัตราการจ่ายไอน้ำที่ 4 kg/h	9.21	0.46	93.08	8.31
MSD	2 kg	- อัตราการจ่ายไอน้ำที่ 4 kg/h - กำลังไมโครเวฟที่ 400 W	9.63	0.48	61.09	5.62

หมายเหตุ : SD คือ กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว (Steam Distillation), MSD คือ กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Steam Distillation)

4. สรุป

จากการศึกษาการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจากใบโหระพาแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกรณีการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว พบว่า กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว สามารถผลิตน้ำมันหอมระเหยได้ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกลั่นของทั้งสองกระบวนการ พบว่า กระบวนการกลั่นแบบ

ใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ จะใช้เวลาในการกลั่นน้อยกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ลดลงเท่ากับ 34.36% และเมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกลั่น พบว่า กระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่ากระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำอย่างเดียว โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเท่ากับ 32.37% ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการกลั่นแบบใช้ไอน้ำร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ใช้เวลาในการกลั่นที่น้อยกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในปีงบประมาณ 2561 และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่สนับสนุนทั้งอาคาร สถานที่ และการดำเนินการต่าง ๆ จนโครงการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. ตำราวิชาการสุคนธ์บำบัด. สำนักกิจการโรงพิมพ์ องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก: กรุงเทพฯ; 2550.
- [2] สุรัตน์วดี จิระจินดา. เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหย. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2560]. เข้าถึงได้จาก : <http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/index.php/distiller>
- [3] Chemat F, Lucchesi ME, Smadja J, Favretto L, Colnaghi G and Visinoni F. Microwave accelerated steam distillation of essential oil from lavender: A rapid, clean and environmentally friendly approach. *Analytica Chimica Acta*. 2006; 555(1): 157–60.
- [4] Sahraoui N, Vian MA, Bornard I, Boutekedjiret C and Chemat F. Improved microwave steam distillation apparatus for isolation of essential oils comparison with conventional steam distillation. *Journal of Chromatography A*. 2008; 1210(2): 229–33.
- [5] Kusuma HS and Mahfud M. Comparison of conventional and microwave-assisted distillation of essential oil from *Pogostemon cablin* leaves: Analysis and modelling of heat and mass transfer. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2017; 4: 55–65.
- [6] Baser KHC and Buchbauer G. *Handbook of essential oils: science, technology, and applications*. Florida USA, CRC Press, Taylor and Francis Group; 2010.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การกำจัดสีย้อมบริลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและเถ้าลอย**Removal of brilliant green by kaolin and fly ash based geopolymer**สายสมร ล่ำลอง¹⁾, นวลใย บัวภา¹⁾, จักรวาท คงอ่อน¹⁾ และ พรพรรณ พึ่งโพธิ์¹⁾Saisamorn Lumlong¹⁾, Nuanyai Buapa¹⁾, Jakkrawut Kongon¹⁾ and Pornpan Pungpo¹⁾¹⁾ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี¹⁾ Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon ratchathani University

Received: 8 April 2022

Revised: 15 August 2022

Accepted: 17 August 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอย จากนั้นใช้จีโอพอลิเมอร์ในการดูดซับสีย้อมบริลเลียน กรีน จากสารละลายในน้ำ ปริมาณที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยคือ 0.25 และ 0.25 กรัมต่อลิตร ส่วนเวลาในการดูดซับ เท่ากับ 360 และ 180 นาที โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 96.62 และ 96.61% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมบริลเลียน กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์ทั้งสองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 3 ครั้ง แสดงว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมบริลเลียน กรีน

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย บริลเลียน กรีน ดินขาว**Abstract**

This research studied the synthesis of kaolin and fly ash based geopolymer. Geopolymer was used to adsorb brilliant green (BG) dye from aqueous solution. The suitable dosage of kaolin and fly ash based geopolymer were 0.25 and 0.25 g/L, the contact time were 360 and 180 minutes with the adsorption

efficiency 96.62 and 96.61% for initial BG concentration of 100 ppm, respectively. Kinetic study showed that the adsorption of both geopolymers were followed the pseudo-second order model. Kaolin based geopolymer cannot be regenerated. Fly ash based geopolymer can be regenerated 3 times. This suggested that geopolymer from fly ash showed the potential to be used as an adsorbent for brilliant green dye removal.

Keywords: Geopolymer; Fly ash; Brilliant green; Kaolin

*ติดต่อ: saisamorn.l@ubu.ac.th

1. บทนำ

มลพิษอันเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วและการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมส่งผลอย่างมากต่อการทำลายคุณภาพของน้ำ อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อม กระบวนการของอุตสาหกรรมสิ่งทอไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ หรือแม้กระทั่งการฟอกย้อม มีการใช้น้ำปริมาณมาก โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการจากอุตสาหกรรมมักมีการแปรเปลี่ยนสภาพกลายเป็นน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียเหล่านั้นจะทำให้แหล่งน้ำที่สะอาดมีการปนเปื้อนอาทิเช่น สีย้อม โลหะหนัก สารช่วยย้อม ตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสียไปในที่สุด สีสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียส่งผลให้เกิดการลดลงของการลดผ่านของแสงในแม่น้ำ ลำคลอง กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำลดลง ทำให้อาหารของสัตว์น้ำลดลง [1-2] สีปรี๊ดเลียน กรีนจัดว่าเป็นสีประจุบวก (cationic dye) มีพิษเมื่อฉีดเข้าไปในมนุษย์และสัตว์ ผลกระทบอันตรายต่อมนุษย์โดยทั่วไป คือ การระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อสัมผัสเป็นเวลานานจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอวัยวะได้ [2]

จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูง เช่น ดินขาว (kaolin) แถ่ลอย แถ่หนัก ทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเข้มข้น เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้าง 3 มิติ จีโอพอลิเมอร์จัดว่าเป็นวัสดุอุตสาหกรรม มีความแข็งแรงและสามารถรับกำลังอัดได้ทำให้มีสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง หรือ งานคอนกรีต การทำอิฐทนไฟ วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม การทำฟิวส์ เป็นต้น [3]

โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิงประมาณวันละกว่า 40,000 ตัน การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้เป็นเถ้าลอยประมาณ 6,000 ตัน เถ้าลอยที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากถือเป็นขยะอันตรายที่มักส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์โดยเฉพาะในบริเวณใกล้เคียง เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารพิษไซลัน ซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือ ซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์โรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้ใน

งานเป็นวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้าง และงานซ่อมแซมต่าง ๆ แทนวัสดุงานดินหลายประเภท เช่น งานก่อสร้างฐานราก และงานซ่อมแซมฐานรากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ งานก่อสร้างชั้นพื้นทางถนน งานลาดห่อ และลาดไหล่คลองส่งน้ำกันรั่วซึม เป็นต้น ปัจจุบันเถ้าลอยได้ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาเข็ม ท่อ พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด [4-5] ได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มศึกษาการนำเถ้าลอยมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อเพิ่มมูลค่าเถ้าลอย ยกตัวอย่างเช่น อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์และคณะ [5] ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารตัวเติมลดต้นทุนในผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบแม่พิมพ์หมุนเหวี่ยง Junjie Feng et al. [6] ศึกษาการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนและการนำความร้อนต่ำจากเถ้าลอยกับน้ำแก้วและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารทำให้เกิดฟอง พบว่าปริมาณน้ำแก้วและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นพารามิเตอร์หลักในการควบคุมรูพรุน ความหนาแน่น การนำความร้อนและสัณฐานวิทยาของรูพรุน สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิในการบ่ม ปริมาณน้ำแก้ว และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส 80 กรัม และ 6 กรัม ตามลำดับ วัสดุที่เตรียมได้จากสภาวะนี้มีความมีรูพรุน (porosity) ร้อยละ 79.9 ค่าการนำความร้อน 0.0744 W/mK และแรงกดอัด 0.82 MPa วัสดุนี้

มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฉนวนของผนังได้ Vinay Kumar Jha and Gautam Prasad Budhamagar [7] ศึกษาการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและใช้ NaOH และ Na_2SiO_3 เป็นตัวกระตุ้นพบว่าสภาวะที่ให้ค่าแรงกดอัดที่สูงที่สุด คือ 6M NaOH อัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 1.25 และการเพิ่มเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าแรงกดอัดที่สูงขึ้น S M Fuad Kabir Moni et al. [8] ศึกษาการเตรียมคอนกรีตที่มาจากจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยและน้ำเสียจากการหล่อทรายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีสมบัติดีกว่าคอนกรีตธรรมดา คือ มีแข็งแรงดี และมีรูพรุนต่ำ นอกจากนี้โฟมจีโอพอลิเมอร์มีศักยภาพในการแทนที่วัสดุฉนวนปกติ นอกจากนี้มีนักวิจัยนำจีโอพอลิเมอร์ หรือ จีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับปรุงผิวหน้า (surface modification) มาใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู และ acid blue 185 [9-11]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเปรียบเทียบศักยภาพในการกำจัดสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว กับเถ้าลอยในแง่ของปริมาณ เวลาที่สัมผัส การนำจีโอพอลิเมอร์กลับมาใช้ซ้ำ เนื่องจากหากใช้ดินขาวจำเป็นต้องมีการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเตรียมเป็นเมตาเกอลิน (metakaolin) แต่หากใช้เถ้าลอยไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นการลดค่าใช้จ่าย หากสามารถนำเถ้าลอยมาเตรียมเป็นจีโอพอลิเมอร์แล้วสามารถกำจัดสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ได้ดีจะเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าลอยและเป็นการแก้ปัญหาช่วยลดปริมาณเถ้าลอยอันเป็นขยะจากโรงงานไฟฟ้าได้

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมเมตาเกาลิน

นำดินขาวใส่ในถ้วยกระเบื้องปรับหน้าดินขาวให้สม่ำเสมอ จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำดินขาวเผาเสร็จแล้วมาทำการบดและร่อนด้วยตะแกรง 250 mesh เพื่อให้ดินขาวมีความละเอียดและพร้อมใช้งาน

2.2 การเตรียม water glass (น้ำแก้ว)

นำสารละลาย 8 โมลาร์ NaOH 8 มิลลิลิตร ผสมกับ Na_2SiO_3 12 มิลลิลิตร นำไปกวนให้สารละลายทั้งสองเป็นเนื้อเดียวกัน

2.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

ชั่งดินขาวที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 20 กรัม ผสมกับน้ำแก้ว 20 มิลลิลิตร กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมแล้วเทใส่แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาดเล็กจากนั้นคลุมแม่พิมพ์ด้วย wrapping film บ่มจีโอพอลิเมอร์เป็นเวลา 1 วัน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลยเหมือนกับจีโอพอลิเมอร์จากดินขาว

2.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีของตัวดูดซับ

ชั่งจีโอพอลิเมอร์ ใช้เวลาในการดูดซับสี 60 นาที ความเข้มข้นของสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้

$$\text{ประสิทธิภาพในการดูดซับสี} = \frac{(C_0 - C) \times 100}{C_0}$$

C_0 = ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น

C = ความเข้มข้นของสีหลังดูดซับ

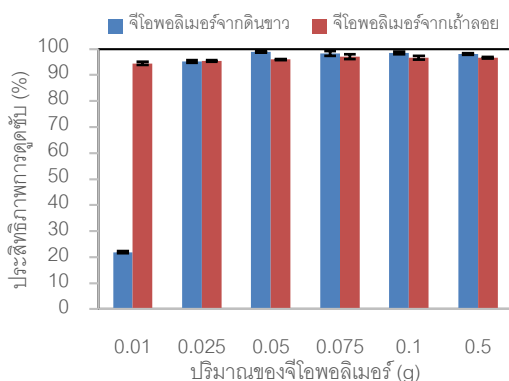
2.5 ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

นำเอาจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการดูดซับแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเอาเตาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสีที่ยอมบริลเลียน กรีน แล้วทำเอาจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการเผามาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซ้ำโดยใช้ปริมาตรสี 25 มิลลิลิตร

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการศึกษาปริมาณในการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาว โดยแปรปริมาณตัวดูดซับ 0.010, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100 และ 0.500 กรัมในการดูดซับสี ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เวลาในการดูดซับ 720 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 21.86, 95.16, 98.95, 98.30, 98.47 และ 98.08 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของจีโอพอลิเมอร์มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับสีที่ยอมบริลเลียน กรีน เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากกว่า 0.025 กรัม พบว่าระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสี ย่อมมากกว่า 95% ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวที่เหมาะสมในการดูดซับสีที่ยอมบริลเลียน กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร คือ 0.025 กรัม มีประสิทธิภาพดูดซับ 95.16%

จากการศึกษาปริมาณในการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอย โดยแปรปริมาณตัวดูดซับ 0.010, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100 และ 0.500 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 94.46, 95.43, 95.96, 97.11, 96.72, 96.68 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 1 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของจีโอพอลิเมอร์มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากกว่า 0.010 กรัม พบว่าระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมากกว่า 90% เนื่องจากสีของสารละลายค่อนข้างเข้มที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.010 กรัม ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร คือ 0.025 กรัม มีประสิทธิภาพดูดซับสีย้อม 95.43 % เพราะสีของสารละลายจางมากกว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.010 กรัม



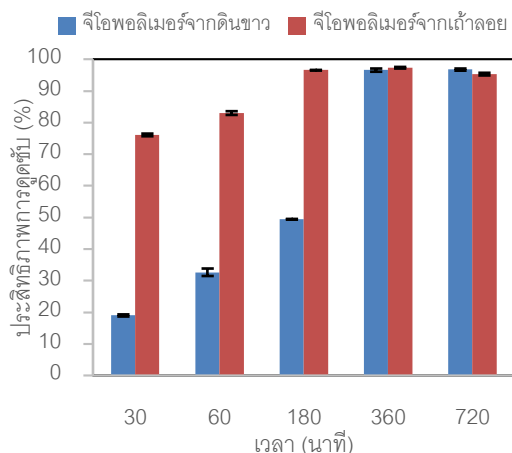
รูปที่ 1 ผลของปริมาณจีโอพอลิเมอร์ต่อการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและถ้ำลอยใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถนำถ้ำลอยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์แทนดินขาวได้

จากการศึกษาเวลาการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน โดยเวลาที่ใช้ในการดูดซับคือ 30, 60, 180, 360 และ 720 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 19.04, 32.65, 49.46, 96.62 และ 96.78% ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้เกิดการดูดซับสารละลายสีย้อม บิลเลี่ยนกรีน เกิดการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับเป็น 180 นาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 49.46% แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับเป็น 360 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 49.46% เป็น 96.62% และเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับมากกว่า 360 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวปริมาณ 0.025 กรัม คือ 360 นาที ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการดูดซับ 96.62%

จากการศึกษาเวลาการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอย ในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน โดยเวลาที่ใช้ในการดูดซับคือ 30, 60, 180, 360 และ 720 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 76.05, 83.10, 96.61, 97.30 และ 95.33% ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ที่ยังไม่ได้เกิดการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน และเกิดการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 นาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 83.10% เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับเป็น 180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 83.10% เป็น 96.61% และเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับมากกว่า 180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



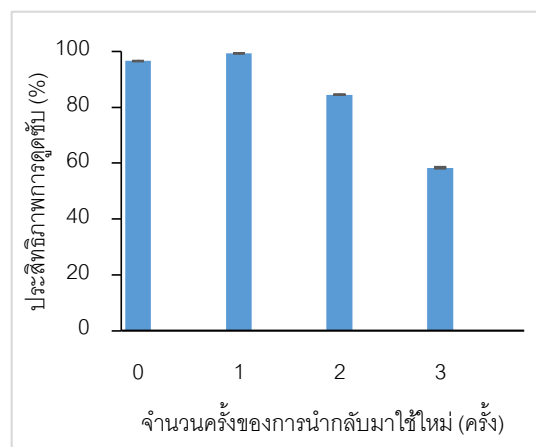
รูปที่ 2 ผลของเวลาในการดูดซับ

ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน

จีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 96.62% เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 21.36% แสดงว่าจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมลดลง

อย่างมาก ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองการดูดซับซ้ำเพียงครั้งเดียว

จีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 96.61% เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 99.39% เมื่อนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ที่ 84.50% และทำการดูดซับซ้ำครั้งที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับอยู่ที่ 58.31% จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่ของจีโอพอลิเมอร์

จากถั่วลันเตากับประสิทธิภาพการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซ้ำของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตาและจีโอพอลิเมอร์จากถั่วเขียวในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยนกรีน โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.025 กรัม ในการดูดซับสีย้อมความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 720 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนการดูดซับซ้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัตรา บุตรเสรีชัย [12] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการดูดซับซ้ำของ

ถ้ำลอยในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อไม้กระดาษ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการดูดซับซ้ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำลงเรื่อย ๆ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับซ้ำได้ดีกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาว เนื่องจาก จีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอยสามารถดูดซับซ้ำได้ 3 ครั้ง ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่

3.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

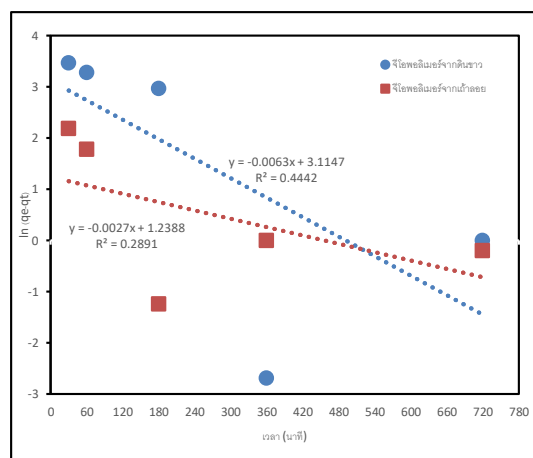
ในการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับมี 3 แบบ คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo-first order), ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (pseudo-second) และ กลไกการแพร่เข้าสู่รูพรุน (intraparticle diffusion) เป็นการศึกษาถึงอัตราเร็วของปฏิกริยาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยนำผลการทดลองที่ได้จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน แทนค่าตัวแปรในสมการแล้วสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเส้นตรง เพื่อหาค่าคงที่จากสมการของจลนพลศาสตร์ แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองว่าสอดคล้องกับ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน หรือ ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน

3.2 การศึกษาปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน

ในการศึกษาปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือนเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์ โดยจะนำผลที่ได้จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ที่มีผลต่อการดูด

ซับของจีโอพอลิเมอร์มาแทนค่าในตัวแปรของสมการ $\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการไปสร้างกราฟโดยให้แกน x คือ เวลา (นาที่) และ แกน y คือ $\ln (q_e - q_t)$ จากสมการเส้นตรงที่ได้ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (k_1) หาได้จากความชันของเส้นตรง

จากการศึกษาปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือนของการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากถ้ำลอยที่เวลาใด ๆ พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.444 และ 0.289 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4

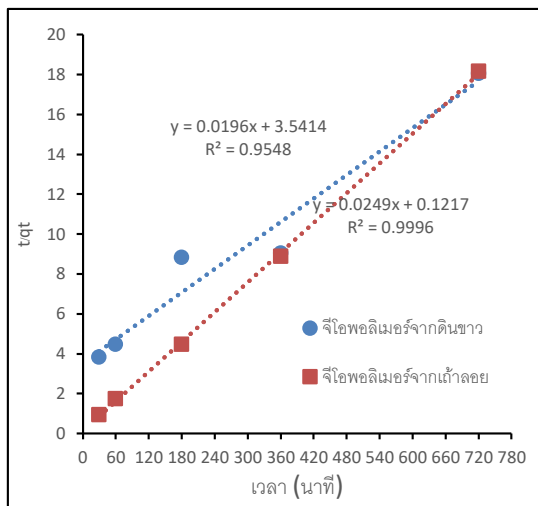


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับกับ $\ln (q_e - q_t)$ ที่ได้จากการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากถ้ำลอย

3.3 การศึกษาปฏิกริยาอันดับสองเสมือน

ในการศึกษาปฏิกริยาอันดับสองเสมือนเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์ โดยจะนำผลที่ได้จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ที่มีผลต่อการดูด

ชั้นของจีโอพอลิเมอร์มาแทนค่าในตัวแปรของสมการ $t/q_t = (1/k_2 q_\infty^2) + (t/q_\infty)$ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการไปสร้างกราฟโดยใช้แกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ t/q_t จากสมการเส้นตรงที่ได้ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน (k_2) หาได้จากความชันของเส้นตรง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับ กับ t/q_t ที่ได้จากการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอย

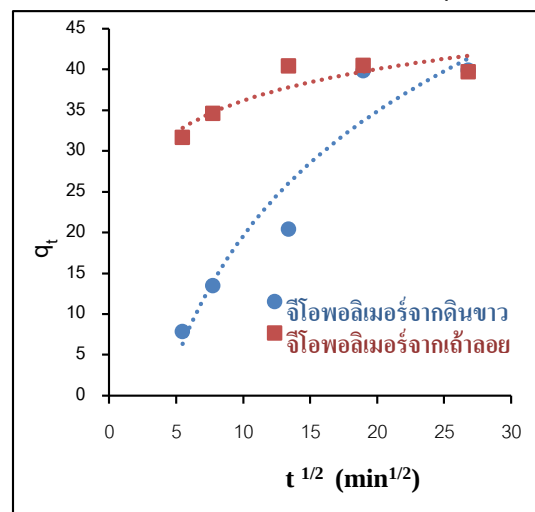
จากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนของการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยที่เวลาใดๆ พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.9548 และ 0.9996 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5

ผลการศึกษาปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน และปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนของสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยที่เวลาใดๆ พบว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาว และจากเถ้าลอย ให้ค่า R^2 ของปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ 0.9548 และ 0.9996

ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน กับจีโอพอลิเมอร์ โดยเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุของสีย้อมบิลเลี่ยน กรีนกับพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์

3.4 การศึกษากลไกการแพร่เข้าสู่รูพรุน (intraparticle diffusion)

ในการศึกษากลไกการแพร่เข้าสู่รูพรุนเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์ โดยจะนำผลที่ได้จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ที่มีผลต่อการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์มาแทนค่าในตัวแปรของสมการ $q_t = k_d t^{1/2} + c$ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการไปสร้างกราฟโดยใช้แกน x คือ $t^{1/2}$ และ แกน y คือ q_t



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับ $t^{1/2}$ กับ q_t ที่ได้จากการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอย

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอย สามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นลำดับได้ดังนี้ ขั้นแรก การดูดซับเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด เนื่องจากมีปริมาณของสีย้อมบิลเลียน กรีน อยู่อย่างมากมาย เป็นผลของ boundary layer/film diffusion ในขณะที่ขั้นที่สองเป็นสมดุลของการดูดซับเนื่องมาจากความเข้มข้นของสีย้อมบิลเลียน กรีน มีปริมาณลดต่ำลง เป็นผลของ intraparticle/pore diffusion

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน โดยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวมีปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.25 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 360 นาที ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยมีปริมาณที่เหมาะสมคือ 0.25 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 180 นาที

2. จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมบิลเลียน กรีน โดยใช้จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

3. จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวสามารถดูดซับซ้ำได้ครั้งเดียว มีประสิทธิภาพการดูดซับ 21.36% ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถดูดซับซ้ำได้ 3 ครั้ง มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับครั้งสุดท้าย 58.31%

จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวและจากเถ้าลอยมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 3 ครั้ง แต่ยังสามารถพัฒนาเพื่อให้จีโอพอลิเมอร์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งมากขึ้น ในงานวิจัยถัดไปอาจเพิ่มพื้นที่ผิวของจีโอพอลิเมอร์โดยเตรียมเป็นโฟมจีโอพอลิเมอร์ เพิ่มการศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ และ การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับการสนับสนุนในด้านเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ PERCH-CIC ที่สนับสนุนงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Balendu SG, Sudeshna G, Saurabh P, Aparna T, Riti TK, Rajendra PS, et al. Reusablility of brilliant green dye contaminated wastewater using corncob biochar and Brevibacillus parabrevis: hybrid treatment and kinetic studies. Bioengineered 2020; 11(1): 743-58.
- [2] Eletta OAA, Mustapha SI, Ajayi OA and Ahmed AT. Optimization of dye removal from textile wastewater using activated carbon from sawdust. Nigerian journal of technological development 2018; 15(1): 26-32.
- [3] คณิตตา ธรรมจริยวงศา. จีโอฟอสโฟร: วัสดุก่อสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อม. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 20 เมษายน 2564] เข้าถึงได้จาก : <http://blog.bru.ac.th/wp-content/uploads/bp-attachments/12116/%E0%B8%88%E0%B8%B5%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C.pdf>
- [4] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2564] เข้าถึงได้จาก : http://maemoh.egat.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=494
- [5] อภิลิทธิ ไชยชัยยงค์, สันติ มิตรประเสริฐพร, เอกชัย วิมลมาลา, ชีรศักดิ์ หมากรผิน และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. การใช้ประโยชน์จากอนุภาคเถ้าลอย เพื่อทำหน้าที่เป็นสารลดต้นทุน สำหรับผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแม่พิมพ์หมุนเหวี่ยง โดยปรับปรุงสภาวะการเตรียมวัสดุผสม. วารสารวิจัยและนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมไทย. 2553; 1(1): 43-53.
- [6] Feng J, Zhang R, Gong L, Li Y, Cao W and Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity. Materials and Design 2015; 65: 529-33.
- [7] Vinay KJ and Gautam PB. Synthesis of geopolymer from coal fly ash. Journal of Nepal Chemical Society 2012; 30: 24-8.

- [8] Moni SMFK, Ikeora O, Pritzel C, Gortz B and Trettin R. Preparation and properties of fly ash based geopolymer concrete with alkaline waste water obtained from foundry sand regeneration process. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2020; 22: 1434-43.
- [9] Chan JL, Zhang YJ, Chen H, Yang PH, and Meng Q. Development of porous and reusable geopolymer adsorbents for dye wastewater treatment. *Journal of cleaner production*. 2022; 10: 131278
- [10] Maleki A, Mohammad M, Emdadi Z, Asim N, Azizi M and Safaei J. Adsorbent materials based on a geopolymer paste for dye removal from aqueous solutions. *Arabian journal of chemistry* 2020; 13(1): 3017-25.
- [11] Açıklı Ö, Acar İ and Khataee A. Preparation of a surface modified fly ash-based geopolymer for removal of an anionic dye : parameters and adsorption mechanism. *Chemosphere*. 2022; 295: 133870.
- [12] สุพัตตรา บุตรเสรีชัย, ฐิติมา นิกรสังขพิณิจ, ศิลป์สุภา แก้วเกิดคำ, อธิป เหลืองไพโรจน์ และยุวรัตน์ เงินเย็น. การใช้เถ้าลอยในการบำบัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยกระบวนการดูดซับ. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2559, 15 มกราคม 2559, จังหวัดขอนแก่น; 2559.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

Influence of Pulse Flow Drying Air on Paddy Drying with Pneumatic Dryer

ณัฐพงษ์ วงศ์บับปา^{1)*} กระวี ตรีอำนรรค²⁾ และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค³⁾Nuttapong Wongbubpa^{1)*} Krawee Treeamnuk²⁾ and Tawarat Treeamnuk³⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี³⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี¹⁾ เลขที่ 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000^{2,3)} เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000¹⁾ School of mechatronics engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

²⁾ School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology³⁾ School of agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology¹⁾ 744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000^{2,3)} 111 University Avenue, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received: 19 April 2022

Revised: 25 October 2022

Accepted: 7 November 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงในท่ออบแห้งแนวดิ่งที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องต้นแบบที่ถูกใช้ในการศึกษานี้ใช้ท่ออบแห้งแบบท่อตั้งตรงแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

พันธุ์หอมปทุม 15 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งด้วยรูปแบบการป้อนอากาศเข้าหอบแห้งที่แตกต่างกันสองสภาวะคือ ที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่าที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ใช้พลังงานรวมจำเพาะน้อยกว่า และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าในช่วงความชื้นข้าวเปลือกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ความเร็วอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง อัตราการอบแห้ง

Abstract

The objective of this research was to study the influence of drying air velocity by pulse flow in vertical chamber with pneumatic dryer on paddy drying. The pneumatic dryer prototype was used in this study. has the vertical tube with a diameter of 3.81 cm and height 100 cm as a drying chamber. The drying of 15 kg of Hom Pathum paddy at 22–25% initial wet basis moisture content is tested under the drying air temperature 80°C until its moisture is 14% wet basis. The test are performed with two different drying air conditions: 1) constant velocity and 2) pulse flow velocity of drying air for study the drying behavior, drying rate (DR), specific energy consumption (SEC), and thermal efficiency of drying. The results showed that drying with pulse flow velocity conditions gives a shorter time, higher drying rate, lower total SEC consumption, and higher thermal efficiency than drying with constant velocity conditions.

Keywords: Pneumatic Paddy Dryer: Pulse Flow Air Velocity: Drying Rate

*ติดต่อ: nuttapong.wn@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 062-714-9796

1. บทนำ

การอบแห้งวัสดุเกษตรโดยเฉพาะข้าวเปลือกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่ทำการอบแห้ง ซึ่งเป็น

กระบวนการที่ขึ้นกับเวลา อีกทั้งยังได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เช่น มวลของข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วของอากาศอบแห้ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับงานทางด้านการอบแห้งวัสดุเกษตร การทำวิจัยเพื่อหาวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพยังคงต้องดำเนินการต่อไป

ปัจจุบันเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลาง เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร เทคนิคที่จะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน [1] คือ 1) Active technique เป็นการใช้พลังงานภายนอกเข้ามาช่วยในการกระตุ้น เช่น การใช้อุปกรณ์ทางกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหล หรือการทำให้พื้นผิวของวัสดุเกิดการสั่น 2) Passive technique เป็นการใช้พลังงานที่สร้างขึ้นมาจาก เช่น การเพิ่มพื้นผิว การทำให้ผิวขรุขระ หรือติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลของอากาศหมุนวน 3) Compound technique เป็นการรวม Active technique และ Passive technique เข้าด้วยกัน นั่นคือ การใช้อุปกรณ์ทางกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหลพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลของอากาศแบบหมุนวน โดยวิธีที่นิยมที่สุดสำหรับเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน คือ Passive technique เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการคิดค้นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive technique ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน หรือท่ออบแห้ง เช่น การใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) [2, 3] การใส่หลอดขด [4] การใส่คียบ [5] การใส่ปีก [6] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการขัดขวางการไหลของอากาศร้อน ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ต้องการนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าที่สูงขึ้น และหากนำเทคนิคเหล่านี้มาใช้กับการอบแห้งวัสดุเกษตรก็จะช่วยให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็วยิ่งขึ้น Bhuiya et al.

[7] ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อผนังเรียบ และท่อที่มีการใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) โดยไบบิดดังกล่าวมีสัดส่วนความพูน 4 ค่า ($RP = 1.6, 4.5, 8.9$ และ 14.7%) จากการทดลองพบว่าการใช้ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) สามารถทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้มากกว่าท่อผนังเรียบ อีกทั้งยังทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นอีกด้วย Bhuiya et al. [8] ทำการทดลองด้วยการใส่ไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) แบบคู่ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลม จากการศึกษาพบว่าที่ระยะไบบิด 1.95 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.35 ต่อมา Skullong et al. [9] ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยการใส่ปีกสามเหลี่ยมที่มีมุมปะทะการไหลของอากาศ 3 ค่า ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°) จากการศึกษาพบว่ากรณีปีกมีการทำมุม 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลมากที่สุด ในขณะที่กรณีปีกมีการทำมุม 30° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด และยังพบว่าการใช้ปีกภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าการใส่หลอดขดและไบบิดแบบเกลียว (twisted tape) อีกด้วย

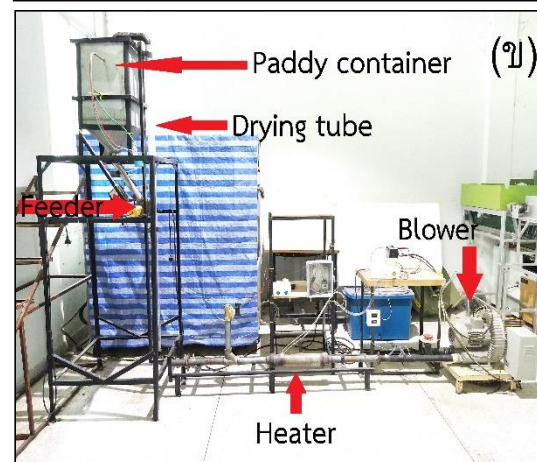
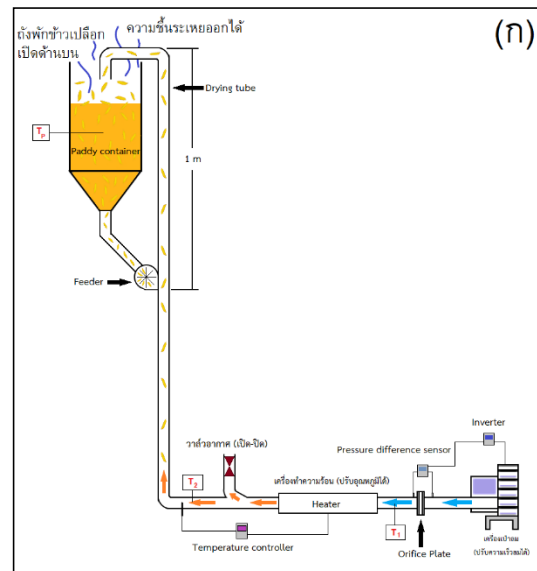
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะคิดค้นต่อยอดและพัฒนาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนใน

บริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนหรือท่ออบแห้ง อาศัยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive technique ที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะพัฒนารูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งให้มีการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) กล่าวคืออากาศจะไหลแบบเป็นช่วงตามคาบเวลาของการจ่ายและหยุดจ่ายอากาศ ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวไปตามพฤติกรรมของอากาศที่ไหลภายในท่ออบแห้ง (เคลื่อนที่แบบขึ้น-ลง ภายในท่ออบแห้งตลอดการทดสอบ) ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้เกิดการอบแห้งที่ดีขึ้น เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่หลายรูปแบบภายในท่ออบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co-current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) การไหลจะเกิดความปั่นป่วนเป็นอย่างมากและจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ต้องการอบแห้งสูงขึ้นด้วย อีกทั้งด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชแบบ ขึ้น-ลงในท่ออบแห้งนั้นถือเป็นวิธีการที่ดีต่อการอบแห้งที่ช่วยให้เมล็ดพืชมีเวลาได้สัมผัสกับอากาศอบแห้งในท่ออบแห้งนานมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

เครื่องอบแห้งต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้ง (Drying tube) ขนาด 3.81 เซนติเมตร (1.5 นิ้ว) ความยาวท่ออบแห้ง 100 เซนติเมตร ใช้เครื่องทำความร้อนขนาด 4 กิโลวัตต์ (ขดลวดความร้อนไฟฟ้าประดิษฐ์) มอเตอร์เครื่องเป่าลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ (Ventex รุ่น 2RB 710 H16)

ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้ การทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก เริ่มจาก เครื่องเป่าลมที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย อินเวอร์เตอร์ (Frecon รุ่น F003b-4) ดูดอากาศจาก สิ่งแวดล้อมผ่านชุดออริฟิซเพลท (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเทียบวัดความเร็วอากาศอบแห้ง ด้วย Differential manometer (Kimo รุ่น CP103-PO) แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุม อุณหภูมิด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Shinko รุ่น JCS-33A) เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง จากนั้นอากาศ อบแห้งจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ท่ออบแห้ง (Drying tube) ที่วางตัวในแนวตั้ง ในขณะที่เดียวกันข้าวเปลือกขึ้นจะ ถูกปล่อยจากถังเก็บ (Paddy container) ด้วยตัว บ้อนข้าวเปลือก (Feeder) และถูกลำเลียงไปพร้อม ๆ กับอากาศอบแห้งจากส่วนล่างของท่อขึ้นสู่ ด้านบนและถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน ข้าวเปลือกจะตกลงสู่ถังเก็บอีกครั้งและรอการ อบแห้งในรอบต่อไป ข้าวเปลือกขึ้นและอากาศ อบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (Concurrent flow) เป็นลักษณะของการหอบเอาเมล็ดข้าวให้ไหล ไปตามกระแสอากาศ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยน ความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี อุณหภูมิของ เมล็ดข้าวเปลือกในถังพักถูกวัดและบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Elitech รุ่น RC-4) ช่วงการวัดอุณหภูมิ -40 ถึง +85°C

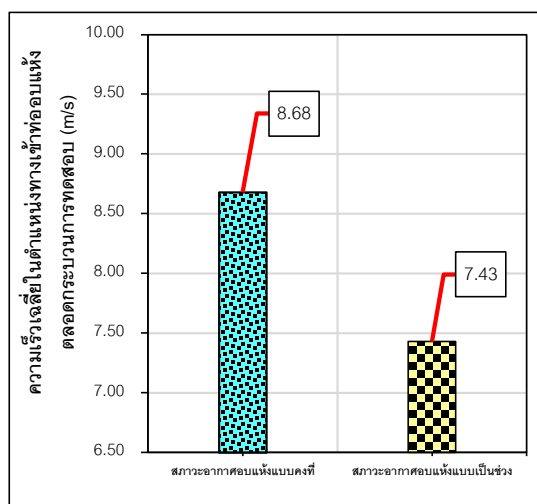
2.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม ทำการ จำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บ เกี่ยวใหม่จากแปลง ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 22-25 มาตรฐานเปียก [10] ด้วยการพ่นละอองน้ำลงในกองข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้ทั่วกันก่อนนำไป

เก็บในพาชนะที่บดแสงเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวในกองมีความชื้นทั่วถึงกัน [11] ในงานวิจัย นี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก และจะทำการลดความชื้นด้วยชุด ทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยให้ความชื้นลดลงเหลือ ประมาณร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่ เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [10] โดยใช้ข้าวเปลือกใน การทดสอบครั้งละ 15 กิโลกรัม อัตราการป้อน ข้าวเปลือก 1.00 กิโลกรัมต่อนาที ความเร็วอากาศ อบแห้ง 8.68 เมตรต่อวินาที ควบคุมอุณหภูมิอากาศ อบแห้งให้คงที่ ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Thermocouple type K เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิอากาศที่ ทางเข้าท่ออบแห้ง และส่งสัญญาณให้กับ Temperature control ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมเครื่องทำ ความร้อน (Heater) และทำการทดสอบเปรียบเทียบ การอบแห้งที่สองสภาวะอากาศคือ ที่สภาวะอากาศ อบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็น ช่วง (Pulse flow) ซึ่งการเกิดสภาวะอากาศอบแห้งแบบ เป็นช่วงนั้นเกิดขึ้นจากการระบายอากาศอบแห้งด้วย การเปิด-ปิดวาล์วอากาศ ที่ตำแหน่งต้นทางก่อน ทางเข้าท่ออบแห้ง โดยจะระบายอากาศอบแห้งด้วย โซลินอยด์วาล์วแบบเป็นคาบเวลาผ่านการควบคุม เวลาการเปิด-ปิดวาล์วด้วยชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) เมื่อทำการเปิดวาล์วระบายอากาศตาม คาบเวลาแล้วจะมีปริมาณสัดส่วนอากาศที่ไหลเข้า ท่ออบแห้งต่ออากาศที่ถูกระบายออกคิดเป็น 3.472 ต่อ 1 (เกิดขึ้นเฉพาะช่วงเวลาที่ระบายอากาศ) รูปแบบ สภาวะอากาศอบแห้งสำหรับการทดสอบแสดงดัง ตารางที่ 1 และความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยใน ตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 สภาวะอากาศที่ใช้สำหรับการทดสอบอบแห้ง

การทดสอบ 1 (สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่)		
เวลา เปิด-ปิดวาล์ว ระบายอากาศ	เปิด (s)	-
	ปิด (s)	ตลอดการ ทดสอบ
การทดสอบ 2 (สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง)		
เวลาการ เปิด-ปิดวาล์ว ระบายอากาศ	เปิด (s)	3
	ปิด (s)	3



รูปที่ 2 ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

ขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือกเมล็ดข้าวจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นชั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังเก็บ (Paddy container) ทุก 20 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงยุติการทดลอง (ยุติการทดลองเท่ากันทั้งสองสภาวะอากาศ ที่ 6 ชั่วโมง)

ทำการทดสอบซ้ำที่สภาวะอากาศละ 3 ซ้ำ อุปกรณ์ในการวัดค่าพลังงานของเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลมเป็นของ ของ LUZINO รุ่น DD28-15(45) และ International Power Group รุ่น IPG862-15(45) ตามลำดับ ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกนำไปหาค่าความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [12] โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกจำนวนประมาณ 10 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป การคำนวณค่าความชื้นแสดงดังสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{W_{i, oven} - W_{f, oven}}{W_{i, oven}} \quad (1)$$

โดยที่

M_w = เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

$W_{i, oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน (กรัม)

$W_{f, oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน (กรัม)

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการในอบแห้งจะพิจารณาจากความรวดเร็ว (ระยะเวลา) ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพที่ใช้ในการอบแห้ง

2.3.1 อัตราการอบแห้ง

นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (2) [13]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่

- DR = อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม/น้ำต่อชั่วโมง)
 W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)
 W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) และความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) และ (4) [13]

$$SEC_{Heater} = \frac{3.6E_H}{W_i - W_f} \quad (3)$$

$$SEC_{Blower} = \frac{3.6E_B}{W_i - W_f} \quad (4)$$

โดยที่

- SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม/น้ำที่ระเหย)
 E = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลม (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

2.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

พิจารณาจากผลรวมของปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกส่วนด้วยปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ แสดงดังสมการ (5) (6) (7) และ (8) [14]

$$\eta_{dry} = \left(\frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$Q_{evap} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \quad (6)$$

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (7)$$

$$Q_a = \dot{m}_a (C_a + C_v H_1) \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

โดยที่

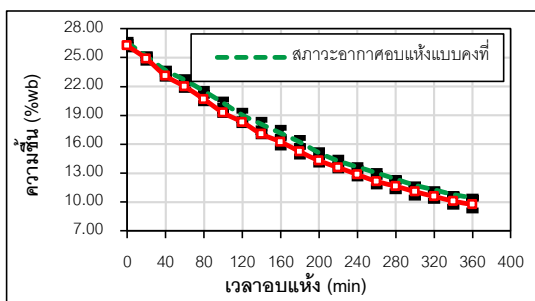
- Q_{evap} = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (กิโลจูล)
 W_d = มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)
 M_i = ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
 M_f = ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
 h_{fg} = ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ T_{p2} (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
 Q_s = ปริมาณความร้อนที่ใช้ในเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (กิโลจูล)
 C_{pd} = ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)
 C_{pw} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)
 T_{p1} = อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

- T_{p2} = อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
 Q_a = ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (กิโลจูล)
 $\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง)
 C_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)
 C_v = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง-องศาเซลเซียส)
 H_1 = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)
 T_1 = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)
 T_2 = อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

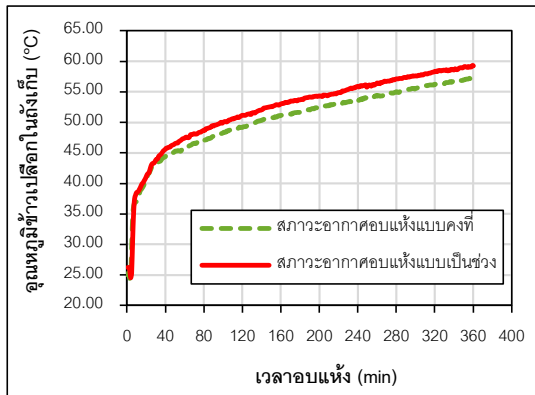
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบพฤติกรรมการลดลงของความชื้นระหว่างสภาวะอากาศอบแห้งสองรูปแบบ คือ ที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง ทดสอบที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 3) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษา จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงช่วยให้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงต่ำกว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไปได้ประมาณ 20 นาที เส้นแนวโน้มการลดลงของความชื้นจะแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าเมื่อทำการทดสอบด้วยการเปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด (เปิด 3 ปิด 3) จะทำให้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงตาม เนื่องจากการเปิดวาล์วเป็นการระบายอากาศอบแห้งออกก่อนเข้าเข้าสู่หอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดอัตราการไหลและลดความดันอากาศอบแห้งภายในหอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการหน่วงเวลาการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้งให้นานขึ้น สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Wongbubpa, N. et al. [15] และ ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ [16] ที่มีการรายงานว่าการสร้างการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงสามารถช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้นานขึ้น ซึ่งการที่เมล็ดข้าวเปลือกสามารถใช้เวลานานในหอบแห้งจะเป็นผลดีที่ช่วยให้สามารถรับพลังงานความร้อนจากอากาศอบแห้งได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว [17-19] หากเมล็ดข้าวได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้มาก ความร้อนนี้จะช่วยในการขับความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามไปด้วยเช่นกัน การรับพลังงานความร้อนได้มากขึ้นแสดงได้ด้วยระดับอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่จะต้องเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของ

พฤติกรรมการอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4

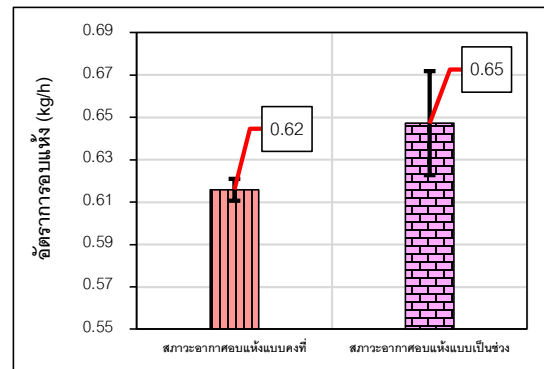


รูปที่ 4 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บในกรณีการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ ค่าความแตกต่างนี้เริ่มสังเกตเห็นได้ อย่างชัดเจนที่เวลาประมาณ 40 นาที เป็นต้นไป ความแตกต่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บระหว่างสภาวะอากาศอบแห้งทั้งสองมีค่าประมาณ 2 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ

3.2 อัตราการอบแห้ง

ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งกับสภาวะอากาศที่ใช้สำหรับการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C วิเคราะห์อัตราการอบแห้งพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในช่วงความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นลดลงถึงร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีลักษณะดังรูปที่ 5

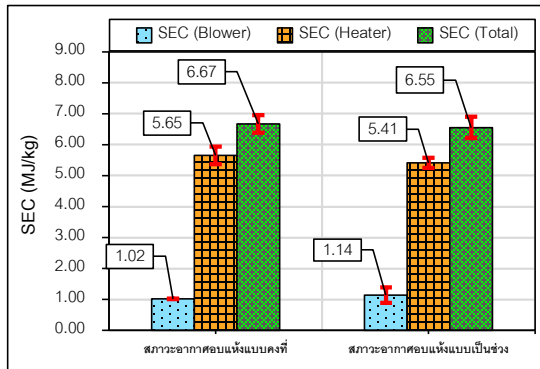


รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะอากาศสำหรับการทดสอบอบแห้งที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบอบแห้ง (รูปที่ 5) พบว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นตาม ทั้งนี้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากอิทธิพลรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงที่สามารถหมุนเวียนเวลาการเคลื่อนที่ให้เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวออกจากท่ออบแห้งได้ช้าลง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาในการสัมผัสและรับพลังงานความร้อนที่นานขึ้น เมล็ดข้าวเปลือกจึงสามารถเก็บและสะสมความร้อนได้มาก (สอดคล้องกับคำอธิบายในหัวข้อที่ 3.1) จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งสำหรับการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 0.62-0.65 kg_{water}/h

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้น ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แสดงดังรูปที่ 6



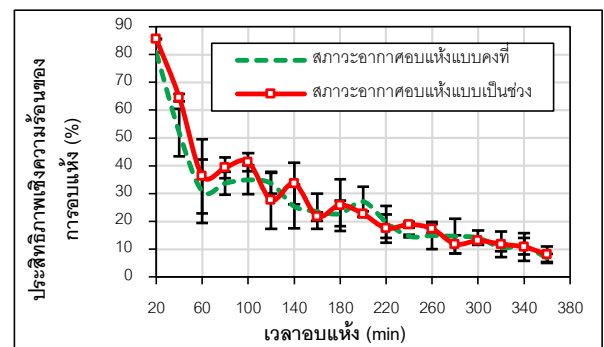
รูปที่ 6 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะอากาศ สำหรับการทดสอบอบแห้งที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 6 แสดงการพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นสามส่วนคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 5.41-5.65 MJ/kg_{water} อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพัดลมจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ไปสำหรับเครื่องเป่าลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 1.02-1.14 MJ/kg_{water} และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวม ($SEC_{Total} = SEC_{Heater} + SEC_{Blower}$) มีค่าอยู่ในช่วง 6.55-6.67 MJ/kg_{water} ผลการทดสอบอบแห้งแสดงให้เห็นว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะ (SEC_{Heater}) มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง การวิเคราะห์ถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในส่วนนี้เป็นไปตามสมการที่ (3) มีเทอมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดและถูกใช้ไปตามเวลา ในระหว่างการทดสอบซึ่งถูกติดตั้งไปในชุดอุปกรณ์การทดสอบ และเนื่องด้วยผลการทดสอบที่สภาวะ

อากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อย (พิจารณาที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) ซึ่งเป็นเหตุและผลดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ดังจะเห็นได้จากข้อมูลผลการทดสอบดังรูปที่ 3 เมื่อการทดสอบอบแห้งใช้เวลาน้อยจึงทำให้อัตราการบริโภคไฟฟ้าน้อยลงตาม ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานป้อนรวมจำเพาะลดลงตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพัดลมจำเพาะ (SEC_{Blower}) จะเห็นได้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าที่มากขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ (SEC_{Total}) แล้ว การทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงก็ยังคงมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะที่ต่ำกว่าการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่อยู่มาก เนื่องจากค่าพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้งมีอิทธิพลที่สำคัญต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าค่าพลังงานที่ใช้ไปสำหรับเครื่องเป่าลม

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาค่าทุก ๆ 20 นาที ที่ตลอดการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งตามเวลา

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (รูปที่ 7) พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง ระบบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่ากรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งสองกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 4) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกรับไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาลดน้อยลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น

4. สรุปผล

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุมด้วยการอบแห้งที่แตกต่างกันสองสภาวะอากาศคือ สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ และสภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง พบว่าการสร้างสภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงสามารถสร้างการหน่วงเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกให้เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งได้นานขึ้นก่อนถูกเป่าพ่นออกนอกท่ออบแห้งได้ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวช่วยส่งเสริมการสะสมอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นได้ และเป็นผลดีต่อการอบแห้งที่จะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความร้อนในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกกลอยอยู่ในท่ออบแห้งได้ การทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงจะ

ให้ค่าความชื้นข้าวเปลือกจะลดลงได้เร็ว อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นประมาณ 4.8 เปอร์เซ็นต์ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะลดลงประมาณ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ทำการทดสอบที่สภาวะอากาศอบแห้งแบบคงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการอบแห้งนี้มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่นข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ หรือวัสดุเกษตรที่มีลักษณะเป็นเมล็ดได้ด้วยเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนการทำวิจัยมาด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu S and Sakr M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 19: 64-81.
- [2] Chuwattanakul V and Eiamsa-ard S. Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. Case Studies in Thermal Engineering. 2019; 13: 100389.

- [3] Eiamsa-ard P, Piriyaungroj N, Thainpong C and Eiamsa-ard S. A case study on thermal performance assessment of a heat exchanger tube equipped with regularly twisted tapes as swirl generators. *Case studies in Thermal Engineering*. 2014; 3: 86-102.
- [4] Akyurek EF, Gelis K, Sahin B and Manay E. Experimental analysis for heat transfer of nanofluid with wire coil turbulators in a concentric tube heat exchanger. *Results in Physics*. 2018; 9: 376-89.
- [5] Nanan K, Thianpong C, Pimsarn M, Chuwattanakul V and Eiamsa-ard S. Flow and thermal mechanisms in a heat exchanger tube inserted with twisted cross-baffle turbulators. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114: 130-47.
- [6] Skullong S, Promvonge P, Thianpong C and Jayranaiwachira N. Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 115: 229-43.
- [7] Bhuiya MMK, Chowdhury MSU, Saha M and Islam MT. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013; 46: 49-57.
- [8] Bhuiya MMK, Sayem ASM, Islam M, Chowdhury MSU and Shahabuddin M. Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014; 50: 25-33.
- [9] Skullong S, Promvonge P, Jayranaiwachira N and Thianpong C. Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts. *Chemical Engineering and Processing*. 2016; 109: 164-77.
- [10] Department of Agriculture. Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice. Jirawat express co., ltd. Bangkok Thailand; 2004.
- [11] Limpiti S and Changrue V. Effects of Rewetting on Milling Quality of Wet Season Japanese Rice. *Journal of Agricultural*. 1996; 12(2): 134-139.
- [12] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland; 2000.

- [13] Saelim N, Treeamnuk T and Treeamnuk K. Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique. RMUTP Research Journal. 2018; 12(2): 37-46.
- [14] Treeamnuk T. Drying and Storage of Agricultural Products. School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology; 2011.
- [15] Wongbubpa N, Treeamnuk K and Treeamnuk T. (2020). Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow, The 13th TSAE International Conferences 187, Suranaree University of Technology, Thailand.
- [16] Wongbubpa N, Treeamnuk K and Treeamnuk T. Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber, The 22nd TSAE National Conferences; 2021 March 12-14; Khon Kaen, Thailand. Khon Kaen University,. 2021.
- [17] Wongbubpa N and Chitsomboon T. Sustain Spouted Bed Paddy Dryer with Internal Grates, The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 October 15-17; Khon Kaen, Thailand. 2014.
- [18] Wongbubpa N and Chitsomboon T. (). Effectiveness of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer, The 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2015 July 1-3; Nakhon Ratchasima, Thailand. 2015.
- [19] Wichinthanassam T, Ritthong W and Sathapomprasath K. Paddy dehydration using Impinging stream dryer combined with Pneumatic dryer, The 25th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2011 October 19 – 21; Krabi, Thailand. 2011.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติและแบบบังคับ

Comparative Study on Performance of Passive and Active Solar Dryer

ศิริชัย ศิริชนะ¹⁾ ทรงสุภา พุ่มชุมพล¹⁾ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹⁾ อภินันต์ นามเขต^{1)*} และ ปฐวิทย์ วรามิตร²⁾Sirichai Sirichana¹⁾ Songsupa Pumchumpol¹⁾ Umphisak Teeboonma¹⁾ Apinunt Namkhat^{1)*}and Pathiwat Waramit²⁾¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

²⁾สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani, 34190

²⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima, 30000

Received: 20 April 2022

Revised: 22 September 2022

Accepted: 22 September 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีห้องอบแห้งจำนวน 4 ห้อง เพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ (PSD) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนแบบบังคับ (ASD) โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศที่ใช้ใน ASD เท่ากับ 0.03 m³/s (ASD0.03), 0.06 m³/s (ASD0.06) และ 0.09 m³/s (ASD0.09) ตามลำดับ ในการศึกษาได้เลือกใช้เนื้อหมูที่มีความชื้น

เริ่มต้นเท่ากับ 265 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง เป็นตัวอย่างในการทดลอง ซึ่งมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ อัตราการอบแห้ง ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลการศึกษาพบว่า สมรรถนะ ASD สูงกว่า PSD นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราการอบแห้งของเครื่อง ASD0.06 สูงกว่าอัตราการอบแห้ง PSD, ASD0.03 และ ASD0.09 เท่ากับร้อยละ 19.35, 10.52 และ 8.86 ตามลำดับ ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ASD0.06 น้อยกว่า PSD, ASD0.03 และ ASD0.09 เท่ากับร้อยละ 26.56, 17.13 และ 15.65 ตามลำดับ และสุดท้ายยังพบว่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ PSD, ASD0.03, ASD0.06 และ ASD0.09 มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.68, 12.68, 14.91 และ 12.91 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพ อัตราการไหลอากาศ

Abstract

The solar dryer with 4 drying chambers, in this research, was constructed to test the performance of passive solar dryer (PSD) and active solar dryer (ASD). Air flowrate of ASD varied in this study are $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ (ASD0.03), $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (ASD0.06) and $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ (ASD0.09). Pork with initial moisture content of 265 % dry basis was selected as testing material. The criteria used to evaluate the solar dryer performance are drying rate, solar dryer efficiency and specific energy consumption. It was found from the experimental results that the ASDs performance are higher than that of PSD. Furthermore, it was revealed that the drying rate of ASD0.06 is higher than that for PSD, ASD0.03 and ASD0.09 by 19.35%, 10.52% and 8.86%, respectively. Whilst, specific energy consumption of ASD0.06 is lower than that for PSD, ASD0.03 and ASD0.09 by 26.56%, 17.13% and 15.65%, respectively. Finally, it was also found that solar dryer efficiency of PSD, ASD0.03, ASD0.06 and ASD0.09 are 11.68%, 12.68%, 14.91% and 12.91%, respectively.

Keywords: Drying: Solar dryer: Efficiency: Air flow rate

*ติดต่อ: E-mail: apinunt.n@ubu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 045-353-309, เบอร์โทรสาร: 045-353-308

1. บทนำ

พื้นที่ของประเทศไทยโดยส่วนใหญ่มีสภาพภูมิประเทศที่เอื้ออำนวยสำหรับการประกอบอาชีพเกษตรกรรม จึงส่งผลให้ประชากรโดยส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมตามแต่ละลักษณะของพื้นที่ เช่น ทำไร่ ทำนา ทำสวน เลี้ยงสัตว์

หรือประมง เป็นต้น ทำให้ประเทศไทยนั้นมีความสมบูรณ์และความหลากหลายทางด้านอาหารเป็นอย่างมาก และส่งผลดีต่อประเทศในด้านเศรษฐกิจเนื่องจากสามารถส่งออกผลผลิตเพื่อจำหน่ายไปยังหลายประเทศทั่วโลก เช่น กุ้ง ข้าว ยางพารา และผลไม้หลากหลายชนิด เป็นต้น สำหรับผลผลิตที่

เกษตรกรเก็บเกี่ยวบางส่วนถูกนำไปจำหน่ายทันที และบางส่วนถูกแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิต หรือเก็บรักษาไว้จำหน่ายในช่วงราคาสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่กำลังพัฒนาประมาณร้อยละ 30-40 [1,2] เกิดความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว และหากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ถึงร้อยละ 80 ของผลผลิตที่มีอยู่ [3] หรือเกิดการเน่าเสียไปเนื่องจากเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ซึ่งสาเหตุของการเน่าเสียส่วนใหญ่มาจากน้ำหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงเกินไปทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้จึงเกิดการเน่าเสีย [3] ในส่วนของวิธีการที่จะทำให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตได้ยาวนานโดยไม่เกิดการเน่าเสียก็คือการไล่น้ำออกจากผลิตภัณฑ์หรือการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ [4-7] สำหรับกระบวนการลดความชื้นที่ปฏิบัติกันมาช้านาน คือ การตากแดดโดยตรง ซึ่งระยะเวลาในการทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าการตากแห้งผลิตภัณฑ์โดยตรงจะพบปัญหาหลายด้านเช่น ใช้พื้นที่ตากแดดมาก มีฝุ่นหรือสิ่งสกปรกปนเปื้อน นกและแมลงรบกวน หรือมีสัตว์แทะเล็ม [6-8] จากปัญหาผลกระทบที่กล่าวมาทำให้มีการพัฒนาวิธีการลดความชื้นผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการปนเปื้อนฝุ่นหรือแมลงรบกวนโดยใช้เครื่องอบแห้งในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถเพิ่มความสะอาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [9,10] อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องอบแห้งต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อให้ความร้อน ที่ผ่านมามีแหล่งพลังงานที่ใช้ในการสร้างความร้อนมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ [11,12] เช่น ไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น

เชื้อเพลิงที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเชื้อเพลิงที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งจะมีความผันผวนทางด้านราคาเป็นอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลง ส่งผลให้เกษตรกรต้องแบกรับภาระต้นทุนการผลิตด้านพลังงานและทำให้กำไรลดลง เกษตรกรจึงหันมาใช้พลังงานจากพลังงานทดแทน เช่น ก๊าซชีวภาพ หรือเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตามก็ยังพบกับปัญหาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ฝุ่นควัน และกลิ่น จากผลกระทบทางด้านต้นทุนและมลภาวะที่กล่าวมาข้างต้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเริ่มได้รับความนิยมและสนใจจากเกษตรกรอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีต้นทุนด้านพลังงาน [10-12] ปรากฏจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งประเทศไทยมีพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรจึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เต็มที่ตลอดทั้งปี โดยมีค่าพลังงานตกกระทบเฉลี่ย $18 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ สำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถจำแนกตามรูปแบบการประยุกต์ใช้ได้ 3 รูปแบบหลัก คือ 1) การตากแดดโดยตรง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้นจะถูกนำมาตากแดดโดยตรง โดยอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์ได้รับจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 2) การใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไล่น้ำความชื้นจะถูกนำเข้าอบในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งจะสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลงจึงเกิดการลอยตัว ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวและเหนี่ยวนำอากาศตามธรรมชาติ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการนี้จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการตากแดดโดยตรง [7-10] อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดจากการอบแห้งในรูปแบบนี้คือ

ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในห้องอบแห้งจะค่อนข้างสูง เนื่องจากการไหลเวียนอากาศเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ ดังนั้นปริมาณอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพื่อนำพาความชื้นออกจากห้องอบแห้งในบางช่วงการอบแห้งจึงไม่เพียงพอ ส่งผลให้ความชื้นสะสมที่ผิวของผลิตภัณฑ์นานเกินไป และเป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถใช้ประโยชน์จากความชื้นที่ผิวดังกล่าวในการเจริญเติบโตจนกระทั่งก่อให้เกิดการเน่าเสีย และ 3) การใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ โดยลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งจะคล้ายคลึงกับรูปแบบที่ 2 แต่จะมีอุปกรณ์เพิ่มเติม คือพัดลมเพื่อใช้สร้างการไหลเวียนอากาศและพาพาความชื้นออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งข้อดีของรูปแบบนี้คือความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งจะต่ำกว่าการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ แต่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งจะต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ การอบแห้งรูปแบบนี้สามารถแก้ปัญหาความชื้นสูงที่มีภายในห้องอบแห้งได้เป็นอย่างดี และสิ่งที่ตามมาจากการใช้พัดลมในการพาความชื้นออกจากห้องอบแห้งอย่างต่อเนื่อง คืออุณหภูมิห้องอบแห้งที่ลดลงเนื่องจากพัดลมจะพาทั้งความชื้นและความร้อนออกไปพร้อมกัน ส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่สูงเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา [13-17] พบว่า การใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการตากแดดโดยตรง และการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ ในขณะที่ประเด็นการหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งที่เหมาะสมควรจะเท่าไรก็ยังไม่ชัดเจน

ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากมีประเด็นคุณสมบัติผลิตภัณฑ์เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติและแบบบังคับ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งและผลของอัตราการไหลเวียนอากาศที่มีต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เนื้อหมูเป็นตัวอย่างในการทดลองผลิตเนื้อหมูแดดเดียว เนื่องจากปัจจุบันเนื้อหมูแดดเดียวได้รับความนิยมในการบริโภคเป็นอย่างมาก รวมทั้งมีการแข่งขันในเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการอบแห้งเนื้อหมูแดดเดียวด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกที่จะสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของเนื้อหมูแดดเดียว

2. วิธีการวิจัย

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างเพื่อทดสอบสมรรถนะโดยประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ โครงสร้างทำจากเหล็ก ผนังด้านข้างและด้านล่างห่อหุ้มด้วยแผ่นสังกะสีภายในบุฉนวนกันความร้อนชนิดโพลียูรีเทนหนา 10 มิลลิเมตร ด้านบนปิดด้วยกระจกใสความหนา 5 มิลลิเมตร โดยกระจกมีพื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ 0.68 ตารางเมตร ซึ่งแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งให้เอียงหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อรับรังสีแสงอาทิตย์ที่มุม 15 องศา 2) ห้องอบแห้งเป็นส่วนที่รับพลังงานความร้อนจากแผงเก็บรังสี เพื่ออบลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ผนังทุกด้านห่อหุ้มด้วยแผ่นสังกะสี ภายในห้องอบแห้งรวมทั้งระหว่างห้องอบแห้งติดฉนวนกันความร้อนชนิดโพลียูรีเทนหนา 10 มิลลิเมตร 3) ชุดควบคุมการทำงาน

พัฒนาระบายอากาศ สำหรับพาอากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้ง และวัดสถิติสำหรับวัดและบันทึกพลังงานที่จ่ายให้กับพัดลม



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ในการทดลองได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 1 เครื่อง โดยมี 4 ห้องอบแห้งเรียงติดกันดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้ในการทดสอบภายใต้สภาวะพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ อุณหภูมิ แวลลุ่มและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเดียวกัน และเพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งระหว่างเครื่องอบแห้งที่มีการไหลเวียนอากาศธรรมชาติและเครื่องอบแห้งที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับในปริมาณที่แตกต่างกัน

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 ผลัดภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

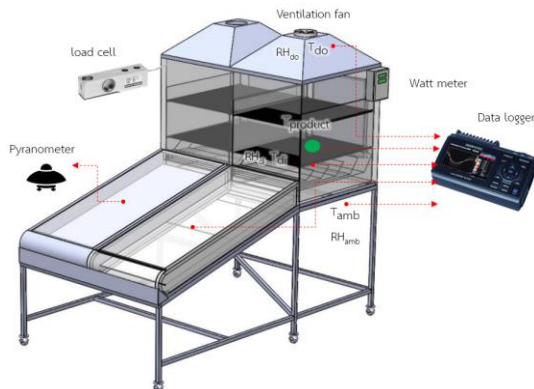
การศึกษานี้ได้เลือกใช้เนื้อหมูสันนอกเพื่อการทดลองในปริมาณห้องอบแห้งละ 1 กิโลกรัม โดยเนื้อหมูถูกจัดเตรียมโดยหั่นตัดขวางเส้นใยให้ได้ขนาดความยาวเฉลี่ย 10 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดที่ใช้ในการผลิตเนื้อหมูแดดเดียวซึ่งวางจำหน่ายในท้องตลาด

2.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองภายใต้พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบจริง เพื่อทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์การไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์การไหลเวียนอากาศแบบบังคับที่อัตราการไหลอากาศ 0.03 m³/s, 0.06 m³/s และ 0.09 m³/s ตามลำดับ สำหรับวิธีการควบคุมอัตราการไหลอากาศในแต่ละห้องอบแห้งดำเนินการโดยใช้พัดลมระบายอากาศขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 40 วัตต์ ซึ่งมีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 0.17 m³/s ต่อผ่านอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อปรับให้ได้อัตราการไหลอากาศตามที่ต้องการ

2.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเริ่มจากเตรียมเนื้อหมู และชุดทดลอง โดยติดตั้งเครื่องมือวัดทุกประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2 วัดอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลิตภัณฑ์วัดโดยใช้โหลดเซลล์โดยทั้งคู่ต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล (Midi logger GL820) ในส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบวัดและบันทึกโดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Seaward solar survey 200R) ในระหว่างการทดลองข้อมูลทุกอย่างจะถูกวัดและบันทึกค่าทุก 5 นาที โดยเริ่มดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 09:00 น. จนถึงเวลา 16:00 น. นอกจากนั้นยังวัดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมระบายอากาศของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ดิจิตอลวัตต์มิเตอร์



รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ดำเนินการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ความชื้นของผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้ง ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content, M) คือ ดัชนีบ่งชี้ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1) [17-20]

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %d.b.

m_i คือ มวลผลิตภัณฑ์เริ่มต้น, kg

m_d คือ มวลแห้งผลิตภัณฑ์, kg

ความชื้นผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลาวิเคราะห์ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2) [17-20]

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งที่แต่ละช่วงเวลา, %d.b.

m_t คือ มวลผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ, kg

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ ปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงค่าสมรรถนะในการอบแห้ง หรือความสามารถของการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อเวลาอบแห้ง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3) [17-20]

$$DR = \frac{m_i - m_t}{T} \quad (3)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, kg/h

m_t คือ มวลผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ, kg

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar dryer efficiency, η) คือ พารามิเตอร์บ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการระเหยนํ้าออกจากผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งต่อพลังงานทั้งหมดที่เครื่องอบแห้งใช้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ (4) [17-20]

$$\eta = \frac{m_w h_{fg}}{AI + E_b} \times 100\% \quad (4)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, %

m_w คือ ปริมาณมวลน้ำระเหย, kg

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงการระเหยนํ้า, MJ/kg

A คือ พื้นที่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์, m^2

I คือ พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ, MJ/m^2

E_b คือ พลังงานไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้, MJ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยมีความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ (5) [20-22]

$$SEC = \frac{E_b + AI}{m_w} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
, MJ/kg evap-water

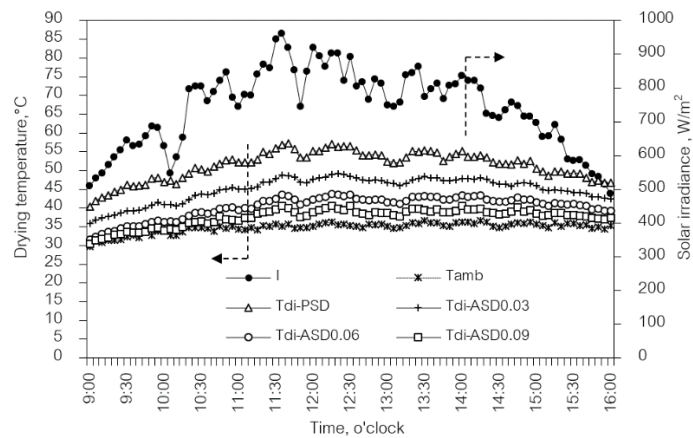
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการทดลองที่นำเสนอประกอบด้วยสภาวะเงื่อนไขพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3-5

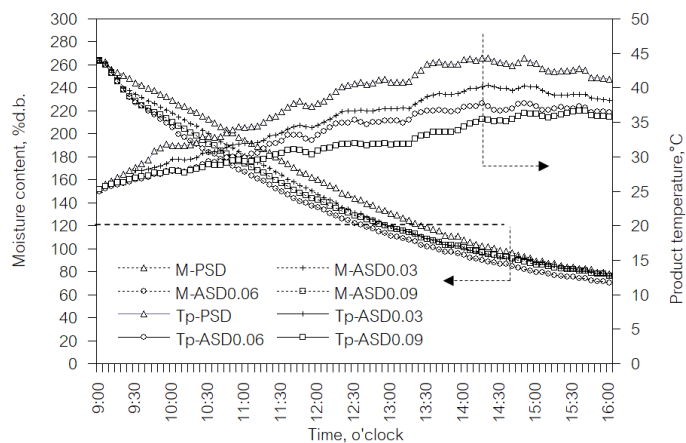
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ (I) อุณหภูมิแวดล้อม (Tamb) และอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง (Tdi) ที่แต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเช้า และลดลงในช่วงบ่าย และในแต่ละช่วงเวลาก็เปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ เช่น ช่วงเวลาที่มีเมฆบดบัง ซึ่งในการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบตลอดช่วงการทดลองเท่ากับ 740 W/m²

ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมก็เปลี่ยนแปลงตามพลังงานตกกระทบเช่นกัน โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองเท่ากับ 35°C สำหรับอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าห้องอบแห้งก็เปลี่ยนแปลงตามพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ (PSD) จะมีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 51°C ในส่วนของอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่มีการควบคุมอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.03 m³/s (ASD0.03), 0.06 m³/s (ASD0.06) และ 0.09 m³/s (ASD0.09) พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 45°C, 40°C และ 38°C ตามลำดับ

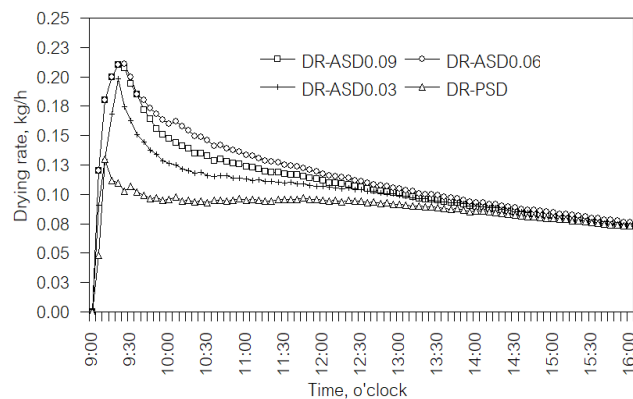
จากข้อมูลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งที่มีการระบายอากาศสูงจะมีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งต่ำ ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อน คือ $Q = \dot{m}C_p(T_{di} - T_{amb})$ กล่าวคือเมื่อเครื่องอบแห้งทุกเครื่องรับพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ (Q) และมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องอบแห้งเท่ากัน ในขณะที่อัตราการระบายอากาศ ($\dot{m}$) ไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้เครื่องอบแห้งที่ระบายอากาศเท่ากับ 0.09 m³/s มีอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งต่ำที่สุด โดยมีค่าน้อยกว่าเครื่องอบแห้งที่ระบายอากาศ 0.06 m³/s, 0.03 m³/s และแบบธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 5.26, 18.42 และ 34.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานตกกระทบและอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งที่แต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งที่แต่ละช่วงเวลา

รูปที่ 4 นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์แต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลพบว่า ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามเวลา และเมื่อเปรียบเทียบที่เงื่อนไขความชื้นเดียวกับความชื้นสูงสุดเพียงอย่างเดียวที่จำหน่ายตามท้องตลาด ซึ่งมีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 120% d.b. พบว่า เครื่องอบแห้งที่มีการไหลเวียนอากาศเท่ากับ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (ASD0.06) จะใช้เวลาในการอบแห้งสูงสุดเพียงอย่างเดียว โดยพบว่าใช้เวลาสั้นกว่า ASD0.09, ASD0.03 และ PSD เท่ากับร้อยละ 9.50, 11.73 และ 23.46 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติจะมีอุณหภูมิผลิตภัณฑ์สูงสุด ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะสอดคล้องกับข้อมูลอุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งที่นำเสนอในรูปที่ 3 ในส่วนประเด็นที่ ASD0.06 ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดนั้นเมื่อวิเคราะห์จากข้อมูลพบว่าในเงื่อนไขนี้มีความชื้นที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (Tp) คงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยค่อนข้างนาน (9:30-10:30 น.) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ซึ่งช่วงเวลานี้จะเป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์สมดุลกับความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ใช้ในการระเหยน้ำหรือเรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) ซึ่งอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง น้ำของผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดการแพร่และเกาะที่ผิวของผลิตภัณฑ์ก็จะเกิดการระเหยหรือถ่ายเทมวลไปกับลมร้อน โดยช่วงนี้สามารถสังเกตได้จากอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย หลังจากนั้นอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้นหรือเข้าสู่ช่วงที่เรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period)

โดยในช่วงนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์จะมากกว่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์รับพลังงานอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้ผิวของผลิตภัณฑ์แห้งและแข็งจนเกิดการปิดกั้นทางเดินของน้ำในผลิตภัณฑ์ที่จะแพร่สู่ผิวของผลิตภัณฑ์จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง และในทางตรงข้ามหากมีอัตราการระบายอากาศสูงเกินไปก็จะส่งผลให้อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งต่ำจนกระทั่งทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ต่ำส่งผลให้ความดันไอของน้ำในผลิตภัณฑ์สูงไม่มากเพียงพอที่จะแพร่มายังผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะพบว่าข้อมูลนี้สอดคล้องกับข้อมูลอัตราการอบแห้งที่นำเสนอในรูปที่ 5 จากข้อมูลในรูปที่ 5 จะพบว่าเครื่องอบแห้งที่เงื่อนไขอัตราการระบายอากาศเท่ากับ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเงื่อนไขอื่น ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองค่าอัตราการอบแห้งจะสูงในช่วง 30-40 นาทีแรก หลังจากนั้นก็จะลดลง โดยมีแนวโน้มในลักษณะเช่นเดียวกันที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งปัจจัยที่ทำให้อัตราการอบแห้งสูงในช่วง 30-40 นาทีแรก เนื่องจากช่วงเริ่มต้นจนกระทั่ง 30 นาทีแรกของการอบแห้งเป็นช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (Heat up) ของผลิตภัณฑ์ กล่าวคืออุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อนจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์เป็นหลัก หลังจากอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งก็จะเกิดการถ่ายเทมวลหรือระเหยน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะสูงและลดลงเมื่อน้ำที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์แห้งหลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ตารางที่ 1 สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เงื่อนไขความชื้นสุดท้าย 120%d.b.

รายการ	การไหลเวียน อากาศแบบ ธรรมชาติ	การไหลเวียนอากาศแบบบังคับ		
		0.03 m ³ /s	0.06 m ³ /s	0.09 m ³ /s
มวลผลิตภัณฑ์เริ่มต้น, g	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00
มวลผลิตภัณฑ์สุดท้าย, g	604.10	602.50	602.40	603.20
พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเฉลี่ย, W/m ²	751.80	760.10	722.10	760.30
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย, °C	33.50	34.20	33.60	34.20
อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย, °C	50.50	44.20	37.70	36.60
เวลาในการอบแห้ง, h	4.42	4.00	3.58	3.92
ปริมาณมวลน้ำที่ระเหย, g	395.90	397.50	397.60	396.80
พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้พัดลม, MJ	0.000	0.117	0.123	0.148
พลังงานแสงอาทิตย์รวม, MJ	8.13	7.44	6.33	7.30
อัตราการอบแห้ง, g/h	89.57	99.38	111.06	101.22
ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง, %	11.68	12.68	14.91	12.91
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg evap-water	20.54	19.01	16.23	18.77

ตารางที่ 1 นำเสนอข้อมูลภาพรวมการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขการระบายอากาศที่แตกต่างกัน โดยได้ควบคุมเงื่อนไขการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะความชื้นคงเหลือเนื้อหมูเท่ากับ 120%d.b. ซึ่งเป็นความชื้นหมูแดดเดียวที่จำหน่ายตามท้องตลาด ข้อมูลค่าเฉลี่ยที่สรุปในตารางที่ 1 เป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนกระทั่งเนื้อหมูมีความชื้นคงเหลือ 120%d.b. ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบและอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละเงื่อนไขแตกต่างกัน จากข้อมูลที่สรุปในตาราง

จะพบว่า ที่เงื่อนไขอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.06 m³/s (ASD0.06) จะให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 111.06 g/h ซึ่งมีค่ามากกว่า PSD, ASD0.03 และ ASD0.09 เท่ากับร้อยละ 19.35, 10.52 และ 8.86 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก ASD0.06 ใช้เวลาสั้นที่สุดในขณะที่สามารถระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ในส่วนของประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งก็พบเช่นกันว่า ASD0.06 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 14.91 ซึ่งมากกว่า PSD, ASD0.03 และ ASD0.09 เท่ากับร้อยละ 21.66, 14.96 และ 13.41 ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า

ASD0.06 มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ 16.23 MJ/kg evap-water โดยมีค่าน้อยกว่า PSD, ASD0.03 และ ASD0.09 เท่ากับร้อยละ 26.56, 17.13 และ 15.65 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจาก ASD0.06 ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ส่งผลให้พลังงานรวมที่ใช้ก็น้อยที่สุดในขณะที่ปริมาณการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) และ (5) จึงทำให้ ASD0.06 มีประสิทธิภาพสูงและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติและแบบบังคับ รวมทั้งศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้เนื้อหมูเป็นตัวอย่างในการทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับมีอัตราการอบแห้ง และประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ ในทุกเงื่อนไขของอัตราการระบายอากาศ จากการศึกษา ยังพบว่า การใช้อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.06 m³/s เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะมีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น สำหรับแนวทาง

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไปในอนาคต ควรศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นการระบายอากาศให้สอดคล้องกับอัตราการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] El-sebaili AA, Shalaby SM. Solar drying of agricultural products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012; 16: 37-43.
- [2] Ahmed A. Drying characteristic of apple slices undertaken the effects of passive shelf solar dryer and open sun drying. Pakistan Journal of Nutrition. 2013; 12(3): 250-4.
- [3] Ahmed AG. Design construction and performance evaluation of solar maize dryer. Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development. 2010; 23: 39-46.
- [4] Nwajinka CO and Onuegbu CU. Development of a solar cabinet dryer for root crops chips in Nigeria. Journal of Agricultural Engineering and Technology. 2014; 22(2): 47-58.

- [5] Okoroigwe EC, Eke MN and Ugwu HU. Design and evaluation of combined solar and biomass dryer for small and medium enterprises for developing countries. *International Journal of Physical Sciences*. 2013; 8(25): 1341-9.
- [6] Janjai S and Bala BK. Solar drying technology. *Food Engineering Review*. 2012; 4: 16-54.
- [7] Gutti B, Kiman S and Mustafa BG. Design and construction of forced/natural convection solar vegetable dryer with heat storage. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012; 7(10): 1213-7.
- [8] Hajar E, Mohammed B, Rachid T, and Bargach MN. Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018; 49: 58-64.
- [9] Muruganantham PK, Kamalakannan RS and Mohana S. Performance analysis of a tubular solar dryer for drying mexican mint (*Plectranthus amboinicus*) - An experimental approach. *Energy Reports*. 2021; 7: 7-12.
- [10] Nabnean S and Nimnuan P. Experimental performance of direct forced convection household solar dryer for drying banana. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 22: 1-11.
- [11] Masnaji RN and Vinod BT. A review on performance evaluation of solar dryer and its material for drying agricultural products. *Materials today: Proceedings*. 2021; 46(1): 345-9.
- [12] Ankur GB, Das AB and Jayanta DM. Sustainability and 4E analysis of novel solar photovoltaic-thermal solar dryer under forced and natural convection drying. *Renewable Energy*. 2022; 188: 1008-21.
- [13] El-Sebaei AA and Shalaby SM. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conversion and Management*. 2013; 74: 109-16.
- [14] Samira C, Abdelghani B, Djamel M and Mohamed HB. Solar drying of sliced potatoes-an experimental investigation. *Energy Procedia*. 2013; 36: 1276-85.

- [15] Avesahemad SN, Husainy SP and Gouri W. Experimental investigation of mixed mode forced convection solar dryer for turmeric (*Curcuma Longa*). *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2018; 7(1): 1-6.
- [16] Baher MAA, Klaus G, Hossain MA. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. *Renewable Energy*. 2018; 121: 539-47.
- [17] Semwanga M, Nakiguli F and Nasejje S. Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive-mode and active-mode solar dryers for drying fruits in East. *Journal of Stored Products Research*. 2020; 88: 1-11.
- [18] Aymen E, Sami K, Ilhem H and Abdelhamid F. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*. 2015; 77: 1-8.
- [19] Mohamed AE, Mostafa MA and Abdulrahman OA. Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*. 2018; 116: 594-605.
- [20] Aprajeeta J and Tripathy PP. Recent advancements in design, application, and simulation studies of hybrid solar drying technology. *Food Engineering Reviews*. 2021; 13: 375-410.
- [21] Wei W, Ming L, Reda HE, Yunfeng W and Luwei Y. Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Applied Thermal Engineering*. 2018; 134: 310–21.
- [22] Ortiz-Rodríguez NM, Condori M, Duran G and García-Valladares O. Solar drying technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 215: 1-31.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับครัวเรือน

Study on Performance of Small Solar Water Pump for Household

กิตติยาพร พงศ์พีระ¹⁾ ทรงสุภา พุ่มชุมพล¹⁾ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹⁾อภินันต์ นามเขต^{1)*} และ ประพันธ์พงษ์ สมศิลา²⁾Kittiyaphon Pongpeera¹⁾ Songsupa Pumchupol¹⁾ Umphisak Teeboonma¹⁾Apinunt Namkhat^{1)*} and Praphanpong Somsila²⁾¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

²⁾สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์

อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani, 34190

²⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Muang District, Surin, 32000

Received: 29 April 2022

Revised: 13 September 2022

Accepted: 15 September 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

การทำการเกษตรในพื้นที่ประเทศไทยส่วนใหญ่ขาดแคลนแหล่งน้ำ ทำให้เกษตรกรเจาะบาดาลเพื่อใช้เป็นแหล่งน้ำในการเพาะปลูก นอกจากนั้นพื้นที่การเกษตรส่วนใหญ่อยู่นอกเขตสายส่งไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ทำให้การประยุกต์ใช้เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังเป็นข้อมูลสำคัญที่ต้องใช้ในการพิจารณาออกแบบระบบเครื่องสูบน้ำพลังงาน

แสงอาทิตย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สร้างชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบจุ่ม มอเตอร์เครื่องสูบน้ำใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดกำลังไฟฟ้า 300 W และเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 340 Wp เป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า ความดันตกคร่อมเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษา ได้แก่ 10, 15 และ 20 เมตร การทดสอบดำเนินการภายใต้สภาวะพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบจริง ซึ่งพลังงานตกกระทบอยู่ระหว่าง 400-1,000 W/m² สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ผลจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 15 และ 0.64 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์และระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 22.0–27.0 และ 3.3-4.0 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพ สมรรถนะเครื่องสูบน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

Most of the agriculture area in Thailand lacks water resources, causing farmers to drill groundwater to use as a source of water for cultivation. In addition, most of the agricultural areas are inaccessible to electrical transmission lines. For this reason, the application of solar water pump is widely interested. However, the performance of the solar pump is still an importance information that must be considered for designing the system of solar water pump. Therefore, submersible solar water pump, DC motor of 300 W, was constructed for testing its performance. Photovoltaic panel of 340 Wp was selected as electrical energy source. Pressure drop of solar water pump studied in this work were 10, 15 and 20 m. The experiments were conducted under real conditions of solar irradiance varied ranging 400-1,000 W/m². The criteria for evaluating the performance of solar water pump system were photovoltaic panel efficiency, electrical power ratio, efficiency of solar water pump and efficiency of solar water pump system. It was found from experimental results that photovoltaic panel efficiency and electrical power ratio are 15% and 0.64, respectively. Additionally, it was also revealed that solar water pump and system of solar water pump provide the efficiency in the range of 22.0-27.0% and 3.3-4.0%, respectively.

Keywords: Solar water pump: Efficiency: Pump performance: Solar energy

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เพื่อการประกอบอาชีพเกษตรกรรม เป็นผลให้ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร ผลดีที่เกิดขึ้นคือทำให้ประเทศไทยมีความสมบูรณ์ทางอาหารมาโดยตลอด อีกทั้งยังสามารถส่งผลผลิตเป็นสินค้าส่งออก สร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นมูลค่ามหาศาลในแต่ละปี ปัจจัยสำคัญในการทำการเกษตรที่เกษตรกรขาดไม่ได้คือ น้ำ เนื่องจากพืชทุกประเภทต้องการน้ำเพื่อการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามในหลายพื้นที่ของประเทศไทยยังเป็นพื้นที่นอกเขตชลประทาน ทำให้ต้องอาศัยเพียงน้ำฝนที่มีตามธรรมชาติในการเพาะปลูก ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ลดลงและมีบางส่วนเกิดความเสียหายหรือเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อราคาจำหน่าย จึงทำให้เกษตรกรพยายามหาแหล่งน้ำเพื่อใช้สำหรับกิจกรรมเกษตรของตนเอง โดยมีทั้งการขุดบ่อเพื่อกักเก็บน้ำไว้ใช้ในช่วงฤดูแล้ง หรือจะบ่อบาดาลเพื่อนำน้ำใต้ดินมาใช้ประโยชน์ จากที่กล่าวมาข้างต้นยังเป็นเพียงส่วนหนึ่งของปัญหาเท่านั้น เกษตรกรยังประสบปัญหาอีกประเด็นคือพื้นที่การเกษตรอยู่ห่างไกลจากระบบสายส่งของการไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำที่มีต้นกำลังจากเครื่องยนต์ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาค่อนข้างสูงและผันผวน ทำให้เกษตรกรมีรายได้และกำไรลดลงตามไปด้วย อีกทั้งประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงมาเป็นพลังงานกลนั้นยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำ รวมทั้งยังสร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [1-5] และก่อให้เกิดเสียงที่สร้างความรำคาญต่อคนและสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน์จากผลกระทบด้านต้นทุนและมลภาวะที่กล่าวมาข้างต้น

เกษตรกรจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ในการเกษตรเนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรของโลก ซึ่งจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี [6-7] และยังเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงขนาดใหญ่ อีกทั้งสามารถใช้โดยไม่มีต้นทุนด้านพลังงานตลอดอายุการใช้งานอุปกรณ์ รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยผ่านเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำทางการเกษตร สำหรับมอเตอร์ต้นกำลังเครื่องสูบน้ำจำแนกได้เป็น 2 ชนิดหลัก [1-3] ดังนี้ 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะสามารถต่อใช้งานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือต่อใช้งานผ่านแบตเตอรี่ได้โดยตรง และ 2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ การใช้งานจะอาศัยกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ ซึ่งจะต้องต่อผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนจ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำต่อไป ในส่วนของการพิจารณาเลือกใช้เครื่องสูบน้ำให้มีความเหมาะสมกับกิจกรรมของเกษตรกรนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากรูปแบบของเครื่องสูบน้ำแต่ละประเภะนั้นจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานรวมทั้งค่าใช้จ่ายและความยากง่ายในการบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-11] ได้ให้ความสำคัญของการเลือกใช้งานเครื่องสูบน้ำเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดการใช้งานอย่างคุ้มค่าและมีความต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วเกษตรกรจะใช้น้ำจากใต้ดินหรือน้ำบาดาลเป็นหลัก เนื่องจากประหยัดพื้นที่ใช้

สอยและค่าใช้จ่ายในการขุดบ่อบาดาลเมื่อเปรียบเทียบกับ การขุดบ่อเพื่อกักเก็บน้ำจากธรรมชาติ การขุดเจาะบาดาลในพื้นที่การเกษตรส่วนใหญ่จะมีความลึกไม่น้อยกว่า 20 เมตร จึงทำให้เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible pump) ถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถดูดและส่งน้ำในบ่อน้ำลึกได้ดี มีขนาดเล็ก สร้างความดันในการส่งน้ำได้สูง ไม่มีปัญหาการเกิดคavititation (Cavitation) ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งทั่วไปที่สามารถสร้างความดันน้ำได้สูงเช่นกัน แต่มีข้อจำกัดทางด้านดูด เนื่องจากต้องอาศัยความดันบรรยากาศช่วยในการยกน้ำขึ้นสู่เครื่องสูบน้ำ ซึ่งมีขีดจำกัดประมาณ 10 เมตรเท่านั้น และหากระบบท่อ มีความเสียหายรวมทั้งใช้งานในพื้นที่ซึ่งสูงกว่าระดับน้ำทะเลค่อนข้างมาก อาทิเช่น พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หรือพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ไทยย่อมจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำลดลง เครื่องสูบน้ำปริมาตรแทนที่เชิงบวก (Positive displacement pump) มีข้อจำกัดสามารถดูดน้ำลึกได้ไม่เกิน 8 เมตร ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับสูบน้ำจากบ่อบาดาลที่มีระดับน้ำนิ่งมากกว่า 8 เมตร ด้วยเหตุนี้ เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มจึงถูกเลือกมาใช้ทดแทน เนื่องจากตัวเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มจะถูกติดตั้งในระดับเดียวกับระดับน้ำหรือต่ำกว่าระดับน้ำนิ่งไม่น้อยกว่า 2 เมตร และด้วยในสภาวะเศรษฐกิจถดถอยรวมทั้งการได้รับผลกระทบเนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ทำให้ประชาชนส่วนใหญ่หันมาเพาะปลูกพืชผักเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภคในครัวเรือนและจำหน่าย โดยทำการเพาะปลูกในพื้นที่บางส่วนของพื้นที่ทำนาในช่วงหลังฤดูการเก็บเกี่ยว และทำการขุดเจาะบาดาลเพื่อให้เป็นแหล่งน้ำ

ในการทำการเกษตร ซึ่งเป็นพื้นที่ห่างไกลจากสายส่งไฟฟ้า ทำให้ระบบสูบน้ำเพื่อการเกษตรจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นสิ่งที่ต้องการและได้รับความนิยมในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับครัวเรือนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการเกษตรให้สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิจัย

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังชุดทดลองเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ โดยประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์

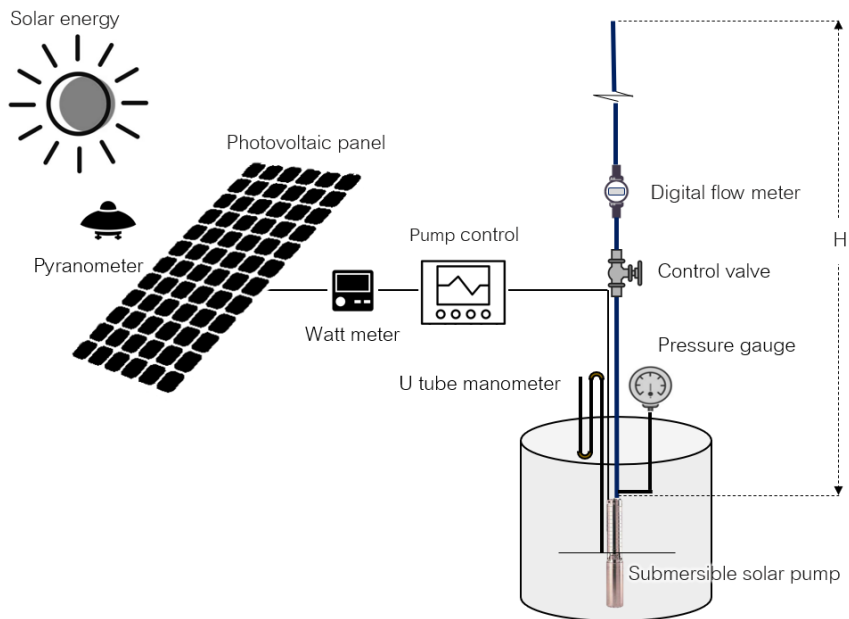
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานวิจัยนี้เป็นชนิดผลึกรวมขนาด 340 Wp มีพื้นที่ 1.8 m^2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงสุดเท่ากับ 43.5 V และ 9.64 A ตามลำดับ

2) ชุดควบคุมและเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นแบบจุ่ม ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 300 W ช่วงแรงดันใช้งาน 18-50 V มีค่าความดันตกคร่อมสูงสุดเท่ากับ 35 เมตร และอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ $3 \text{ m}^3/\text{h}$

3) ชุดสร้างความดันตกคร่อมเครื่องสูบน้ำ

ชุดสร้างความดันตกคร่อม จะใช้ท่อ PVC ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดความสูงได้โดยการต่อผ่านข้อต่อแบบยูเนียน เพื่อสร้างความดันตกคร่อมเสมือนจริงให้กับเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในการทดลองท่อจะถูกต่อยึดกับโครงสร้างของอาคาร



รูปที่ 1 แผนผังชุดทดสอบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์

2.2 วิธีการทดลอง

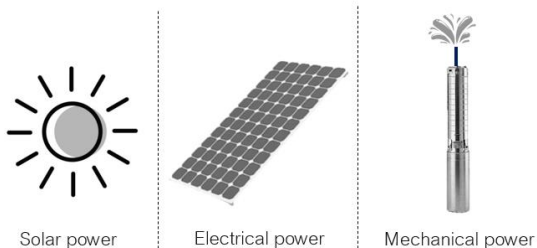
สำหรับการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ เริ่มต้นจากติดตั้งท่อส่งน้ำให้ได้ความสูงตกร้อมตามที่กำหนด ซึ่งในการทดสอบได้ปรับเปลี่ยนค่าความสูง (H) 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 เมตร ตามลำดับ โดยมีการติดตั้งเครื่องวัดความดันเพื่อสอบเทียบและบันทึกค่าในระหว่างการทดลองทุก 5 นาที สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบได้ใช้แสงอาทิตย์จริง ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาและสภาพภูมิอากาศในแต่ละวัน ในการทดลองได้วัดและบันทึกข้อมูลพลังงานตกกระทบโดยใช้ไพรวานอมิเตอร์ Seaward solar survey 200R ซึ่งสามารถวัดและบันทึกได้ทั้งค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบและ

อุณหภูมิ ในส่วนของกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าเครื่องสูบน้ำวัดและบันทึกค่าโดยใช้ดิจิตอลวัตต์มิเตอร์ ซึ่งมีค่าความเที่ยงตรง $\pm 3\%$

ในส่วนของการไหลน้ำถูกวัดและบันทึกทุก 5 นาที โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดดิจิตอล ค่าความเที่ยงตรง $\pm 2.5\%$ โดยเริ่มทดลองตั้งแต่ 9:00-16:00 น. ของแต่ละวัน สำหรับตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนั้นในการทดลองยังได้เก็บและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมจริง

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่เก็บและบันทึกจากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์และประเมินค่าประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ และประสิทธิภาพระบบสูบน้ำ ซึ่งมีแนวคิดการวิเคราะห์ในแต่ละส่วนดังรูปที่ 2 กล่าวคือ พลังงานแสงอาทิตย์จะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงโดยเซลล์แสงอาทิตย์ หลังจากนั้นพลังงานที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องสูบน้ำเพื่อแปลงเป็นพลังงานกลสำหรับการสูบน้ำและส่งน้ำขึ้นจากบ่อบาดาล



รูปที่ 2 การเปลี่ยนรูปพลังงาน

สำหรับรายละเอียดความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์มีดังนี้

ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Efficiency of photovoltaic panel, η_{pv}) คือ ความสามารถในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1) [11-14]

$$\eta_{pv} = \frac{P_{pv}}{GA_{pv}} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ η_{pv} คือ ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์, %

P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, W

G คือ พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ, W/m^2

A_{pv} คือ พื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์, m^2

สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า (Electrical power ratio, PR) คือ ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (2)

$$PR = \frac{P_{pv}}{P_{max}} \quad (2)$$

เมื่อ PR คือ สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า, -

P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, W

P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าระบุสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, W

ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ (Efficiency of solar water pump, η_{pump}) นั้นคือความสามารถการแปลงกำลังไฟฟ้าเข้าเครื่องสูบน้ำให้เป็นกำลังไฮดรอลิกส์ (Hydraulic power) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3) [11-15]

$$\eta_{pump} = \frac{\rho g Q H}{P_{motor}} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ η_{pump} คือ ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์, %

ρ คือ ความหนาแน่นน้ำเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

Q คือ อัตราการไหลของน้ำ, m^3/s

H คือ ความดันตกคร่อมเครื่องสูบน้ำ, m

P_{motor} คือ กำลังไฟฟ้ามอเตอร์เครื่องสูบน้ำ, W

จากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนสมการที่

(3) ให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (4)

$$\eta_{\text{pump}} = \frac{9,810QH}{P_{\text{motor}}} \times 100\% \quad (4)$$

ประสิทธิภาพระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ (Efficiency of solar water pump system, η_{sys}) คือ ความสามารถในการแปลงกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ให้เป็นกำลังไฮดรอลิกส์ซึ่งวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5) [11,12]

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\rho g Q H}{G A_{\text{pv}}} \times 100\% \quad (5)$$

เมื่อ η_{sys} คือ ประสิทธิภาพระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์, %

สมการที่ (5) สามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการที่ (6)

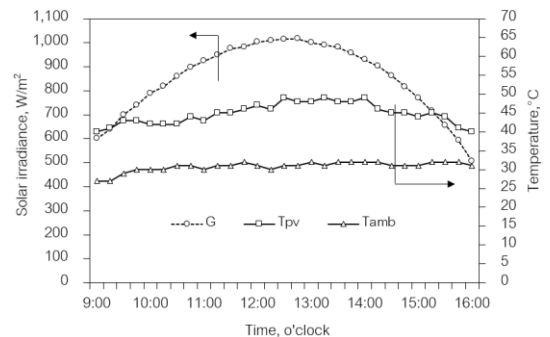
$$\eta_{\text{sys}} = \frac{9,810QH}{G A_{\text{pv}}} \times 100\% \quad (6)$$

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ถูกจ่ายให้กับมอเตอร์เครื่องสูบน้ำกระแสตรงผ่านชุดควบคุมซึ่งเกิดการสูญเสียน้อยมาก [15-18] จึงทำให้กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{pv}) มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้ามอเตอร์เครื่องสูบน้ำ (P_{motor}) ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ประสิทธิภาพระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ในอีกรูปแบบได้ดังสมการที่ (7)

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{pv}} \eta_{\text{pump}} \quad (7)$$

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบจุ่มขนาด 300 W สามารถนำเสนอผลการศึกษาในกรณีเงื่อนไขความดันคร่อมเครื่องสูบน้ำ (H) เท่ากับ 15 เมตร ได้ดังรูปที่ 3 ถึง 6

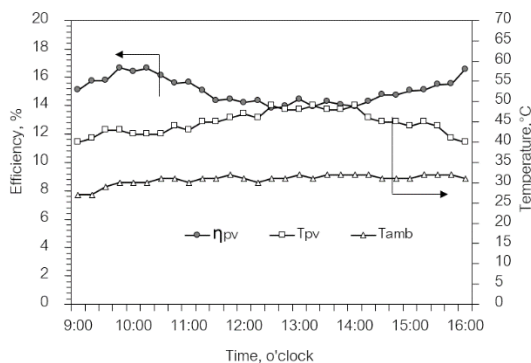


รูปที่ 3 ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบ

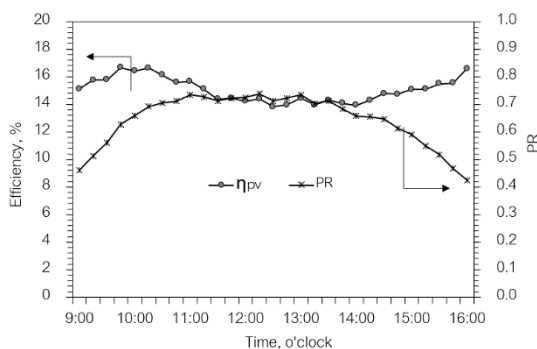
อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมที่เงื่อนไข H เท่ากับ 15 เมตร

รูปที่ 3 นำเสนอข้อมูลการทดลองภายใต้เงื่อนไข H เท่ากับ 15 เมตรหรือ 1.47 Bar ในวันทำการทดลองสภาพท้องฟ้าแจ่มใส ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบจึงเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาในลักษณะระฆังคว่ำ โดยมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 12:00-13:00 น. และมีพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเฉลี่ยในช่วงการทดลองเท่ากับ 848 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 31 และ 45°C ตามลำดับ จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 3 เมื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าช่วงเวลา 9:30-10:30 น. เป็นช่วงแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ยังต่ำเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่น และ

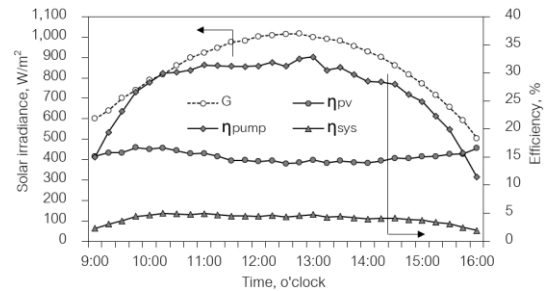
ขณะเดียวกันจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น (เวลา 11:00-14:00 น.) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงถึงแม้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบจะมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] ดังนั้นการออกแบบเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำหรือมีการระบายความร้อนที่ดียิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงและให้ความสำคัญในการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมที่เงื่อนไข H เท่ากับ 15 เมตร



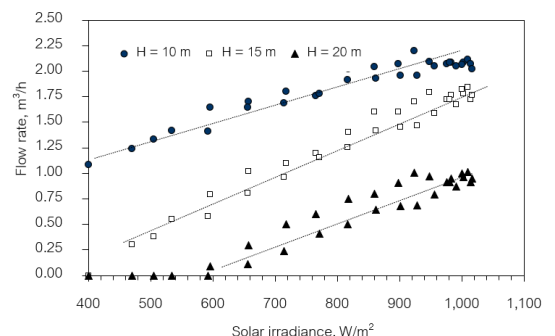
รูปที่ 5 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ และสัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เงื่อนไข H เท่ากับ 15 เมตร



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องสูบน้ำ และระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่เงื่อนไข H เท่ากับ 15 เมตร

ในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าพิคต์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และพบว่า PR มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.64

รูปที่ 6 นำเสนอประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ และประสิทธิภาพระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 15, 27 และ 4 ตามลำดับ โดยพบว่าในช่วงที่ประสิทธิภาพระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย คือ ช่วงเวลา 10:00-14:30 น. ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบและอัตราการสูบน้ำที่แต่ละความดันตกคร่อม

ผลจากการทดลองเก็บข้อมูลอัตราการสูบน้ำที่แต่ละความดันตกคร่อม เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเปลี่ยนแปลง สามารถนำเสนอข้อมูลได้ดังรูปที่ 7 จากข้อมูลพบว่า ที่ความดันตกคร่อมเท่ากับ 20, 15 และ 10 เมตร ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์จะมีอัตราการสูบน้ำสูงสุดเท่ากับ 1.0, 1.8 และ 2.1 m³/h ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบระหว่าง 900-1,000 W/m² นอกจากนั้นยังพบว่า ที่แต่ละความดันตกคร่อมระบบจะเริ่มทำงานหรือส่งน้ำได้ที่ค่าพลังงานตกกระทบแตกต่างกัน เช่น ที่ความดันตกคร่อม H เท่ากับ 20 และ 15 เมตร ระบบจะสามารถส่งน้ำได้เมื่อมีพลังงานตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 600 และ 450 W/m² ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเท่ากัน จะพบว่า ระบบจะมีอัตราการสูบน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความดันตกคร่อมลดลง ซึ่งสอดคล้องตามความสัมพันธ์ของสมการกำลังไฮดรอลิกส์และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10-13] ในส่วนของข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1 ได้สรุปผลการวิเคราะห์ภาพรวมของระบบแต่ละเงื่อนไข ในการทดลองได้ดำเนินการทดลองหลายซ้ำ และได้เลือกข้อมูลผลการทดลอง 3 ครั้งที่มีเงื่อนไขพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบแสดงผลการวิเคราะห์ภาพรวมในแต่ละเงื่อนไข

ดังข้อมูลในตารางที่ 1 จากข้อมูลที่สรุปในตารางจะพบว่า เงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด คือ กรณีความดันตกคร่อมเท่ากับ 20 เมตร ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพระบบต่ำกว่าเงื่อนไขอื่นเนื่องจากระบบจะเริ่มสูบน้ำและส่งน้ำได้เมื่อมีพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบมากกว่า 600 W/m² ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 7 และจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 15 และ 0.64 ตามลำดับ โดยเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์และระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 22.0-27.0 และ 3.3-4.0 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [19-21] สำหรับกรณีประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำที่มีค่าเปลี่ยนแปลงหรือเมื่อความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักคือ ความดันตกคร่อม อัตราการไหล และความเร็วรอบ ซึ่งประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำที่ได้จะมีลักษณะความสัมพันธ์คล้ายรูปประฆังคว่ำ เนื่องจากเมื่อความดันตกคร่อมมากขึ้น เครื่องสูบน้ำต้องใช้กำลังเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลจะลดลง ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ข้อมูลสรุปผลการวิเคราะห์แต่ละเงื่อนไข

รายการ	ความดันตกคร่อม H (m)		
	10	15	20
พลังงานแสงอาทิตย์ตก กระทบเฉลี่ย (G), W/m^2	845	848	850
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย (T_{amb}), $^{\circ}C$	32	31	33
อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ เฉลี่ย (T_{pv}), $^{\circ}C$	45	45	46
ประสิทธิภาพแผงเซลล์ แสงอาทิตย์เฉลี่ย (η_{pv}), %	15	15	15
สัดส่วนการผลิต กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (PR), -	0.64	0.64	0.64
ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย (η_{pump}), %	26	27	22
ประสิทธิภาพระบบสูบน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย (η_{sys}), %	3.9	4.0	3.3

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างชุดทดสอบระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้าเครื่องสูบน้ำ 300 W เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดจุ่ม ใช้กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 340 W_p ในการศึกษาได้ทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ และประสิทธิภาพระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ผลจากการทดลองพบว่า ระบบเครื่องสูบน้ำพลังงาน

แสงอาทิตย์สามารถสูบน้ำได้ในอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 2.1 m^3/h ที่ความดันตกคร่อมเท่ากับ 10 เมตร นอกจากนั้นยังพบว่า ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 15 และ 0.64 ตามลำดับ โดยเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์และระบบเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 22.0-27.0 และ 3.3-4.0 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shrey V, Shubham M, Subhankar C, Ambar G, Subhashree M, Archana S and Puneet V. Solar PV powered water pumping system – A review. Materials Today: Proceedings. 2021: 5601-06.
- [2] Olga VS, Alexander TB and Sergei VC. Review of photovoltaic water pumping system research. Energy Reports. 2020; 6(6): 306-24.
- [3] Shinde VB and Wandre SS. Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review. African Journal of Agricultural Research. 2015; 10(22): 2267-73.

- [4] Kala M, Sadru I and Steven B. Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008; 2(4): 1162-75.
- [5] Mangesh RD, Vaibhav SG, Chetan PP. Review on solar photovoltaic water pumping system. *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*. 2017; 5(1): 1042-5.
- [6] Chaianong A and Pharino C. Outlook and challenges for promoting solar photovoltaic rooftops in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 48: 356-72.
- [7] Chimres N and Wongwises S. Critical review of the current status of solar energy in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 58: 198-207.
- [8] Kedar M and Robin R. Design and development of solar water pump. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2017; 5(4): 126-9.
- [9] Said MAI, El-Ghetanyb HH and Shabaka AGM. Comprehensive design tool for sizing solar water pumping system in Egypt. *Applied Solar Energy*. 2020; 56(1): 18–29.
- [10] Ben GB. Performance of submersible PV water pumping systems in Tunisia. *Energy for Sustainable Development*. 2012; 16(4): 415-20.
- [11] Korpalea VS, Kokatea DH and Deshmukha SP. Performance assessment of solar agricultural water pumping system. *Energy Procedia*. 2016; 90: 518–24.
- [12] Ahmed M, Djamila R and Nabil M. Experimental study of a PV water pumping system. *Journal Electrical Systems*. 2013; 9(2): 212-22.
- [13] Arunendra KT and Vilas RK. Effect of total head and solar radiation on the performance of solar water pumping system. *Renewable Energy*. 2018; 118: 919-27.
- [14] Ibrahim SMA, El-Ghetany HH and Shabak AGM. Mathematical modeling and performance evaluation for a solar water pumping system in Egypt. *Journal of Al Azhar University Engineering Sector*. 2018; 13(48): 946-57.
- [15] Santosh SR and Vikas K. Sizing and implementation of photovoltaic water pumping system for irrigation. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*. 2018; 7(1): 54-62.

- [16] Allouhi A, Buker MS, El-houari H, Boharb A, Benzakour MA, Kousksou T and Jamil A. PV water pumping systems for domestic uses in remote areas: sizing process, simulation and economic evaluation. *Renewable Energy*. 2019; 132: 798-812.
- [17] Odesola IF, Adekunle NO and Akinwonmi RA. Performance evaluation of a photovoltaic pumping system in Funaab community. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2020; 9(6): 444-9.
- [18] Agabi IJ and Nyoko AP. Design procedures for photovoltaic solar water pumping system for rural communities. *International Journal of Scientific Engineering and Science*. 2021; 5(6): 13-9.
- [19] Abdolzadeh M. and Ameri M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*. 2009; 34, 91-6.
- [20] Benghanem M. Daffallah KO, Alamri SN and Joraid AA. Effect of pumping head on solar water pumping system. *Energy Conversion and Management*. 2014; 77, 334-9.
- [21] Rosa JC, Urânio SM and Diana N. Design and performance of photovoltaic water pumping systems: comprehensive review towards a renewable strategy for Mozambique. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2018; 6, 32-63.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพดเพื่อออกแบบเครื่องสับต้นข้าวโพด

A Study on the Mechanical Properties of Maize plant

for Design Cutting Machine of Maize plant

ชัยณรงค์ หล่มช้างคำ^{1)*} ชัยยันต์ จันทร์ศิริ²⁾ ประยูร จอมหล้าพีรติกุล¹⁾อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล¹⁾ เดชาวัต มั่นกลาง¹⁾ และ ประสิทธิ์ โสภา¹⁾Chainarong Lomchangkum^{1)*} Chaiyan Junsiri²⁾ Prayoon Jomlaperatikul¹⁾Arpapon Jomlaperatikul¹⁾ Dechawut Manklang¹⁾ and Prasit Sopa¹⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น¹⁾ Department of Food and Biological Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University
of Technology Isan Khon Kaen Campus²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 27 May 2022

Revised: 15 September 2022

Accepted: 22 September 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพดมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงสับเฉือนของลำต้นข้าวโพด เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นข้าวโพดเพื่อเป็นอาหารสัตว์ ซึ่งปัจจัยในการทดสอบประกอบด้วย แรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุด ที่มีมุมคมของใบมีดสับ จำนวน 5 ใบมีด มีมุมคมแต่ละใบ คือ 30° 40° 50° 60° และ 70° โดยกำหนดอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับ 5 ระดับ คือ 10 20 40 60 และ 100 mm/min ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า แรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุด ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วง แต่มิมีค่าสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว และแรงสับเฉือนสูงสุดของใบมีดสับที่ทำมุม 30° ในทุกอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับจะใช้แรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุด น้อยกว่าทุกมุมคมของใบมีดสับ และยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับในทุกมุมใบมีดสับที่ทำการทดสอบจะมีแนวโน้ม

ของแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุดลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 507.28 ± 10.15 N 30.18 ± 10.76 MPa และ 57.05 ± 8.82 mJ/mm²

คำสำคัญ: ต้นข้าวโพด แรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด พลังงานสับจำเพาะ

Abstract

This study of maize mechanical properties was to study the behavior of the shearing and chopping force of maize stalks to use as basic information and guidelines for designing and building maize choppers for animal feed. The test factors consisted of maximum shearing and chopping force, maximum shear stress, and maximum specific chopping energy with five blades with the angles of 30°, 40°, 50°, 60° and 70° on each blade. In addition, the movement rate of the chopping blade was set at five levels, 10, 20, 40, 60, and 100 mm/min, respectively. The results of this test revealed that maximum shearing and chopping force, maximum shear stress and maximum specific chopping energy in chopping corn stalks in chopping Purple Sweet Waxy Corn Hybrid stalks were higher than Waxy Corn and the maximum shear. In addition, the chopping blade at a 30° angle at all movement rates used less energy of maximum shearing and chopping force, maximum shear stress and maximum specific chopping energy than every sharp angle of the chopping blades. It was also found that when the blade movement rate was increased at every angle, the chopper blades utilized in the test would decrease a tendency of maximum shearing and chopping force, maximum shear stress and maximum specific chopping energy. The mean was 507.28 ± 10.15 N 30.18 ± 10.76 MPa and 57.05 ± 8.82 mJ/mm²

Keywords: Maize plant: Maximum cutting shear force: Maximum cutting shear stress: Specific cutting energy

*ติดต่อ: E-mail: Lomchangkum.C@hotmail.com, 087-9451522

1. บทนำ

ข้าวโพด (Maize) เป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้า ปลูกง่าย อายุสั้น สามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย เป็นธัญพืชที่มีความสำคัญเป็นอันดับสามของโลก รองมาจากข้าวสาลี และข้าว สามารถปลูกได้ทั่วไปในเขตภูมิอากาศอบอุ่น เขตกึ่งร้อนชื้น

และพื้นที่ราบเขตร้อน โดยแหล่งปลูกมักกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา บราซิล เม็กซิโก จีน รวมทั้งในทวีปแอฟริกาได้ สำหรับประเทศไทยข้าวโพดถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เนื่องจากมีพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศ 234,402 ไร่ ส่วนมากอยู่ทางภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ

เนื้อที่เก็บเกี่ยว 232,423 ไร่ ผลผลิต 2,146 kg/ไร่ ส่งออกและนำเข้าปริมาณ 54,700 ton/ year ทำให้สามารถสร้างรายได้เป็นจำนวนมากให้กับประเทศ ข้าวโพดที่ปลูกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ข้าวโพดฝักสด และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยข้าวโพดฝักสดปลูกเพื่อใช้สำหรับบริโภคเป็นอาหาร และการส่งออก เนื่องจากผู้บริโภคนิยมรับประทาน และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ส่วนลำต้นนำไปใช้สำหรับเป็นอาหารสัตว์ [1]

ปัจจุบันกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงโคหันมาลดต้นทุนการผลิตด้วยการหาพืชมาใช้เลี้ยงโคเพื่อลดต้นทุนของอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงโค การขาดแคลนอาหารที่จะนำมาเลี้ยงโค ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของโคได้ช้าลงทำให้เกษตรกรมีรายได้น้อยลงประกอบกับเกษตรกรส่วนมากไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับทำทุ่งไว้เลี้ยงสัตว์ เกษตรจะใช้เครื่องสับย่อยหญ้าเนเปียร์มาทำการสับย่อยเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งหลังจากการสับย่อย พบว่าขนาดของต้นข้าวโพดยังมีขนาดที่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ จากการศึกษาเบื้องต้นในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสับเพื่อผลิตอาหารสัตว์เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ [2] รุ่งเรือง และคณะ, 2562 ได้ศึกษาถึงการพัฒนาเครื่องย่อยและอัดหญ้าเนเปียร์สำหรับผลิตอาหารสัตว์ [3] มงคล และคณะ, 2554 ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นย่อยต้นถั่วลิสง และ [4] ชัยณรงค์ และคณะ, 2564 ได้ศึกษาปัจจัยของใบมีดสับที่เหมาะสมสำหรับสับหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตอาหารสัตว์ และ [5] รังสรรค์ และวินัย [6] Chattopadhyay and Pandey ได้ศึกษาพฤติกรรมการสับลำต้นมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการ

ออกแบบเครื่องสับ เป็นต้น ซึ่งนักวิจัยกลุ่มนี้ใช้อุปกรณ์และหลักการสับที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการออกแบบเครื่องสับต้นข้าวโพดที่นำเอาใบมีดสับแบบไฮสปิดมาทำการสับต้นข้าวโพด ในการออกแบบเครื่องสับย่อยนั้นจะต้องรู้ค่าพื้นฐานต่าง ๆ เช่น แรงเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานตัดจำเพาะตลอดจนการเลือกชนิดของใบมีดของเครื่องสับย่อย ซึ่งจะสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุ ขนาด อายุ ความชื้น รวมถึงโครงสร้างของเซลล์ ภายในวัสดุ [5] ด้วยหลักการพื้นฐานในการสับต้นพืชเมื่อใบมีดเคลื่อนที่ลงอย่างต่อเนื่องเมื่อไปสัมผัสกับเนื้อวัสดุจะทำให้เกิดค่าความเค้นภายในเนื้อวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดจุดแตกหัก ซึ่งวัสดุบางชนิดจะเกิดการแตกหักเพียงครั้งเดียวในขณะที่วัสดุชนิดอื่น ๆ อาจจะเกิดจุดแตกหักขึ้นหนึ่งจุดก่อนและก็จะมีความเค้นภายในค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเกิดจุดแตกหักอีกครั้งเมื่อใบมีดตัดผ่านเนื้อวัสดุ ทั้งนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมในการตัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตัดย่อยด้วย [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพด จากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นขณะสับเฉือนและหาค่าตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะ ซึ่งเกิดจากการทดลองตัดส่วนโคนของลำต้นข้าวโพด ด้วยใบมีดสับและอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องวัดแรงกระทำต่อวัสดุแบบอเนกประสงค์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าตัวแปรข้างต้นที่จำเป็นต่อการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นข้าวโพดเพื่อเป็นอาหารสัตว์ ซึ่งจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องสับต้นข้าวโพดที่จะดำเนินการสร้างต่อไป

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพด จากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นขณะสับเฉือน ซึ่งประกอบด้วยแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับเฉือนสูงสุด จากมุมมองของใบมีดสับ และอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับขณะทำการสับเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นข้าวโพดเพื่อเป็นอาหารสัตว์ในการทดสอบในครั้งนี้ โดยใช้ต้นข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ปลูกในเขตพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบและวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

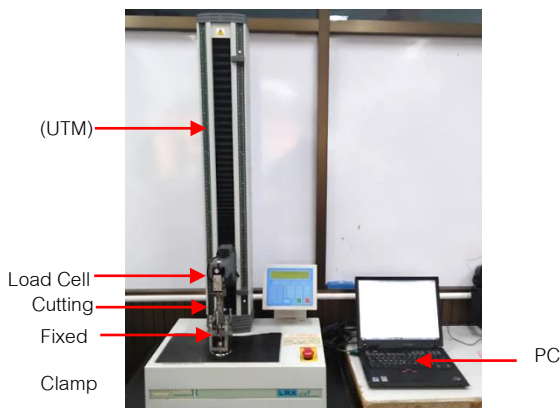
1. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบเอกประสงค์ UTM (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ LRX Plus รุ่น RS232 ขนาดแรงสูงสุด 5 kN ดังรูปที่ 1 และเครื่องชั่งน้ำหนัก Digital

2. จำนวน 5 ใบมีด มีมุมคมแต่ละใบ คือ มุม 30° 40° 50° 60° และ 70° ตามลำดับ

3. ต้นข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ทำการทดสอบ 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวเหนียวม่วงดำและพันธุ์ข้าวเหนียวอายุ 70 วัน โดยกำหนดเอาตรงโคนของลำต้นมีขนาดท่อนละ 10 cm

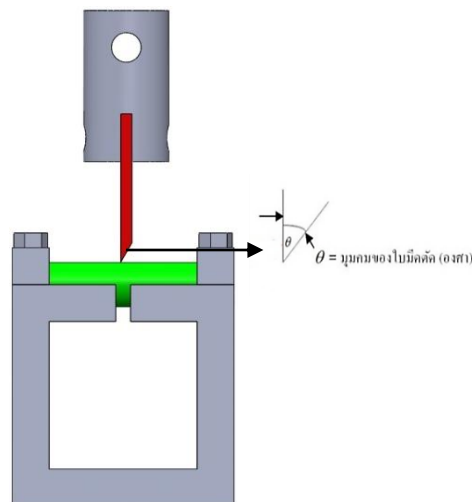
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของต้นข้าวโพดในการทดสอบ

สมบัติทางกายภาพของ ลำต้นข้าวโพด	พันธุ์ข้าวเหนียว ม่วงดำ	พันธุ์ข้าวเหนียว
ความสูงของลำต้น (cm)	168.5±4.0	180.7±5.6
เส้นผ่านศูนย์กลางโคนของลำต้น (cm)	1.7±1.5	1.7±1.6
น้ำหนักของลำต้น (g)	156.1±2.4	218.4±2.3
ความหนาแน่นของลำต้น (g/cm^3)	0.24±10.4	0.40±6.4
ความชื้นของลำต้น (% w.b.)	70.1±2.3	68.7±1.8



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบ

เอกประสงค์ขนาดแรงสูงสุด 5 kN และ
ส่วนประกอบ ต่าง ๆ ของเครื่อง [6]



รูปที่ 2 ลักษณะการติดตั้งการวัดแรงเฉือนลำต้น

ข้าวโพดทางเทคนิควิศวกรรม [6]

2.2 ปัจจัยที่ศึกษา

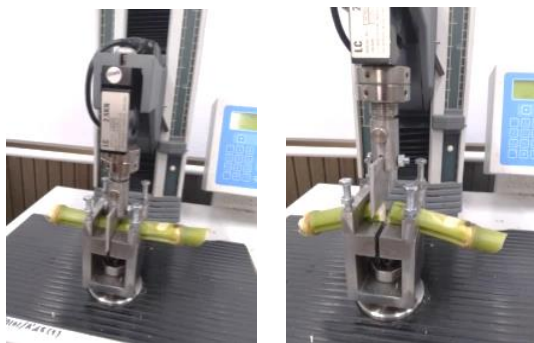
1. มุมคมของใบมีดสับจำนวน 5 ใบ มีมุมคมแต่ละใบ คือ 30° 40° 50° 60° และ 70°

2. อัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับ 5 ระดับ คือ 10 20 40 60 และ 100 mm/min

2.3 วิธีดำเนินการ

1. เตรียมตัวอย่างและทำการปรับตั้งชุดอุปกรณ์ให้เครื่องทำงานจนเข้าสู่สภาวะคงที่ พร้อมทดสอบและจัดเตรียมต้นข้าวโพดสำหรับทดสอบ โดยใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ณ สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

2. หลังจากทำการติดตั้งใบมีดสับและยึดลำต้นเข้ากับแท่นจับชิ้นงานของเครื่องวัด แรงกดวัสดุแบบเอนกประสงค์ ดำเนินการทดสอบสับลำต้นข้าวโพดด้วยใบมีดที่มีมุมคมของการสับแต่ละใบ คือ มุม 30° 40° 50° 60° และ 70° กดลงในแนวตั้งฉากทำมุม 90° กับต้นข้าวโพด ซึ่ง ในแต่ละชนิดของมุมคมในการสับของใบมีดจะใช้อัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดที่ในแต่ละระดับ คือ 10 20 40 60 และ 100 mm/min ตามลำดับ จำนวนตัวอย่างละ 30 ซ้ำ จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลและ นำค่าที่ได้ไปคำนวณและประมวลผล ตามลำดับ แล้วเปลี่ยนค่าตัวแปรและดำเนินการตามข้อ 1 และ 2 แผนการทดสอบแบบ 5X5 Factorial โดยใช้วิธีการทดสอบของ [5] รังสรรค์ และวินัย, 2558 [6] Chattopadhyay and Pandey, 1998



(a)

(b)

รูปที่ 3 (a) พฤติกรรมการสับต้นข้าวโพด

(b) ต้นข้าวโพดหลังการสับ

สมการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพด

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด พลังงานสับจำเพาะสูงสุด สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. การหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุด [7], [8] โดยการนำค่าแรงเฉือนสูงสุดในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะที่กดผ่านต้นข้าวโพดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของลำต้นข้าวโพด สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (1)

$$\sigma_s = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เมื่อ σ_s = ความเค้นเฉือน (MPa)

F = แรงเฉือน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของต้นข้าวโพด (m^2)

2. การหาค่าพลังงานสับจำเพาะ ตามหลักการคำนวณของ [7],[9] หาค่าได้จากพื้นที่ใต้กราฟของแรงเฉือนกับระยะที่ใบมีดกดผ่านลำต้นข้าวโพด สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2)

$$E_{ss} = \frac{1}{A} \int F \cdot dx = n \times \frac{f}{A} \quad (2)$$

เมื่อ E_{ss} = พลังงานสับจำเพาะ (mJ/mm²)

A = พื้นที่หน้าตัดของลำต้นข้าวโพด (m^2)

F = แรงเฉือน (N)

x = ระยะการเคลื่อนที่ผ่านลำต้นข้าวโพด (mm)

n = จำนวนหน่วยพื้นที่ใต้กราฟของแรง

เฉือนกับระยะที่ใบมีดเคลื่อนที่ผ่านลำต้นข้าวโพดขณะทำการทดสอบ

f = ค่าของตัวคูณหน่วยพื้นที่

3. การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของการสับ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ (Multiple Linear Regression)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ดังสมการที่ (3) [7]

$$Y = \alpha + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (3)$$

เมื่อ Y = ตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่ม

X = ตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถวัดและสังเกตได้

α = จุดตัดบนแกน Y (หรือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็น 0

β = ค่าความชันของเส้นตรง เป็นค่าแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

ε = ความคลาดเคลื่อนหรือค่าความแตกต่างของค่า Y และค่า Y บนเส้นถดถอย

i = ตัวแปรอิสระตัวที่ 1,2,...,n

2.4 ค่าชี้ผลการศึกษา

1. แรงสับเฉือนสูงสุด (N)
2. ความเค้นเฉือนสูงสุด (MPa)
3. พลังงานสับเฉพาะสูงสุด (mJ/mm²)

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ส่วนการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยใช้วิธีของ Duncan เป็นตัวเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงสับเฉือนสูงสุด

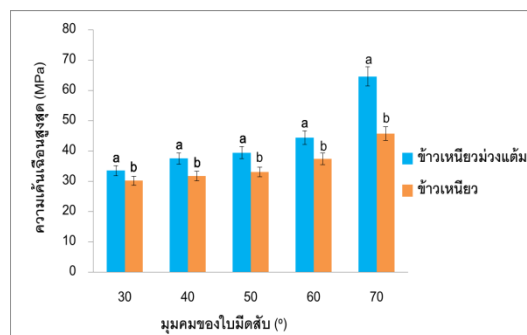
มุมคมของใบมีดสับ

จากการทดสอบหาแรงสับเฉือนสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียว พบว่าค่าแรงสับเฉือนสูงสุดในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มที่มุม 30° 40° 50° 60° และ 70° ความเร็วในการสับเท่ากันที่ 100 mm/min มีค่าสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว ในทุก ๆ

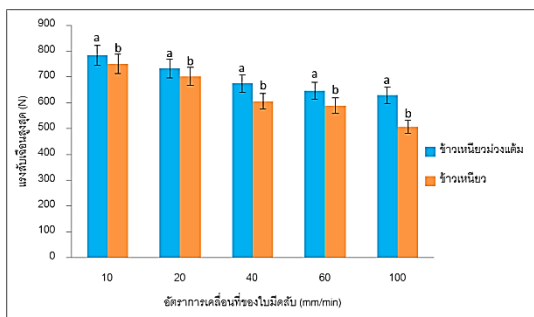
มุมคมของใบมีดสับ สามารถระบุได้ว่าโครงสร้างภายในของลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มมีความแข็งแรงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว และยังพบว่าแรงสับเฉือนสูงสุดจะแปรผันตรงกับขนาดของมุมคมของใบมีดสับและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบ Exponential ดังรูปที่ 4 นอกจากนี้การสับลำต้นข้าวโพด โดยใช้มุมคมของใบมีดสับที่ มุม 30° แรงสับเฉือนสูงสุดในการสับมีค่าน้อยที่สุดทั้ง 2 สายพันธุ์ มีค่าน้อยกว่ามุมคมของใบมีดอื่นประมาณ 1-2 เท่า โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 507.28±10.15 N มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [5]

อัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับ

จากการทดสอบหาแรงสับเฉือนสูงสุดของความเร็วในการสับ พบว่าแรงสับเฉือนสูงสุดจะแปรผกผันกับความเร็วในการสับ เมื่อเพิ่มความเร็วในการสับจาก 10-100 mm/min ที่มุมคมของใบมีดสับเท่ากัน 30° ค่าแรงสับเฉือนสูงสุดจะมีค่าลดลงแบบ Exponential และแรงสับเฉือนสูงสุดในการสับลำต้นข้าวโพดทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ความเร็ว 100 mm/min มีค่าน้อยที่สุดและมีแนวโน้มลดลงอีกหากความเร็วในการเคลื่อนที่ในการสับเพิ่มขึ้น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมคมของใบมีดสับและแรงสับเฉือนสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุดหมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)



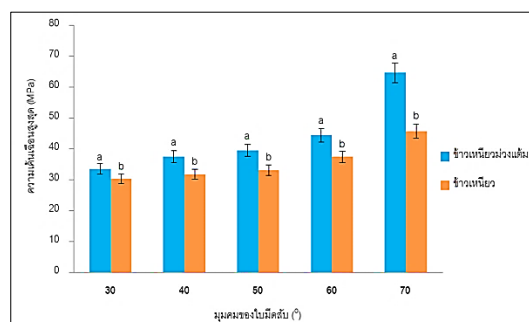
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับและแรงสับเฉือนสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุด หมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นเฉือนสูงสุด มุมคมของใบมีดสับ

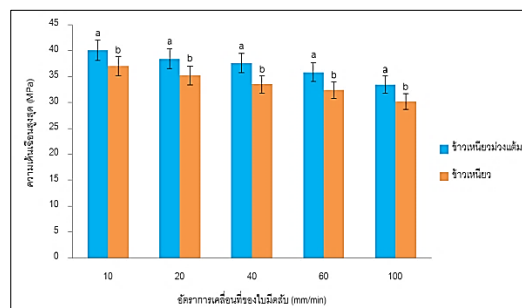
จากการทดสอบหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียว ทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยใช้สมการที่ 1 พบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ใช้ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มที่มุม 30° 40° 50° 60° และ 70° ความเร็วในการสับเท่ากันที่ 100 mm/min มีค่าสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว ในทุก ๆ มุมคมของใบมีดสับ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะแปรผันตรงกับมุมคมของใบมีดสับที่เพิ่มขึ้น โดยการสับที่ใช้มุมคมของใบมีดที่น้อยกว่าจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนสูงุณ้อยลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 6 โดยการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนสูงสุดเป็นการเพิ่มขึ้นแบบ Exponential และเป็นการเพิ่มขึ้นที่ตรงตามพฤติกรรมของแรงที่ใช้ในการสับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.18 ± 10.76 Mpa ความสอดคล้องงานวิจัยของ [6]

อัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับ

ในการทำงานเดียวกันจากการทดสอบหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของความเร็วในการสับลำต้นข้าวโพดทั้ง 2 สายพันธุ์ จะแปรผกผันกับความเร็วในการสับ พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการสับจาก 10-100 mm/min ที่มุมคมของใบมีดสับเท่ากัน 30° ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าลดลงประมาณ 1-2 เท่า ความสอดคล้องงานวิจัยของ [5] ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมคมของใบมีดสับและความเค้นเฉือนสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุด หมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

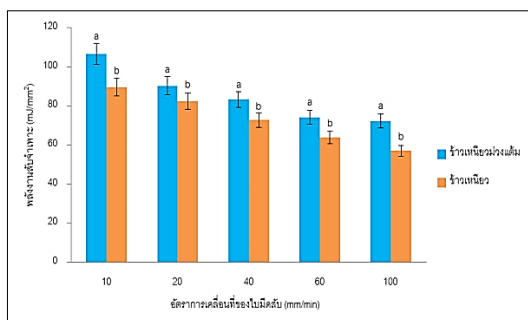


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับและความเค้นเฉือนสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุด หมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานสับจำเพาะ

มุมคมของใบมีดสับ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาพิจารณา พลังงานสับจำเพาะสูงสุด โดยคำนวณจากสมการที่ 1 ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียว ทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่าพลังงานสับจำเพาะที่ใช้ในการสับลำต้นข้าวโพด พันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้ม ที่มุม 30° 40° 50° 60° และ 70° ความเร็วในการสับเท่ากันที่ 100 mm/min มีค่าสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว ในทุก ๆ มุมคมของใบมีดสับ และค่าพลังงานสับจำเพาะสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมคมของใบมีดสับเพิ่มขึ้น กล่าวคือ การสับด้วยมุมคมใบมีดสับที่ 30° จะใช้พลังงานสับจำเพาะน้อยที่สุด ดังรูปที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงสับเฉือนสูงสุดที่ใช้ในการสับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57.05 ± 8.82 mJ/mm² ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบมากที่สุด

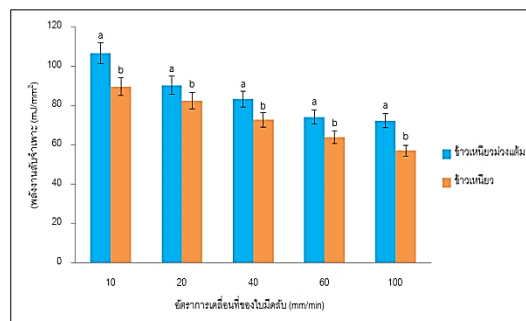


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมคมของใบมีดสับและพลังงานสับจำเพาะสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุด หมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

อัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับ

ในทำนองเดียวกันจากการทดสอบหาค่าพลังงานสับจำเพาะสูงสุดของความเร็วในการสับลำต้นข้าวโพดทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการ

สับเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานสับจำเพาะสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 9 ความสอดคล้องงานวิจัยของ [6]



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของใบมีดสับและพลังงานสับจำเพาะสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงของต้นข้าวโพด (^{ab}ตัวอักษรที่เหมือนกันแต่ละชุด หมายถึง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของการสับ

เมื่อนำลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียว ทั้ง 2 สายพันธุ์ มาวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของการสับ สามารถทำนายได้จากสมการที่ 3 โดยกำหนดให้ค่าสมบัติทางกายภาพ คือ มุมคมของใบมีดสับ และความเร็วในการสับ ส่วนสมบัติเชิงกลคือ แรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุด จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของการสับ สามารถที่จะทำนายได้ ซึ่งดูจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มีค่าสูง สมการทำนายค่าแรงสับเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นเฉือนสูงสุด มีค่าเท่ากัน พันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียวที่ $R^2 = 0.969$ และ 0.967 รองลงมาคือ ค่าพลังงานสับจำเพาะที่ $R^2 = 0.936$ และ 0.942 นอกจากสมการทั้ง 3 ทำให้ทราบค่ามุมคมของใบมีดสับเป็นตัวแปรที่สำคัญส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลในการสับ รองลงมาคือค่าของความเร็วในการสับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมการสำหรับทำนาย และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่าสมบัติเชิงกลของการสับลำต้นข้าวโพด

ลำต้นข้าวโพด	สมบัติเชิงกล	ค่าทำนาย	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)
พันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้ม	แรงสับเฉือนสูงสุด (N)	$1.2499+0.00665K-0.0017S$	0.969
	ความเค้นเฉือนสูงสุด (MPa)	$4.2374+0.03082K-0.0040S$	0.969
	พลังงานสับจำเพาะ (mJ/mm^2)	$45.3525+0.63752K-0.216S$	0.936
พันธุ์ข้าวเหนียว	แรงสับเฉือนสูงสุด (N)	$0.6923+0.00215K-0.0065S$	0.967
	ความเค้นเฉือนสูงสุด (MPa)	$2.8156+0.01049K-0.00226S$	0.967
	พลังงานสับจำเพาะ (mJ/mm^2)	$23.1061+0.52135K-0.0437S$	0.942

เมื่อ K = มุมคมของใบมีดสับ ($^{\circ}$) และ S = ความเร็วของใบมีดสับ (mm/min)

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพด ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มและพันธุ์ข้าวเหนียว พบว่า ค่าของแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุด ในการสับลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้ม ที่มุมคมของใบมีดสับ 30° 40° 50° 60° และ 70° ความเร็วในการสับเท่ากันที่ 100 mm/min มีค่าที่สูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว ในทุกมุมคมของใบมีดสับ เนื่องโครงสร้างภายในของลำต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวม่วงแต้มมีความแข็งแรงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว และยังพบว่าแรงสับเฉือนสูงสุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และพลังงานสับจำเพาะสูงสุดจะแปรผันตรงกับขนาดมุมคมของใบมีดสับและเมื่อเพิ่มความเร็วในการสับจาก 10-100 mm/min ที่มุมของใบมีดสับ 30° ที่ความเร็วในการสับ 100 mm/min แต่ถ้าหากว่ามุมคมน้อยกว่า 30° แรงที่ใช้ในการสับอาจส่งผลให้สับไม่ขาดเพราะพื้นที่หน้าตัดสัมผัสกับลำต้นข้าวโพดน้อยและสอดคล้องกับความเร็วที่มากกว่า 100 mm/min

ก็ยิ่งดีอาจจะต้องไม่สูงมากนักแต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยและวัสดุที่นำมาทดสอบ ส่วนการตัดขาดสามารถตัดขาดได้ทุกต้นทุกความเร็วรอบและทุกมุมใบมีดแต่ความเร็วใบมีดต่ำ ๆ หรือมุมใบมีดที่ค่อนข้างมากจะขาดแบบไม่เนียนแต่ขาดแบบฉีกขาด ดังนั้น จากการศึกษาครั้งนี้ใบมีดสับที่ทำมุม 30° จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นข้าวโพดเพื่อเป็นอาหารสัตว์ด้วยเทคนิคการสับเฉือน และในการออกแบบจริงตามหลักทางวิศวกรรม จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลด้านอื่น ๆ มาประกอบในการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นข้าวโพดเพื่อเป็นอาหารสัตว์

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สัญญาเลขที่ ENG13/65 สำหรับสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2563/64. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.(สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2565]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.oae.go.th>
- [2] รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์, ณพล เหลืองพิพัฒน์สร และ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์. การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยและอัดหญ้าอาหารสัตว์ สำหรับเกษตรกรรายย่อย. วารสารวิจัย มทร. รัตนบุรี. 2562; 18(1): 40-51.
- [3] มงคล ตุ่นแฮ้ว, กลวัชร ทิมีนกุล และ รังสิณี ศิริมาลา. ออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นย่อยต้นถั่วลิสง. วารสารแก่นเกษตร. 2554; 39(3): 60-5.
- [4] ชัยณรงค์ หล่มช่วงคำ, ประสิทธิ์ ไสภา, ประยูร จอมหล้าพีรติกุล, อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล และ เดชาวัต มั่นกลาง. ทดสอบและประเมินผลปัจจัยของใบมีดสับที่เหมาะสมสำหรับสับหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตอาหารสัตว์. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 8, 29 พฤษภาคม 2564, จังหวัดขอนแก่น; 2564.
- [5] Womac AR, Igathinathane C and Hayes D. Shearing characteristics of biomass for size reduction. paper presented in An ASAE meeting presentation; 2005.
- [6] Persson S. Mechanics of Cutting Plant Material. American Society of Agricultural Engineers: USA; 1987.
- [7] รัษฎรงค์ ภูฎสำโรง และ วินัย กล้าจริง. การศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นมันสำปะหลัง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 และระดับนานาชาติครั้งที่ 8, 17-19 พฤษภาคม 2558. กรุงเทพฯ; 2558.
- [8] Chattopadhyay PS, Pandey KP. Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi static deformation. Journal of Agricultural Engineering Research 1999; 73: 199-206.
- [9] Lomchangkum C, Junsiri C, Sudajan S, and Laloon K. A Study on the Mechanical Characteristics of Cassava Tuber Cutter. International Journal of Agricultural Technology 2020; 16(1): 63-76.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาขั้นตอนวิธีในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับแขนกลกรีดยางพารา Development of Trajectory Control Algorithm for a Para Rubber Tapping Manipulator

ยงยุทธ์ เสี่ยงดัง¹⁾ กมลชนน วงศ์สถาน¹⁾ จัตริน เรืองจอหอ¹⁾มงคล คราพันธ์²⁾ และ พยุงศักดิ์ จุลยุเสน^{1)*}Yongyuth Sengdang¹⁾ Kamonchanon Vongstan¹⁾ Chattarin Ruangchoho¹⁾Mongkol Kataphan²⁾ and Payungsak Junyusen^{1)*}¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000²⁾ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์ นครราชสีมา 30000¹⁾ School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000²⁾ Faculty of Engineering, Phanomwan College of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

Received: 22 June 2022

Revised: 2 August 2022

Accepted: 4 August 2022

Available online: 23 December 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายการพัฒนาขั้นตอนวิธีในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับแขนกลกรีดยางพารา เส้นทางการเคลื่อนที่ถูกออกแบบตามรอยกรีดที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งวงรี แขนกลคาร์ทีเซียนแบบสองแกนถูกนำมาใช้เป็นแขนกลกรีดยางต้นแบบ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อนำทางแขนกลติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ การทดสอบทำในห้องปฏิบัติการโดยใช้ต้นยางพาราจำลอง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมพีไอดีสามารถช่วยให้แขนกลทั้งสองแกนเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางการที่ต้องการได้อย่างราบเรียบ ถึงแม้ว่าจะเกิดความผิดพลาดทางตำแหน่งของแขนกลแกน Z ที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 13.9 mm และ 14.8 mm ตามลำดับ ดังนั้นขั้นตอนวิธีควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่นี้มีศักยภาพสูงในการนำไปปรับปรุงเพื่อใช้งานจริง

คำสำคัญ: การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ แขนกลกรีดยางพารา ตัวควบคุมพีไอดี

Abstract

This paper describes the development of a trajectory control algorithm for a Para rubber tapping manipulator. The trajectory was designed in accordance with an elliptical tapping cut. A two-axis cartesian robot was used as a prototype of the tapping manipulator. The objective of this study was to guide the manipulator in tracking the designed trajectory. The experiment was conducted in a laboratory using a cylindrical model of Para rubber tree. The experimental results showed that the trajectory control employing a PID controller could help the manipulator to track the desired trajectory smoothly, even though the positional errors in Z axis were found at the initial and final positions of the movement with the maximum values of 13.9 mm and 14.8 mm, respectively. In conclusion, the developed trajectory control algorithm has a great potential in adaptability for practical use.

Keywords: Trajectory control: Para rubber tapping manipulator: PID controller

*ติดต่อ: payungs@sut.ac.th, Tel: 081-3904234

1. บทนำ

ยางพาราเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2563 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 24.7 ล้านไร่ ปริมาณผลผลิต 4.86 ล้านตัน และมูลค่าการส่งออก 1.82 แสนล้านบาท โดยภาคใต้เป็นแหล่งผลิตยางพาราที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ [1] ปริมาณผลผลิตยางพาราขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การเพาะปลูก สภาพแวดล้อม พันธุ์ของต้นยาง และระบบการกรีดยาง เป็นต้น การกรีดยางพาราเป็นงานที่ต้องการแรงงานที่มีทักษะและความชำนาญสูง เพราะส่งผลกระทบต่อจำนวนผลผลิตและการเจริญเติบโตของต้นยางโดยตรง หลักการสำคัญในการกรีดยางคือ กรีดให้น้ำยางมากที่สุด สั้นเปลือกเปลือกน้อยที่สุด และไม่ทำลาย

เนื้อเยื่อเจริญ จากสถานการณ์การขาดแคลนแรงงานในภาคเกษตรของประเทศ ทำให้ขาดแรงงานฝีมือในการกรีดยาง [2, 3] กอปรกับสถานการณ์ราคายางพาราที่ตกต่ำในปัจจุบัน ทำให้แรงงานมีรายได้น้อยลง แรงงานบางส่วนจึงเคลื่อนย้ายไปประกอบอาชีพอื่นทดแทน ส่งผลให้การขาดแคลนแรงงานในการกรีดยางยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น [4] ดังนั้น เกษตรกรสวนยางจึงต้องการอุปกรณ์ช่วยในการกรีดยางที่สามารถทดแทนแรงงานฝีมือเหล่านี้ได้และมีความสะดวกในการใช้งาน [5]

มิดเจี๊ยะเป็นมิดกรีดยางที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย [6] อย่างไรก็ตามการกรีดยางโดยใช้มิดเจี๊ยะต้องอาศัยความชำนาญเป็นอย่างมาก เพราะต้องมีการกระตุกมือขณะทำการกรีดยาง

ทำให้สูญเสียพลังงานและเกิดความเมื่อยล้า นอกจากนี้ยังต้องควบคุมมีดอยู่เสมอ เพื่อให้กรีดต้นยางได้ง่ายและป้องกันความเสียหายของหน้ายาง จากสาเหตุเหล่านี้จึงมีความพยายามในการพัฒนาอุปกรณ์ช่วยในการกรีดยาง เช่น มีดกรีดยางแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า [6, 7] และเครื่องกรีดยางแบบอัตโนมัติ [8] อย่างไรก็ตามเครื่องกรีดยางนี้ยังมีข้อจำกัดในการควบคุมความสม่ำเสมอของรอยกรีด เพราะการเคลื่อนที่ของใบมีดกรีดยางไม่สัมพันธ์กับรูปร่างของต้นยาง

การพัฒนาเครื่องกรีดยางพาราแบบอัตโนมัติกำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยและเกษตรกรสวนยาง [4] โดยเฉพาะเครื่องกรีดยางอัตโนมัติแบบติดตั้งบนต้นยาง เพราะมีความสะดวกในการใช้งานและมีแนวโน้มที่จะทดแทนแรงงานที่มีฝีมือได้ เครื่องกรีดยางชนิดนี้มีลักษณะเป็นแขนกลแบบคาร์ทีเซียน ซึ่งจะประกอบด้วย โครงสร้างจับยึดต้นยาง กลไกขับเคลื่อนและใบมีดกรีดยาง เนื่องจากการพัฒนาแขนกลกรีดยางเหล่านี้ให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมยังเป็นเรื่องที่ท้าทาย เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของใบมีดต้องสัมพันธ์กับลักษณะของต้นยาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาขั้นตอนวิธีควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพาราสำหรับการนำไปปรับเปลี่ยนเพื่อใช้งานจริง

2. วิธีการวิจัย

2.1 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา

การเปิดกรีดยางควรทำเมื่อต้นยางพารามีขนาดเส้นรอบลำต้นไม่น้อยกว่า 50 cm ที่ระดับความสูง 150 cm จากพื้นดิน การกรีดควรทำให้เกิดรอยกรีดบน

ต้นยางที่เอียงจากด้านบนซ้ายลงปาด้านล่างขวา เพื่อตัดท่อน้ำยางให้มากที่สุด เมื่อต้นยางถูกกรีดแบบครั้งลำต้น รอยกรีดบนต้นยางจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยจะทำมุมประมาณ 30° กับแนวระดับ ซึ่งจะทำให้น้ำยางไหลลงสู่ภาชนะได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) ดังนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพาราสามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของใบมีดที่ทำให้เกิดรอยกรีดนี้ ด้วยการสมมติให้ต้นยางพารามีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังรูปที่ 1(ข) และกำหนดจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก XYZ ตรงตำแหน่งต่ำสุดของรอยกรีด โดยให้แกน X อยู่ในแนวระดับขวาลำต้นยางพารา แกน Y อยู่ในแนวตั้งขนานกับลำต้นยางพารา และแกน Z มีทิศพุ่งออกมา เมื่อต้องการสร้างแขนกลกรีดยางจากตัวขับเคลื่อนเส้นแบบบอลสกรูจำนวนสองแกนให้สามารถติดตามรอยกรีดได้ ระนาบ XY จะต้องถูกหมุนรอบแกน Z ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยมุม θ ซึ่งจะทำให้ได้ระบบพิกัดฉาก $X'Y'Z'$ เมื่อผู้สังเกตมองในทิศตั้งฉากกับระนาบ $X'Z'$ จะเห็นรอยกรีดบนต้นยางพาราเป็นเส้นโค้งรูปวงรี ดังนั้นแขนกลนี้จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ในแกน X' และแกน Z เป็นแบบเส้นตรงและแบบครึ่งวงกลมตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X' และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ถูกแสดงดังรูปที่ 2 เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนเส้นมีค่าคงที่ ระยะทางการเคลื่อนที่ที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

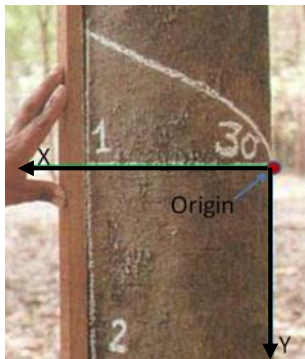
$$x' = \frac{x'_{\max}}{t_{\max}} t \quad (1)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการกรีด (s), $t_{\max}$ คือ เวลาที่ใช้ในการกรีดทั้งหมด (s), x' คือ ระยะทางการเคลื่อนที่

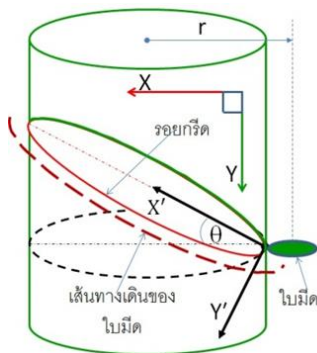
ที่เวลาใด ๆ (mm), $x'_{\max}$ คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ที่เวลา $t_{\max}$ (mm) ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ในแกน Z และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่ถูกแสดงดังรูปที่ 3 ระยะทางการเคลื่อนที่ที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$z = r \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{0.5t_{\max} - t}{0.5t_{\max}} \right) \right) \quad (2)$$

เมื่อ Z คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ที่เวลาใด ๆ (mm), r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางต้นยางถึงจุดศูนย์กลางใบมีด (mm) และ θ_z คือ การกระจัดเชิงมุมรอบจุดศูนย์กลางต้นยาง (rad)



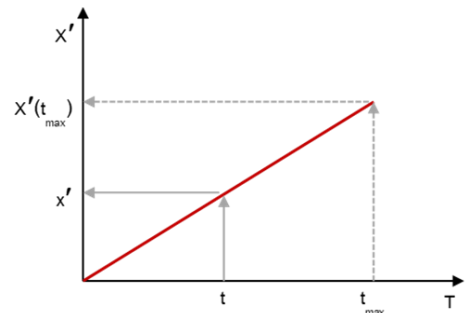
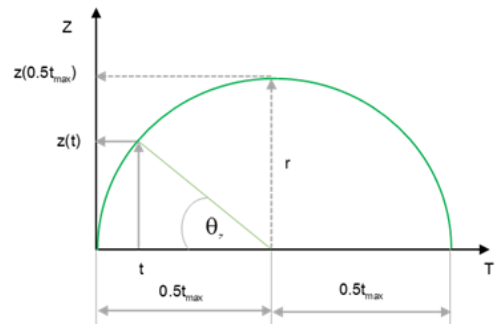
(ก)



(ข)

รูปที่ 1 การกำหนดระบบพิกัดฉากบน

(ก) ต้นยางพารา (ข) ทรงกระบอก

รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของแกนกลในแกน X' รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของแกนกลในแกน Z

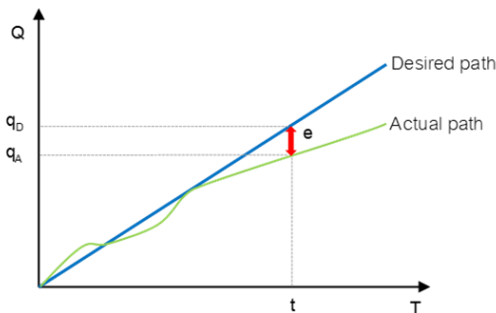
2.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแกนกลถูกแสดงดังรูปที่ 4 และสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

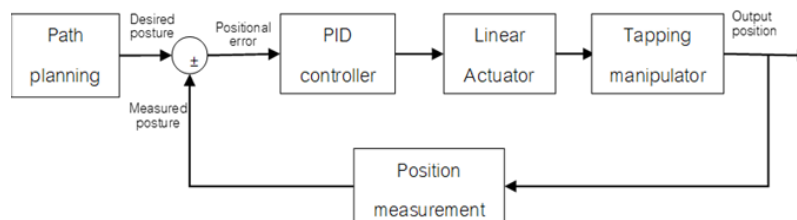
$$e = q_D - q_A \quad (3)$$

เมื่อ q_D คือ ตำแหน่งที่ต้องการ (mm), q_A คือ ตำแหน่งจริง (mm) และ e คือ ค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง (mm)

เนื่องจากความถูกต้องในการเคลื่อนที่และการตอบสนองที่รวดเร็วของแกนกลมีความสำคัญต่อการกรีดยาง ดังนั้นตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีถูกเลือกใช้เพื่อลดความผิดพลาดทางตำแหน่งและปรับปรุงการตอบสนองของแกนกล รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมแกนกลกรีดยางพารา



รูปที่ 4 ความผิดพลาดทางตำแหน่งในการเคลื่อนที่

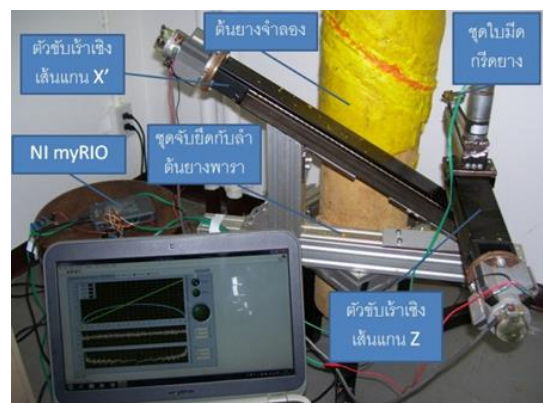


รูปที่ 5 ระบบควบคุมแขนกลกรีดยางพารา

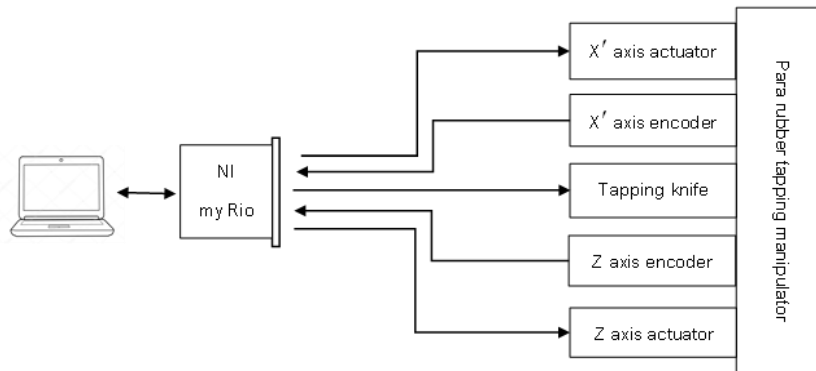
2.3 แขนกลกรีดยางพาราต้นแบบ

แขนกลกรีดยางพาราที่ใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ โครงจับยึดต้นยาง ชุดกลไกขับเคลื่อน และชุดมีดกรีดยาง ดังแสดงในรูปที่ 6 โครงจับยึดต้นยางถูกสร้างจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ โดยออกแบบให้สามารถติดตั้งและถอดออกจากต้นยางพาราได้ ชุดกลไกขับเคลื่อนสร้างจากตัวขับเคลื่อนเชิงเส้น จำนวน 2 แกน ต่อตั้งฉากกันบนโครงจับยึดต้นยาง ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นของแกน X' จะถูกวางเอียงเป็นมุม 30° กับแนวระดับ ส่วนตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นของแกน Z จะถูกวางขนานกับแนวระดับ ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นเป็นแกนสำเร็จรูปที่ทำจากรางสไลด์และบอลสกรู ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง ชุดมีดกรีดยางซึ่งเป็นแบบใช้มอเตอร์กระแสตรงขับเคลื่อนใบมีดผ่านสายพานดินตะขाप ถูกติดตั้งที่ปลายแกน Z คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่

ประมวลผลและควบคุมการทำงานของแขนกลผ่านทาง NI myRIO เ็นโค้ดเคอร์จะทำหน้าที่วัดการหมุนของมอเตอร์ของตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นของระบบวัดมุมของแขนกลถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมแขนกลกรีดยางพาราพัฒนาโดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW



รูปที่ 6 แขนกลกรีดยางพาราต้นแบบ

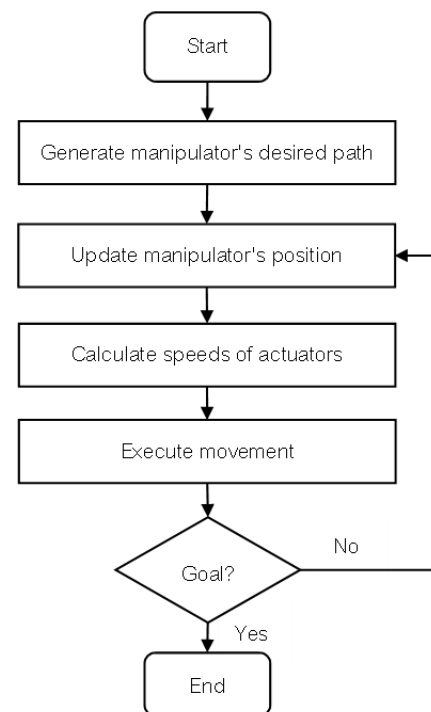


รูปที่ 7 แผนผังของระบบควบคุมแขนกลกรีดยางพารา

2.4 การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่

ต้นยางพาราจำลองถูกนำมาใช้เพื่อความสะดวกในการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ เพราะต้นยางพาราจริงมีลักษณะสัณฐานที่ซับซ้อนและไม่แน่นอน ต้นยางพาราจำลองถูกสร้างโดยการพอกดินน้ำมันบนไม้ที่ผ่านการกลึงผิวให้มีลักษณะสัณฐานเป็นรูปทรงกระบอก ต้นยางพาราจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม้เท่ากับ 200 mm ความหนาของดินน้ำมันเท่ากับ 10 mm ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราจำลองจะเท่ากับ 220 mm ไม้มีมิติเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 47.2 mm และความเร็วรอบเท่ากับ 110 rpm เมื่อกำหนดความลึกในการกรีดเท่ากับ 10 mm ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่ของตัวขี้น้ำแข็งเส้นบนแกน X จะเท่ากับ 247.2 mm เมื่อกำหนดมุมกรีดเท่ากับ 30° ทำให้มีระยะการเคลื่อนที่บนแกน X' เท่ากับ 285.4 mm ตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ ค่าเกณฑ์ K_p , K_i และ K_d สำหรับตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีของแกน X' เท่ากับ 0.020, 80 และ 0.0000012

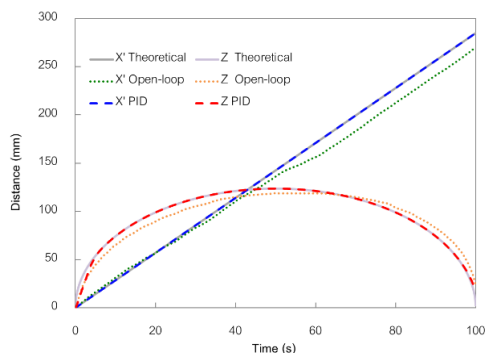
ตามลำดับ ส่วนค่าเกณฑ์ของแกน Z มีค่าเท่ากับ 0.026, 113.04 และ 0.0000014 ตามลำดับ ขั้นตอนการทำงานของแขนกลกรีดยางพาราแสดงดังรูปที่ 8



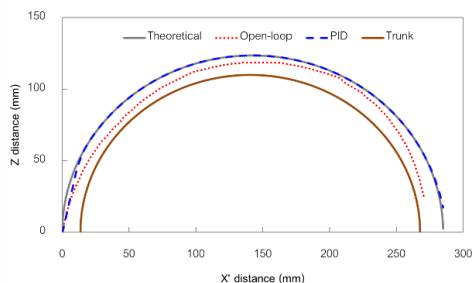
รูปที่ 8 ขั้นตอนการทำงานของแขนกลกรีดยางพารา

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางบนต้นยางพารา จำลองทรงกระบอกสามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X' และแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 9 แขนกลในแกน X' เคลื่อนที่แบบเส้นตรง ขณะที่แขนกลในแกน Z เคลื่อนที่แบบเส้นโค้งครึ่งวงกลม โดยมีระยะทางสูงสุดเท่ากับ 285.4 mm และ 123.6 mm ตามลำดับ ดังนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางที่ถูกออกแบบมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปวงรีคล้ายกับรอยกริดที่ต้องการบนต้นยางพารา จำลองทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X' และแกน Z เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมพีไอดี

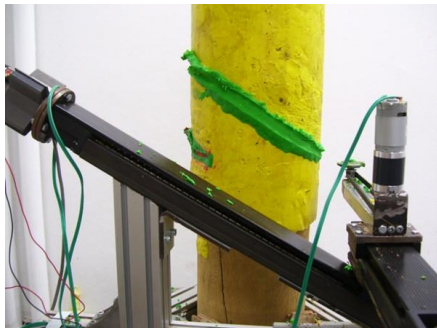


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารา เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมพีไอดี

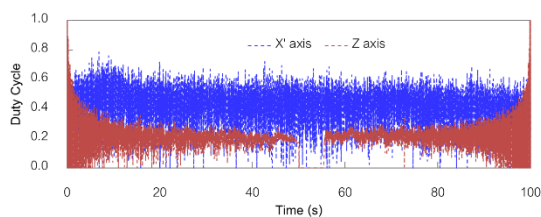
การเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X' และแกน Z เมื่อใช้ตัวควบคุมวงเปิดและตัวควบคุมพีไอดีถูกแสดงไว้ในรูปที่ 9 จากรูปจะเห็นว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมวงเปิด แขนกลทั้งสองแกนเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ แม้ว่าแขนกลแกน X' จะสามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับระยะทางที่ต้องการในช่วงเวลาประมาณ 30 s แรก ความผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุดของแขนกลแกน X' และแกน Z มีค่าเท่ากับ 16.4 mm ที่เวลา 68 s และ 21.9 mm ที่เวลา 100 s ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดี แขนกลทั้งสองแกนสามารถเคลื่อนที่ตามระยะทางที่ออกแบบไว้ได้อย่างราบเรียบ แม้ว่าจะเกิดความผิดพลาดทางตำแหน่งของแขนกลแกน Z ในช่วงเริ่มและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 13.9 mm ที่เวลา 1 s และ 14.8 mm ที่เวลา 100 s ตามลำดับ รูปที่ 11 แสดงรอยกริดบนต้นยางพาราจำลอง เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี จากรูปจะเห็นว่ารอยกริดมีขนาดสม่ำเสมอ

เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลพบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมวงเปิดมีลักษณะเป็นเส้นโค้งวงรีที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นทางการออกแบบไว้ จึงทำให้ใบมีดกริดดินน้ำมันลึกจนถึงแกนไม้ ส่งผลให้แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเป้าหมายได้ เพราะภาระที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างใบมีดกับแกนไม้ เนื่องจากในการทดสอบนี้ชุดใบมีดถูกออกแบบให้มีกำลังเพียงพอสำหรับการกริดดินน้ำมันของต้นยางพาราจำลอง เพื่อป้องกันความเสียหายของใบมีดและแกนไม้ ในกรณีการกริดต้นยางพาราจริง ชุดใบมีดจะต้องถูกออกแบบให้มีกำลังเพียงพอสำหรับการกริดเปลือกยางที่มีความหนาประมาณ 7 mm [9] เพื่อรักษาความแม่นยำ

ในการกรีด และต้องกรีดให้เหลือความหนาเปลือกยางประมาณ 0.5 mm เพื่อป้องกันความเสียหายของเปลือกยาง ส่วนเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมพีไอดีมีลักษณะเป็นเส้นโค้งวงรีใกล้เคียงกับเส้นทางที่ออกแบบไว้เกือบตลอดการเคลื่อนที่ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการสัมผัสแกนไม้ของใบมีดได้ แม้ว่าแกนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเป้าหมายได้ เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ในช่วงเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดมีความชันมาก ส่งผลให้แกนกลแกน Z ไม่สามารถสร้างความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เพียงพอได้ ดังเห็นได้จากวัฏจักรการทำงาน (duty cycle) ของแกนกลแกน Z มีค่าเท่ากับ 1 ในช่วงเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 รอยกรีดบนต้นยางพาราจำลอง
เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 12 วัฏจักรการทำงานของแกนกลในแกน X'
และแกน Z เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดี

อย่างไรก็ตามผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า แขนกลกรีดยางพาราที่มีตัวควบคุมพีไอดีมีศักยภาพที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการกรีดต้นยางพาราจริงได้ หากมีการพิจารณาเงื่อนไขในการกรีดยางเพิ่มเติม เช่น เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลต้องสร้างมาจากพื้นฐานของลำต้นยางพาราจริง เพื่อให้สามารถควบคุมความลึกในการกรีดยางได้อย่างถูกต้อง และการเปลี่ยนรูปแบบการกรีดจากแบบครึ่งลำต้นเป็นแบบหนึ่งในสามของลำต้น เพื่อลดความเร็วที่ต้องการในการเคลื่อนที่ของแกนกลแกน Z ในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้สามารถลดระยะเวลาในการกรีดลงได้ เพราะแกนกลทั้งสองแกนสามารถใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ได้สูงขึ้น เป็นต้น

4. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับแขนกลกรีดยางพารา ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่า การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมพีไอดี สามารถช่วยให้แขนกลเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ได้อย่างน่าพอใจ ดังนั้นขั้นตอนวิธีควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่นี้มีศักยภาพในการนำไปปรับปรุงเพื่อใช้งานจริง ความเร็วของแขนกลในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายของการเคลื่อนที่จำกัดการใช้งานขั้นตอนวิธีกรีดนี้ ทำให้เวลาที่เหมาะสมในการกรีดต้นยางพาราจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 220 mm แต่ละครั้งเท่ากับ 100 s

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สือออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2565]. เข้าถึงได้จาก : <http://mis-app.oae.go.th/product/ยางพารา>
- [2] อภิญญา จันทรเจริญ และ บัญชา สมบูรณ์สุข. วิเคราะห์สถานการณ์แรงงานการกรีดยางพารา และการทำยางแผ่นของเกษตรกรชาวสวนยางในภาคใต้. วารสารวิทยาศาสตร์ สาขาสังคมศาสตร์. 2540; 18(1): 25-38.
- [3] อัจฉราพร ทนปุ่น. พฤติกรรมการปฏิบัติงานของแรงงานครัวเรือนในระบบการผลิตยางพาราในจังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2555.
- [4] วันเฉลิม จันทรากุล และ อภินันท์ จันตะนี. ปัญหาและแนวทางแก้ไขราคายางพาราตกต่ำ. วารสารรัชตภาคย์. 2563; 14(33): 132-40.
- [5] นริศรา มหานินวงษ์, เขียวศักดิ์ ชูชีพ, นงเยาว์ เมืองดี, ปิยนาง คงทิม, เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์, สุธิดา หมาดโต๊ะชะ๊ะ และ กนกรัตน์ สำนางกาย. พฤติกรรมการกรีดยางพารา พฤติกรรมการเลือกใช้มีดกรีดยางพารา และการประเมินแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติของเกษตรกรชาวสวนยางพารา. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 2559; 33(1): 66-76.
- [6] ยงยุทธ์ เสียงดัง. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบกรีดยางพาราแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2551.
- [7] นริศรา มหานินวงษ์, เขียวศักดิ์ ชูชีพ, นงเยาว์ เมืองดี, ภูริวัฒน์ เพ็ชรนิคม, อนุพงษ์ สุวรรณมณี และ เอกพัฒน์ ช่วยเมือง. ใบมีดกรีดยางสำหรับเครื่องกรีดยางอัตโนมัติ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2559; 19(2): 23-31.
- [8] เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์, นงเยาว์ เมืองดี, นริศรา มหานินวงษ์, ปิยนาง คงทิม และ สุธิดา หมาดโต๊ะชะ๊ะ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติกับการกรีดยางแบบใช้มีดเจ๊ะบง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2562; 22(2): 22-8.
- [9] พิศมัย จันทูมา. การเจริญเติบโต ความหนาเปลือก และลักษณะทรงพุ่มของยางพันธุ์ RRIM 600 และสถาบันวิจัยยาง 251 ที่ระยะเปิดกรีดยาง. วารสารยางพารา. 2557; 35(3): 2-11.

ข้อแนะนำในการส่งต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (FEAT Journal) มีกำหนดออกเป็นราย 6 เดือน คือ มกราคม - มิถุนายน และกรกฎาคม - ธันวาคม ของทุกปี จัดพิมพ์โดยกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อเป็นการส่งเสริมและเผยแพร่ความรู้ ผลงานทางวิชาการ งานวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีพร้อมทั้งยังจัดส่ง เผยแพร่ตามสถาบันการศึกษาต่างๆ ในประเทศด้วย บทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสาร FEAT ทุกบทความนั้นจะต้องผ่านความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2535

ต้นฉบับบทความ

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

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

โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

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



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

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

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

Abstract

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

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

*ติดต่อ: E-mail, เบอร์โทรศัพท์, เบอร์โทรสาร

1. บทนำ

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

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

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

1.2 ชนิดตัวอักษร

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

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

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

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

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

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

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความขีดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

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

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินิจย่อหน้าใหม่ ให้พินิจบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินิจบทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพหรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่าง ๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการ จะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ขีดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

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

7.2. รูปภาพและตาราง

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

รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็น รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับได้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2 , ... พินิจหมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความจะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

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

ตารางที่ 1

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

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

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

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

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนรูป ประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมาก เกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

ทั้งนี้เพื่อความสมบูรณ์และความน่าเชื่อถือของบทความ ท่านควรใช้เอกสารอ้างอิงจากวารสารที่อยู่ในฐาน TCI (Thai Journal Citation Index Centre) ที่สามารถตรวจสอบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และควรใช้การอ้างอิงจากรายงาน ผลการวิจัย เอกสารประกอบการประชุม และหรือวิทยานิพนธ์ เท่าที่จำเป็น

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของบทความ ใช้ระบบ ตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับของเอกสารที่มีการอ้างถึง ในเนื้อหาและหมายเลขที่อ้างถึงในเนื้อเรื่อนั้นจะต้องตรงกับ หมายเลขที่มีการกำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ ตัวเลข อารบิกในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิง ในบทความ เช่น [1] หรือ [2-4, 8, 10] หมายถึงอ้างถึงลำดับผู้ แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดยเรียงลำดับจาก หมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่สุดท้าย ตามการอ้างอิง การเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่อง เฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาของบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

[2] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. การออกแบบชิ้นส่วน เครื่องจักรกล 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. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวด้วยกระบวนการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัย นครสวรรค์. 2553; 18(3): 20-6.

คำอธิบายเพิ่มเติม กรณีผู้แต่งเกิน 6 คน ให้ใส่ชื่อผู้แต่ง 6 คนแรก คั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (comma- ,) และตาม ด้วย 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. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหม โดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาด สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. 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>