

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol. 6 No. 2 July - December 2020

Research Article

- Preparation of carbon-silica composite adsorbent from by-product of sugar industry 80

Yuvarat Ngernyen Natthapat Chantarasombat Boonyisa Ounphikul and Atip Laungphairojana

- Energy Analysis of Torrefaction for Spent Coffee Grounds as a Solid Fuel 90

Rathapong Pirompoo and Kanit Manatura

- Smart Cricket Farming Based on Internet of Things 98

Kiattisin Kanjanawanishkul Jumphon Kaewsihawong Wuttiya Uttaracha and Suphan Yangyuen

- Upgrading fuel property of Bagasse, Cane leaves, and Eucalyptus-wood Residues via torrefaction 113

Narongrit Sailoon and Varinrumpai Seithtanabutara

- The Effects of Sterilization Pressure on Fruit-Bunch Separation and Crude Palm Oil Yield in Sterilization Process Using Direct Steaming 125

Siravit Pakdeechot and Makatar Wae-hayee

- Poultry house climate control using a Fuzzy Logic Controller 137

Nutsuporn Chinsuwan Krisanarach Nitisiri Niyom Pinitkarn Thana Radpukdee and Chanoknun Sookkumnerd

- Reuse of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Process for Indigo Dyeing Wastewater Treatment 147

Songphon Prayochmee Panomchai Weerayuttil and Kulyakorn Khuanmar



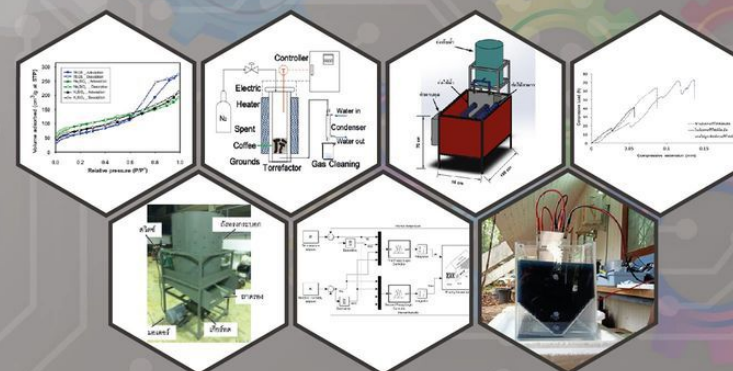
Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร

วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี
การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol. 6 No. 2 July - December 2020

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2563

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
ผศ.ดร. ชนินฐา	คำวิลัยศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. กัลยากร	ขวัญมา	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร. วาอิส	ลีลาภัทร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. ธนา	ราษฎร์ภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. วีรชัย	อาจหาญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร. นิยม	กำลังดี	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. คำธณ	พิทักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. วิภาดา	สนองราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. สิริวิชญ์	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
Asst.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 Muang Sub-district,Muang Khon Kaen District,Khon Kaen Province, 40002

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

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

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

ขอบเขตของเนื้อหาที่ตีพิมพ์ในวารสาร ประกอบด้วยบทความที่เกี่ยวข้อง ในประเด็นดังต่อไปนี้

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

จัดทำและเผยแพร่โดย กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (Farm Engineering and Automation Technology: FEAT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ. เมืองขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002 โทร.090-024-4998 Email: feat.kku@gmail.com

บทบรรณาธิการ

เรียน ท่านสมาชิกวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
และผู้อ่านทุกท่าน



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (Farm Engineering and Automation Technology Journal: FEAT Journal) ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2563 ฉบับนี้เป็นปีที่ 6 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 7 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความฉบับนี้ได้ที่เว็บไซต์ <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

31 ธันวาคม 2563

จริยธรรมของการตีพิมพ์ (Publication Ethics)

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

บทบาทหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผลงานของผู้เขียนต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่นหากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของตนเองรวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ
3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสาร
4. ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคนต้องเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัยจริง
5. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมาเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง
6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ภายหลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว
7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์กับวารสารทุกบทความ โดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
2. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้เขียนในด้านเชื้อชาติเพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้เขียน
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียนหรือผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
4. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประโยชน์ของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียน
5. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

บทความวิจัย

- | | |
|---|------------|
| <p>การเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาจากผลิตภัณฑ์พลอยได้
ของอุตสาหกรรมน้ำตาล</p> <p>ยุวรัตน์ เงินเย็น ณัฐพัชร จันทรมบัติ บุญญิสา อุ๋นพิกุล และอชิป เหลืองไพโรจน์</p> | <p>80</p> |
| <p>การวิเคราะห์พลังงานจากการทอรีแฟกชั่นของกากกาแฟสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงแข็ง</p> <p>รัฐพงศ์ ภิรมย์ภู และ คณิต มานะบุระ</p> | <p>90</p> |
| <p>การทำฟาร์มจิ้งหรีดอัจฉริยะโดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง</p> <p>เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล จุมพล แก้วสีหาวงค์ วุฒิยา อุดราชา
และ สุพรรณ ยั่งยืน</p> | <p>98</p> |
| <p>การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของขาน้อย ใบ้อย และเศษไม้ยูคาลิปตัส
ด้วยกระบวนการทอรีแฟกชั่นขั้นต้น</p> <p>ณรงค์ฤทธิ์ สายลุน และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธณบุตร</p> | <p>113</p> |
| <p>ผลของความดันที่มีต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการ
ให้ความร้อนปาล์มน้ำมันแบบนิ่งโดยตรง</p> <p>สิริวิชญ์ ภักดีโชติ และ มักตาร์ แวหะยี</p> | <p>125</p> |
| <p>การควบคุมสภาพอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไก่ระบบปิดโดยใช้ตัวควบคุมพีซีซีลอจิก</p> <p>ณัฐสุพร ชื่นสุวรรณ กฤษณรัช นิตสิริ นิยม พินิจการ ธนา ราษฎร์ภักดี
และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด</p> | <p>137</p> |
| <p>การใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า
เพื่อบำบัดน้ำเสียข้อมลคราม</p> <p>ทรงพล ประโยชน์มี พนมชัย วีระยุทธศิลป์ และ กัลยกร ขวัญมา</p> | <p>149</p> |

Research Article

- | | |
|--|-----|
| Preparation of carbon-silica composite adsorbent from by-product of sugar industry | 80 |
| <i>Yuvarat Ngernyen Natthapat Chantarasombat Boonyisa Ounphikul
and Atip Laungphairojana</i> | |
| ENERGY ANALYSIS OF TORREFACTION FOR SPENT COFFEE GROUNDS AS A
SOLID FUEL | 90 |
| <i>Rathapong Pirompoo and Kanit Manatura</i> | |
| Smart Cricket Farming Based on Internet of Things | 98 |
| <i>Kiattisin Kanjanawanishkul Jumphon Kaewsihawong Wuttiya Uttaracha
and Suphan Yangyuen</i> | |
| Upgrading fuel property of Bagasse, Cane leaves, and Eucalyptus-wood Residues
via torrefaction Pretreatment | 113 |
| <i>Narongrit Sailoon and Varinrumpai Seithtanabutara</i> | |
| The Effects of Sterilization Pressure on Fruit-Bunch Separation and Crude Palm Oil
Yield in Sterilization Process Using Direct Steaming | 125 |
| <i>Siravit Pakdeechot and Makatar Wae-hayee</i> | |
| Poultry house climate control using a Fuzzy Logic Controller | 137 |
| <i>Nutsuporn Chinsuwan Krisanarach Nitisiri Niyom Pinitkarn
Thana Radpukdeeand and Chanoknun Sookkumnerd</i> | |
| Reuse of aluminum electrodes in electrocoagulation process
for indigo dyeing wastewater treatment | 149 |
| <i>Songphon Prayochmee Panomchai Weerayutsil and Kulyakorn Khuanmar</i> | |



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ ของอุตสาหกรรมน้ำตาล

Preparation of carbon-silica composite adsorbent from by-product of sugar industry

ยุวรัตน์ เงินเย็น* ณัฐพัชร จันทรสสมบัติ บุญนิสา อุ่นพิกุล และอธิป เหลืองไพโรจน์

Yuvarat Ngernyen* Natthapat Chantarasombat Boonyisa Ounphikul and Atip Laungphairojana

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและพลังงานชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Biomass and Bioenergy Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Khon Kaen University

Received: 2 December 2019

Revised: 17 July 2020

Accepted: 20 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา โดยเตรียมจากกากน้ำตาล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลใช้เป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับแหล่งซิลิกาใช้สารเคมีซึ่งเป็นที่นิยมใช้ คือ tetraethyl orthosilicate (TEOS) โดยทำการศึกษเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีที่มีราคาถูกกว่า ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) เมื่อได้ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตแล้ว ทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุน โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์ปริมาณความชื้นและเถ้าตามวิธีการ ASTM และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่เตรียมได้จากแหล่งซิลิกาทั้งสามมีโครงสร้างรูพรุนเป็นขนาดกลาง และโซเดียมซิลิเกตให้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ $329 \text{ m}^2/\text{g}$ ผลการศึกษาปริมาณเถ้าของวัสดุคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่ามีซิลิกาอยู่ในโครงสร้าง และการศึกษา FTIR แสดงถึงหมู่คาร์บอนและซิลิกาในโครงสร้าง ดังนั้น กากน้ำตาล โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมในการผลิตคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ที่มีต้นทุนต่ำ

คำสำคัญ: คาร์บอน-ซิลิกา คอมโพสิต ตัวดูดซับ กากน้ำตาล

Abstract

This research studied the preparation of carbon-silica composite materials from molasses which is by-product of sugar industry as a carbon source. For silica source, conventional chemical tetraethyl orthosilicate (TEOS) was used and compared with lower cost chemicals i.e. sodium silicate (Na_2SiO_3) and potassium silicate (K_2SiO_3). Porous properties, moisture content and ash content of the obtained composite materials were characterized using N_2 adsorption and ASTM method, respectively. The surface functional groups were characterized using Fourier transform Infrared spectroscopy (FTIR). The results revealed that all silica sources have led to materials with mesoporous structure and among different silica sources, Na_2SiO_3 showed the highest surface area of $329 \text{ m}^2/\text{g}$. The ash content of composite materials indicated the presence of silica in their structure and the FTIR studies also confirm the carbon and silica groups in the structure. It is to be emphasized that molasses, Na_2SiO_3 and K_2SiO_3 are suitable materials to produce low cost carbon-silica composite.

Keywords: Carbon-silica: Composite: Adsorbent: Molasses

*ติดต่อ: nyuvarat@kku.ac.th, 081-288-9649

1. บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูปที่สำคัญของประเทศไทย มีจุดแข็งเนื่องจากการใช้วัตถุดิบหรืออ้อยที่ปลูกภายในประเทศมาแปรรูปเป็นน้ำตาล เพื่อตอบสนองของความต้องการบริโภคภายในประเทศ อีกทั้งยังส่งออกเพื่อนำรายได้ให้กับผู้ปลูกอ้อย ซึ่งในฤดูการผลิตปีพ.ศ. 2561-2562 มีโรงงานน้ำตาลถึง 57 โรงงาน กระจายตัวอยู่ในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศ ยกเว้น ภาคใต้ โดยมีอ้อยเข้าหีบถึง 126 ล้านตัน [1] ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น นอกจากจะได้น้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์หลักแล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ที่เกิดขึ้นทั้งในรูปแบบของแข็งและของเหลว ได้แก่ ชานอ้อย (bagasse) กากหม้อกรอง (filter cake) และกากน้ำตาลหรือ โมลาส (molasses) ซึ่งในปัจจุบันกากน้ำตาลถูกนำไปใช้ในการผลิตเอทานอล และใช้เป็นอาหารสัตว์งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาล โดยมีเป้าหมายว่าจะนำกากน้ำตาลไปผลิตเป็นวัสดุที่สามารถตอบโจทย์การแก้ไขปัญหาของประเทศ รวมถึงเป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่มีงานวิจัยใดเคยทำมาก่อน และต้องมีต้นทุนในการผลิตที่ไม่สูง

สำหรับปัญหาของประเทศที่งานวิจัยนี้มุ่งเป้าที่จะแก้ไข คือ ปัญหามลพิษทั้งทางน้ำและทางอากาศที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และครัวเรือน โดยวิธีการบำบัดมลพิษทั้งทางน้ำและทางอากาศนั้นมีอยู่หลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างมีข้อดี

และข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม มีกระบวนการบำบัดอยู่หนึ่งวิธีที่เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง กระบวนการไม่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายของกระบวนการต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ [2] โดยกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่นำตัวดูดซับของแข็ง (adsorbent) ที่มีรูพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวที่มากมาดูดซับสารที่ไม่ต้องการ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊ส โดยวัสดุที่นำมาเป็นตัวดูดซับนั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) โมเลกุลลาร์ซีฟ (molecular sieve) ซิลิกาเจล (silica gel) และซีโอไลต์ (zeolite) เป็นต้น [3] นอกจากนี้ ตัวดูดซับทางการค้าหลายชนิดมีราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาลจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

อย่างไรก็ตามมีวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ นั่นคือ วัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) ฉนวนกันความร้อน (thermal insulator) ทั้งยังสามารถนำไปใช้งานเป็นตัวดูดซับได้อีกด้วย [4] เช่น ใช้ดูดซับ SO_2 , NH_3 , CO_2 , CH_4 หรือ C_2H_6 เป็นต้น [5, 7-8]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาล โดยนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาของงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้ เรโซซินอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (resorcinol-formaldehyde) [4, 6] พอลิเพอร์ฟิวรีล แอลกอฮอล์ (polyfurfuryl alcohol, PFA) [7-8] กลูโคส (glucose) [9] ซูโครส (sucrose) [5] ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) [10] และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) [11] เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยใดใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อกากน้ำตาลซึ่งมีน้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$) เป็นองค์ประกอบหลักถึงประมาณ 30-40% ดังนั้น จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ [12]

สำหรับแหล่งซิลิกานั้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้ tetraethyl orthosilicate (TEOS, $C_8H_{20}O_4Si$) [4, 6, 9] tetramethyl orthosilicate (TMOS, $C_4H_{12}O_4Si$) [10-11] และ methyltrimethoxy silane (MTMS, $C_4H_{12}O_3Si$) [11] ซึ่งสารเคมีเหล่านี้มีราคาแพง และต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น TEOS มีราคาประมาณ 4 พันบาทต่อลิตร งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้สารที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย และมีราคาถูก เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา และเป็นการเพิ่มศักยภาพให้สารเคมีของประเทศไทย ให้สามารถใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น โดยผู้วิจัยได้เลือกโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) ซึ่งมีราคาประมาณ 700

บาทต่อลิตร (ราคาจากบริษัทผู้ผลิต) ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้ TEOS

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน - ซิลิกา

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา คือ กากน้ำตาล ซึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ Tetraethyl Ortho-silicate (TEOS, $C_8H_{20}O_4Si$, Sigma-Aldrich $\geq 99.0\%$), โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, Na_2SiO_3 , บริษัท ช.เคมีไทย จำกัด) และโพแทสเซียมซิลิเกต (potassium silicate, K_2SiO_3 , บริษัท ช.เคมีไทย จำกัด) เป็นแหล่งซิลิกา

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ดัดแปลงจากวิธีการของ Sun และคณะ [13] ทำโดยนำกากน้ำตาลมาผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เจือจาง 50% ปริมาตร 20 mL และน้ำกลั่นปริมาตร 5 mL โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกากน้ำตาลต่อแหล่งซิลิกา เท่ากับ 1.5:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณกากน้ำตาล 7.5 กรัม และปริมาณแหล่งซิลิกา 5 กรัม จากนั้นนำของผสมไปให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนด้วยเตาให้ความร้อน (hot plate digital, ULAB รุ่น UH-4550) อุณหภูมิ $35^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น $85^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ผ่านการล้างมีค่า pH เท่ากับ น้ำที่ใช้ล้าง หลังจาก

นํ้านำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วนำไปบดเป็นผงละเอียดเพื่อนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมได้

การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ประกอบด้วย สมบัติรูพรุน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว

สมบัติรูพรุนทำการวิเคราะห์โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ด้วยเครื่อง Surface area and Porosity Analyzer (ASAP2460, Micromeritics) โดยก่อนทำการวิเคราะห์ต้อง out gas ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งความดันภายในหลอดทดลอง < 50 mmHg ซึ่งการดูดซับทำตั้งแต่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) 0.01–0.99 ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) โดยใช้สมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) วัดที่ P/P° 0.05–0.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) ใช้สมการ Dubunin-Radushkevich (DR) โดยวัดที่ $P/P^\circ = 0.05–0.3$ เช่นกัน ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume) วัดที่ $P/P^\circ = 0.99$ ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (mesopore and macropore volume) คำนวณได้โดยลบปริมาตรรูพรุนรวมด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) คำนวณได้จากสมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH)

ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตาม ASTM D2867 ส่วนปริมาณเถ้า ทำโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เตา Muffle furnace การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Bruker รุ่น TENSOR 27) โดยทำการวิเคราะห์ที่เลขคลื่น (wavenumber) 4000–600 cm^{-1}

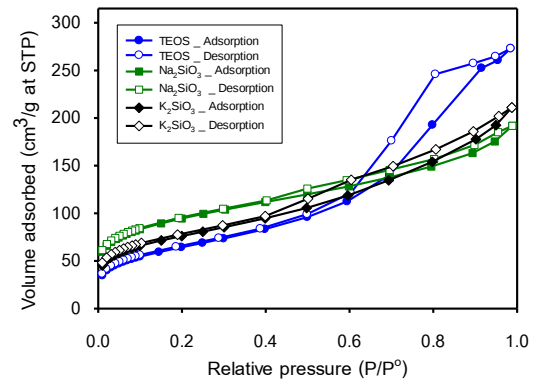
3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติรูพรุนของตัวดูดซับคอมโพสิตที่เตรียมได้

รูปที่ 1 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวอย่างทั้งสาม เป็นชนิด Type VI ตามการแบ่งของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งแสดงถึงตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนขนาดกลาง [14] โดยไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงลักษณะของวงฮีสเทรีซิส (hysteresis loop) กล่าวคือ มีปริมาณการดูดซับและการคายซับที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง [14] และตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมโดยใช้ TEOS เป็นแหล่งซิลิกา (เส้นสีน้ำเงิน) มีวงฮีสเทรีซิสที่ใหญ่ที่สุด รองลงมา คือ การใช้โพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3 , เส้นสีดำ) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , เส้นสีเขียว) ตามลำดับ นั่นคือ ตัวดูด

ซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมจาก TEOS มีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางมากที่สุด รองลงมา คือ ตัวดูดซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมจาก K_2SiO_3 และ Na_2SiO_3 ตามลำดับ

สมบัติรูพรุนของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย แสดงผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า โซเดียมซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสูงกว่า TEOS โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $329 \text{ m}^2/\text{g}$ ส่วนตัวดูดซึบที่เตรียมจากโพแทสเซียมซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซึบที่เตรียมจาก TEOS เล็กน้อย โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 269 และ $230 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ดังนั้น โซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารเคมีที่ผลิตได้ในประเทศไทยและมีราคาถูก จึงมีศักยภาพในการใช้เตรียมตัวดูดซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา สามารถนำมาใช้ทดแทนสารเคมีจากต่างประเทศ หรือ TEOS ซึ่งมีราคาแพงได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของตัวดูดซึบรูพรุนขนาดกลางจากงานวิจัยอื่น ๆ เช่น แมงกานีสออกไซด์ชนิด birnessite ($\delta\text{-MnO}_2$) ที่มีพื้นที่ผิว $211.3 \text{ m}^2/\text{g}$ [15] หรือ ถ่านกัมมันตรูพรุนขนาดกลางที่เตรียมได้จากเกล็ดไคโตซาน ที่มีพื้นที่ผิว $318.3 \text{ m}^2/\text{g}$ [16] ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซึบรูพรุนขนาดกลางชนิดอื่น ๆ ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซึบสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ($> 2 \text{ nm}$) เช่น สีย้อม เป็นต้น



รูปที่ 1 ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

ตารางที่ 1 สมบัติรูพรุนของตัวดูดซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

	TEOS	Na_2SiO_3	K_2SiO_3
พื้นที่ผิว (m^2/g)	230	329	269
ปริมาตรรูพรุน	0.09	0.13	0.11
ขนาดเล็ก (cm^3/g)	(22%)	(43%)	(33%)
ปริมาตรรูพรุนขนาด	0.33	0.17	0.22
กลางและใหญ่ (cm^3/g)	(78%)	(57%)	(67%)
ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	0.42	0.30	0.33
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	7.33	3.61	4.85

ตัวดูดซึบที่เตรียมได้ มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ โดยตัวดูดซึบที่เตรียมจาก TEOS มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาด

ใหญ่สูงถึง 78% ส่วนตัวดูดซับที่เตรียมจากโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตมีปริมาตร รูพรุน ขนาดกลางและขนาดใหญ่ 57 และ 67% ตามลำดับ ซึ่ง IUPAC ได้ทำการแบ่งขนาดรูพรุนไว้ 3 ขนาด ดังนี้ (1) รูพรุนขนาดเล็ก มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm (2) รูพรุนขนาดกลาง มีขนาดรูพรุน 2–50 nm และ (3) รูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 nm ซึ่งตัวดูดซับจากแหล่งซิลิกาทั้ง 3 แหล่ง เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง โดยเมื่อใช้ Na_2SiO_3 K_2SiO_3 และ TEOS เป็นแหล่งซิลิกา มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 3.61 4.85 และ 7.33 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา แล้วได้ตัวอย่างที่มีขนาดรูพรุนเป็นรูพรุนขนาดกลาง [4, 9]

3.2 ปริมาณความชื้นและเถ้า

ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้า ทำการทดสอบเฉพาะตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกต เนื่องจากเป็นแหล่งซิลิกาที่มีราคาถูกกว่า TEOS และได้ตัวดูดซับที่มีสมบัติรูพรุนที่ดี ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่า ตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) โดยมีปริมาณความชื้นที่ต่ำมาก เพียงร้อยละ 2–3 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าตัวดูดซับใดมีปริมาณความชื้นมาก จะไม่ส่งผลดีต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งความชื้นที่เกาะติดอยู่ตรงพื้นผิวและรูพรุน

ของตัวดูดซับ จะทำให้ตัวดูดซับสูญเสียพื้นที่สำหรับใช้ดูดซับตัวถูกดูดซับที่ต้องการกำจัด

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นและเถ้าของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

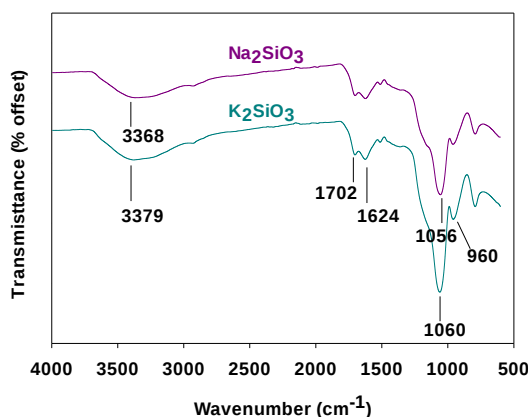
แหล่งซิลิกา	ความชื้น (wt%)	เถ้า (wt%)
Na_2SiO_3	2.33	24.73
K_2SiO_3	3.13	29.91

ตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ มีปริมาณเถ้าอยู่ระหว่างร้อยละ 25–30 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากน้ำตาลเริ่มต้น มีปริมาณเถ้า ร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มซิลิกาเข้าไปในกากน้ำตาล ทำให้มีปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเถ้าที่เกิดขึ้นก็คือซิลิกาที่ใส่เข้าไปนั่นเอง ดังนั้น ผลการทดลองนี้ จึงเป็นการยืนยันว่า ในโครงสร้างของตัวดูดซับที่เตรียมได้มีซิลิกาอยู่ด้วย

3.3 หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวบนตัวดูดซับที่เตรียมได้

เมื่อนำตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้จากโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า พีกที่ตำแหน่ง 1056 cm^{-1} ของตัวดูดซับที่เตรียมจาก Na_2SiO_3 และที่ตำแหน่ง 1060 cm^{-1} ของตัวดูดซับที่เตรียมจาก K_2SiO_3 คือ หมู่ Si–O–Si [5] ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3368 และ 3379 cm^{-1} คือ O–H ของหมู่ Si–OH และ C–OH [6] และที่เลขคลื่น 960 cm^{-1} คือ

หมู่ Si-OH เช่นกัน [4] โดยที่ตำแหน่ง 1702 cm^{-1} คือ C=O ของหมู่ -COOH [9] และที่ตำแหน่ง 1624 cm^{-1} คือ อะโรมาติกคาร์บอน [9] แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับที่เตรียมได้ทั้งคาร์บอนและซิลิกาอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 2 FTIR spectra ของตัวดูดซับคอมโพสิต คาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิต คาร์บอน-ซิลิกา ชนิดใหม่ โดยใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่ง คาร์บอน และใช้โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีราคาถูกและผลิตได้ในประเทศไทย เป็นแหล่งซิลิกา เทียบกับการใช้ TEOS ซึ่งเป็น สารเคมีที่มีราคาแพงกว่า และต้องสั่งซื้อจาก ต่างประเทศ พบว่า โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต สามารถเตรียมตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการใช้ TEOS โดยมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 329 และ $269\text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ โดยตัวดูดซับที่เตรียมได้มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 2.33 และ 3.13 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแฉะ

ร้อยละ 24.73 และ 29.91 โดยน้ำหนัก ดังนั้น สารเคมี ทั้ง 2 ชนิด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ ผลิตตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยจึง ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานน้ำตาล สำนักงานคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาลทราย. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 8 พฤศจิกายน 2562]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ocsb.go.th/th/factory/index.php>
- [2] Qin P, Yang Y, Zhang X, Niu J, Yang H, Tian S, Zhu J, Lu M. Highly efficient, rapid, and simultaneous removal of cationic dyes from aqueous solution using monodispersed mesoporous silica nanoparticles as the adsorbent. *Nanomaterials*. 2018; 8: 1-14.
- [3] Alghamdi AA, Al-Odauni A-B, Saeed WS, Al-Kahtani A, Alharthi FA, Aouak T. Efficient adsorption of lead (II) from aqueous phase solutions using polypyrrole-based activated carbon. *Materials*. 2019; 12: 1-16.

- [4] Xu H, Zhang H, Huang Y, Wang Y. Porous carbon/silica composite monoliths derived from resorcinol-formaldehyde/TEOS. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2010; 356: 971-6.
- [5] Furtado AMB, Wang Y, LeVan D. Carbon silica composites for sulfur dioxide and ammonia adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013; 165: 48-54.
- [6] Ye L, Ji Z-H, Han W-J, Hu J-D, and Zhao T. Synthesis and characterization of silica/carbon composite aerogels. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010; 93: 1156-63.
- [7] Glover TG, Dunne KI, Davis RJ, Levan MD. Carbon-silica composite adsorbent: Characterization and adsorption of light gases. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2008; 111: 1-11.
- [8] Barpaga D, Levan MD. Functionalization of carbon silica composites with active metal sites for NH₃ and SO₂ adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016; 221: 197-203.
- [9] Nandan D, Sreenivasulu P, Konathala LNS, Kumar M, Viswanadham N. Acid functionalized carbon-silica composite and its application for solketal production. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013; 179: 182-90.
- [10] Pilipavicius J, Sakalauskas D, Beganskiene A, Kareiva A. Synthesis of silica-carbon nanotube composite materials and their application for laser systems. *International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies*; 2012 Apr 17-20; Riga, Latvia.
- [11] Givianrad MH, Rabani M, Saber-Tehrani M, Aberoomand-Azar P, Sabzevari MH. Preparation and characterization of nanocomposite, silica gel, activated carbon and its adsorption properties for Cd (II) ions from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2013; 17: 329-35.
- [12] Clarke MA. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. 2nd ed. Academic Press: San Diego; 2003.

- [13] Sun X, Yu W, Yan J, Li J, Jin G, Feng J, Guo Z, Liang X. Mesoporous silica-carbon composites fabricated by a universal strategy of hydrothermal carbonization. Controllable synthesis and applications. RSC Advances. 2018; 8: 27207-15.
- [14] Yu Z-H, Zhai S-R, Guo H, Lv T-M, Song Y, Zhang F, Ma H-C. Removal of methylene blue over low-cost mesoporous silica nanoparticles prepared with naturally occurring diatomite. Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2018; 88: 541-50.
- [15] Pang J, Fu F, Ding Z, Lu J, Li N, Tang B. Adsorption behaviors of methylene blue from aqueous solution on mesoporous birnessite. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017; 77: 168-76.
- [16] Marrakchi F, Ahmed MJ, Khanday WA, Asif M, Hameed BH. Mesoporous-activated carbon prepared from chitosan flakes via single-step sodium hydroxide activation for the adsorption of methylene blue. International Journal of Biological Macromolecules. 2017; 98: 233-9.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การวิเคราะห์พลังงานจากการทอรีแฟกชันของกากกาแฟสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ENERGY ANALYSIS OF TORREFACTION FOR SPENT COFFEE GROUNDS AS A SOLID FUEL

รัฐพงศ์ ภิรมย์ภู และ คณิต มานะบุระ*

Rathapong Pirompoo and Kanit Manatura*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University,

Kamphaeng Saen campus, Nakornpatom 73140

Received: 5 December 2019

Revised: 11 June 2020

Accepted: 17 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์คุณสมบัติการทอรีแฟกชันและประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกากกาแฟอัดเม็ดภายใต้อุณหภูมิ (200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30, 45 และ 60 นาที) ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยใช้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Energy Efficiency, REE) เป็นดัชนีบ่งบอกประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการปรับปรุงชีวมวล ผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทอรีแฟกชันส่งผลให้อัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C ผลผลิตเชิงมวล และผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าลดลง ขณะที่ความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิทอรีแฟกชันสูง (275 ถึง 300 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาทอรีแฟกชันที่สั้น (30 นาที) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าที่อุณหภูมิทอรีแฟกชันต่ำ (200 ถึง 250 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาสั้น (60 นาที) ซึ่งการทอรีแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 28.2 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่สุด

คำหลัก: ทอรีแฟกชัน กากกาแฟ ผลผลิตเชิงพลังงาน ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์

Abstract

Analysis of torrefaction characteristics and energy utilization of coffee grounds residue under the combination of temperature (200, 250, 275 and 300 °C) and duration (30, 45 and 60 minutes) is studied. An index of relative energy efficiency (REE) is introduced to identify the performance of energy utilization for upgrading biomass. Results showed increasing torrefaction temperature lead to low H/C, O/C, mass yield, energy yield which contrast with energy density. Moreover, the energy utilization under the combination of a high temperature (275 to 300 °C) and a short duration (30 minute) is more efficient than that of a low temperature (200 to 250 °C) and a long duration (60 minute). Torrefaction at 300 °C and 30 minute shows HHV of 28.2 MJ/kg, the optimum choice for REE.

Keywords: Torrefaction: Spent coffee grounds: Energy yield: REE

*ติดต่อ: kanitmana@gmail.com, 034-355-310

1. บทนำ

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เกิดจากธรรมชาติ และเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินได้ [1] เชื้อเพลิงดังกล่าวส่วนมากนำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อาทิ แกลบ ชานอ้อย ชัง ข้าวโพด ฟางข้าว เศษไม้ กากปาล์ม และกากมันสำปะหลัง พลังงานจากชีวมวลได้รับการคาดว่าจะจะเป็น 1 ใน 4 ของพลังงานหลักที่จะใช้ในประเทศไทย [2] ชีวมวลนอกจากถูกใช้ในการผลิตทางความร้อนและไฟฟ้าแล้ว ยังช่วยลดปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกอีกด้วย จากข้อมูลของสมาคมกาแฟ [3] ในปี 2559 ประเทศไทยมีการบริโภคกาแฟถึง 120,000 ตันต่อปี ผลผลิตที่ได้หลังจากการนำไปบริโภคแล้ว คือ กากกาแฟ โดยทั่วไปจะถูกนำไปทิ้ง ใช้ในการทำปุ๋ย ชัดผิว หรือใช้เป็นสารกำจัดกลิ่น อับ กากกาแฟโดยทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายกับชีวมวล กล่าวคือ มีความชื้นค่อนข้างสูง เนื่องจากการมีคุณสมบัติดูดความชื้นในบรรยากาศได้ดี (hygroscopic) และมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ [4] ข้อเสียดังกล่าวสามารถถูกปรับปรุงโดยใช้การปรับสภาพทางความร้อนหรือการทอริแฟกชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอริแฟกชัน เป็นกระบวนการปรับสภาพทางความร้อนกระบวนการหนึ่งใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้อากาศหรืออากาศเบาบาง [5] ที่ความดันบรรยากาศ ความร้อนจะทำให้ส่วนประกอบหลักของชีวมวล ประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เกิดการสลายตัวในอัตราต่างๆกัน การทอริแฟกชันสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ตามระดับช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ การทอริแฟกชันชนิดเบาบางหรือ light torrefaction (200 – 235 °C) การทอริแฟกชันชนิดอ่อนหรือ mild torrefaction (235 – 275 °C) และการทอริแฟกชันชนิดเข้มข้นหรือ severe torrefaction (275 – 300 °C) ตามลำดับ ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชันจะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เปราะ (brittle) ค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) สูงขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนเชิงอะตอมของ

ออกซิเจนต่อคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง ผลจากการทอริแฟกชันช่วยปรับสภาพชีวมวลให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินบางชนิด [5]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทอริแฟกชันมีอย่างกว้างขวาง ดังนี้ Granados และคณะ [6] ศึกษาผลของการรับอิเล็คตรอนของโครงสร้างทางเคมีในชานอ้อยหลังผ่านกระบวนการทอริแฟกชัน พบว่า ชานอ้อยที่ผ่านการทอริแฟกชันมีคาร์บอนสูงขึ้น ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น 30% อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลลดลง เนื่องจากการมีสูญเสียมวลของไอน้ำและสารระเหยง่าย บางส่วนระหว่างเพิ่มอุณหภูมิทอริแฟกชัน ชีวมวลดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเชื้อเพลิงแข็ง เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน ผลจากการทอริแฟกชันดังกล่าวคล้ายคลึงกับงานของ Zhang และคณะ [7] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของการทอริแฟกชันของกากกาแฟ ยาจีน และสาหร่ายขนาดเล็ก

Du และคณะ [8] ศึกษาการปรับปรุงชีวมวลที่ใช้กับเตาหลอม ผ่านการทอริแฟกชันและคาร์บอนไนเซชัน ผลศึกษาพบว่า ถ่านทอริไฟด์ ที่ 300 องศาเซลเซียส หรือถ่านจากการไพโรไลซิสระหว่าง 400 และ 500 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติที่ดีกว่าถ่านหินซึ่งมีสารระเหยง่ายน้อยและสามารถนำไปผสมกับถ่านหินบดละเอียดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบเผาไหม้

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทอริแฟกชันโดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30, 45 และ 60 นาที) ต่อสมรรถนะของการทอริแฟกชันในรูปของผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน และความหนาแน่นเชิงพลังงาน รวมถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ เพื่อหาเงื่อนไขการทอริแฟกชันที่เหมาะสม ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาเชื้อเพลิงถ่านหินร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชีวมวล

กากกาแฟที่เหลือจากร้านเครื่องดื่มภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการปรับปรุงสภาพทางความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ กากกาแฟดังกล่าวถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ชนิด Binder ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยเครื่องอัดแท่งเพื่อให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยมาผสมกับน้ำในอัตราส่วนระหว่างกากกาแฟต่อน้ำเท่ากับ 1 : 1.2 แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 - 5 มิลลิเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 2 - 2.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำกากกาแฟแท่งเข้าเครื่องอบอีกครั้งเพื่อทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความเหนียวคงตัวมากขึ้นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 7 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บเชื้อเพลิงดังกล่าวไว้ในขวดโหลที่ปิดผนึกป้องกันความชื้น ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

2.2 กระบวนการทอริแฟกชัน

รูปที่ 1 แสดงระบบการทอริแฟกชัน ประกอบด้วยถังแก๊สไนโตรเจน เตาทอริแฟกเตอร์ ระบบควบคุม และระบบกำจัดก๊าซเสีย ไนโตรเจนถูกใช้เพื่อให้สภาวะในถังปราศจากออกซิเจนตลอดการทอริแฟกชันโดยถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

เตาทอริแฟกเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 200 มิลลิเมตร สูง 500 มิลลิเมตร ทำจาก stainless steel ถูกควบคุมโดยระบบควบคุมและระบบกำจัดก๊าซเสียซึ่งประกอบด้วย บั๊ม และคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ควบแน่นแก๊สให้อยู่ในรูปของเหลว

ในการทดลอง กากกาแฟแท่งจำนวน 100 กรัม ถูกใส่ในอุปกรณ์บ่อนก่อนนำลงในเตาทอริแฟกเตอร์ ภายในเตาถูกทำให้ปราศจากอากาศ โดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลที่ 10 ลิตรต่อนาที ระยะเวลา 5 นาที เพื่อทำให้สภาวะในเตาปราศจากอากาศ หลังจากนั้นจึงลดอัตราการไหลของแก๊ส

ไนโตรเจนลงเหลือ 1 ลิตรต่อนาที เพื่อเริ่มการทดลอง เตาทอริแฟกเตอร์ได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อให้ชีวมวลภายในเตามีอุณหภูมิเท่ากับ 200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาดังกล่าวทำให้ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น [10] ถ่านชาร์ที่เหลือจากการทอริแฟกชันจะถูกเก็บไว้ในภาชนะปิดก่อนนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ

กากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชันถูกวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ (Proximate and Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D7582 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความชื้นและสารระเหย การวิเคราะห์แบบแยกธาตุใช้เครื่องวิเคราะห์ CHN analyzer ของบริษัท Leco รุ่น CHN 628 series เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และ ไนโตรเจน (N) ตามลำดับ โดยออกซิเจน (O) คำนวณจากผลต่างของ 100% และผลรวมของธาตุ C, H และ N

2.4 สมรรถนะการทอริแฟกชัน

สมรรถนะการทอริแฟกชันสามารถแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass yield, MY) ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density, ED) และผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) ดังสมการต่อไปนี้

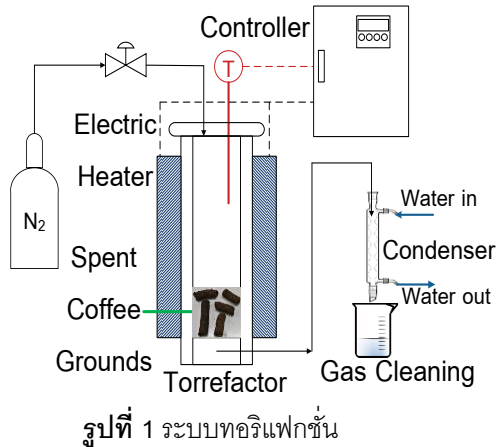
$$MY = \left(\frac{m_{\text{torrefied}}}{m_{\text{raw}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$ED = \frac{HHV_{\text{torrefied}}}{HHV_{\text{raw}}} \quad (2)$$

$$EY = MY \times ED \quad (3)$$

โดย m_{raw} และ $m_{\text{torrefied}}$ คือ มวลของกากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชัน (กรัม), HHV_{raw} และ $HHV_{\text{torrefied}}$ คือ

ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชัน (MJ/kg) ตามลำดับ



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	55.73
ไฮโดรเจน (H)	6.92
ออกซิเจน (O)	34.92
ไนโตรเจน (N)	2.43
ค่าความร้อน (MJ/kg)	21.97

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบของกากกาแฟ

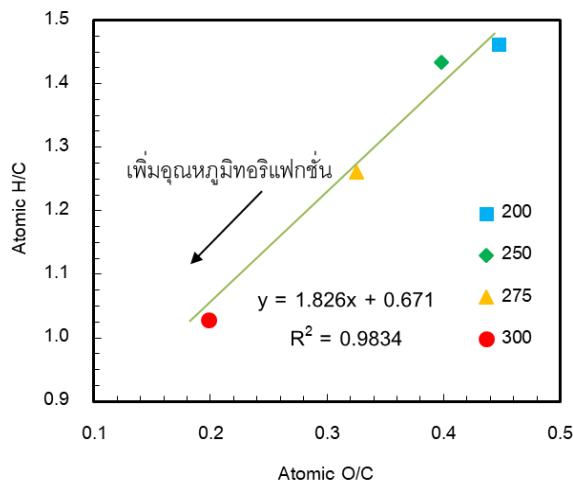
ผลการวิเคราะห์แบบปริมาณและแบบแยกธาตุของกากกาแฟแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากตารางที่ 1 พบว่า กากกาแฟมี C, O และ H เท่ากับ ร้อยละ 55, 34 และ 7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าธาตุ C มีปริมาณมากกว่าครึ่งหนึ่งขององค์ประกอบของกากกาแฟทั้งหมด ส่งผลให้กากกาแฟมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง (22 MJ/kg)

ตารางที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทอริแฟกชันต่อองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ จากตารางพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของธาตุในกากกาแฟมากกว่าระยะเวลาในการทอริแฟกชัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ C มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณ O และ H มีค่าลดลง นอกจากนี้ธาตุ N

มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ C ที่มากที่สุดพบที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการระเหยของไอน้ำและสารระเหยง่ายในชีวมวล รวมถึงการสลายตัวของเส้นใยผ่านกระบวนการทอริแฟกชันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ [5]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ผ่านการทอริแฟกชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	200	250	275	300
คาร์บอน (C)				
30	56.73	58.56	63.00	71.51
45	57.02	59.70	64.36	73.92
60	57.60	64.72	70.11	78.59
ไฮโดรเจน (H)				
30	6.91	7.00	6.62	6.13
45	6.90	6.73	6.42	6.03
60	6.81	6.19	6.13	5.66
ไนโตรเจน (N)				
30	2.51	3.35	3.04	3.48
45	2.53	3.42	3.34	3.62
60	2.55	3.80	3.91	3.76
ออกซิเจน (O)				
30	33.85	31.10	27.34	18.89
45	33.55	30.15	25.88	16.43
60	33.04	25.29	19.84	11.99

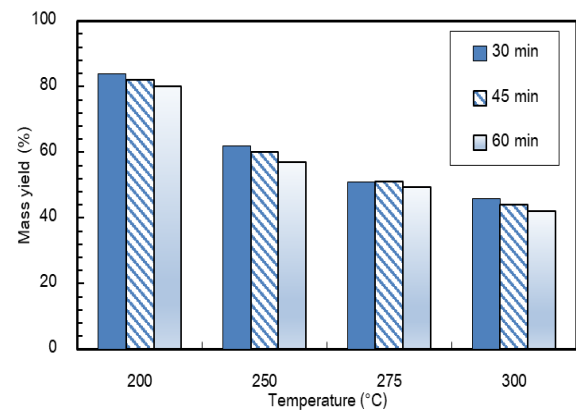


รูปที่ 2 ไดอะแกรมของ van Krevelen และเส้นถดถอยระหว่าง H/C และ O/C

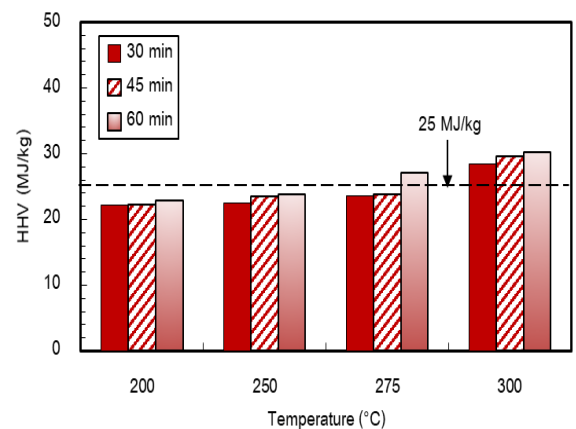
รูปที่ 2 แสดงอัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านการทอริแฟกชั่นที่ระยะเวลา 30 นาที รูปดังกล่าวถูกเรียกว่า van Krevelen diagram [7] จากรูปอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C อยู่ระหว่าง 1 - 1.5 และ 0.2 - 0.4 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชั่นเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C มีค่าลดลง โดยมีลักษณะการกระจายตัวเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือที่ 0.98 ความชันของเส้นมีค่าเท่ากับ 1.826 แสดงให้เห็นว่าค่า H/C มีค่าประมาณ 2 เท่าของ O/C แสดงถึงการกำจัดปริมาณความชื้นที่อยู่ในชีวมวลซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของการทอริแฟกชั่นรูปดังกล่าวสามารถช่วยทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง H/C และ O/C ของการทอริแฟกชั่นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ขอบเขตของการทดลองนี้ได้

3.2 สมรรถนะการทอริแฟกชั่น

ประสิทธิภาพในการทอริแฟกชั่นมักแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass yield, MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) และ ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density, ED)



รูปที่ 3 อุณหภูมิและระยะเวลาต่อผลผลิตเชิงมวล



รูปที่ 4 อุณหภูมิและระยะเวลาต่อค่าความร้อนสูง

รูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิ (200 ถึง 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการทอริแฟกชั่น (30 ถึง 60 นาที) ต่อผลผลิตเชิงมวล ซึ่งผลผลิตเชิงมวลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

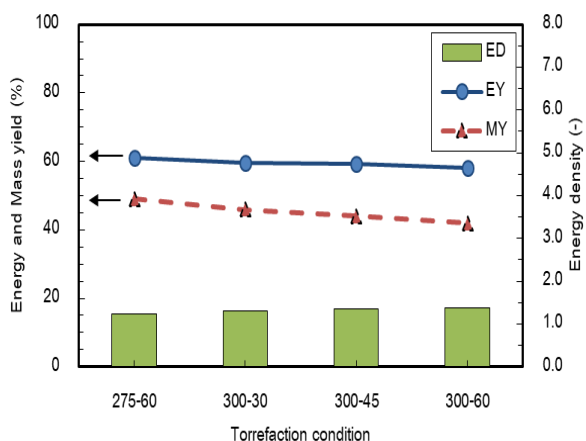
จากรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชั่นเพิ่มสูงขึ้นจาก 200 เป็น 300 องศาเซลเซียส ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลงจาก ร้อยละ 80 เหลือเพียงประมาณร้อยละ 40 เนื่องจากเกิดการสลายของปริมาณความชื้นและสารระเหยง่ายบางส่วนในส่วนของเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์บอนในชีวมวลมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ H และ O มีค่าลดลง [7] เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการทอริแฟกชั่นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลผลิตเชิงมวลน้อย (ร้อยละ 1-2)

รูปที่ 4 แสดงผลของอุณหภูมิ (200 ถึง 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30 ถึง 60 นาที) ต่อค่าความร้อนสูงของกากกาแฟหลังผ่านกระบวนการทอริแฟกชั่น เป็นที่แน่ชัดว่าระยะเวลาในการทอริแฟกชั่นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า

ความร้อนสูงของกากกาแฟ ค่าความร้อนสูงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 22 MJ/kg ขณะที่อุณหภูมิทอริแฟกชัน 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ค่าความร้อนสูงเริ่มมีการเพิ่มขึ้นเป็น 26 MJ/kg จนถึง 29 MJ/kg ที่ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟมีค่าใกล้เคียงค่าความร้อนของถ่านหินซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 MJ/kg [4] ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากากกาแฟหลังผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยความร้อนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเพื่อใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ได้ อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับสภาพดังกล่าว ควรถูกพิจารณาด้วยในงานวิจัยนี้การทอริแฟกชันตั้งแต่ 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที เป็นต้นไป จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางด้านพลังงานในหัวข้อถัดไป

3.3 การวิเคราะห์พลังงาน

การทอริแฟกชันที่ 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา จาก 30 ถึง 60 นาที สามารถแสดงในรูปของอุณหภูมิ-ระยะเวลา ดังต่อไปนี้ : 275-60, 300-30, 300-45 และ 300-60 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของผลผลิตเชิงมวล (MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (EY) และความหนาแน่นเชิงพลังงาน (ED) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันต่อค่า MY, EY และ ED

จากรูปที่ 5 พบว่า ความหนาแน่นเชิงพลังงานและผลผลิตเชิงพลังงาน มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 1.4 และร้อยละ 59 ถึง 61 ตามลำดับ ผลผลิตเชิงมวลมีค่าค่อยๆ ลดลง

จากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 40 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการทอริแฟกชัน การทอริแฟกชันมักมีความร้อนที่สะสมในก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการสร้างบรรยากาศที่ปราศจากอากาศ โดยทั่วไปมักใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความร้อนดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของเอนทาลปี (ΔH_T , kJ/kmol) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\Delta H_T = \int_{298}^T (c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3) d\theta \quad (4)$$

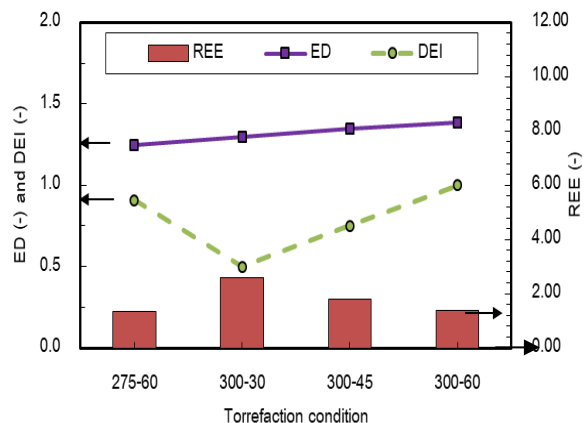
เมื่อ T คือ อุณหภูมิในการทอริแฟกชัน (K) c_0 , c_1 , c_2 และ c_3 คือ ค่าคงที่ สามารถหาได้จาก [10] เพื่อนำไปหาค่าเอนทาลปี ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 273 ถึง 1800 K และระยะเวลาในการทอริแฟกชัน (30, 45 และ 60 นาที) พลังงานสำหรับแก๊สไนโตรเจน (E_{in}) สามารถแสดงดังตารางที่ 3 พลังงานเข้าระบบทอริแฟกชันของไนโตรเจนสามารถแสดงในรูปของ DEI (Dimensionless Energy Input) ดังสมการที่ 5 โดยพลังงานจากการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ถูกเลือกเป็นพลังงานอ้างอิง ($E_{in,0}$)

$$DEI = \frac{E_{in}}{E_{in,0}} = \frac{\Delta H_T \cdot V \cdot t}{\Delta H_{573K} \cdot V \cdot 60} = \frac{\Delta H_T \cdot t}{\Delta H_{573K} \cdot 60} \quad (5)$$

เมื่อ V และ t คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สไนโตรเจน (ลิตร/นาที) และระยะเวลาในการทอริแฟกชัน (นาที) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้นและพลังงานเข้าทอริแฟกชันของไนโตรเจนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	200	250	275	300
ค่าเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้น (kJ/kmol)				
	5135	6623.4	7371.8	8123.1
พลังงานเข้าทอริแฟกชัน (kJ)				
30	61.84	79.69	88.68	97.73
45	92.76	119.54	133.03	146.59
60	123.68	159.39	177.37	195.45



รูปที่ 6 อุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันต่อค่า ED, DEI และ REE

นอกจากค่า DEI ซึ่งเป็นตัวแทนของพลังงานงานที่เข้าในระบบทอริแฟกชันแล้ว ตัวแปรที่เชิงประสิทธิภาพของระบบทอริแฟกชันอีกตัวแปรหนึ่ง ได้แก่ ประสิทธิภาพของพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Energy Efficiency, REE) ถูกกำหนดเพื่อใช้บ่งชี้ประสิทธิภาพของการทอริแฟกชัน โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ระบบทอริแฟกชันทำได้ (ED) เทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้าระบบ (DEI) ค่า REE สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังต่อไปนี้

$$REE = \frac{ED}{DEI} \quad (6)$$

รูปที่ 6 แสดงผลของการทอริแฟกชันต่อตัวแปรเชิงพลังงาน ได้แก่ ค่า ED, DEI และ REE จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่า ED มีค่าเพิ่มเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันเพิ่มขึ้น เนื่องการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูง ดังแสดงในรูปที่ 4 การทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่า REE มากที่สุด (2.59) เนื่องจากค่า DEI มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น เป็นที่สังเกตว่าค่า REE จากการทอริแฟกชันที่ 275 องศาเซลเซียสและการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที มีค่า REE ใกล้เคียงกัน จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่า REE ที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟกชันภายในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ถึง 60 นาที คือ การทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที หรือกล่าวได้ว่า

การทอริแฟกชันที่อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้น ทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [11]

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์พลังงานของกากกาแฟ ซึ่งได้จากการทดสอบโดยกระบวนการทอริแฟกชันที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทอริแฟกชันทำให้อัตราส่วนโดยอะตอมของ H/C และ O/C มีค่าลดลง ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าลดลง ความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบทอริแฟกชัน พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 30 นาที มีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 28.2 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้พลังงานที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Agbor E, Zhang X, Kumar A. A review of biomass co-firing in North America. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014; 40(12): 930-943.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy (Internet). Thailand; 2019 [cited 2019 Mar 10]. Available from: <http://www.dede.go.th>.
- [3] กรุงเทพธุรกิจ. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 มีนาคม 2562]. เข้าถึงได้จาก <http://www.bangkokbiznews.com>

- [4] ดุษฎีพร สิทธิกุล. คุณสมบัติของชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชั่น. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2556.
- [5] Basu P. Biomass gasification, Pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory. 3rd ed. Academic press: San Diego; 2018.
- [6] Granados D.A, Ruiz R.A, Vega LY, Chejne F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. Energy. 2017; 139: 818-827.
- [7] Zhang C, Ho SH, Chen WH, Xie Y, Liu Z, Chang JS. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. Applied Energy. 2018; 220: 598-604.
- [8] Du SW, Chen WH, Lucas JA. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. Bioresource Technology. 2014; 161: 333-9.
- [9] Prins MJ, Ptasinski KJ, Janssen FJ. More efficient biomass gasification via torrefaction. Energy. 2006; 31(15): 3458-3470.
- [10] Çengel YA, Bole MA. Thermodynamics: An Engineering approach. 6th ed. McGraw-Hill: Boston; 2007
- [11] Chen WH, Huang MY, Chang JS, Chen CY, Lee WJ. An energy analysis of torrefaction for upgrading microalga residue as a solid fuel. Bioresource technology. 2015; 185(6): 285-293.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การทำฟาร์มอัจฉริยะโดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Smart Cricket Farming Based on Internet of Things

เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล^{1*}, จุมพล แก้วสีหาวงค์¹, วุฒิยา อุตราช¹ และ สุพรรณ ยั่งยืน²Kiattisin Kanjanawanishkul^{1*}, Jumphon Kaewsihawong¹, Wuttiya Uttaracha¹ and Suphan Yangyuen²¹ หน่วยวิจัยการออกแบบกระบวนการและควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม² หน่วยวิจัยหลังการเก็บเกี่ยวและเครื่องจักรการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม¹ Research Unit of Process Design and Automation, Faculty of Engineering, Mahasarakham University² Post-Harvest and Agricultural Machinery Engineering Research Unit, Faculty of Engineering,

Mahasarakham University

Received: 9 December 2019

Revised: 2 June 2020

Accepted: 16 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันถึงแม้ว่าการเลี้ยงจิ้งหรีดได้รับความนิยมที่เพิ่มขึ้น แต่ปัญหาหลักในการเลี้ยงจิ้งหรีด คือเกษตรกรต้องดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการให้น้ำและให้อาหาร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ การประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อช่วยในการเลี้ยงจิ้งหรีด โดยมีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ระบบการให้อาหาร ระบบการให้น้ำ และ ระบบควบคุมผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบการให้อาหารถูกออกแบบมาเพื่อการให้อาหารที่กระจายอย่างเหมาะสมโดยจะใส่อาหารในท่อพีวีซีและเจาะรูเป็นแนวยาว เมื่อท่อพีวีซีถูกเหยียงหมุน อาหารจะตกลงในรางรองอาหารที่อยู่ด้านล่าง ระบบการให้น้ำถูกออกแบบมาให้เติมน้ำอัตโนมัติเมื่อระดับน้ำต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ระบบควบคุมผ่านแอปพลิเคชันประกอบด้วยคำสั่งการให้อาหาร และแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ยังสามารถสั่งให้ถ่ายภาพ เพื่อแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Line ได้อีกด้วย ในการทดลอง ได้ทำการเลี้ยงจิ้งหรีดจำนวน 600 ตัว ด้วยวิธีเดิมและ 600 ตัว ด้วยวิธีที่นำเสนอ ผลการทดลอง พบว่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการหมุนท่อพีวีซี คือ 71.5 รอบต่อนาที และเมื่อนำจิ้งหรีดมาเลี้ยงครบ

30 วัน พบว่าจำนวนจิ้งหรีดที่รอดชีวิตด้วยวิธีเดิมและด้วยวิธีที่นำเสนอ คือ 450 ตัว และ 530 ตัว ตามลำดับ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวที่ได้จากการเลี้ยงด้วยวิธีเดิมและด้วยวิธีที่นำเสนอ คือ 0.65 +/- 0.18 กรัม และ 0.71 +/- 0.15 กรัม ตามลำดับ ดังนั้น วิธีที่นำเสนอจะ ช่วยเพิ่มจำนวนจิ้งหรีดที่รอดชีวิตและเพิ่มน้ำหนัก อีกทั้งยังช่วยลดความต้องการการใช้แรงงานในการเลี้ยงจิ้งหรีดได้

คำสำคัญ: การทำฟาร์มจิ้งหรีด จิ้งหรีด การให้อาหาร อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

At present, although cricket farming becomes increasingly popular, the main problem of cricket farming is that the farmer has to take great care of, especially, giving water and feeding. Therefore, this research work aims to apply the Internet of things to cricket farming. There are three main parts, i.e., a feeding system, a water supply system and a control system via Internet of Things. The feeding system was designed for proper feed dispersion by filling cricket feed into a PVC pipe and drilling holes along the pipe. When the PVC pipe is rotated, the feed falls into the feed rack below. The water supply system was designed to automatically fill the water when the water level was lower than the pre-set level. The control system via the mobile application consisted of a feeding command, temperature and relative humidity. Besides, the picture was taken as demand to be shown through Line application. In the experiment, 600 crickets were raised with the traditional method and 600 crickets were raised with the proposed method. The experimental results showed that the proper speed for rotating a PVC pipe is 71.5 rpm. Then, after 30 days of cricket raising, the number of crickets survived by raising with the traditional method and the proposed method was 450 and 530, respectively. The average weight of one cricket obtained from the traditional and proposed methods are 0.65 +/- 0.18 g and 0.71 +/- 0.15 g, respectively. Therefore, the proposed method can increase the number of survival crickets and the weight. Likewise, it can reduce labor demand in cricket farming.

Keywords: Smart farming: Cricket: Feeding: Internet of things

1. บทนำ

แมลงได้กลายเป็นแหล่งสารอาหารที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งสำหรับมนุษย์เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนที่สูง [1] โดยปกติแล้วแมลงจะหาจับได้ทั่วไป แต่เนื่องจากความต้องการของตลาดที่สูงขึ้น จึงได้มีการเริ่มทำฟาร์มแมลงขึ้นมาทดแทนกันอย่างแพร่หลาย และจิ้งหรีดเป็นแมลงชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาเลี้ยงมากที่สุด [2] ในปัจจุบัน การเลี้ยงจิ้งหรีดเป็นที่แพร่หลายมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความต้องการของตลาดที่มากขึ้น การเลี้ยงจิ้งหรีดเพื่อให้ได้ผลผลิตหรือน้ำหนักที่ดีจำเป็นต้องมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตทั้งการให้อาหารที่ตรงต่อเวลาและให้ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับแต่ละวัย มีอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมและอากาศสามารถถ่ายเทสะดวก

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นการเชื่อมโยงวัตถุหรืออุปกรณ์ที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์และซอฟต์แวร์ฝังตัวอยู่เข้าด้วยกันผ่านเครือข่าย ซึ่งทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถเก็บบันทึกและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ ตัวอย่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนในการประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำและประโยชน์ทางเศรษฐกิจ คือ ทางด้านการเกษตร หรือ ที่เรียกว่า ฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm)

ฟาร์มอัจฉริยะ [3] เป็นการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและระบบอัตโนมัติมาช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพทางการผลิตในภาคการเกษตรเพื่อต้องการรักษาความมั่นคงทางอาหารทั้งเรื่องคุณภาพและปริมาณ ผลจากการทำฟาร์มอัจฉริยะ ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า

สามารถลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจน [4] ตัวอย่างเช่น Kim และคณะ [5] ได้พัฒนาระบบเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะปลูกสตรอว์เบอร์รีโดยอาศัยเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์และคาดการณ์การเกิดโรคในสตรอว์เบอร์รีได้ ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรสามารถแก้ไขปัญหาได้ทันเวลาที่ Jaiganesh และคณะ [6] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวางแผนในการเพาะปลูก ซึ่งพบว่าได้ช่วยลดต้นทุนในการผลิต เพิ่มคุณภาพและปริมาณของผลผลิต ชาญวิษและวีรธรรม [7] ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อติดตามและระบุตำแหน่งโคเนื้อ ซึ่งสามารถช่วยในการเก็บข้อมูลประวัติและสุขภาพได้ วิษณุและวริษา [8] ได้พัฒนาแอปพลิเคชันที่ทำหน้าที่บริหารจัดการฟาร์มไข่ไก่และได้พัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนไข่ โดยใช้ระบบพีซีลอจิกในการวิเคราะห์ข้อมูลค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และแสงสว่างทั้งภายนอกและภายในโรงเรือน Kontogiannis [9] ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมของรังผึ้งและสุขภาพของผึ้ง เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงที่สุด

ฟาร์มอัจฉริยะ สำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีดในปัจจุบันยังไม่เป็นระบบอัตโนมัติที่สมบูรณ์ ผู้ดูแลยังคงต้องเข้ามาตรวจสอบปริมาณอาหารและน้ำ อีกทั้งยังไม่มีการติดตามการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดแบบเรียลไทม์ (Real time) ดังนั้น บทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอการพัฒนาระบบการเลี้ยงจิ้งหรีดผ่านทางแอปพลิเคชันมือถือ โดยที่ระบบการให้อาหารจะสามารถกระจาย

อาหารได้สม่ำเสมอและทั่วถึง ส่วนระบบการให้น้ำ จะเป็นแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ ผู้เลี้ยงยังสามารถติดตามสภาพแวดล้อมในระหว่างการเลี้ยงจิ้งหรีดแบบไม่จำเป็นต้องรบกวนจิ้งหรีด ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และภาพถ่ายแสดงความเป็นอยู่ของจิ้งหรีด ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดการใช้แรงงานมนุษย์ รวมทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพในการเลี้ยง คือ จำนวนจิ้งหรีดที่รอดชีวิต และน้ำหนักของจิ้งหรีดที่สูงขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 จิ้งหรีด

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีขนาดลำตัวปานกลางเมื่อเทียบกับแมลงโดยทั่วไป [10] จิ้งหรีดมีขาคู่หลังใหญ่และแข็งแรงใช้สำหรับกระโดด ดังรูปที่ 1 ตัวผู้มีอวัยวะพิเศษสำหรับทำเสียงเป็นฟันเล็กๆ อยู่ตามเส้นปีกบริเวณกลางปีก ใช้กรีดกับแผ่นทำเสียงที่อยู่บริเวณท้องปีกของปีกอีกข้างหนึ่ง ขณะที่ตัวเมียจะไม่สามารถทำเสียงดังกล่าวได้ แต่มีอวัยวะสำหรับไขวางไข่เป็นท่อยาวบริเวณก้นคล้ายเข็ม โดยปกติแล้วจิ้งหรีดกินพืชเป็นอาหารและสามารถกินพืชได้หลายชนิด มักออกหากินในเวลากลางคืน สำหรับในประเทศไทย พบจิ้งหรีดได้ทั่วทุกภูมิภาค ชนิดของจิ้งหรีดที่พบได้แก่ จิ้งหรีดทองดำ, จิ้งหรีดทองแดงและจิ้งโกร่งหรือจิ้งกู่ เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะของจิ้งหรีด (ก) ตัวผู้ (ข) ตัวเมีย [2]

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีวงจรชีวิตแบบไม่ต้องผ่านการเป็นหนอนหรือดักแด้ [10] ตัวอ่อนที่เกิดมาจะเหมือนตัวเต็มวัย เพียงแต่ยังไม่มีปีก และมีสีที่อ่อนกว่า ต้องผ่านการลอกคราบเสียก่อนจึงจะมีปีกและทำเสียงได้ จิ้งหรีดจะผสมพันธุ์เมื่อเป็นตัวเต็มวัย ตลอดอายุจิ้งหรีดตัวเมียสามารถวางไข่ได้ตั้งแต่ 600-1,000 ฟอง ซึ่งจะวางไข่เป็นรุ่น ๆ ได้ประมาณ 4 รุ่น เมื่อหมดการวางไข่รุ่นสุดท้ายแล้วตัวเมื่อก็จะตาย

ถึงแม้ว่าจิ้งหรีดจะเป็นสัตว์กินพืช แต่การหาอาหารจำพวกพืชนั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่สะดวก จึงได้นำอาหารไก่มาทดแทน ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังมีปริมาณโปรตีนที่สูง ในระยะตัวอ่อนถึงอายุ 2 สัปดาห์ จิ้งหรีดมีขนาดเล็ก ปริมาณอาหารที่ให้จะน้อยและให้เพียงวันละ 1 ครั้ง แต่ต้องคอยสังเกตปริมาณอาหารที่ให้เป็นระยะ ๆ หลังจากจิ้งหรีดอายุ 2 สัปดาห์ขึ้นไปกระทั่งตัวโตเต็มวัยรอจับขาย จิ้งหรีดมีการเจริญเติบโตและมีขนาดตัวที่ใหญ่ขึ้นความสามารถในการกินอาหารเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในช่วงนี้ เกษตรกรต้องเพิ่มปริมาณอาหารและปกติจะให้อาหารวันละ 2 ครั้ง เช้า-เย็น ในขณะที่เดียวกันเกษตรกรยังต้องคอยสังเกตปริมาณอาหารอยู่เสมอ ถ้าอาหารเหลือ จะเกิดการหมักหมมและเกิดเชื้อราได้ [11] ส่วนการให้น้ำนั้นสามารถให้ได้ตลอดเวลาและต้องเป็นน้ำสะอาดไม่มี

สิ่งปนเปื้อน ถ้าหากจิ้งหรีดขาดน้ำจะทำให้จิ้งหรีดตาย สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีด [12-13] คือ อุณหภูมิ 25 –35 องศาเซลเซียส จิ้งหรีดสามารถออกหากินได้ปกติและสามารถวางไข่ได้อย่างเต็มที่ พื้นที่ที่ใช้เลี้ยงต้องอยู่ในที่ร่มไม่ตากแดดตากฝน ฤดูที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงจิ้งหรีด คือ ฤดูฝน ถ้าหากเลี้ยงในฤดูร้อน ต้องมีการระบายอากาศที่ดี อุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้จิ้งหรีดตายและสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ระหว่างการเลี้ยง ควรจะรบกวนจิ้งหรีดน้อยที่สุด เพราะว่าจิ้งหรีดจะไม่ขึ้นมากินอาหาร

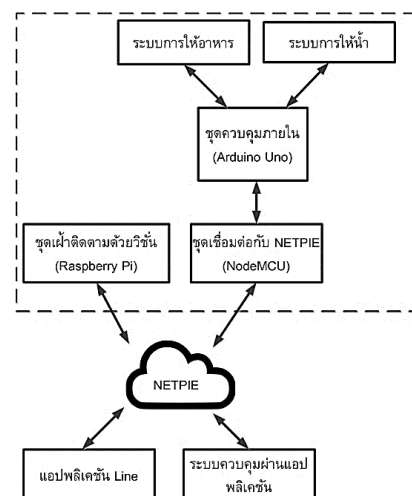
2.1 การควบคุมฟาร์มอัจฉริยะ

การควบคุมฟาร์มอัจฉริยะมุ่งเน้นการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณของผลผลิต เช่น สภาพแวดล้อมของฟาร์ม ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงสว่าง อุณหภูมิ เป็นต้น การให้อาหาร หรือ การเฝ้าระวังโรค เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ผู้พัฒนาจึงต้องมีการวิเคราะห์และวางแผนที่ดี อีกทั้งยังต้องเข้าใจในกระบวนการควบคุมซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมที่รับค่าต่าง ๆ จากเซนเซอร์ รวมถึงคำสั่งที่ได้รับจากผู้ใช้งาน แล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อสั่งงานอุปกรณ์ตัวกระตุ้น เช่น การเปิด-ปิดการให้อาหาร แต่ด้วยเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ผู้ใช้งานสามารถติดตามค่าต่าง ๆ ที่ได้จากเซนเซอร์ ผ่านทางอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย เช่น โทรศัพท์มือถือจากที่ใดก็ได้ รวมถึงสามารถส่งคำสั่งไปยังตัวควบคุมผ่านทางอุปกรณ์สื่อสารไร้สายนี้เช่นกัน ความเป็นอัจฉริยะของระบบ จึงเกี่ยวเนื่องกับการควบคุมสภาพแวดล้อมให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ตลอดเวลาและความสามารถในการ

การติดตามการเจริญเติบโตหรือพฤติกรรมที่เปลี่ยนไป อีกทั้งยังสามารถแจ้งเตือนได้ทันที หากมีสิ่งผิดปกติ หรือ เกิดการเปลี่ยนแปลงตามที่ระบุไว้

3. ผลการทดลอง

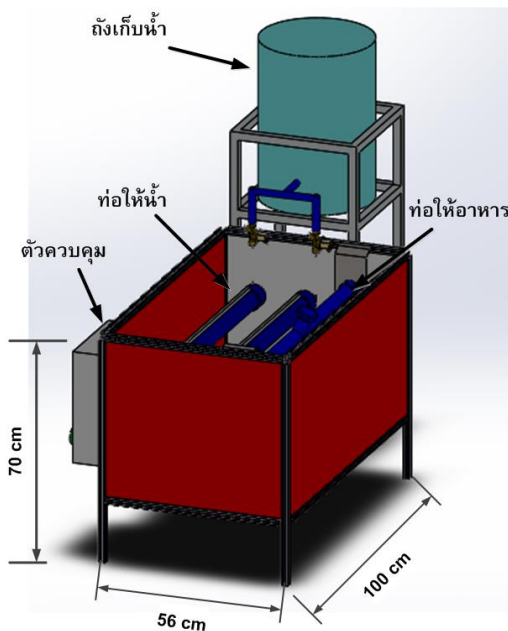
การทำงานของระบบการเลี้ยงจิ้งหรีด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ระบบการให้อาหาร ระบบการให้น้ำ และระบบควบคุมผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ดังรูปที่ 2 ระบบการให้อาหาร เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยสั่งงานผ่านแอปพลิเคชันที่ได้พัฒนาขึ้น ไม่จำเป็นต้องใช้คนให้อาหาร ส่วนการให้น้ำจะเป็นแบบอัตโนมัติ นั่นคือ มีการให้น้ำตลอดเวลา เพื่อไม่ให้จิ้งหรีดขาดน้ำ การทำงานของทั้งระบบจะถูกควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน โดยใช้ NETPIE Cloud Platform เป็นตัวกลางในการสื่อสารที่ทำให้สิ่งต่างๆ (Things) เชื่อมโยงกันผ่านอินเทอร์เน็ต Cloud Platform นี้ ทำหน้าที่ให้บริการการใช้ซอฟต์แวร์ระบบและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ให้บริการผ่านทางอินเทอร์เน็ต ซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงข้อมูลบน Cloud ได้ทุกที่ที่มีอินเทอร์เน็ต



รูปที่ 2 แผนภาพของทั้งระบบ

นอกจากนี้ ในการใช้งาน ผู้ดูแลยังสามารถส่งถ่ายภาพจิ้งหรีดเพื่อตรวจสอบการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดและปริมาณอาหารที่เหลือ ภาพที่ได้จะถูกส่งมายังแอปพลิเคชัน Line ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นดังกล่าว ช่วยให้เกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตและผลผลิตที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น

การออกแบบโครงสร้างของระบบการเลี้ยงจิ้งหรีดเป็นดังรูปที่ 3 มีความกว้าง 56 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร และ ความสูง 70 เซนติเมตร

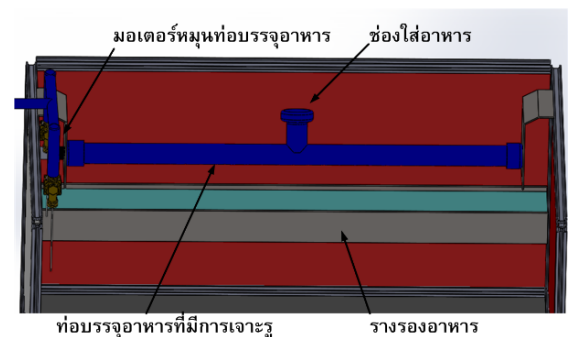


รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบการเลี้ยงจิ้งหรีด

3.1 ระบบการให้อาหาร

ระบบการให้อาหารจิ้งหรีดถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาการให้อาหารแบบเดิม คือ ต้องมีผู้ดูแลเข้ามาในบริเวณที่เลี้ยง เพื่อเทอาหาร ซึ่งปัญหาที่พบ คือ การให้อาหารจะกระจายไม่เพียงพอ ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับแรงงานและเป็นการเข้าไปรบกวนจิ้งหรีด

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบที่สามารถให้อาหารที่กระจายอย่างเหมาะสม โดยใช้ท่อพีวีซีขนาด 2 นิ้ว เพื่อบรรจุอาหาร แล้วเจาะรูขนาด 5.6 มิลลิเมตร จำนวน 28 รู แต่ละรูห่างกัน 2 เซนติเมตรตามแนวยาวของท่อ ซึ่งอาหารจะไหลออกมาได้ ขนาดของรูนี้พิจารณาจากขนาดของอาหารไก่ที่ใช้เลี้ยงจิ้งหรีดโดยวัดจากขนาดเม็ดอาหารที่ใหญ่ที่สุด และเพื่อให้อาหารมีการกระจายทั่วถึง ได้นำท่อพีวีซีนี้ ต่อกับมอเตอร์เพื่อหมุนเหวี่ยงให้อาหารไหลออกจากรูแล้วตกลงในรางอาหารที่อยู่ด้านล่าง ดังรูปที่ 4

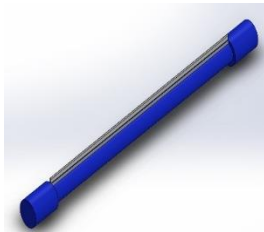


รูปที่ 4 โครงสร้างระบบการให้อาหารจิ้งหรีด

3.2 ระบบการให้น้ำ

ระบบการให้น้ำ จะมี 2 ท่อ วางขนานกันตามแนวยาว เพื่อให้สามารถไหลได้ทั่วถึง ภายในท่อจะมีเซนเซอร์วัดระดับน้ำ เมื่อน้ำเต็มท่อ (พิกัดค่าสูง) และเมื่อน้ำใกล้จะหมด (พิกัดค่าต่ำ) เอาต์พุตของเซนเซอร์นี้จะใช้ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์วเพื่อเปิด-ปิดน้ำที่จะไหลเข้าไปภายในท่อให้น้ำ นอกจากนี้ในถังเก็บน้ำขนาด 20 ลิตร จะมีเซนเซอร์ตรวจวัดกรณีน้ำใกล้หมดถึง โดยจะแจ้งไปยังแอปพลิเคชัน Line เพื่อให้ผู้ดูแลเติมน้ำเพิ่ม ท่อให้น้ำนี้ ส่วนบนจะเจาะเป็นร่องตามแนวยาวของท่อเพื่อสอดผ้าเข้าไป

ปลายด้านหนึ่งโผล่เหนือท่อเล็กน้อย เมื่อให้จิ้งหรีดเข้ามาดูน้ำจากผ้านี้ได้ ดังรูปที่ 5 ส่วนปลายอีกด้าน จะจุ่มอยู่ในน้ำภายในท่อ ผ้านี้จะดูดซึมน้ำขึ้นมาเพื่อนำมาเลี้ยงจิ้งหรีด ระบบการให้น้ำแบบอัตโนมัตินี้จะช่วยลดปัญหาจิ้งหรีดขาดน้ำ ลดการใช้แรงงานและลดการเข้าไปรบกวนจิ้งหรีดอีกด้วย



รูปที่ 5 โครงสร้างระบบการให้น้ำสำหรับจิ้งหรีด

3.3 ระบบควบคุมผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

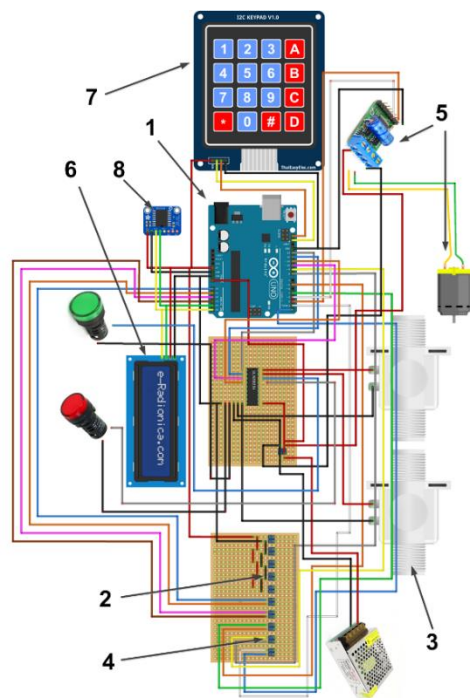
การทำงานของระบบควบคุม ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ชุดควบคุมภายใน ชุดเฝ้าติดตามด้วยวีซัน และ ชุดเชื่อมต่อกับ NETPIE ระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบให้ผู้ดูแลใช้งานง่ายและสามารถเลี้ยงจิ้งหรีดโดยใช้โทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟนได้ด้วยตนเอง ส่วนที่ผู้ดูแลต้องทำ คือ การเติมอาหารเมื่อหมด การเติมน้ำเมื่อน้ำใกล้หมดจากถัง การเตรียมไข่จิ้งหรีดและเมื่อเข้าสู่ช่วงการเก็บจิ้งหรีด หรือ เมื่อเกิดความผิดปกติ เช่น อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป เป็นต้น โดยแต่ละส่วนของระบบควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

1) ชุดควบคุมภายใน

ชุดควบคุมภายในทำหน้าที่เปิด-ปิดการให้อาหาร ควบคุมการให้น้ำ การตั้งเวลาการทำงาน วงจรควบคุมเป็นดังรูปที่ 6 ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- บอร์ด Arduino Uno (หมายเลข 1) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งระบบ

- เซนเซอร์วัดระดับต่ำสุดและสูงสุดของน้ำในท่อให้น้ำ (หมายเลข 2) เพื่อใช้ในการเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว (หมายเลข 3) ให้น้ำไหลเข้าไปในท่อให้น้ำ หลักการของเซนเซอร์นี้จะอาศัยการนำไฟฟ้าของน้ำโดยมีแท่งโลหะ 2 แท่งติดตั้ง ณ ตำแหน่งตรวจวัดระดับ เมื่อระดับน้ำถึงตำแหน่งที่ติดตั้งแท่งโลหะนี้ ระดับแรงดันไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไป

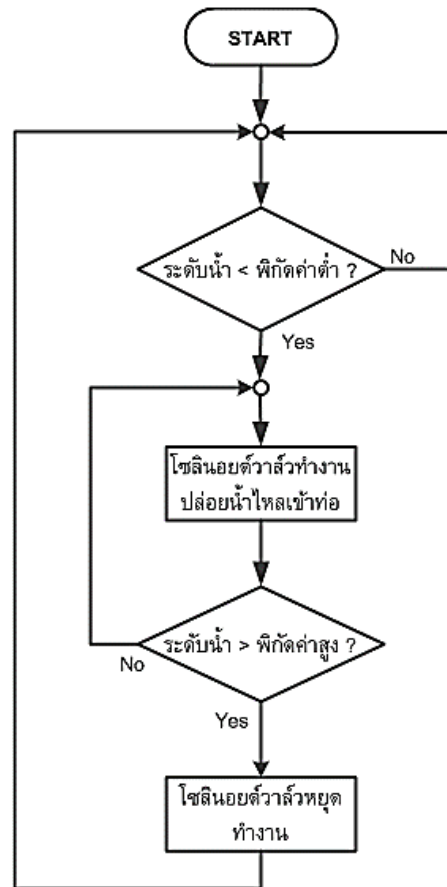


รูปที่ 6 วงจรของชุดควบคุมภายใน

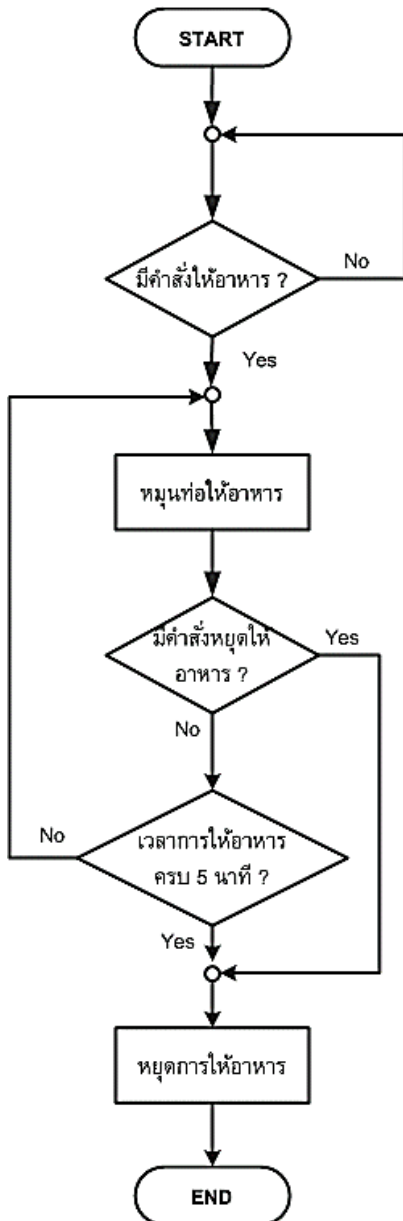
- เซนเซอร์วัดระดับน้ำในถัง (หมายเลข 4) ใช้หลักการเดียวกับเซนเซอร์วัดระดับต่ำสุดและสูงสุดของน้ำในท่อให้น้ำ เมื่อน้ำใกล้หมดก็จะมีกระแสไฟฟ้าผ่านทางแอปพลิเคชัน Line

- ตัวรับมอเตอร์และมอเตอร์ (หมายเลข 5) สำหรับระบบการให้อาหาร
- จอแสดงผลและคีย์แพด (หมายเลข 6 และ หมายเลข 7 ตามลำดับ) สำหรับการแสดงผลและการตั้งค่าต่าง ๆ
- Real Time Clock (DS3231) (หมายเลข 8) สำหรับอ่านค่าเวลาปัจจุบัน

แผนผังแสดงขั้นตอนการให้น้ำและการให้อาหาร อธิบายได้ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 ตามลำดับ ซึ่งการให้น้ำจะเป็นแบบอัตโนมัติ นั่นคือ เมื่อระดับน้ำต่ำกว่า พิกัดค่าต่ำ โซลินอยด์วาล์วก็จะทำงานปล่อยน้ำเข้าสู่ท่อให้น้ำ ในขณะที่การให้อาหารจะถูกควบคุมโดยผู้ดูแลผ่านแอปพลิเคชัน จึงยังไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติ คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดระยะเวลาให้อาหารไม่เกิน 5 นาที เพื่อป้องกันกรณีที่ผู้ใช้ลืมกดหยุดหรือมีปัญหาการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เวลา 5 นาทีที่กำหนดไว้ จะได้ปริมาณอาหารที่ไม่มากเกินไปสำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีด



รูปที่ 7 แผนผังแสดงขั้นตอนการให้น้ำ



รูปที่ 8 แผนผังแสดงขั้นตอนการให้อาหาร

2) ชุดเฝ้าติดตามด้วยวีชัน

เพื่อให้ผู้ดูแลสามารถทราบถึงสิ่งที่เกิดขึ้นภายในระบบ คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการเฝ้าติดตามด้วยวีชัน โดยได้ติดตั้งกล้อง ผู้ดูแลสามารถตั้งเวลา

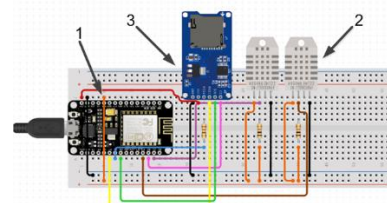
ในการส่งถ่ายภาพหรือส่งงานผ่านทางแอปพลิเคชันโดยตรงเพื่อให้กล้องถ่ายรูปแล้วส่งรูปที่ได้ไปยังแอปพลิเคชัน Line ตัวควบคุมหลัก คือ บอร์ด Raspberry Pi กล้องที่ใช้ คือ กล้อง USB Webcam ภาษาที่ใช้ในการเขียน คือ Python

3) ชุดเชื่อมต่อกับ NETPIE

NETPIE ทำหน้าที่รับค่าจากเซนเซอร์ต่างๆ เพื่อที่จะสามารถนำไปแสดงบนแอปพลิเคชัน รวมทั้งรับคำสั่งจากแอปพลิเคชัน คือ คำสั่งการเปิดปิดการให้อาหาร ซึ่งจะส่งคำสั่งนี้ไปยังชุดควบคุมภายใน ส่วนคำสั่งถ่ายภาพบนแอปพลิเคชัน จะถูกส่งไปยังชุดเฝ้าติดตามด้วยวีชัน

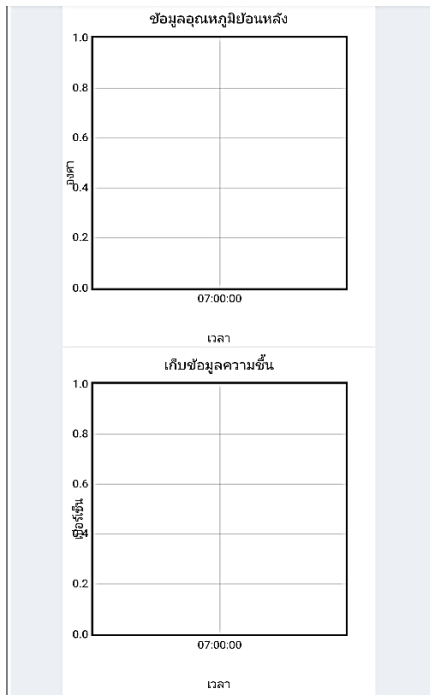
วงจรไฟฟ้าของส่วนนี้ เป็นดังรูปที่ 9 ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- บอร์ด NodeMCU (หมายเลข 1) ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับ NETPIE Internet Cloud เพื่อส่งและรับค่า
- เซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิ (DHT22) (หมายเลข 2)
- SD card Module (หมายเลข 3) สำหรับบันทึกค่าทุก ๆ 10 นาที หรือ ตามที่ผู้ใช้ระบุ



รูปที่ 9 วงจรของชุดเชื่อมต่อกับ NETPIE

ส่วนของแอปพลิเคชัน เป็นลักษณะดังรูปที่ 10 โดยจะมีส่วนที่แสดงค่าที่ได้จากเซนเซอร์และคำสั่งที่จะส่งไปยังระบบการเลี้ยงจิ้งหรีด



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 ลักษณะของแอปพลิเคชัน

(ก) การแสดงค่าที่ได้จากเซนเซอร์ (ข) การสั่งงาน

4. ผลการทดลอง

จากการออกแบบ ระบบการเลี้ยงจิ้งหรีดมีลักษณะดังรูปที่ 11 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 ทดสอบหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์กระจายอาหาร, การทดลองที่ 2 ทดสอบฟังก์ชันการทำงานของทุกส่วน และการทดลองที่ 3 ทดลองการเลี้ยงจิ้งหรีด โดยเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ต้องใช้คนในการดูแล



รูปที่ 11 ระบบเลี้ยงจิ้งหรีดที่ได้พัฒนาขึ้น

4.1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์กระจายอาหาร

เนื่องจากในการให้อาหารจิ้งหรีดนั้น ปัญหาหนึ่ง คือ อาหารควรจะมีการกระจายอย่างทั่วถึงเพื่อให้จิ้งหรีดทุกตัวสามารถกินอาหารได้ ในการออกแบบชุดให้อาหารจะเป็นดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 11 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายของอาหาร คือ ความเร็วในการหมุนท่อพีวีซี คณะผู้วิจัยได้ทดลองปรับค่าความเร็วมอเตอร์เป็น 4 ระดับโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tacho Meter) ตรวจวัดค่าความเร็ว และกำหนดเวลาในการหมุน 2 นาที

ในการวัดการกระจาย คณะผู้วิจัยใช้การสังเกตโดยพิจารณา 2 กรณี คือ เมื่อมองจากทางด้านบนอาหารได้ถูกกระจายทั่วพื้นที่ของรางรองอาหารที่อยู่ด้านล่างหรือไม่ และเมื่อสุ่มวัดแต่ละจุด ความหนาของอาหารใกล้เคียงกันหรือไม่ จากการสังเกตนี้ คณะผู้วิจัย จึงแบ่งความสามารถในการกระจายอาหารเป็น 3 ระดับ คือ น้อย ปานกลาง และ ดี การกระจายอาหารระดับน้อย คือ อาหารกระจายไม่ทั่วพื้นที่ของรางรองอาหาร ระดับปานกลาง คือ อาหารกระจายทั่วพื้นที่ของรางรองอาหาร จุดที่สุ่มมีความหนาของอาหารแตกต่างกันมากกว่า 3 มิลลิเมตร จำนวนมาก ส่วนระดับดี คือ อาหารกระจายทั่วพื้นที่ของรางรองอาหารและแต่ละจุดที่สุ่มมีความหนาของอาหารส่วนใหญ่แตกต่างกันน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดลอง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรอบ 71.5 +/- 0.1 รอบต่อนาที อาหารกระจายได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การกระจายของอาหารบนรางรองอาหารเมื่อท่อพีวีซีที่บรรจุอาหารถูกหมุน

ตารางที่ 1 การทดสอบหาความเร็วที่เหมาะสม

ลำดับ	ความเร็วรอบของท่อ สำหรับให้อาหาร (rpm)	การกระจาย ของอาหาร
1	16.8 +/- 0.1	น้อย
2	45.5 +/- 0.1	ปานกลาง
3	71.5 +/- 0.1	ดี
4	98.0 +/- 0.2	ปานกลาง

4.2 ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงาน

เพื่อตรวจสอบการทำงานของทุกระบบก่อนนำไปใช้เลี้ยงจิ้งหรีด คณะผู้วิจัยได้ทดสอบแต่ละฟังก์ชัน โดยพิจารณาจากผลการตอบสนองว่าทำงานได้ถูกต้องตามข้อกำหนดที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการทำงานของแต่ละฟังก์ชัน จำนวน 10 ครั้ง ซึ่งพบว่าระบบทำงานได้อย่างถูกต้องทุกฟังก์ชันและทุกครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบฟังก์ชันการทำงาน

ลำดับ	ฟังก์ชันการทำงาน	ผลการทดสอบ
1	การให้น้ำอย่างอัตโนมัติ	ทำงานได้ ถูกต้อง
2	การสั่งเปิด-ปิดการให้อาหารผ่านแอปพลิเคชัน	ทำงานได้ ถูกต้อง
3	การแสดงผลอุณหภูมิและความชื้นบนแอปพลิเคชัน	ทำงานได้ ถูกต้อง
4	การส่งถ่ายภาพแล้วแสดงผลทางแอปพลิเคชัน Line	ทำงานได้ ถูกต้อง
5	การถ่ายภาพทุก ๆ 1 ชั่วโมงเพื่อเฝ้าติดตามการเจริญเติบโต	ทำงานได้ ถูกต้อง
6	การเก็บข้อมูลลง SD Card ทุก ๆ 10 นาที	ทำงานได้ ถูกต้อง

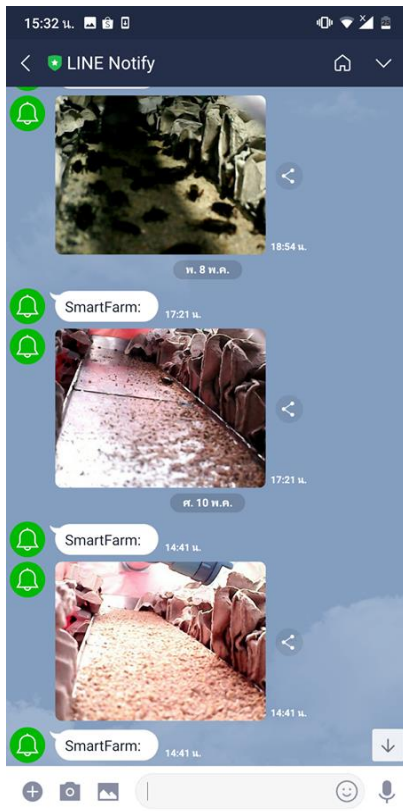
4.3 ผลการทดสอบการเลี้ยงจิ้งหรีด

ในการทดลอง ได้ใช้จิ้งหรีดจำนวน 1200 ตัว โดยจิ้งหรีดที่เริ่มเลี้ยงจะมีอายุ 5 วัน แบ่งจิ้งหรีด 600 ตัว สำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และอีก 600 ตัวที่เหลือสำหรับการเลี้ยงด้วยวิธีเดิมที่ใช้แรงงานคน นั่นคือ ผู้ดูแลต้องนำอาหารไปเทลงในภาชนะอาหารวันละ 2 ครั้ง เช้า – เย็น ปริมาณที่ให้ จะขึ้นอยู่กับช่วงวัยของจิ้งหรีด การให้อาหารมากเกินไป

จะเป็นการสิ้นเปลืองเนื่องจากอาหารที่เหลือจะเกิดการหมักหมมและมีมูลของจิ้งหรีดปนอยู่ในอาหารซึ่งจิ้งหรีดจะไม่กินอาหารที่เหลือนี้ ในขณะที่ ส่วนของการให้น้ำ ผู้ดูแลต้องคอยสังเกตอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้น้ำหมด แต่วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ การให้อาหารจะถูกควบคุมผ่านคำสั่งจากแอปพลิเคชัน ปริมาณอาหารที่ให้ถูกกำหนดด้วยระยะเวลาการหมุนของท่อให้อาหาร โดยปกติ ผู้ดูแลให้อาหารวันละ 2 ครั้ง เช้า-เย็น ปริมาณอาหารในช่วงเริ่มต้นของการเลี้ยง จะให้ปริมาณน้อย แต่จะคอยสังเกตจากภาพถ่าย ถ้าหากอาหารไม่เพียงพอ ก็จะมีการเพิ่มปริมาณอาหารได้ ส่วนการให้น้ำนั้น น้ำในถังเก็บน้ำมีประมาณ 15 ลิตร การให้น้ำเป็นแบบอัตโนมัติผู้ดูแลไม่จำเป็นต้องคอยตรวจสอบและตลอดระยะเวลาการเลี้ยง ไม่ได้มีการเติมน้ำลงในถังเก็บน้ำเพิ่มเติม เนื่องจากมีปริมาณที่เพียงพอ

ในการเฝ้าติดตามการเจริญเติบโต ผู้ดูแลสามารถส่งผ่านแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นเพื่อถ่ายรูปดังตัวอย่างในรูปที่ 13 หลังจากเลี้ยงจิ้งหรีดได้ 30 วัน เป็นกระบวนการเก็บจิ้งหรีด โดยแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้ ในขั้นตอนแรกจิ้งหรีดต้องมีการล้างท้องหรือการทำความสะอาดท้อง โดยให้จิ้งหรีดกินผักเพื่อให้จิ้งหรีดขับถ่ายมูลส่วนที่เป็นอาหารที่ออกมาให้มากที่สุด โดยใช้เวลาประมาณ 2 วัน เมื่อจิ้งหรีดกินผักจนหมด ถือว่าเป็นการล้างท้องที่สมบูรณ์ ขั้นตอนต่อไป คือการรวบรวมจิ้งหรีด เพื่อนับจำนวนและชั่งน้ำหนักทั้งแบบที่เลี้ยงด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นและแบบที่เลี้ยงด้วยวิธีเดิม ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น อัตราการรอดชีวิตของจิ้งหรีดเท่ากับ 88.3% และ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวเท่ากับ 0.71

+/- 0.15 กรัม ในขณะที่การเลี้ยงด้วยวิธีเดิม อัตราการรอดชีวิตของจิ้งหรีดเท่ากับ 75.0% และ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวเท่ากับ 0.65 +/- 0.18 กรัม



รูปที่ 13 การส่งถ่ายภาพแล้วแสดงผลทางแอปพลิเคชัน Line

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการเลี้ยงจิ้งหรีด

วิธีการเลี้ยง	การเลี้ยงด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น	การเลี้ยงด้วยวิธีเดิม
จำนวนที่เลี้ยง (ตัว)	600	600
จำนวนที่รอด (ตัว)	530	450
จำนวนที่ตาย (ตัว)	70	150
น้ำหนักต่อตัว(กรัม)	0.71+/-	0.65+/-
	0.15	0.18

5. สรุปผลการทดลอง

ระบบเลี้ยงจิ้งหรีด ประกอบด้วยระบบการให้อาหาร ระบบการให้น้ำ และ ระบบควบคุมผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบดังกล่าวอาศัย NETPIE Cloud Platform เป็นตัวกลางในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระบบและผู้ดูแล ผลการทดลอง พบว่า อัตราการรอดชีวิตของจิ้งหรีดเท่ากับ 88.3% และ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวเท่ากับ 0.71 +/- 0.15 กรัม ในขณะที่ การเลี้ยงด้วยวิธีเดิม อัตราการรอดชีวิตของจิ้งหรีดเท่ากับ 75.0% และ น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวเท่ากับ 0.65 +/- 0.18 กรัม นอกจากนี้ ประโยชน์ที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น คือ การลดการใช้แรงงานและลดการรบกวนจิ้งหรีด อีกทั้งยังสามารถติดตามการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดได้อีกด้วย

แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างผู้ดูแลและระบบการเลี้ยง ทำให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างครอบคลุม ในการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน พบว่าต้นทุนของระบบที่พัฒนาขึ้น ประมาณ 8,000 บาท ถ้าหากเลี้ยงจิ้งหรีด

ด้วยจำนวนสูงสุด ประมาณ 4-5000 ตัว ระยะเวลาคืนทุน อยู่ที่ประมาณ 21 เดือน แต่ถ้าหากขยายโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้น จะสามารถเพิ่มจำนวนจิ้งหรีดได้ ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลง

ในส่วนที่คณะผู้วิจัยต้องพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต ได้แก่ ระบบการให้อาหารควรเป็นระบบอัตโนมัติ แทนที่ผู้ดูแลต้องกดปุ่มส่งคำสั่งปล่อยอาหาร และระบบการเลี้ยงควรมีการควบคุมอุณหภูมิเพราะถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้จิ้งหรีดตายได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ วิชาחקกิจกลุ่มเลี้ยงจิ้งหรีดบ้านฮ่องฮี้ อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์ และ ฟาร์มจิ้งหรีดมหาสารคาม อ.โกสุมพิสัย จ.มหาสารคาม สำหรับคำแนะนำในการเลี้ยงจิ้งหรีดและตัวอย่างจิ้งหรีดสำหรับการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Williams JP, Williams JR, Chester D, Peterson M. Nutrient content and health benefits of insects. In: Dossey A, Morales-Ramos J, Rojas M, editors. Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications. Academic Press: London; 2016. p. 61-84.
- [2] การเลี้ยงจิ้งหรีด (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 4 กันยายน 2562]. เข้าถึงได้จาก <https://esan108.com/การเลี้ยงจิ้งหรีด>.
- [3] ฝ่ายธุรกิจสัมพันธ์ ศูนย์บริหารจัดการเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, การเกษตรอัจฉริยะ (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 31 พฤษภาคม 2563]. เข้าถึงได้จาก <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2020/20200313-smart-farming.pdf>.
- [4] Muangprathuba J, Boonnama N, Kajornkasirata S, Lekbangponga N, Wanichsombata A, Nillaor P. IoT and agriculture data analysis for smart farm. Computers and Electronics in Agriculture. 2019; 156: 467–74.
- [5] Kim S, Lee M, Shin C. IoT-based strawberry disease prediction system for smart farming. Sensors 2018; 18(11): 1-17.
- [6] Jaiganesh S, Gunaseelan K, Ellappan V. IOT agriculture to improve food and farming technology. Proceedings of the 2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS). 2017 Mar 3-4; Tiruchengode, India.
- [7] ชาญวิษ สุวรรณพงศ์ และ วีรธรรม ไชยวงศ์. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อติดตามและระบุตำแหน่งโคเนื้อในภาคปศุสัตว์. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและการควบคุมอัตโนมัติ 2558; 1(1): 15-21.

- [8] วิษณุ ช้างเนียม และ วริษา สันทวีวรกุล. เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการฟาร์มไก่ไข่ด้วยการใช้แอปพลิเคชันระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์และควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนด้วยระบบพีซีซีลอจิก. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและการควบคุมอัตโนมัติ 2562; 5(2): 77-88.
- [9] Kontogiannis S. An Internet of things-based low-power integrated beekeeping safety and conditions monitoring system. *Inventions*. 2019; 4(3): 52.
- [10] จิ้งหรีด (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 4 กันยายน 2562]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/จิ้งหรีด>.
- [11] ชญานิศ กันจินะ, สุจินต์ สิมารักษ์, สุวิทย์ เลหาศิริวงศ์ และสุกัลยา เชิญขวัญ. ระบบการเลี้ยงจิ้งหรีดเพื่อการค้าของเกษตรกรในหมู่บ้านแห่งหนึ่ง ในจังหวัดขอนแก่น. *แก่นเกษตร*. 2562; 47(ฉบับพิเศษ 1): 225 – 32.
- [12] กลุ่มส่งเสริมแมลงเศรษฐกิจ กรมส่งเสริมการเกษตร. เทคนิคการเลี้ยงและการจัดการเลี้ยงจิ้งหรีด. (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 31 พฤษภาคม 2563]. เข้าถึงได้จาก <http://www.agriman.doae.go.th/homebe e0/cricket1.html>.
- [13] ยุพา หาญบุญทรง, ทศนีย์ แจ่มจรรยา, นพชนม์ ทับทิม และ ลำไย อิทธิจันทร์. คู่มือการเพาะเลี้ยงแมลงที่เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ในฟาร์มที่ได้มาตรฐาน. สำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) (สพภ.): กรุงเทพฯ; 2561.

**FEAT JOURNAL****FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL****วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ**

การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของชานอ้อย ใบอ้อย และเศษไม้ยูคาลิปตัส ด้วยกระบวนการทอริแฟกชันขั้นต้น

Upgrading fuel property of Bagasse, Cane leaves, and Eucalyptus-wood Residues via torrefaction Pretreatment

ณรงค์ฤทธิ์ สายลูน¹ และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธัญญบุตร^{2*}**Narongrit Sailoon¹ and Varinrumpai Seithtanabutara^{2*}**¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002²ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Received: 12 December 2019

Revised: 24 June 2020

Accepted: 17 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

กระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลได้ถูกออกแบบการทดลองและมีการวิเคราะห์ทางสถิติร่วมกับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นผิว ตัวแปรอิสระ ได้แก่ อุณหภูมิ (250-300 องศาเซลเซียส) และเวลา (30-60 นาที) ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าความร้อน ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเชื้อเพลิง และร้อยละผลได้พลังงาน จากการศึกษาพบว่า ชีวมวลทอริไฟด์จะมีค่าความร้อนสูงขึ้น ค่าร้อยละการสูญเสียโดยน้ำหนักของชีวมวลเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละผลได้พลังงานจากกระบวนการจะลดลงตามสภาวะความรุนแรงของกระบวนการ ทั้งนี้ชีวมวลทอริไฟด์จะมีสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอน ที่ต่ำกว่าชีวมวลดิบ และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้น มีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น จากผลการวิเคราะห์ค่าการแปรปรวนทางสถิติและการตอบสนองเชิงพื้นผิว จะทำให้ได้สภาวะการทอริแฟกชันที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส โดยชีวมวลทอริไฟด์ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมนี้จะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จะได้ชีวมวลทอริไฟด์อัดเม็ดที่มีสมบัติตรงกับเกรดมาตรฐาน

โดยทั่วไปของประเทศไทย มีสัดส่วนมิติความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 3.22 ถึง 3.88 ความหนาแน่น มีค่า 0.34 ถึง 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่า 8,927.10 ถึง 25,071.74 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความแข็งแรง 41.20 ถึง 73.03 นิวตัน คุณสมบัติการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงไบอ้อยมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือ ชานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส

คำสำคัญ: ชีวมวล ทอริแฟกชัน ชานอ้อย ไบอ้อย เศษไม้ยูคาลิปตัส

Abstract

The biomass torrefaction process was experimental designed and statistically analyzed with response surface methodology. There were two independent factors; temperature (250-300°C) and time (30-60 min), and three response variables; heating value, weight loss percentage and energy yield. Results showed that torrefied biomass has higher heating value, weight loss of biomass during torrefaction increased and energy yield decreased according to the severity factor of the torrefaction process. Torrefied biomass had the lower molar ratio of H/C and O/C and had more thermal stability with improved fuel properties than of the raw biomass. Proposed equations based on the anova analysis and response surface methodology were estimated for the optimum condition of each biomass torrefaction; bagasse, cane leaves and eucalyptus wood residue. Torrefied biomass producing at the optimum condition was palletized using gluten as a binder at 5% wt. of biomass. The produced torrefied pellet met the general standard of THAILAND; the L/D dimension, the pellet density, the energy density, and the strength was about 3.22 to 3.88, 0.34 to 0.27 g/cm³, 8,927.10 to 25,071.74 MJ/m³, and 41.20 to 73.03 N respectively. Cane leaves-torrefied pellet to have the highest combustion efficiency than bagasse torrefied-pellet and eucalyptus torrefied-pellet.

Keywords: Biomass: Torrefaction: Palletization: Bagasse: Cane leaves: Eucalyptus

*ติดต่อ: tmallika@kku.ac.th, 086-459-9202

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานส่วนใหญ่ที่นำมาใช้คือพลังงานปิโตรเลียมซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องตามจำนวนประชากรโลกที่มากขึ้น ดังนั้นพลังงานทางเลือก

จึงได้รับความสนใจในทุกภาคส่วน เนื่องจากประเทศไทยมีปริมาณภาคเกษตรกรรมอยู่เป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่มีศักยภาพและถูกนำมาแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งภาคเกษตรกรรมชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นรวม

ต่ำ (Low Bulk Density) ความหนาแน่นเชิงพลังงานต่ำ (Low Energy Density) และ มีความชื้นสูง (Moisture content) ส่งผลให้มีศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงที่ต่ำ อีกทั้งยังเกิดความยุ่งยากในการจัดเก็บและการขนส่ง [1-3] ดังนั้นหากเกษตรกรรวมชีวมวลจึงถูกนำไปใช้ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง (Biofuel Solid) เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Briquette) หรือ เชื้อเพลิงตะเกียบ (Pellet) โดยวัตถุดิบชีวมวลจะผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (Densification Process) ที่มีการเตรียมขั้นต้น (pretreatment) เพื่อให้ชีวมวลมีคุณลักษณะที่เหมาะสม แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งดังกล่าว

ได้มีการนำเทคโนโลยีทอริแฟคชัน (Torrefaction Technology) มาใช้เป็นกระบวนการขั้นต้นร่วมกับกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นชีวมวล [4-6] เพื่อเพิ่มศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล ซึ่งจะเรียกโดยรวมว่า กระบวนการ TOP (Torrefaction and Pelletization) [1] โดยผลผลิตเชื้อเพลิงที่ได้ถูกเรียกว่าชีวมวลอัดเม็ด TOP จะมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป กระบวนการทอริแฟคชันชีวมวลมักจะกระทำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที เพื่อให้ได้ชีวมวลทอริไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงตะเกียบ ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงตะเกียบทอริไฟด์ที่ผลิตได้จะมีความชื้นลดลง มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น มีความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นหลวมสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม สมบัติชีวมวลทอริไฟด์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและปัจจัยด้านกระบวนการ เช่น ขนาด ความชื้น ค่าความร้อน สภาพาทอริแฟคชัน เป็นต้น ซึ่งต้องคำนึงถึงคุณค่าทั้งทางด้านการลงทุนและกระบวนการผลิต

ดังนั้น เงื่อนไขกระบวนการจึงมีความสำคัญ หลักการทางสถิติจึงเริ่มถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์หาผลการตอบสนองที่น่าพึงพอใจ

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด ด้วยการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistically method) เพื่อให้ได้ความคุ้มค่าทั้งคุณภาพและปริมาณของผลผลิตชีวมวลทอริไฟด์ โดยเชื้อเพลิงทอริไฟด์ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชื้อเพลิง

2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบการทอริแฟคชันชีวมวลในระดับห้องทดลอง

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบ CCD

Run	Variable		Coded		SF
	X ₁ (min)	X ₂ (°C)	X ₁	X ₂	
1	30	250	-1	-1	5.89
2	45	250	-1	0	6.07
3	60	250	-1	1	6.19
4	30	275	0	-1	6.63
5	45	275	0	0	6.81
6	45	275	0	0	6.81
7	45	275	0	0	6.81
8	45	275	0	0	6.81
9	45	275	0	0	6.81
10	60	275	0	1	6.93
11	30	300	1	-1	7.37
12	45	300	1	0	7.54
13	60	300	1	1	7.67

$$\text{Weight loss (\%)} = \left[\frac{M_U - M_T}{M_U} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Energy yield (\%)} = \left[\left(\frac{M_T}{M_I} \right) \times \left(\frac{E_T}{E_I} \right) \right] \quad (2)$$

$$SF = \log \{ t \times \exp \left[\frac{(T_H - T_R)}{14.75} \right] \} \quad (3)$$

ชีวมวลแต่ละชนิด ได้แก่ ชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส ถูกนำไปอบไล่ความชื้นที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วผ่านการบดลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบให้มีขนาดความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ก่อนนำไปทำการทอริแฟคชันในเตาระดับห้องทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD ด้วยโปรแกรมสถิติ Minitab (เวอร์ชัน 16) มี 2 ปัจจัย 2 ระดับ คือ อุณหภูมิ (Temperature, X_1) ที่ 240-320 องศาเซลเซียส และเวลา (Time, X_2) 20-60 นาที โดยใช้ $\alpha=1$ มีตัวแปรตอบสนอง 3 ตัว คือ ค่าความร้อน (Heating value, Y_1) ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (weight loss%, Y_2) และ ร้อยละผลได้พลังงาน (Energy yield%, Y_3) ทั้งนี้จะมีการคำนวณค่าตัวแปรความรุนแรง (Severity factor, SF) เพื่อใช้ประเมินผลร่วมกับเวลาและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (1)-(3) เมื่อ t คือ เวลา (นาที) T_H คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) T_R คือ อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 100 (องศาเซลเซียส) M_U คือ น้ำหนักสารก่อนปรับปรุง (กรัม) M_T คือ น้ำหนักสารหลังการทอริไฟด์ (กรัม) M_I คือ น้ำหนักสารเริ่มต้น (กรัม) E_T คือ ค่าความจุความร้อนหลังการทอริไฟด์ (MJ/kg) และ E_I คือ ค่าความจุความร้อนเริ่มต้น (MJ/kg) ดังนั้นจากการออกแบบการทดลองตามข้างต้นจะได้ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

2.2 การทอริแฟคชันชีวมวล

นำชีวมวลที่เตรียมเบื้องต้น (ดังที่ระบุในหัวข้อ 2.1) มาบรรจุในท่อปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร แล้วนำไปใส่เตาที่ติดตั้งระบบให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า การทอริแฟคชันตามสภาวะที่ออกแบบไว้ จะถูกดำเนินภายใต้สภาวะที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่เป็น 800 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์และร้อยละของน้ำหนักที่หายไป วิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน เพื่อใช้ในการคำนวณและหาร้อยละผลได้พลังงาน (Energy yield) จากนั้นจะทำการวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการทางสถิติ เพื่อหาสมการจำลองการทำนายค่าพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (Y_1) สมการจำลองการทำนายร้อยละน้ำหนักที่หายไป (Y_2) และ สมการจำลองการทำนายร้อยละผลได้พลังงานของผลิตภัณฑ์เทียบกับวัตถุดิบ (Y_3) จากนั้นจะใช้เทคนิควิธีการตอบสนองเชิงพื้นผิว (Response surface methodology, RSM) ในการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด (ชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส) เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้พลังงานสูงสุด (Maximum energy yield) เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปสู่กระบวนการต่อไป

2.3 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลทอริไฟด์

นำชีวมวลแต่ละชนิดที่ผ่านการทอริแฟกชันที่สภาวะที่เหมาะสม นำมาลดขนาดด้วยเครื่องบอลลมิลล์ (ball mill) แล้วคัดขนาดอนุภาคให้มีขนาด 10 เมช ด้วยเครื่องร่อนตะแกรง (sieving machine) หลังจากนั้นจะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แปรงเป็กเป็นตัวประสานในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบลูกกลิ้ง (pelletizer) ที่มีแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.6 เซนติเมตร ความยาว 2.5 เซนติเมตร เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์นำมาทดสอบสมบัติกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงได้แก่ ทางมิติ (สัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง, L/D) หาคความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (pellet density) และความแข็งแรง (Strength) โดยจะใช้เครื่องมือ Universal testing machine (UTM) ในการทดสอบ ส่วนการวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ (Moisture Uptake) ของตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอริแฟกชัน จะดำเนินการโดยนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลาหนึ่งนาที่ แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำ เพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นของน้ำหนัก และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ (Combustion) โดยนำน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตรมาทำการต้มโดยใช้ตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงจำนวน 10 กรัม วัดอุณหภูมิของน้ำหลังจากนั้นวัดปริมาณน้ำที่เหลือ [2]

2.4 การวิเคราะห์

ตัวอย่างชีวมวลดิบที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น และตัวอย่างชีวมวลหลังจากการทอริแฟกชันดังเงื่อนไข

การทดลองที่ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 จะถูกนำมาตรวจสอบหาค่าความจุความร้อน (heating value) โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter และการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analysis) โดยใช้อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 15 องศาเซลเซียสต่อ นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดที่ 700 องศาเซลเซียส และใช้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 2 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที เพื่อนำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (%MC) ปริมาณสารระเหยง่าย (%VM) ปริมาณเถ้า (%AC) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%FC) และปริมาณธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHNO Analyzer)

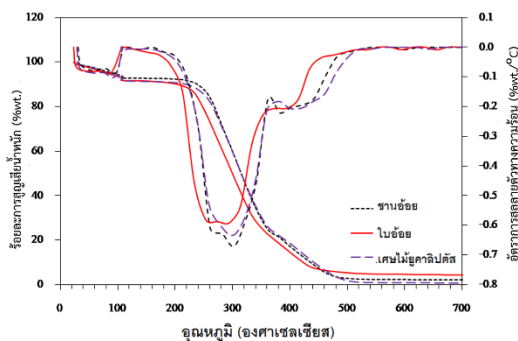
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟกชัน

จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสถิติ MINITAB 16 จะได้การทดลองออกมาทั้งหมด 13 การทดลองซึ่งแต่ละการทดลองจะมีค่าความรุนแรงของสภาวะ (SF) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตาม SF ที่สูงขึ้นเนื่องจากการปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้น ค่าความร้อนของชีวมวลก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ร้อยละผลได้ของพลังงานก็เปลี่ยนไปตามค่าความร้อนและค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ ซึ่งค่าความร้อนของชีวมวลขานอ้อยทอริไฟด์จะอยู่ระหว่าง 19.29-40.90

เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่ การทอรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ เวลา 60 นาที ชีวมวลไบอ้อยทอรีไฟด์อยู่ระหว่าง 50.20-95.73 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อน สูงสุดจะอยู่ที่การทอรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส และเวลา 60 นาที ชีวมวลเศษไม้ยูคาลิปตัส ทอรีไฟด์อยู่ระหว่าง 9.79-60.95 เมกกะจูลต่อ กิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่การทอรีแฟกชัน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที

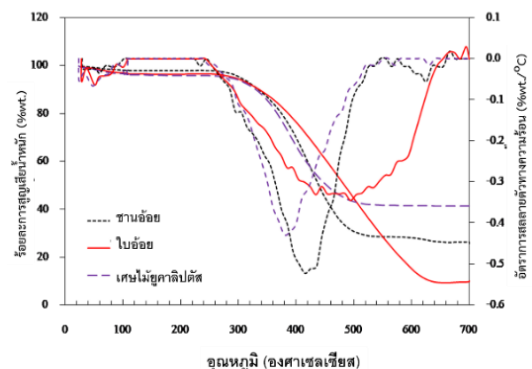
3.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน



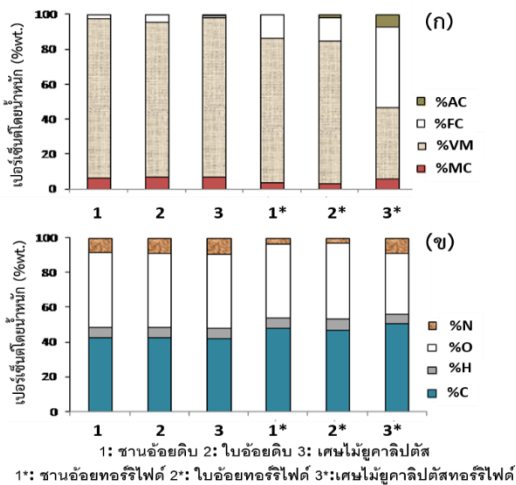
รูปที่ 1 เส้นโค้ง TGA/DTG ของชีวมวลดิบ

พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแสดงผลออกมาเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการสลายตัวทาง ความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการระเหย ความชื้นที่สิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศา เซลเซียส ช่วงของการปลดปล่อยสารระเหยง่าย

ซึ่งจะเกิดขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส [3] โดยโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะมีการแตกสลายกลายเป็นผลผลิตแก๊สร้อนทำให้โครงสร้างชีวมวลมีองค์ประกอบคาร์บอนมากขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นช่วงที่มีการสลายตัวค่อนข้างคงตัว เนื่องจากที่เหลือจะเป็นคาร์บอนคงตัวและถ้า มีปริมาณโดยรวมน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ชีวมวลทั้งหมด ซึ่งไบอ้อยจะเกิดการสลายตัวทาง ความร้อนก่อนขานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส โดยไบอ้อยจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 253 องศาเซลเซียส ขานอ้อยจะมีอัตราการสลายตัว สูงสุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เศษไม้ยูคา ลิปตัสจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 เส้นโค้ง TGA/DTG ของชีวมวลทอรีไฟด์ดิบ



รูปที่ 3 สมบัติชีวมวลก่อนและหลังการทอไรแฟชัน

ชีวมวลทอไรไฟด์จะถูกนำมาตรวจสอบพฤติกรรม การสลายตัวทางความร้อนเปรียบเทียบกับชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการทอไรแฟชัน รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าชีวมวลทอไรไฟด์มีการสลายตัว 3 ช่วง เช่นเดียวกับกับชีวมวลดิบ โดยจะมีช่วงการปลดปล่อยสารระเหยง่ายระหว่าง 250-650 องศาเซลเซียส โดยใบอ้อยทอไรไฟด์และชานอ้อยทอไรไฟด์จะมีสัดส่วนสารระเหยง่ายมากกว่าเศษไม้ยูคาลิปตัสทอไรไฟด์น้ำหนักที่คงเหลือสุดท้ายจากการทดสอบบ่งบอกได้ว่าชีวมวลทอไรไฟด์จะมีสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นกว่าชีวมวลดิบ เศษไม้ยูคาลิปตัสทอไรไฟด์จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มากกว่าชีวมวลทอไรไฟด์อื่น

เมื่อนำข้อมูลพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนมาวิเคราะห์แบบประมาณการ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้า และการวิเคราะห์

ปริมาณธาตุ (Ultimate analysis) จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ชีวมวลดิบ ชานอ้อย ใบอ้อย และเศษไม้ยูคาลิปตัส เมื่อผ่านการทอไรแฟชัน จะมีสมบัติบ่งบอกความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น นั่นคือ ชีวมวลทอไรไฟด์จะมีปริมาณสารระเหยง่ายและปริมาณความชื้นลดลง มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น มีสัดส่วนธาตุออกซิเจนลดลง และมีสัดส่วนธาตุคาร์บอนสูงขึ้น และปริมาณเถ้าที่ร้อยละ 1.26 91.07 และ 0.46 ตามลำดับ เมื่อนำสัดส่วนเชิงโมล ของ O/C และ H/C ของทั้ง ชีวมวลดิบ และชีวมวลทอไรไฟด์มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าชีวมวลทอไรไฟด์จะมีสัดส่วนเชิงโมลของ O/C และ H/C ต่ำกว่าชีวมวลดิบ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของธาตุคาร์บอนและการลดลงของธาตุออกซิเจนในองค์ประกอบนั่นเอง ทำให้ชีวมวลทอไรไฟด์มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อสนับสนุนได้ว่าชีวมวลทอไรไฟด์จะมีศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นกว่าชีวมวลดิบ [4]

3.3 สภาวะที่เหมาะสมของการทอไรแฟชัน

โปรแกรม MINITAB (เวอร์ชัน 16) นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อประเมินผลของการเตรียมเชื้อเพลิงด้วยการทอไรแฟชันชีวมวลโดยใช้วิธี CCD (Central Composite design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยมีการวิเคราะห์ปัจจัยดังนี้คือ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการทดลองหรือ Severity factor (SF) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ของความแปรปรวน (ANOVA) ของข้อมูลการทดลอง จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Y_1 , Y_2 และ Y_3) และตัวแปรอิสระ (X_1 และ X_2) ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นกำลังสองเพื่อทำนายสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการทอริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด ภายใต้ค่าความน่าจะเป็นที่มีระดับความเชื่อมั่น 95% เงื่อนไขในการตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และนัยสำคัญทางสถิติได้รับการตรวจสอบโดยค่า F-Test หลังจากพิจารณาความน่าเชื่อถือของแต่ละเทอมอย่างมีนัยสำคัญ สมการถดถอยที่ถูกเสนอใช้ในการทำนายกระบวนการ

ทอริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด ถูกแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2 , R^2_{adj}) จะมีค่าค่อนข้างสูง ดังผลในตารางที่ 2 ทำให้สามารถประเมินหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟคชันชีวมวลเพื่อให้ได้ปริมาณชีวมวลทอริไฟด์สูง และ ร้อยละผลได้พลังงานสูงสุด ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3 โดยได้มีการทดลองซ้ำที่สถานะที่เหมาะสมดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อยืนยันค่าการทำนาย พบว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทำนาย จึงเป็นการยืนยันได้ว่าสมการทำนายที่ได้นี้มีเป็นที่ยอมรับได้ในเชิงสถิติ

ตารางที่ 2 สมการทำนายกระบวนการทอริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด

ชีวมวล	ค่าตอบสนอง	สมการทำนาย	R^2_{adj}	R^2
ชานอ้อย	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 609 - 4.73 X_1 + 0.1800 X_2 + 0.00935 X_1^2$	90.69	88.98
	ร้อยละน้ำหนัที่หายไป (%)	$Y_2 = -71.4 + 0.3805 X_1 + 0.1978 X_2$	85.91	87.56
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = 1185 - 8.49 X_1 - 1.85 X_2 + 0.01664 X_1^2 + 0.0233 X_2^2$	87.06	83.47
ใบอ้อย	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 822 - 4.73 X_1 + 0.405 X_2 + 0.01327 X_1^2$	77.93	79.25
	ร้อยละน้ำหนัที่หายไป (%)	$Y_2 = 27.12 + 0.11313 X_1 + 0.0539 X_2$	92.07	95.56
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = 1185 - 8.49 X_1 - 1.85 X_2 + 0.1664 X_1^2 + 0.0233 X_2^2$	69.11	72.51
เศษไม้ ยูคาลิปตัส	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 737 - 6.22 X_1 + 0.416 X_2 + 0.01299 X_1^2$	84.36	86.29
	ร้อยละน้ำหนัที่หายไป (%)	$Y_2 = -43 - 0.27 X_1 + 0.4417 X_2 + 0.00183 X_1^2$	94.00	96.85
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = -1782 + 7.00 X_1 + 24.3 X_2 - 0.0843 X_1 X_2$	65.06	69.58

ตารางที่ 3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีไฟเคชันชีวมวลและสมบัติของชีวมวลทอรีไฟด์อัดเม็ด

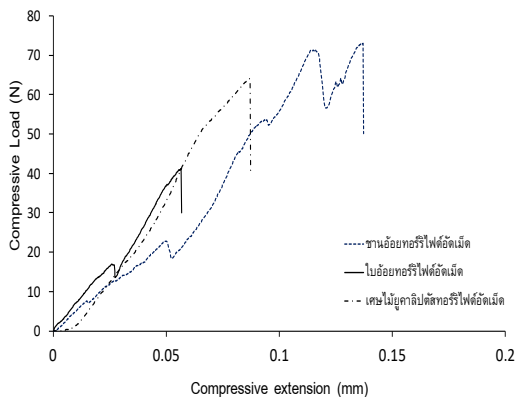
ชีวมวลและเงื่อนไข	ค่าทำนาย (Y_1, Y_2, Y_3)	ค่าทดลอง (Y_1, Y_2, Y_3)	สมบัติเม็ดเชื้อเพลิงทอรีไฟด์		
			Pellet Density (kg/m^3)	Heating Value (MJ/Kg)	Energy density (MJ/m^3)
ชานอ้อย 289°C, 30 min	30.70 MJ/kg, 44%, 88.27%	28.87 MJ/kg, 46.52%, 84.65%	339.96	50.02	18,127.25
ใบอ้อย 294°C, 30 min	66.57 MJ/kg, 61.97%, 79.61%	63.24 MJ/kg, 59.97%, 81.25%	382.70	67.67	25,071.74
เศษไม้ยูคาลิปตัส 297°C, 30 min	49.81 MJ/kg, 50.98%, 288%	47.55 MJ/kg, 52.21%, 280%	275.23	32.70	8,927.10

3.4 ชีวมวลทอรีไฟด์อัดเม็ด

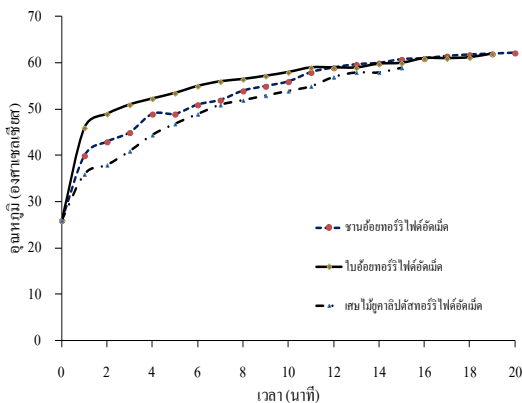
จากการศึกษาข้างต้น ชีวมวลทอรีไฟด์แต่ละชนิดจะถูกเตรียมขึ้นมาโดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ โดยชานอ้อยจะถูกทอรีไฟเคชันที่ 289 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชีวมวลใบอ้อยจะถูกทอรีไฟเคชันที่ 294 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชีวมวลเศษไม้ยูคาลิปตัสจะถูกทอรีไฟเคชันที่ 297 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชีวมวลทอรีไฟด์ที่ได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้นเป็นผลมาจากสารระเหยง่ายได้ถูกไล่ออกไปจากโครงสร้างและมีความเป็นคาร์บอนมากขึ้นทำให้ได้สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ชีวมวลทอรีไฟด์จากสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แป้นเปียงเป็นตัวประสานผสมปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของชีวมวลทอรีไฟด์ใช้เครื่องอัดเม็ดแบบเครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) อัดที่กำลังการผลิต 100-150

กิโลกรัมต่อชั่วโมงได้ชีวมวลทอรีไฟด์อัดเม็ดออกมา หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยสมบัติที่วิเคราะห์ได้แก่ มติ ความหนาแน่น ความแข็งแรง การดูดซับความชื้นและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยทำการสุ่มตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เมื่ออัดเสร็จแล้วนำไปทำการตากแห้งเป็นเวลา 1 วัน ผลวิเคราะห์พบว่า เม็ดชีวมวลชานอ้อยทอรีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.22 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 339.96 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เม็ดชีวมวลใบอ้อยทอรีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.68 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 382.70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและเม็ดชีวมวลยูคาลิปตัสทอรีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.88 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 275.23 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งขนาดที่ได้ขึ้นอยู่กับการเพิ่มและการเกาะตัวกันของชีวมวลทอรีไฟด์โดยใช้ตัวประสาน [5] ซึ่งเม็ดเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะง่ายต่อการขนส่งและประหยัดค่า

ชนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น อีกทั้งยังสามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายขึ้นในการเผาไหม้ แม้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะมีขนาดเล็กแต่สามารถให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น จึงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่านั่นเอง



รูปที่ 4 ความแข็งแรงของชีวมวลทอริไฟด์อัดเม็ด



รูปที่ 5 การให้ความร้อนของชีวมวลทอริไฟด์อัดเม็ด

เมื่อพิจารณาค่าผลได้พลังงานของชีวมวลทอริไฟด์ พบว่าชานอ้อย ใบอ้อย และไม้ยูคาลิปตัส มีค่าเท่ากับ 18,127.25, 25,071.74 และ 8,927.10 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ใบอ้อยทอริไฟด์จะมีความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงและค่าความร้อนสูงสุด ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง เมื่อนำชีวมวลทอริไฟด์อัดเม็ดทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบค่าความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) จะได้ผลการทดลองออกมาดังกราฟรูปที่ 4 ซึ่งกราฟของการบีบอัดมีความชันประมาณเท่ากัน โดยสังเกตได้ว่าหลังจากถึงค่าสูงสุดอันดับแรกแล้วมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นได้อีกครั้ง เนื่องจากการบีบอัดของเม็ดเชื้อเพลิงทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้น [6] ซึ่งหลังจากทำการทดสอบจะเห็นได้ว่าเม็ดเชื้อเพลิงชานอ้อยทอริไฟด์มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด (73.03 นิวตัน) รองลงมาคือเม็ดเชื้อเพลิงยูคาลิปตัสทอริไฟด์ (63.98 นิวตัน) และเม็ดเชื้อเพลิงใบอ้อยทอริไฟด์ (41.20 นิวตัน) จากการทดสอบการให้ความร้อนในการต้มน้ำด้วยเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ โดยนำเม็ดเชื้อเพลิงจำนวน 10 กรัม ไปทำการต้มน้ำ 50 มิลลิลิตร (โดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นร่วม) และวัดอุณหภูมิได้ผลแสดงออกมดังรูปที่ 5 พบว่าเส้นโค้งของเม็ดชีวมวลทอริไฟด์ใบอ้อยมีความชันที่สูงที่สุดในช่วงการเผาไหม้ 2 ชั่วโมงแรก เนื่องจากมีปริมาณค่าความร้อนที่สูงนั่นเอง และรองลงมาเป็นชานอ้อย และไม้ยูคาลิปตัส ตามลำดับ จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์แต่ละชนิด พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงยูคาลิปตัสมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าคือ 49.64 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือชานอ้อย 46.90

เปอร์เซ็นต์ และใบอ้อย 44.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเม็ดเชื้อเพลิงที่ดีจะต้องมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำเพื่อให้งานต่อการขนส่ง การจัดเก็บ และการนำไปใช้ โดยจะเห็นว่าเม็ดเชื้อเพลิงขานอ้อยมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชีวมวลทอริไฟด์ พบว่า สมการที่ใช้ทำนายกระบวนการทอริฟิเคชันมีความน่าเชื่อถือในทางสถิติ โดยค่าทำนายและค่าการทดลองจากสภาวะที่เหมาะสมในการทอริไฟด์ชีวมวลมีความใกล้เคียงกัน และเมื่อนำชีวมวลทอริไฟด์มาทำการอัดเม็ด พบว่าเม็ดชีวมวลขานอ้อยทอริไฟด์ที่ได้มีสมบัติสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลในประเทศไทย [7] คือ มีสัดส่วนมิติความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 3.22 ถึง 3.68 ความหนาแน่น มีค่า 0.34 ถึง 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่า 8,927.10 ถึง 25,071.74 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความแข็งแรง 41.20 ถึง 73.03 นิวตัน คุณสมบัติการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงใบอ้อยมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือ ขานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Van der Stelt MJ, et al. Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. Biomass and Bioenergy. 2011; 35(9): 3748-62.
- [2] Kim H, et al. Biomass Briquette as a Technology for Desulphurizing and Energy Saving. Renewable Energy Journal. 2001; 8: 33-75.
- [3] Wilson L, et al. Thermal Characterization of Tropical Biomass Feedstocks. Energy Conversion and Management. 2011; 52(1): 191-8.
- [4] Bilgic E, et al. Limits of Variations on the Structure and the Fuel Characteristics of Sunflower Seed Shell Through Torrefaction. Fuel Processing Technology. 2016; 144: 197-202.
- [5] Reza MT, et al. Engineered Pellets from Dry Torrefied and HTC Biochar Blends. Biomass and Bioenergy. 2014; 63: 229-38.
- [6] Chrastina J, et al. Determination of Mechanical Properties of Poppy Waste Pellets. Agronomy Research. 2017; 15(5): 1906-17.

- [7] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร. รายงาน
ฉบับสุดท้าย โครงการศึกษากำหนดมาตรฐาน
ของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิง
ชีวมวลสำหรับอนาคต. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัย
ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ
อนุรักษ์พลังงาน; 2555.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ผลของความดันที่มีต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ ในกระบวนการให้ความร้อนปาล์มน้ำมันแบบนิ่งโดยตรง

The Effects of Sterilization Pressure on Fruit-Bunch Separation and Crude Palm Oil Yield in Sterilization Process Using Direct Steaming

สิริวิญญ์ ภักดีโชติ และ มักตาร์ แวหะยี่*

Siravit Pakdeechot and Makatar Wae-hayee*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla

Received: 23 February 2020

Revised: 24 June 2020

Accepted: 17 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความดันที่มีต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil, CPO) ในการนึ่งทะลายปาล์มที่ใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม การทดลองได้ให้ความร้อนทะลายปาล์มแบบนิ่งโดยตรงในหม้อน้ำขนาดเล็ก ที่ระยะเวลา 60 นาที โดยควบคุมความดันที่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar ทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะนำเข้าเครื่องแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย เพื่อหาปริมาณการหลุดร่วงของลูกปาล์มจากทะลาย จากนั้นนำลูกปาล์มที่ได้เข้าเครื่องสกัดน้ำมันปาล์มแบบสกรู เพื่อหาปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ จากการศึกษพบว่าความดันที่ 1.5, 2.5 และ 3.5 bar มีผลทำให้ลูกปาล์มหลุดร่วงออกจากทะลายในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ที่ 90.85, 91.84 และ 94.69% ตามลำดับ และได้ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ใกล้เคียงเช่นกันที่ 18.52, 18.91 และ 19.61% ตามลำดับ ซึ่งมีผลแตกต่างกันไม่เกิน 4% สำหรับที่ความดัน 0.5 bar การหลุดร่วงออกจากทะลายและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบมีค่าต่ำสุด ดังนั้น ควรเลือกที่ความดัน 1.5 bar

สำหรับใช้ในการให้ความร้อนผลปาล์มแบบนิ่งโดยตรง เนื่องจากในแง่การใช้พลังงาน ที่ความดัน 1.5 bar ใช้พลังงานน้อยกว่าที่ 2.5 bar และ 3.5 bar

คำสำคัญ: ปาล์มน้ำมันทั้งทะลาย การสกัดน้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มดิบ การนึ่งทะลายปาล์ม หม้อนึ่งทะลายปาล์ม

Abstract

In this work, the effect of pressure on fruit-bunch separation and Crude Palm Oil (CPO) yield in palm-bunch sterilization for palm oil milling process. Palm bunches were sterilized using direct steaming in a mini sterilizer for 60 min, and the sterilization pressure was varied at 0.5, 1.5, 2.5 and 3.5 bar. The palm bunches, after sterilizing, was loaded suddenly into the bunch-fruit separator to consider the efficiency of fruit-bunch separation. Then, palm fruit were extracted by screw press to evaluate a CPO yield. The results show that at 1.5, 2.5 and 3.5 bar, amount of palm fruits from fruit-bunch separation was 90.85, 91.84 and 94.69%, respectively, and CPO yield was 18.52, 18.91 and 19.61%, respectively, which slightly affected with small discrepancy lesser than 4%. However, at 0.5 bar, the amount of fruit-bunch separation and the crude palm oil yield were the lowest. Therefore, to apply this direct steaming in palm-bunch sterilization process, the sterilization pressure at 1.5 bar should be selected due to lower energy consumption as compared to the case of 2.5 bar and 3.5 bar.

Keywords: Fresh Fruit Bunch (FFB): Palm Oil Milling: Crude Palm Oil (CPO): Oil palm sterilization: Oil palm sterilizer

*ติดต่อ: makatar.w@psu.ac.th, 074-287-231

1. บทนำ

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งในประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซียและไทย อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มสามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ หีบแบบแยกเมล็ดในปาล์ม และหีบแบบรวมเมล็ดในปาล์ม การหีบแบบแยกเมล็ดในปาล์มนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตสูง ใช้ผลปาล์มทั้งทะลายเป็นวัตถุดิบ ซึ่งหลังจากเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มสดแล้ว ควรส่งทะลายปาล์มไปยังโรงงานเพื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนแล้วสกัดน้ำมันปาล์มทันทีหรือไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยกระบวนการให้ความร้อนเป็นการยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระ โดยกรดไขมันอิสระนั้นจะส่งผลทำให้น้ำมันปาล์มดิบที่ได้มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นกระบวนการให้ความร้อนจึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม [1]

กระบวนการให้ความร้อน (Sterilization) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ทะลายปาล์มอ่อนนุ่ม ทำให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลายได้ง่ายและยับยั้งเอนไซม์ที่ไม่พึงประสงค์ ทำได้โดยการนึ่งทะลายปาล์มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 140°C ความดันไอน้ำ 40 psi เป็นระยะเวลา 75 ถึง 90 นาที [2,3] จากนั้นทะลายปาล์มจะถูกลำเลียงเข้าเครื่องแยกลูกปาล์มออกจากทะลายแบบตะแกรงหมุน [4-7] ผลผลิตที่ได้รับจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ น้ำมันจากเนื้อปาล์ม (Crude Palm Oil, CPO) และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil, CPKO) ในส่วนข้อเสียของวิธีการให้ความร้อนผลปาล์มโดยการนึ่งด้วยไอน้ำนี้คือ (1) ทำให้เกิดน้ำเสียจากการควบแน่นของไอน้ำ หลังจากกระบวนการนึ่ง จึงก่อให้เกิดมลภาวะ (2) ผล

ปาล์มได้รับความชื้น จากไอน้ำจำเป็นต้องไล่ความชื้นในน้ำมันปาล์มดิบอีกครั้ง และ (3) ต้องมีเครื่องจักรที่ซับซ้อน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษา

นอกจากนี้ยังมีการหีบอีกวิธี คือ การหีบแบบรวมเมล็ดในปาล์ม ส่วนมากเป็นโรงงานขนาดเล็ก จะใช้เตาอบลมร้อน ซึ่งจะใช้อุณหภูมิลมร้อน 100-150°C เป็นเวลา 30-40 ชั่วโมง แล้วทำการสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องสกัดแบบอัดเกลียวเดียว น้ำมันที่ได้เป็นแบบผสมกันระหว่างน้ำมันจากเนื้อปาล์มและน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม (Mixed Crude Palm Oil, MCPO) ซึ่งข้อเสียคือในกระบวนการให้ความร้อนจะใช้ระยะเวลาและคุณภาพน้ำมันจะเป็นแบบเกรดต่ำ [8,9]

ในปัจจุบันได้มีการศึกษากระบวนการหีบแบบแยกเมล็ดในปาล์ม โดยทีมีวิจัย Hadi และคณะ [10] ได้ศึกษากระบวนการให้ความร้อนในหม้อหนึ่งขนาดเล็ก โดยหม้อไอน้ำ (Boiler) และหม้อนึ่ง (Sterilizer) แยกออกจากกัน ทดสอบที่ความดัน 2.6 บาร์ และอุณหภูมิไอน้ำที่ 140°C โดยพิจารณาผลของระยะเวลาการนึ่งที่มีต่อการหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลาย โดยให้ความร้อนที่ระยะเวลา 40, 50, 60 และ 70 นาที ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลา 70 นาที ทำให้การหลุดร่วงของผลปาล์มมีค่ามากที่สุดที่ 100% ในขณะที่ที่ระยะเวลา 60 นาที ทำให้การหลุดร่วงมีค่าประมาณ 90% อย่างไรก็ตาม จากการแนะนำโดย Malaysian Palm Oil Board (MPOB) [11] การหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลาย 90 % เป็นที่ยอมรับได้

Sukaribin และ Khalid [12] ได้ศึกษาผลของระยะเวลาให้ความร้อนแก่ผลปาล์มด้วยไมโครเวฟที่มี

ต่อการหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลาย ในการทดลองได้แยกทะลายปาล์มเป็นข้อเล็กๆ แล้วนำไปอบในเตาไมโครเวฟตามระยะเวลาที่กำหนด ผลการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์การหลุดร่วงของผลปาล์มจากข้อทะลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลาย อยู่ที่ 81.67, 81.29 และ 83.09% ที่ระดับพลังงาน 1, 1.5 และ 2 kW ตามลำดับ แต่เมื่อผ่านระยะเวลาที่มีเปอร์เซ็นต์สูงสุด (หลังจาก 16, 14 และ 12 นาที ที่ระดับพลังงาน 1, 1.5 และ 2 kW ตามลำดับ) เปอร์เซ็นต์การหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลายจะมีแนวโน้มที่ลดลง และยังพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดความชื้นในผลปาล์มจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้ความร้อน

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเพื่อลดระยะเวลาการให้ความร้อนผลปาล์ม เช่น Alimalbari และคณะ [13] ได้ศึกษาแนวทางการลดระยะเวลาการอบปาล์มโดยการบีบให้ปาล์มแตกก่อนทำการอบ Hanifarianty และคณะ [14] พัฒนาเครื่องอบถึงหมุนเพื่อให้ความร้อนแก่ผลปาล์ม สาวิตรี และคณะ [15] ได้ประยุกต์เตาอบไมโครเวฟแบบสายพาน มาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนผลปาล์ม โดยวิธีที่ได้กล่าวทั้งหมดสามารถช่วยลดระยะเวลาการให้ความร้อนผลปาล์ม แต่จะเหมาะกับการสกัดแบบหีบรวมเมล็ดในปาล์ม [8,9]

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบหีบแยกเมล็ดในปาล์ม ต้องใช้น้ำและพลังงานปริมาณที่มากในกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ความร้อนทะลายปาล์ม โดยปกติแล้ว หม้อไอน้ำ (Boiler) และหม้อนึ่ง (Sterilizer) ถูกแยกออกจากกันในแต่ละหน่วย (เป็นรูปแบบ

เดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ Hadi และคณะ [10]) ซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนและต้องใช้น้ำปริมาณที่มาก เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและลดปริมาณการใช้น้ำ งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะรวมหม้อไอน้ำและหม้อนึ่งให้อยู่ในหน่วยเดียว ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนทะลายปาล์มแบบหนึ่งโดยตรง

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [16] ได้ศึกษาการให้ความร้อนทะลายปาล์มแบบหนึ่งโดยตรงในหม้อนึ่งขนาดเล็ก หม้อไอน้ำและหม้อนึ่งอยู่ในหน่วยเดียวกัน โดยพิจารณาผลของระยะเวลาการนึ่ง (ความดันคงที่) ที่มีผลต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาการนึ่งทะลายปาล์มที่นานกว่า มีผลทำให้การหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่เพิ่มขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ จะพิจารณาผลของความดันที่มีผลต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ

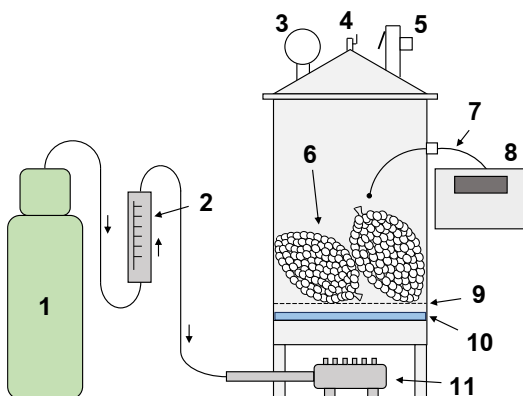
2. วิธีการการวิจัย

2.1 ชุดการทดลอง

2.1.1 ถังนึ่งปาล์ม

ถังนึ่งปาล์มขนาดเล็กแบบหนึ่งโดยตรงได้แสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm สูง 60 cm มีปริมาตร 58 ลิตร ภายในถังมีชั้นตะแกรงสูงจากก้นถัง 2 cm ได้ทำการติดตั้งวาล์วระบายแรงดัน (Pressure relief valve) เพื่อควบคุมความดันภายในถังให้คงที่ ภายในได้ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) เพื่อวัดอุณหภูมิไอน้ำ ในการนึ่งปาล์มจะนำทะลายปาล์มสดใส่เข้าไปในถัง จากนั้นเติมน้ำในปริมาณตามที่กำหนด แล้วให้ความร้อนจากเตา

แก๊สโดยใช้เชื้อเพลิง LPG



รูปที่ 1 ส่วนประกอบทั้งหมดของถังนึ่งปาล์มน้ำมันแบบนึ่งโดยตรง

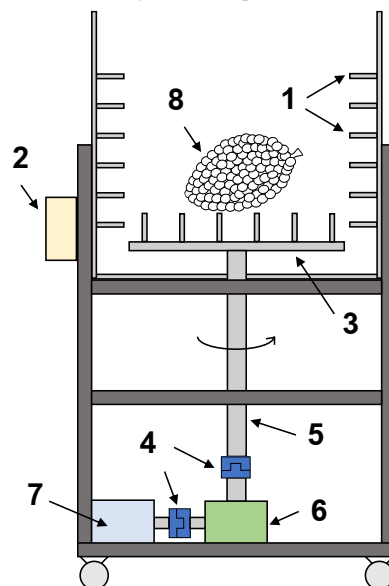
(1) ถังเชื้อเพลิง LPG (2) โรตานิเตอร์ (3) เกจวัดความดัน (4) วาล์ว (5) วาล์วระบายแรงดัน (6) ทะลายปาล์ม (7) โพรบวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) (8) อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Data logger) (9) ตะแกรง (10) น้ำ (11) เตาแก๊ส



รูปที่ 2 ถังนึ่งปาล์มน้ำมันแบบนึ่งโดยตรงที่ใช้ในการทดลอง

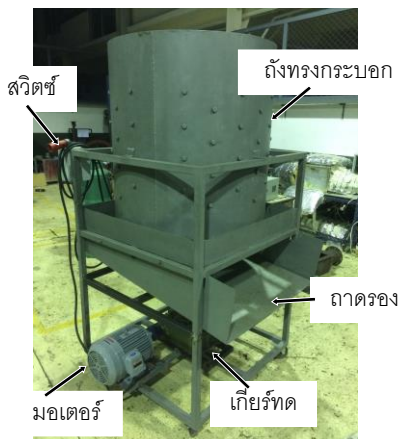
2.1.2 เครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย

เครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 และ 4 เป็นแบบทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 cm ภายในได้ติดตั้งเดือยที่มีความยาว 10 cm ด้านล่างมีจานหมุนสำหรับเหวี่ยงทะลายปาล์ม ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 7.5 แรงม้า ใช้ขับเคลื่อนที่มีอัตราส่วน 1:20 แล้วหมุนจานหมุนด้วยความเร็วรอบ 70 rpm (ความเร็วเชิงเส้นที่ขอบจาน 3.5 เมตร/วินาที) โดยจานหมุนจะเหวี่ยงทะลายปาล์มให้ชนกับเดือยที่ติดอยู่ข้างๆ ทำให้ลูกปาล์มหลุดออกจากทะลาย ซึ่งในการทดลอง ได้นำทะลายปาล์มที่ผ่านการนึ่งใส่เข้าเครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย โดยกำหนดให้ระยะเวลาการหมุนของเครื่องให้คงที่ แล้วพิจารณาการหลุดร่วงของลูกปาล์มจากทะลาย



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย

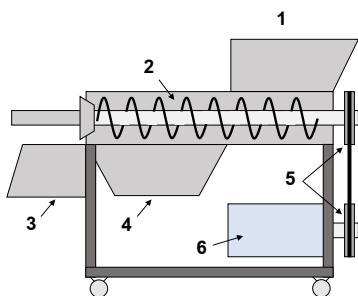
(1) เดือย (2) สวิตช์ (3) จานหมุน (4) ยอย (5) เพล (6) เกียร์ทด (7) มอเตอร์ (8) ทะลายปาล์ม



รูปที่ 4 เครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลายที่ใช้ในการทดลอง

2.1.3 เครื่องสกัดน้ำมันปาล์ม

เครื่องสกัดน้ำมันปาล์ม ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5 และ 6 ใช้มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า โดยจะนำลูกปาล์มที่ได้จากเครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย มาใส่ทางด้านบนของตัวเครื่อง ด้านในเครื่องจะมีสกรูลำเลียงลูกปาล์มเข้าไปแล้วบีบให้น้ำมันปาล์มออกมาที่ถาดด้านล่างของเครื่อง และกากปาล์มออกมาทางด้านข้างของเครื่อง โดยเครื่องสกัดนี้สามารถสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยไม่ทำให้กะลาปาล์มแตก ส่วนน้ำมันปาล์มที่สกัดได้จะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบผลแต่ละกรณีต่อไป



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่องสกัดน้ำมันปาล์ม

(1) ทางเข้าลูกปาล์ม (2) เพลากลีวย (3) ถาดรองกากปาล์ม (4) ถาดรองน้ำมัน (5) พูล์เลย์ (6) มอเตอร์



รูปที่ 6 เครื่องสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การหาประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย

ได้ทดลองโดยการนำทะลายปาล์มสดที่มีน้ำหนัก 18 กก. $\pm$ 2 กก. ใส่เข้าไปในถังนี้ แล้วให้ความร้อนจากด้านล่างโดยใช้เชื้อเพลิง LPG จากนั้นทำการปรับวาล์วระบายแรงดัน (Pressure relief valve) ไปที่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar เพื่อศึกษาผลต่างของความดัน ในการทดสอบที่ระดับช่วงความดันนี้ขึ้นเนื่องมาจากในปัจจุบันมีการให้ความร้อนทะลายปาล์มโดยการใช้ไอน้ำอยู่ในช่วง 3 ถึง 3.5 bar [17-19] โดยวาล์วระบายแรงดันจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันให้คงที่ตามที่กำหนด และระบายไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการนี้ออกสู่บรรยากาศ ในการนี้แต่ละครั้งได้กำหนดให้ระยะเวลาคงที่ที่ 60 นาที ทุกการทดลองเพื่อนำไปเปรียบเทียบเฉพาะผลของความดัน ที่เลือกระยะเวลานี้ เนื่องจากกระบวนการนี้ปาล์มน้ำมัน เช่น horizontal sterilizer, vertical sterilizer, compact modular sterilizer และ continuous sterilizer มีการใช้ระยะเวลาในการนี้ที่ใกล้เคียง 60 นาที [20-24] ดังนั้นที่ระยะเวลา 60 นาที

จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ หลังจากการนี้ ทะลายปาล์มถูกใส่เข้าเครื่องแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย โดยระยะเวลาที่ใช้ในการแยกลูกปาล์มออกจากทะลายกำหนดให้คงที่ที่ 60 วินาที [16] ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้านี้

ประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย โดยมีอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่คล้ายคลึงกัน [12,16,25-26] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$\eta_M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} (100 \%) \quad (1)$$

โดยที่ η_M = ประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย (%), M_1 = น้ำหนักลูกปาล์มทั้งหมด (kg), M_2 = น้ำหนักลูกปาล์มที่ไม่หลุดออกจากทะลาย (kg)

2.2.2 ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้

ในการหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ จะทำการชั่งน้ำหนักลูกปาล์มทั้งหมดที่นำเข้าสู่เครื่องสกัดน้ำมันปาล์ม และชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ โดยมีอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่คล้ายคลึงกัน [16] ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2)

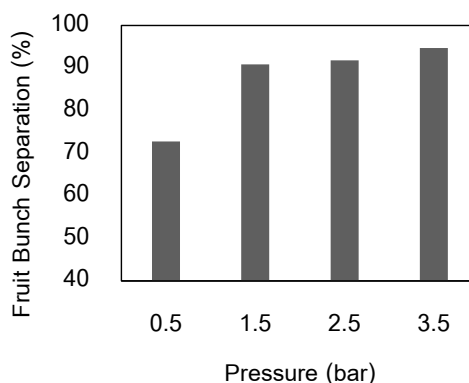
$$\eta_m = \frac{m_1}{m_2} (100\%) \quad (2)$$

โดยที่ η_m = เปอร์เซนต์น้ำมันปาล์มที่สกัดได้ (%), m_1 = น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ทั้งหมด (kg), m_2 = น้ำหนักทะลายปาล์มสดทั้งหมด (kg)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

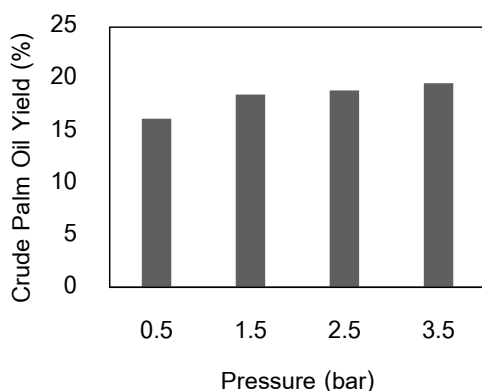
ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7 และ 8 โดยกำหนดให้ระยะเวลาการนิ่งคงที่ 60 นาที ความดันที่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar

รูปที่ 7 แสดงประสิทธิภาพในการแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกลูกปาล์มอยู่ที่ 72.75, 90.85, 91.84 และ 94.69% ที่ความดัน 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar ตามลำดับ ซึ่งตั้งแต่ที่ความดัน 1.5 bar ขึ้นไปมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ไม่เกิน 4%) ส่วนที่ความดัน 0.5 bar พบว่ามีค่าต่ำสุด



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพแยกลูกปาล์มออกจากทะลายที่ระยะเวลาการนิ่ง 60 นาที

รูปที่ 8 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ พบว่า มีปริมาณน้ำมันปาล์มดิบอยู่ที่ 16.20, 18.52, 18.91 และ 19.61% ที่ความดัน 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar ตามลำดับ ซึ่งตั้งแต่ที่ความดัน 1.5 bar ขึ้นไปมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ไม่เกิน 1.1%) ส่วนที่ความดัน 0.5 bar มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มออกจากทะลายตามที่แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 8 เปอร์เซ็นน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ ที่ระยะเวลาการนึ่ง 60 นาที

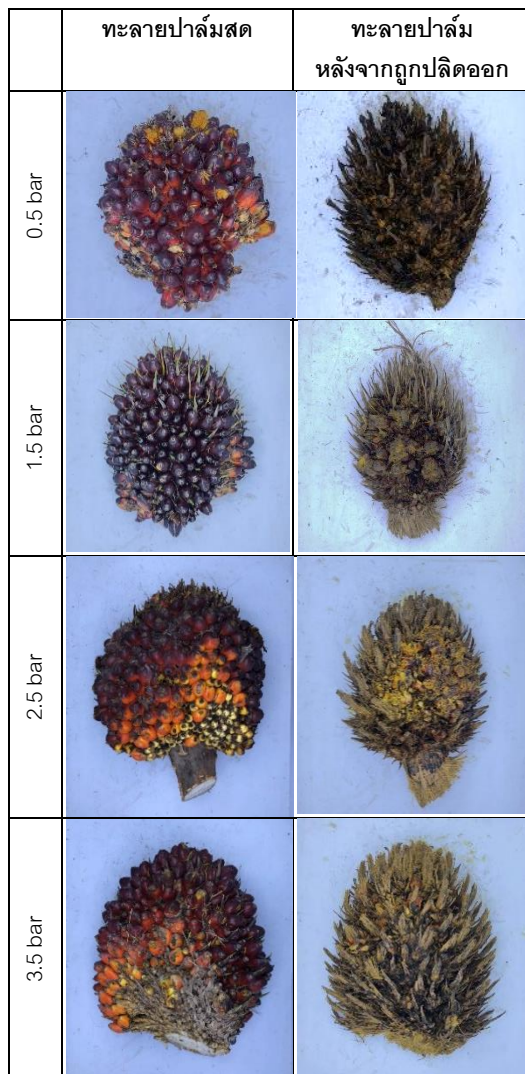
เมื่อความดันในการนึ่งปาล์มเพิ่มขึ้น (ตั้งแต่ 0.5 bar จนถึง 3.5 bar) ประสิทธิภาพการแยกลูกปาล์มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ เมื่อเทียบผลของระยะเวลาในการนึ่งปาล์มจากการทดลองก่อนหน้านี้ [16] พบว่า แนวโน้มผลของระยะเวลามีผลต่อประสิทธิภาพแยกลูกปาล์มและเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มดิบมากกว่าผลของความดันที่ทดลองในครั้งนี้

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Hadi และคณะ [10] ได้ศึกษาการนึ่งปาล์มที่ความดัน 2.6 bar แต่เป็นวิธีการนึ่งปาล์มแบบทั่วไป ที่มีการแยกระหว่างหม้อไอน้ำ (Boiler) และหม้อนึ่ง (Sterilizer) สำหรับงานวิจัยนี้มีแนวคิดการรวมหม้อไอน้ำและหม้อนึ่งให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน เพื่อลดการสูญเสียความร้อน และลดปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม เนื่องจากในกระบวนการต้มที่แยกหม้อไอน้ำ (Boiler) ออกจากหม้อนึ่ง (Sterilizer) ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนใน

ระบบท่อส่งไอน้ำ จากการทดลองในครั้งนี้ที่ความดัน ตั้งแต่ 0.5 bar จนถึง 3.5 bar (ความดันอยู่ในช่วงการทดลองของ Hadi และคณะ [10]) พบว่า แนวคิดการรวมหม้อไอน้ำและหม้อนึ่งนี้สามารถใช้ได้ ซึ่งหลังจากนี้ต้องมีการศึกษาในรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนของการใช้พลังงาน

รูปที่ 9 แสดงทะลายปาล์มหลังการนึ่งและเครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย พบว่าในช่วงความดันที่ 0.5 bar ยังมีลูกปาล์มที่ยังติดค้างอยู่ในทะลายปาล์มส่วนหนึ่ง ลูกปาล์มมีสภาพไม่แตกแต่มีลักษณะข้าปานกลาง และช่วงความดันตั้งแต่ 1.5 bar จนถึง 3.5 bar ลูกปาล์มติดค้างที่ทะลายเล็กน้อย มีสภาพไม่แตกแต่มีลักษณะข้าเล็กน้อย ลูกปาล์มที่ติดค้างเป็นลูกปาล์มขนาดเล็กที่อยู่ชั้นในของทะลาย ลักษณะทางกายภาพของทะลายหลังจากการแยกลูกปาล์มคล้ายคลึงกัน จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การนึ่งผลปาล์มที่ความดัน ตั้งแต่ 1.5 bar จนถึง 3.5 bar ไม่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของทะลายหลังจากการแยกลูกปาล์ม

ดังนั้น ในการเลือกความดันสำหรับควบคุมการนึ่งปาล์มแบบวิธีนี้โดยตรงนี้ ควรเลือกที่ความดัน 1.5 bar เนื่องจากประสิทธิภาพในการแยกลูกปาล์มออกจากทะลายตั้งแต่ความดัน 1.5 bar ขึ้นไปมีค่ามากกว่า 90% ซึ่งการหลุดร่วงของผลปาล์มจากทะลาย 90% เป็นที่ยอมรับได้ [11] และในแง่การใช้พลังงาน เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Specific enthalpy of steam เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ที่ความดัน 1.5 bar จะใช้พลังงานน้อยกว่าที่ 2.5 bar และ 3.5 bar



รูปที่ 9 ตัวอย่างทะลายปาล์มหลังผ่านการนึ่งและเครื่องแยกลูกปาล์มจากทะลาย

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความดันที่มีผลต่อการหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการให้ความร้อนทะลายปาล์มแบบนึ่งโดยตรง โดยการออกแบบให้หม้อนึ่ง (Sterilizer) กับหม้อไอน้ำ (Boiler) อยู่ในหน่วยเดียวกัน

เพื่อนำไปศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงกระบวนการนึ่งทะลายปาล์ม สำหรับบทความนี้ได้ทดลองการนึ่งทะลายปาล์มที่ระยะเวลาคงที่ที่ 60 นาที และปรับความดันที่ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 bar จากการทดลองพบว่า

1. ที่ความดัน 1.5 ถึง 3.5 bar การแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย เเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มที่สกัดได้และลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มหลังผ่านการนึ่งและเครื่องแยกลูกปาล์ม มีผลที่แตกต่างกันไม่มากนัก (ไม่เกิน 4%) สำหรับที่ความดัน 0.5 bar การแยกลูกปาล์มออกจากทะลาย และเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มมีค่าต่ำสุด ดังนั้นควรเลือกที่ความดัน 1.5 bar เนื่องจากในแง่การใช้พลังงานเมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Specific enthalpy of steam เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ที่ความดัน 1.5 bar จึงใช้พลังงานน้อยกว่าที่ 2.5 bar และ 3.5 bar

2. เมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาผลของระยะเวลาในการนึ่งปาล์ม [16] พบว่าผลของระยะเวลามีผลต่อประสิทธิภาพแยกลูกปาล์มและเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มดิบมากกว่าผลของความดันที่ทดลองในครั้งนี้

จากการทดลองครั้งนี้ มีแนวโน้มสามารถปรับปรุงกระบวนการนึ่งปาล์มโดยการรวมหม้อไอน้ำ (Boiler) กับหม้อนึ่ง (Sterilizer) ให้อยู่ในหน่วยเดียวกันได้ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนและประหยัดน้ำที่ใช้ในกระบวนการนึ่งทะลายปาล์ม เนื่องจากในกระบวนการต้มที่แยกหม้อไอน้ำ (Boiler) ออกจากหม้อนึ่ง (Sterilizer) จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในระบบท่อส่งไอน้ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่สัญญา ENG 610585S

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jusoh JM, Rashid NA, Omar Z. Effect of Sterilization Process on Deterioration of Bleachability Index (DOBI) of Crude Palm Oil (CPO) Extracted from Different Degree of Oil Palm Ripeness. *Int. J. Biosci. Biochem. & Bioinfo* 2013; 3(4): 322-7.
- [2] Mahidin MR. Quality improvement in the production of Malaysian palm oil. *Palm Oil Development* 1998; 9: 15-21.
- [3] Sivasothy K. Palm oil milling technology. *Advances in Palm Oil Research* 2000; 1: 745-75.
- [4] Mattheus B. Technological innovations in major world oil crops. *Oil technology* 2012; 2: 23-92,
- [5] Let CC. storage and transportation of fresh fruit bunch and palm oil products. *Palm Oil Technical Bulletin* 1995; 1: 2-4.
- [6] Olie JJ, Tjeng TD. The Extraction of Palm Oil. *The Incorporated Society of Planters*, Kuala Lumpur 1974; 29-35.
- [7] Hadi S, Ahmad D, Akande FB. Determination of the bruise indexes of oil palm fruits. *Journal of Food Engineering* 2009; 95: 322-6.
- [8] อามีน อาลีมัลบารี มักตาร์ แวหะยี และ ชยุด นันทดุสิต. การทบทวนเอกสาร กระบวนการของการสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทย. การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลสารในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 16, 23 – 24 กุมภาพันธ์ 2560, จังหวัดเชียงใหม่; 2560
- [9] พูนสุข ประเสริฐสรพร และ สุธีระ ประเสริฐสรพร. การศึกษาและวิเคราะห์สถานภาพและ ศักยภาพของการใช้ประโยชน์จากของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. ศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. สำนักงานวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม; 2537.
- [10] Hadi AA, Mohammad AW, Takriff MS. Determination of optimum sterilization condition based on calculated heat transfer rate for palm oil mill process. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 2016; 11(13): 8475-80.
- [11] Malaysian Palm Oil Board (MPOB). Fresh fruit bunch (FFB) grading manual. Kuala Lumpur; 2003.

- [12] Sukaribin N, Khalid K. Effectiveness of sterilization of palm bunch using microwave technology. *Industrial Crops and Products* 2009; 30(2): 179-83.
- [13] Alimalbari A, Hanifarianty S, Kumar A, Khomphet T, Eksomtramage T, Wae-hayee M. Effects of pressed palm conditions on acceleration of palm drying rate and CPO quality. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 2019; 55(1): 12-9.
- [14] Hanifarianty S, Legwiriyakul A, Alimalbari A, Nuntadusit C, Theppaya T, Wae-Hayee M. The development of rotary drum dryer for palm fruit sterilization. 8th TSME-International Conference on Mechanical Engineering, 2017 December 12-15; TSME-ICoME, Thailand; 2017
- [15] สาวิตรี คำหอม วีรชัย อัจหาญ และ ชาญชัย ทองโสภณ. การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบสายพานในกระบวนการนึ่งปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, 1-3 เมษายน 2552, จังหวัดนครราชสีมา; 2552.
- [16] สิริวิชญ์ ภักดีโชติ อามีน อาลีมัลบารี และ มักราร์ แวนะฮ์. ผลของระยะเวลาที่มีผลต่อ การหลุดร่วงและปริมาณน้ำมันดิบในกระบวนการอบแบบนึ่งโดยตรง. การถ่ายทอดความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 18, 20-21 มีนาคม 2562, จังหวัดกระบี่; 2562.
- [17] Chavalparit O. Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand [PhD Thesis]. Wageningen University; 2006.
- [18] Mahidin MR. Quality improvement in the production of Malaysian palm oil. *Palm Oil Development* 1998; 9: 15–21.
- [19] Sivasothy K. Palm oil milling technology. *Advances in Palm Oil Research* 2000; 1: 745–75.
- [20] Hadi NA, Han NM, May CY, Ngan MA. Dry Heating of Palm Oil Fruits: Effect on Selected Parameters. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 2012; 5(2): 128-31.
- [21] Eaton. Process of sterilizer 2012. [Internet]. Available from: [http://www.novaflow.com.my/wpcontent/themes/webtemp/pdf/ICEPO%202012%20Part3 . pdf](http://www.novaflow.com.my/wpcontent/themes/webtemp/pdf/ICEPO%202012%20Part3.pdf).
- [22] Reese CD. *Industrial Safety and Health for Infrastructure Services*. CRC Press Taylor and Francis Group; 2009.
- [23] Kandiah S, Basiron Y, Suki A, Taha RM,

- Hwa TY, Sulong M. Continuous Sterilization: The New Paradigm for Modernizing Palm Oil Milling - Journal of Oil Palm Research 2006, 144-52.
- [24] Loh TW. Innovative methods in oil processing oil palm industry. In Proceedings of the 1994 PORIM National Palm Oil Milling and Refining Technology Conference, Kuala Lumpur; 1994.
- [25] Ali FS, Shamsudina R, Yunusb R. The effect of storage time of chopped oil palm fruit bunches on the palm oil quality - Agriculture and Agricultural Science Procedia 2014; 2: 165 – 72.
- [26] สมพร พรหมดวง. การออกแบบและพัฒนาเครื่องแยกผลปาล์มน้ำมันออกจากทะลาย. การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12, 17 สิงหาคม 2560, มหาวิทยาลัยรังสิต; 2560.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมสภาพอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไก่ระบบปิดโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

Poultry house climate control using a Fuzzy Logic Controller

ณัฐสุพร ชื่นสุวรรณ¹, กฤษณรัช นิตสิริ², นิยม พินิจการ³, ธนา ราษฎร์ภักดี² และ ชนกันันท์ สุขกำเนิด⁴Nutsuporn Chinsuwan¹, Krisanarach Nitisiri², Niyom Pinitkarn³, Thana Radpukdee²and Chanoknun Sookkumnerd⁴¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹Department of Materials and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 1 April 2020

Revised: 23 July 2020

Accepted: 30 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้พัฒนาตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมระบบทำความเย็นแบบระเหยสำหรับควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ปีก ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีประสิทธิภาพดี และง่ายต่อการนำไปใช้กับระบบที่ซับซ้อน การควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ปีกเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้น ซับซ้อน และยากต่อการควบคุม ดังนั้น เราจึงใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในและความชื้นสัมพัทธ์แบบป้อนกลับ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 2 ตัว สำหรับควบคุมพัดลม และปั้มน้ำ ในการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองใช้อินพุต 4 ตัวและเอาต์พุต 1 ตัว โดยมีค่าคลาดเคลื่อนและการเปลี่ยนแปลง

ค่าคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์เป็นอินพุตของระบบ ถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นตัวแปรทางภาษาด้วย membership function และใช้กฎ IF-THEN ที่สร้างจากความเข้าใจเรื่องเฟสระนาบ เพื่อหาค่าเอาต์พุตของระบบ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการระบายอากาศ และอัตราการสร้างความชื้น ในบทความนี้ สมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอจะเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ผลทดสอบพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอ สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่ในช่วงให้คงที่อยู่ที่ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ และ $\pm 20\%$ ตามลำดับได้ซึ่งดีกว่าตัวควบคุมแบบเดิม สำหรับงานวิจัยถัดไปผู้วิจัยจะพัฒนา membership function ให้มีความละเอียดสูงขึ้นเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ระบบปรับอากาศ ฟาร์มไก่ การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมความชื้น ระบบควบคุมอัตโนมัติ

Abstract

The aim of this paper is developing a Fuzzy Logic Controller (FLC) to control climate with evaporative cooling system in model of poultry house. In recent year, many studys show that FLC has good performance and simple to apply with a complex system and poultry house climate control is nonlinear system which is complex and difficult to control. Thus we apply FLC to control this system. By internal temperature and relative humidity, important index indicating thermal comfort, is feedback signal.

In the design, 2 FLCs used for controlling fans and pump. Both FLCs use the structure of 4 inputs and 1 output. The error and the error derivative of temperature and relative humidity are the input of the system. These are translated to linguistic valuables by the membership function and through fuzzy processes according to If-Then rule which based on phase plane analysis to arrive at single value, and then defuzzification to get value of the change of ventilation rate and moisture production rate.

The maximum and average error is collected to propose FLC comparing with a conventional control system. The result shows that FLC can control temperature in $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ range and relative humidity control in $\pm 20\%$ range. The FLC has better performance than a conventional system. For the future work , to improve relative humidity response the finer membership function should be apply.

Keyword: Evaporative cooling system: Chicken house: Pad-fan cooling: Automatic control system

1. Introduction

In Thailand, the demand for chicken is expected to increase, so suppliers try to improve themselves for competitiveness. Animal welfare is potential for increased productivity and profit in the farm sector [1]. Poultry needs a suitable environment. The heat stress stimulates the central nervous system (CNS), which reduces feed intake, weight gain and carcass quality of poultry [2]. Temperature and relative humidity are essential factors that have to maintain at a comfortable level. Because of hot and dry weather in Thailand, poultry meat production uses an evaporative cooling system for controlling inside climate. The difficulty of controlling is uncertainty from disturbance that is the changing of the external climate. Providing a method for accuracy controlling is essential for animal husbandry.

Fuzzy logic was first introduced by Lotfi A. Zadeh (1973), he proposed the fundamental of fuzzy sets [3-4]. And then Ebrahim Mamdani (1975) introduced the fuzzy interface system to control a steam engine [5]. It involves fuzzification and defuzzification of crisp input variables to derive crisp output variables. Fuzzy interface system had widespread acceptance. Fuzzy control is a popular control technique because of its performance and simplicity. It is much closer to human thinking and natural language [6]. It converts the linguistic control strategy based on

human-like decision making in to an automatic control strategy. Fuzzy Logic Controller (FLC) consists of three stages fuzzification, rules base and defuzzification based on Mamdani fuzzy set [6]. In closed loop control system, the system error and change of error are input variables. FLC assigns these crisp variables in to linguistic variables which are national language words defined by Membership Functions (MFs) [7]. This conversion is fuzzification. And the next stage is the fuzzy rule base which is relation between input and output variable in form of IF-Then. There are many techniques for constructing a fuzzy rule base with the heuristic method [8]. The common technique is the Phase-Plane Trajectory method. King and Mamdani (1977) introduce a useful method for control rule by referring to a closed system trajectory in a phase plane [9]. In last stage, defuzzification, fuzzy outputs are converted to crisp value as control signals. During the past several years, there are many related works of a FLC design for controlling temperature or humidity in building and agricultural usage [10-12]. They concluded that FLC has better control quality occurred.

This study develops the FLC to control evaporative cooling system. The poultry house model in Lopburi province, Central of Thailand from previous work [13] is provided for simulation. The conventional control method is week by week schedule for fans and pumps. We intend to find a simple and optimum method to manage the

operation time of actuators for better controlling temperature and relative humidity than the conventional control which is current used in actual plant. In this study, the fuzzy logic method is applied to get higher accuracy.

2. Materials and Methods

2.1 System definition

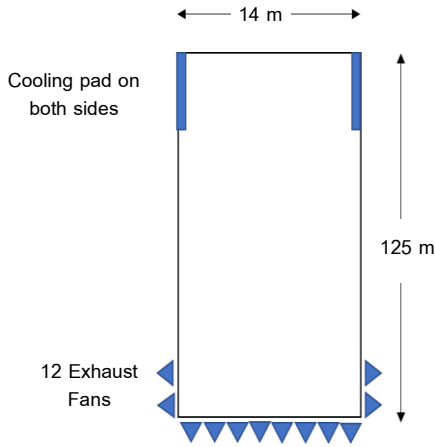


Fig. 1 Elements of the poultry house

Elements of the poultry house are shown in Fig 1. Pad-fan evaporative cooling system is used for controlling the climate in the poultry house. Poultry house case study is in Lopburi, Central of Thailand. A mathematical model of the actual plant for this study is obtained from Uachaba T. et. al., 2016 [13].

In this study, internal temperature (T_{int} in $^{\circ}\text{C}$) and humidity ratio (ω_{int} in $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Dry air}}$) represent the internal climate condition. Dynamics model of the poultry house is described with heat and mass balance equations by:

$$\frac{dT_{int}(t)}{dt} = \frac{N_{an} \times 0.013 \times [0.8 - 1.85 \times 10^{-7} (T_{int} + 10)^4]}{\rho_{air} C_p V_T} + \frac{UA(T_{ext} - T_{int}) - \lambda W_{ev}}{\rho_{air} C_p V_T} - \frac{V_R(T_{ext} - T_{int})}{V_T} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_{int}(t)}{dt} = \frac{N_{an} \times 0.001 \times [0.26 T_{int}^2 - 6.465 T_{int} + 81.6] + W_{ev}}{\rho_{air} V_H} - \frac{V_R(\omega_{ext} - \omega_{int})}{V_H} \quad (2)$$

where T_{ext} is external temperature [$^{\circ}\text{C}$]

ω_{ext} is external humidity ratio

N_{an} is the number of animals

UA is overall heat transfer coefficient [kW/K]

λ is heat vaporization of water [kJ/kg]

ρ_{air} is air density [kg/m^3]

C_p is the specific heat of air [$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$]

V_T is active mixing volume of air inside [m^3]

V_H is the effective volume for humidity [m^3]

V_R is ventilation rate [m^3/s]

W_{ev} is moisture production rate from the evaporative cooling system [kg/s]

V_R and W_{ev} are control signals from fans and pump, respectively.

As these actuators operate without an inverter, signals aren't analogue. The next section is focused on a control technique that handles the nonlinear system with on/off actuator by FLC

2.2 Design of fuzzy logic controller

FLC is a means to convert the linguistic control strategy from human expert knowledge into an automatic control strategy. Its advantage is simplicity, especially when the implemented system is very complicated. It is accessible for dealing with a highly complicated nonlinear system. The methodology of FLC consists of

three processes, fuzzification, rules-based and defuzzification [6].

The simulink model of controlling the poultry house is shown in Fig. 2. There are two FLCs used for controlling fans and pump. Both FLCs have 4 inputs and 1 output. The inputs variables are temperature error (TE), temperature error derivative (TDE), relative humidity error (HE) and relative humidity error derivative (HDE). These inputs variables are transformed into three linguistic variables, N : Negative, Z : Zero and P: Positive. These linguistic variables represent the type of number: negative number, zero number and positive number. The outputs are the change of ventilation rate (DVR in m^3/s^2) and moisture production rate (DWev in kg/s^2) for first and second FLC, respectively. These output variables are transformed into three linguistic variables, same as the input variables. The triangular membership functions of input and output variables of FLCs are shown in Fig. 3.

A total of 36 rules is tabulated in Table 1-4. The first and second FLC rules are tabulated in Table 1-2 and 3-4, respectively. These rules are built for the most essential variable temperature followed by relative humidity. Thus the weight of temperature rules (Table 1,3), 1, is more than the weight of relative humidity rules (Table 2,4), 0.1. Considering the equation (1) and (2) conclude that increasing the ventilation rate generated by the fans decreases the temperature and relative

humidity. Increasing moisture production rate generated by the pump, providing water for the cooling pad, will reduce temperature but increase relative humidity. This knowledge is used to build FLC rules with a understanding of parameter-adjusting based on phase plane [6].

The rule base of Table 1 can be described in IF-THEN form as:

Control rules when the error is negative, so DVR is positive:

IF {TE is N AND TDE is N} THEN DVR is P

IF {TE is N AND TDE is Z} THEN DVR is P

IF {TE is N AND TDE is P} THEN DVR is P

Control rule at equilibrium point, so DVR is unchanged.

IF {TE is Z AND TDE is Z} THEN DVR is Z

Control rules when the error is positive, so DVR is negative:

IF {TE is P AND TDE is P} THEN DVR is N

IF {TE is P AND TDE is N} THEN DVR is N

IF {TE is P AND TDE is Z} THEN DVR is N

Control rule when the error is zero, so DVR is opposite to TDE for reduce the overshoot.

IF {TE is Z AND TDE is P} THEN DVR is N

IF {TE is Z AND TDE is N} THEN DVR is P

The FLC rules in Table 2-4 is built in the same way as Table 1, but be changed follow the relation of input and output variables.

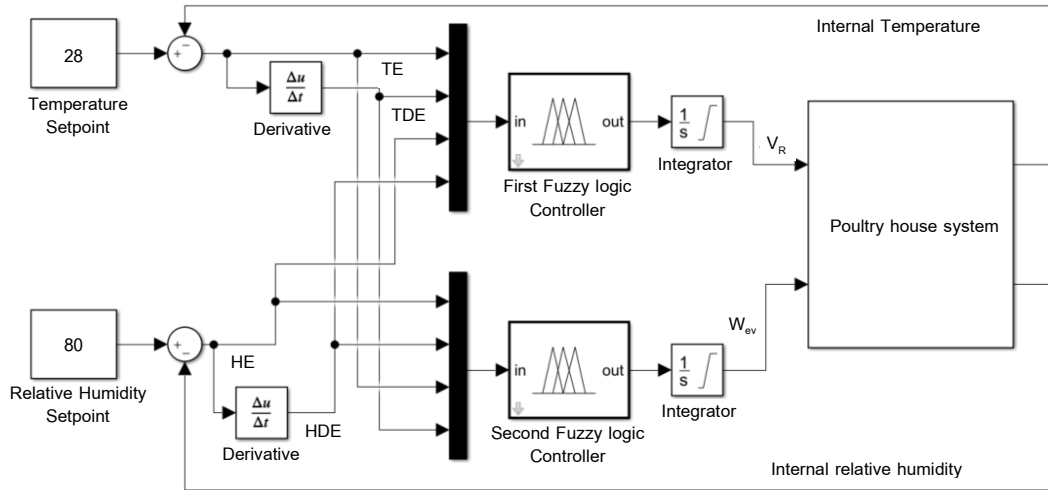


Fig. 2 Simulink model for controlling the climate of poultry house

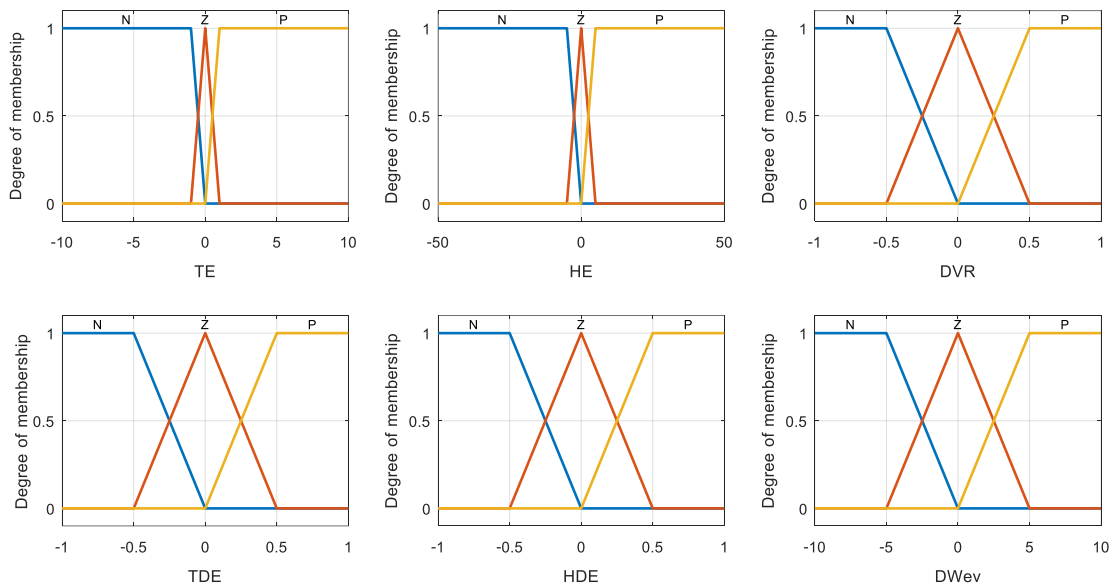


Fig. 3 The membership functions of input and output variables of FLCs

The simulation for climate controlling in the poultry house uses 3-days historical weather data from the chicken house from 16th to 18th August 2019. The parameters of equation 1 and 2 are listed in Table 6. The simulation compares temperature and relative humidity responses between the proposed FLC and the conventional control logic, which is currently used in the plant. Conventional control logic plan for controlling fans and pump are shown in Table 5. The control table is for 8-10 days-age chicken. On/off period for fans and pump are 90/120 s/s and 60/420 s/s, respectively.

Table 1 The fuzzy temperature rules of the first FLC

DVR		TE		
		N	Z	P
TDE	N	P	P	N
	Z	P	Z	N
	P	P	N	N

Table 2 The fuzzy humidity rules of the first FLC

DVR		HE		
		N	Z	P
HDE	N	P	P	N
	Z	P	Z	N
	P	P	N	N

Table 3 The fuzzy temperature rules of the second FLC

Dwev		TE		
		N	Z	P
TDE	N	P	P	N
	Z	P	Z	N
	P	P	N	N

Table 4 The fuzzy humidity rules of the second FLC

Dwev		HE		
		N	Z	P
HDE	N	N	N	P
	Z	N	Z	P
	P	N	P	P

Table 5 Conventional control logic for actuators

Internal Temperature (°C)	Number of Fans	Pump status
<28	4	off
28	5	off
29	6	on
30	7	on
31	9	on
32	12	on

Table 6 Parameter values of the case study

Parameter	Value
N_{an}	19000
λ	2257 kJ/Kg
V_T	4900 m ³
V_H	4900 m ³
ρ_{air}	1.2 kg/m ³
C_p	1.006 kJ/kg·K
U	37 kW/K·m ²
A	1680 m ²
W_{ev}	0.9 kg/s for turn on pump
V_R	5.66 m ³ /s·fan (max 12 fans)

3. Result and discussion

The comparison of temperature and relative humidity responses for the FLC and the conventional control logic is shown in Fig. 4 and 5. From these Figs, outdoor temperature varied from 26 to 37 °C and outdoor relative humidity varied from 45 to 90% with changing outdoor condition FLC maintains temperature and relative humidity in less than ± 1.24 °C and $\pm 20\%$ from the set point 28 °C and 80%.

Table 7 Comparison of average and maximum error

Method	Avg. error	Max. error
Temperature (°C)		
Proposed FLC	0.54	1.24
Conventional system	1.12	2.40
Relative humidity (%)		
Proposed FLC	15.44	20
Conventional system	17.76	20

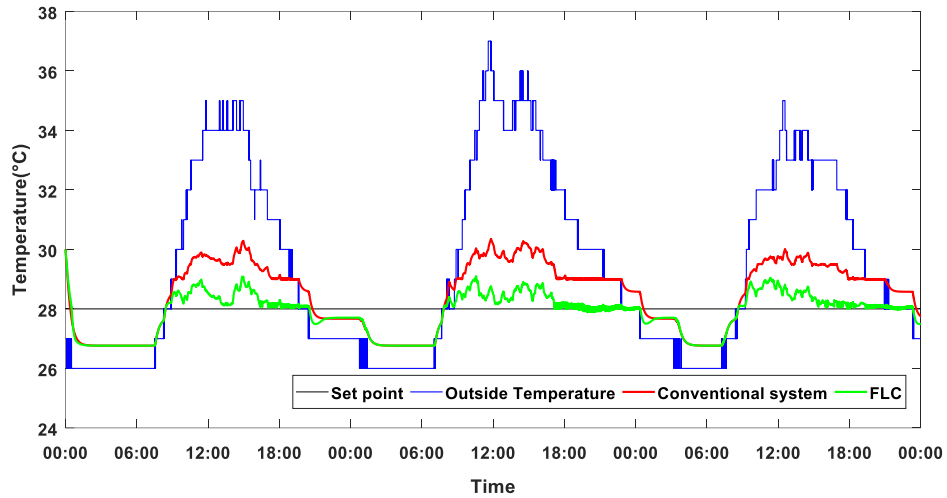


Fig. 4 Temperature curve from setpoint, outside, inside by conventional system and Fuzzy logic controller

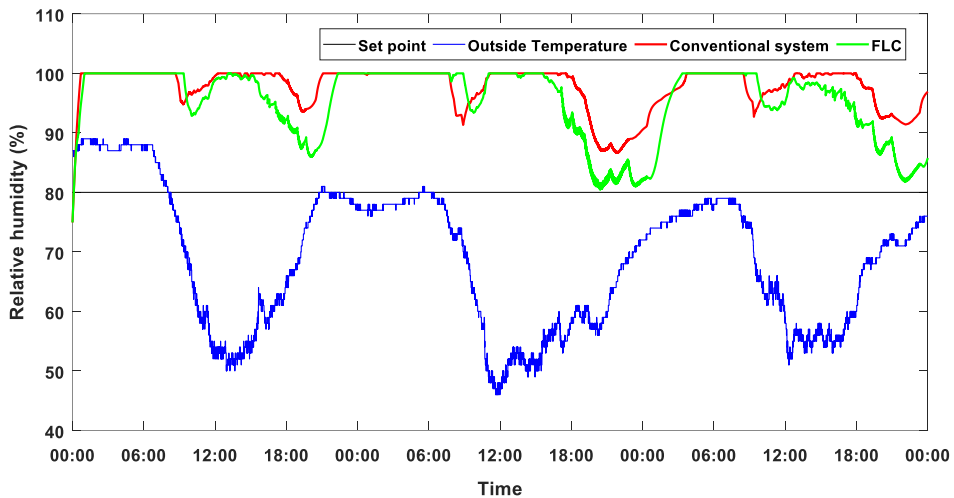


Fig. 5 Relative humidity curve from setpoint, outside, inside by conventional system and Fuzzy logic controller

According to Table 7 FLC has less average error and maximum error in temperature response, while take more 1% average error than the conventional system in relative humidity response. The result indicates that the FLC provides better temperature response, lower error and better performance against

disturbance. A similar result for research on the comparison of fuzzy and on/off controllers for winter season indoor climate management in a model poultry house by Mirzaee-Ghaleh, et al [12] that the fuzzy logic controller has good performance.

The relative humidity response from both control techniques reach a high level (100%) because of poultry and surrounding. This result is consistent with the research of Kamis, et al. [10]

on closed-house chicken ban climate control using a fuzzy inference system that provides slightly high steady state error for relative humidity. We can conclude that this system lacks of controlling internal humidity with the accuracy temperature. In a further study, the finer membership function of FLC may be proposed to improve RH response.

4. Conclusion

The thermal comfort is a potential factor for increase poultry weight gain and carcass quality because heat stress reduces feed consumption and increases the risk of disease and death. For high productivity, suppliers have to control the internal climate of the poultry house. This study simulated controlling internal temperature and relative humidity of a poultry house by Fuzzy logic controller compared with the conventional logic control. The chicken house in the central of Thailand, Lopburi province modeled by Uachaba et al. [13] was provided for simulation experiments. The results shown that the proposed fuzzy logic controller can control internal temperature higher accuracy than the conventional control under the changing of outdoor conditions. The accuracy response of

relative humidity may be improved by a finer membership function.

5. Acknowledgement

The financial support provided by Khon Kaen University Graduate School and Department of Materials and Manufacturing Engineering is gratefully acknowledged.

6. References

- [1] Dawkins MS. Animal welfare and efficient farming: is conflict inevitable?. *Animal Production Science* 2017; 57(2): 201-8.
- [2] He SP, Arowolo MA, Medrano RF, Li S, Yu QF, Chen JY, et al. Impact of heat stress and nutritional interventions on poultry production. *World's Poultry Science Journal* 2018; 74(4): 647-64.
- [3] Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and Control*(1965); 8(3): 338-53.
- [4] Zadeh LA. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 1973; 1: 28-44.
- [5] Mamdani EH, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int J Man Mach Stud* 1975; 7: 1.

- [6] Mamdani EH, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 1975; 7: 1.
- [7] Zadeh LA. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences* 1975; 8(3): 199-249.
- [8] Chen T, Shang C, Su P, Shen Q. Induction of accurate and interpretable fuzzy rules from preliminary crisp representation. *Knowledge-based Systems* 2018; 146: 152-66.
- [9] King PJ, Mamdani EH. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica* 1977; 13(3): 235-42.
- [10] Kamis MS, Abdullah AH, Sudin S, Shukor SAA, Bakar MAA, Mustafa MH. Closed house chicken barn climate control using fuzzy inference system. *The Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering* 2018; 10(1-14): 47-51.
- [11] Kolokotsa D. Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment. *Building and Environment* 2003; 38(12): 1439-50.
- [12] Mirzaee-Ghaleh E, Omid M, Keyhani A, Dalvand MJ. Comparison of fuzzy and on/off controllers for winter season indoor climate management in a model poultry house. *Computers and Electronics in Agriculture* 2015; 110: 187-95.
- [13] Upachaban T, Khongsatit K, Radpukdee T. Mathematical model and simulation study of a closed-poultry house environment. *International Journal of Technology* 2016; 7: 1117-23.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า เพื่อบำบัดน้ำเสียย้อมคราม

Reuse of aluminum electrodes in electrocoagulation process
for indigo dyeing wastewater treatment

ทองพล ประโยชน์มี พนมชัย วีระยุทธศิลป์ และ กัลยกร ขวัญมา *

Songphon Prayochmee, Panomchai Weerayuttil and Kulyakorn Khuanmar *

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

Received: 7 May 2020

Revised: 25 July 2020

Accepted: 30 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการย้อมคราม การทดลองดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมความหนา 0.5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ได้ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า การกำหนดปัจจัยในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า ประกอบด้วย ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร ค่า pH ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่ pH 11 และไม่มีการปรับค่า pH ในการทดลองกับถังปฏิกรณ์ต้นแบบ พบว่า การใช้ซ้ำ 3 ครั้ง ยังคงรักษารูปร่างสีเหลี่ยมของขั้วไฟฟ้าด้านที่มีการละลายคือ แอโนด ไว้เหมือนด้านที่ไม่มีการละลายคือ แคโทด การทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการย้อมครามในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีอินดิโกและสีเหลืองร้อยละ 76.75 และ 76.39 ตามลำดับ สำหรับการใช้ขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดซ้ำ 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายประมาณ 1,426.22 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร หากการใช้ซ้ำของขั้วด้านแอโนดจนละลายหมด มีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: ขั้วอลูมิเนียม การตกตะกอนทางไฟฟ้า น้ำเสียย้อมคราม ถังปฏิกรณ์ต้นแบบ

Abstract

This research aimed to study the reuse of aluminum electrode in electrocoagulation process for wastewater treatment from indigo dyeing process. The experiments were conducted both in laboratory scale and small industry. An aluminum sheet thickness of 0.5 mm was used as electrodes in electrocoagulation process. Moreover, the cost of wastewater treatment was also studied. The conditions for electrocoagulation process were set as follow; electrolysis time of 60 minutes, current density of 300 A/m^2 , and initial pH of 11 or without adjustment when the experiments were conducted in prototype reactor. At the laboratory scale experiments, it was found that 3-times reuse could maintain the rectangular shape of anode electrodes as the shape of cathode. The prototype reactor for wastewater treatment from real indigo dyeing in a small industry, the efficiency of the 9-liters prototype reactor presented COD and color removal of 76.75% and 76.39% respectively. For 3-times reuse of anode electrode, it was costly 1,426.22 bath per cubic meter. Moreover, if the reuse of electrode was repeated until the anode was dissolved completely, the cost of treatment was about 169.59 bath per cubic meter.

Keywords: Aluminum electrode: Electrocoagulation: Indigo dyeing wastewater: Prototype reactor

*ติดต่อ: kulyakorn@kku.ac.th

1. บทนำ

มนุษย์ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ (natural dyes) ตั้งแตยุคโบราณถึงกลางศตวรรษที่ 19 [1] โดยทั่วไปสีย้อมธรรมชาติได้จาก พืช สัตว์ และแร่ธาตุ โดยส่วนใหญ่เป็นสีที่ได้จากพืชเพราะหาได้ง่าย น้ำย้อมจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติจัดได้ว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ หรือ biodegradable organic compounds ต่อมา มีการพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ และการพัฒนาสีสังเคราะห์เพื่อให้ได้ปริมาณมากพอกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น เป็นผลให้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายทั้งต่อสุขภาพของมนุษย์และต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จัดว่าเป็นสารประกอบ

อินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก หรือ non-biodegradable organic compounds [2]

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีความสนใจกลับมาใช้สีย้อมจากธรรมชาติในการย้อมสิ่งทอมากขึ้น จึงได้มีการฟื้นฟูการย้อมผ้าด้วยสีย้อมจากธรรมชาติ ซึ่งจังหวัดสกลนครเป็นอีกแหล่งที่ได้ฟื้นฟูการย้อมสีธรรมชาติโดยใช้สารธรรมชาติจากต้นคราม ผ้าครามจึงถือเป็นอัตลักษณ์และเป็นผลิตภัณฑ์ประจำถิ่นของสกลนคร เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทรงคุณค่าทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคมและวัฒนธรรม ได้รับการยอมรับว่ามีเนื้อสัมผัสเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว โดยมีการจัดตั้งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก ส่วนใหญ่มีการฟอกย้อมตามฤดูกาล สีครามที่ได้จากการสกัดจากต้นครามยังมีคุณสมบัติยึดติดกับโครงสร้างของใยผ้าฝ้าย

ได้ดีเนื่องจากสีครามเป็นสีย้อมประเภทแคว้ตาย (vat dye) [3] จึงทำให้ผ้าย้อมครามมีคุณสมบัติสีติดทนเป็นพิเศษ ผ้าย้อมครามได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทั้งที่คงเอกลักษณ์ท้องถิ่นและปรับปรุงตามยุคสมัย อาทิเช่น เสื้อผ้า ผ้าพันคอและกระเป๋า การย้อมผ้าครามแม้จะเป็นกลุ่มวิสาหกิจขนาดเล็กมีน้ำเสียปริมาณไม่มาก และเป็นน้ำเสียประเภทสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ แต่หากน้ำเสียเหล่านี้มีการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพก่อน สีครามที่ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในน้ำ บดบังการส่องผ่านของแสงในแหล่งน้ำ จึงจำเป็นจะต้องบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไม่นิยมใช้วิธีการทางชีววิทยาเพราะประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ดังนั้นมีหลายงานวิจัยใช้เทคนิคทางกายภาพและทางเคมี ตั้งแต่เทคนิคที่ไม่ซับซ้อน เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี [4] การดูดซับ [5, 6] และเทคนิคที่ซับซ้อนขึ้น เช่น Advance Oxidation Processes (AOPs) [7]

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (electrocoagulation) เป็นการตกตะกอนโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับการตกตะกอน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ใช้งานได้ง่าย และเป็นการลดการใช้สารเคมี [8] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถนำมาใช้งานได้ซ้ำหลายครั้งและขนาดของระบบบำบัดมีขนาดเล็กใช้พื้นที่น้อย ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้ามีงานวิจัยหลายเรื่องที่ศึกษาการ

บำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการนี้ โดยศึกษาการบำบัดในน้ำเสียจากชุมชน [9 - 11] และบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น การฟอกหนัง [12, 13] เยื่อกระดาษ [14] รวมถึงการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [15 - 18] ด้วยเช่นกัน

ปัจจุบันไม่มีกฎหมายควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับครัวเรือน แต่หากต้องการยกระดับผลิตภัณฑ์ให้เป็นสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือ Green Products จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียให้ได้ระดับที่ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคนิคการบำบัดน้ำเสียที่มีกระบวนการไม่ซับซ้อนและสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมย้อมครามขนาดเล็ก เนื่องจากค่าใช้จ่ายของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า สารเคมี ขั้วไฟฟ้า (electrode) มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ไม่สูง กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามของอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับครัวเรือน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความสามารถในการใช้งานขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมคราม โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2. วิธีการวิจัย

การศึกษาศักยภาพในการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้า โดยใช้แผ่นอลูมิเนียม เพื่อบำบัดน้ำเสียย้อมครามด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า ในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) และทดลองใช้จริงด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ (prototype) ในระดับ

อุตสาหกรรมขนาดเล็ก เนื่องจากอลูมิเนียมเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า ขั้วแอโนดจะละลายและเปลี่ยนรูปเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตกตะกอนร่วม และขั้วแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ช่วยให้เกิดการลอยตัวของตะกอนขึ้นไปที่ผิวน้ำ โดยการทดลองแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.1 การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

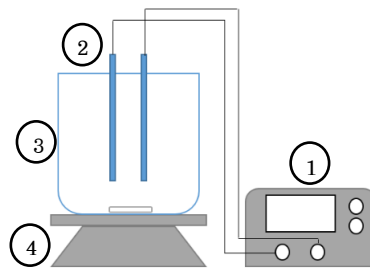
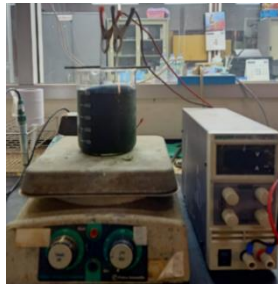
- 1) ถึงปฏิกรณ์สำหรับทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ปฏิกิริยาปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- 2) ขั้วไฟฟ้าใช้แผ่นอลูมิเนียมความหนา 0.5 มิลลิเมตร เกรด 1100
- 3) ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมมีขนาด 50×150 มิลลิเมตร ความลึกใช้งาน 75 มิลลิเมตร
- 4) จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 มิลลิเมตร
- 5) แหล่งพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น KPS3010D สามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 30 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 แอมป์แปร์ ขณะทดลองมีการควบคุมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก
- 6) กำหนดปัจจัยในการทดลอง คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร และค่า pH ใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงที่ pH 11

7) หลังบำบัดตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำส่วนที่แยกตะกอนออกแล้วไปกรองด้วยทรายกรองขนาด 0.4-0.6 มิลลิเมตร ความหนาชั้นทรายกรอง 0.6-0.75 เมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสี

8) ศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำจากน้ำหนักของขั้วแอโนดที่เปลี่ยนแปลง ลักษณะการกัดกร่อนของผิวขั้ว พร้อมลักษณะและสัญญาณของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) การติดตั้งชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 1

2.2 การทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

- 1) ถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ ขนาดใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (กว้าง 200 x ยาว 300 x ลึก 300 มิลลิเมตร) ปริมาตรใช้งาน 9 ลิตร กันถังมีความดัน 45 องศา
- 2) ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมมีขนาด 90×300 มิลลิเมตร ความลึกใช้งาน 150 มิลลิเมตร
- 3) จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar electrodes in series connections (MP- S) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 5 คู่ ระยะห่าง 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (1) DC power supply
(2) Aluminum electrodes (3) EC reactor และ (4) Stirrer Plate

4) แหล่งพลังงานใช้สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแบบคงค่าแรงดัน (Switching Power supply) ค่าศักย์ไฟฟ้า 24 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมป์แปร์

5) เติมสารช่วยตกตะกอน ด้วย Cationic Polymers ปริมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

6) กำหนดปัจจัยในการทดลอง คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร และใช้น้ำเสียจริงจากการย้อมคราม ไม่ปรับ pH ของน้ำเสีย

7) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีไครีและค่าสี ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การทดลองใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการย้อมคราม จากวิสาหกิจชุมชนผ้าฝ้ายมัดย้อม บ้านสบเปือย อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร โดยทดลองในสถานที่จริงจำนวน 3 ครั้ง

ทั้งนี้การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งในถังปฏิกรณ์จะทำให้ฟล็อกแตกและตัวอย่างน้ำที่จะนำไปวิเคราะห์จะมีปริมาณตะกอนปนมาด้วย จึงมีการใช้การกรองด้วยทรายช่วยในการแยกตะกอนในกระบวนการทดลอง โดยการติดตั้งชุดการทดลอง ดังรูปที่ 2

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

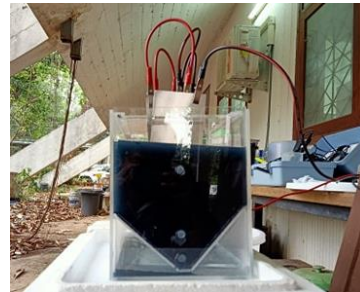
การศึกษาการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตร เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ กำหนดเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร โดยปรับค่า pH ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงคือ pH เท่ากับ 11 ผลการทดลองแสดงได้ ดังนี้

3.1 ตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการย้อมผ้าคราม จากการล้างสีที่ย้อมที่ไม่ติดกับเส้นใย น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีสีน้ำเงินเข้มอมเขียว โดยค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าครามจัดได้ว่าเป็นน้ำเสียประเภทสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable organic compounds) น้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าคราม พารามิเตอร์หลักที่ก่อปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมคือสีครามที่คงเหลือในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมคราม

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการล้างผ้าภายหลังการซักหม้อมคราม

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์
pH	10.5-12.5
COD (mg/L)	2,500–3,100
Color (ADMI)	800-930
Total suspended solids (mg/L)	3,200-3,800
Total Dissolved solids (mg/L)	3,100-5,200
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,870-3,900



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดการทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ

3.2 การกักกรองของขี้ไฟฟ้า

การกักกรองของขี้ไฟฟ้าจากการใช้งานถึงครั้งที่ 6 พบว่า ขี้แอมโมเนียเกิดการกักกรองที่ผิวหน้าตั้งแต่ใช้งานครั้งแรก โดยเริ่มแสดงให้เห็นการกักกรองจากบริเวณขอบด้านข้างและเห็นการเปลี่ยนแปลงจากการกักกรองที่ผิวของขี้ไฟฟ้าทำให้ขี้ไฟฟ้ามีลักษณะเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนในการใช้ซ้ำครั้งที่ 3 และถูกกักกรองประมาณร้อยละ 35 ในครั้งที่ 6 ดังรูปที่ 3

ลักษณะและสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขี้ไฟฟ้าออลูมิเนียมจากภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงให้เห็นลักษณะสัณฐานของพื้นผิวขี้ไฟฟ้าออลูมิเนียมก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4 ก่อนการทดลองขี้ไฟฟ้า

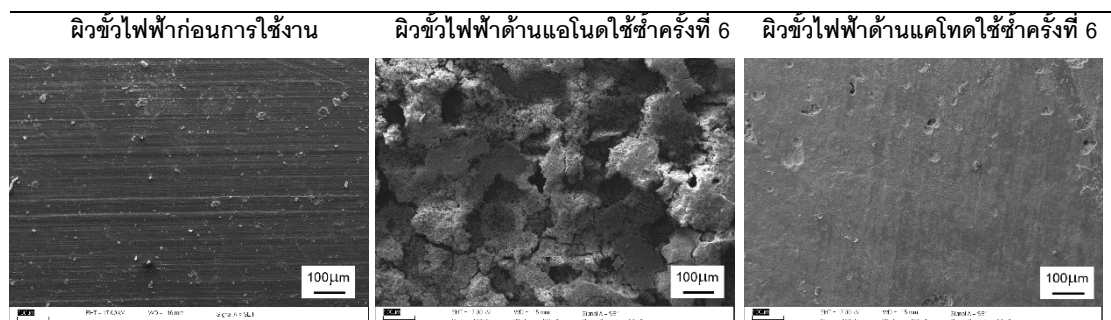
มีลักษณะสัณฐานและมีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีรอยแตกร้าวบนพื้นผิว ขี้แอมโมเนียเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พื้นผิวของขี้ ขี้ออลูมิเนียมด้านแอมโมเนียจะละลายอยู่ใน species ของออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ ช่วยในการรวมตะกอน ซึ่งลักษณะสัณฐานของพื้นผิวขี้แอมโมเนียหลังการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง ขี้จะเกิดรอยแตกเป็นหลุมลึกที่เกิดจากการละลายของพื้นผิวโดยเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่น ส่วนด้านขี้แคโทดขี้มีการกักกรองเพียงเล็กน้อย เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่พื้นผิวของขี้แคโทดทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน จึงไม่มีการกักกรองในส่วนของขี้ออลูมิเนียมด้านขี้แคโทด

3.3 น้ำหนักที่ลดลงของขั้วไฟฟ้า

การทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ หลังการทดลองแต่ละครั้งน้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรดจะลดลงเนื่องจากเกิดการละลายไอออนของโลหะจากขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด น้ำหนักของขั้วแอโนดจะลดลงหลังการทดลองในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 2 ซึ่งขั้วไฟฟ้าความหนา 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยในการลดลงของน้ำหนักขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด เท่ากับ 0.44 กรัม หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 5.77 ตามลำดับ

ขั้วไฟฟ้า	ก่อน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
ขั้วแอโนด							
ขั้วแคโทด							

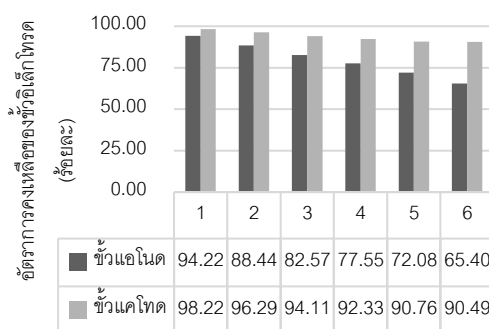
รูปที่ 3 ลักษณะการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ก่อนและหลังการใช้งาน



รูปที่ 4 ลักษณะและสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (SEM กำลังขยาย 100X)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า
 ขั้วไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี มี
 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีเฉลี่ยร้อยละ
 67.98 และ 77.41 ตามลำดับ และโดยค่าเบี่ยงเบน
 มาตรฐาน (Standard deviation) มีค่าเท่ากับ 2.02

และ 1.54 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีโอดีขึ้นอยู่กับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารที่ตกตะกอนยาก เช่น คอลลอยด์ สำหรับค่าสีมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เนื่องจากสีในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปสาร Indigotin ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียอย่างมาก



รูปที่ 5 สัดส่วนน้ำหนักที่ลดลงของข้าวไฟฟ้าภายหลังการใช้งาน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สัดส่วนน้ำหนักที่ลดลงของข้าวไฟฟ้าภายหลังการใช้งาน

ประเภทข้าวอิเล็กทรอนิกส์		จำนวนการใช้งาน (ครั้งที่)						
		ก่อน	1	2	3	4	5	6
ข้าวแอนด์	น้ำหนัก (กรัม)	7.55	7.12	6.68	6.24	5.86	5.44	4.94
	ร้อยละ	100.0	94.22	88.44	82.57	77.55	72.08	65.40
ข้าวแคโทด	น้ำหนัก (กรัม)	7.47	7.34	7.19	7.03	6.90	6.78	6.76
	ร้อยละ	100	98.22	96.29	94.11	92.33	90.76	90.49

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และสี ในระดับห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพจากการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้า (ร้อยละ)							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	เฉลี่ย	SD
ซีโอดี	68.08	68.49	69.83	66.47	70.15	64.86	67.98	2.02
สี	74.86	76.63	79.37	77.50	78.27	77.85	77.41	1.54

อย่างไรก็ตาม สารคอลลอยด์ในน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีประจุลบ การเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี สามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยสร้างตะกอนด้วย Cationic Polymer ที่มีประจุเป็นบวก จึงจะช่วยลดค่าซีโอดีได้ ดังนั้น การทดลองใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก จะทดลองด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบขนาด 9 ลิตร ร่วมกับการเติมสาร Cationic Polymer เพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอน

3.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียย้อมครามในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

การบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบได้ทดลอง ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดสกลนคร โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ค่า pH ของน้ำเสียจริงที่ไม่ได้ปรับสภาพ สาร Cationic Polymer 5 มิลลิกรัม/ลิตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 300 แอมป์แปร์/ตารางเมตร เวลา 60 นาที จัดวางขั้วแบบ Monopolar electrodes in series connections (MP- S) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ด้วยขั้วไฟฟ้าเดียวกัน หลังการทดลองในแต่ละครั้งจะระบายน้ำทิ้งลงถังกรองทราย แล้วเติมน้ำเสียลงถังปฏิกรณ์เพื่อทดลองซ้ำโดยไม่ล้างถังและขั้วไฟฟ้า ผลของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีจากการทดลอง ดังตารางที่ 4

ประสิทธิภาพจากการทดลอง 3 ซ้ำ สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 76.59 74.63 และ 79.02 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ร้อยละ 77.31 76.74 และ 75.12 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ดังนั้น วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในกระบวนการรวมตะกอนไม่ควรมีการกวน

ระบบในขั้นตอนการรวมตะกอน เพราะจะทำให้ฟล็อกแตกและตกตะกอนได้ช้าลง

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และสี ในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

การใช้ซ้ำ (ครั้งที่)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	
	ซีโอดี	สี
1	76.59	77.31
2	74.63	76.74
3	79.02	75.12

เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ก่อนและหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังการบำบัด พบว่า ค่า pH ลดลงอยู่ในช่วง 9.18-9.28 ค่าซีโอดีลดลงเหลือ 607-734 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าสีลดลงเหลือ 196-215 ADMI และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 32-33 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน จะเห็นว่า ค่า pH และซีโอดี ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ยังมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามน้ำล้างผ้าครามเป็นน้ำที่เกิดจากการเตรียมตามวิธีการทางธรรมชาติไม่มีการเติมสารเคมีใด ๆ ความสกปรกในรูปซีโอดีนั้นเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ โดย ปริมาณน้ำทิ้งขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและลักษณะเฉพาะของการย้อมครามในแต่ละพื้นที่ซึ่งมีความแตกต่างกัน ส่วนค่าสีภายหลังการบำบัดแล้วมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน อุณหภูมิภายหลังการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน โดยผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังตารางที่ 5

3.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

พิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายสิ้นเปลืองที่เกิดขึ้น ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าสารเคมีและค่าหัวไฟฟ้า โดยดำเนินการบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ มีรายละเอียด ดังนี้

1) ค่าพลังงานไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ต้นแบบ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า 24 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้า 20 แอมป์แปร์ หรือมีกำลังไฟฟ้า 480 วัตต์ ใช้บำบัดน้ำเสีย 3 ครั้งรวม 3 ชั่วโมง สามารถคำนวณค่าไฟฟ้าได้ 1.44 กิโลวัตต์หรือยูนิต์ เมื่อกำหนดเป็นค่าไฟฟ้าตามประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย จะคำนวณค่าไฟฟ้า รวมค่า Ft และภาษี สำหรับการบำบัดน้ำเสีย 3 ครั้งเท่ากับ 3.4404 บาท หรือ 127.80 บาท/ลูกบาศก์เมตร

2) ค่าสารช่วยสร้างตะกอน

การทดลองได้เติมสารช่วยสร้างตะกอน ประเภท Cationic Polymer ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อครั้ง หรือทดลอง 3 ครั้งใช้ 135 มิลลิกรัม โดย Cationic Polymer 1 กิโลกรัม ราคา 500 บาท ดังนั้น

การบำบัดน้ำเสีย 3 ครั้ง 27 ลิตร สามารถคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายได้เท่ากับ 0.0675 บาท หรือ 2.50 บาท/ลูกบาศก์เมตร

3) ค่าหัวไฟฟ้าอลูมิเนียม

ค่าหัวไฟฟ้าพิจารณาจากการใช้งาน ซึ่งไม่สามารถใช้งานส่วนปลายหัวที่เชื่อมกับสะพานไฟ เกิดเป็นของเสียที่ใช้งานไม่ได้ แต่นับเป็นค่าใช้จ่าย โดยคิดเฉพาะหัวแอดโนดที่เป็นหัวสิ้นเปลือง ส่วนหัวแคโทดสามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้ง โดยหัวไฟฟ้าอลูมิเนียมมีราคาประมาณ 7.00 บาทต่อหัว การทดลองใช้หัวแอดโนด 5 แผ่น ราคา 35.00 บาท สามารถคิดค่าใช้จ่ายได้ 2 กรณี (1) กรณีใช้งาน 3 ชั่วโมง บำบัดน้ำเสียรวม 27 ลิตร ค่าหัวไฟฟ้า 35.00 บาท หรือ 1,296.30 บาท/ลูกบาศก์เมตร (2) กรณีการใช้งานหัวส่วนที่จุ่มลงในน้ำเสียจนหัวละลายหมด เมื่อพิจารณาน้ำหนักหัวไฟฟ้าก่อนทดลองมีน้ำหนักประมาณ 16.25 กรัม หลังการทดลองมีน้ำหนักลดลง 0.163 กรัมต่อครั้ง ดังนั้น สามารถใช้งานหัวได้ 99 ครั้ง หรือบำบัดน้ำเสียรวม 891 ลิตร ค่าหัวไฟฟ้าอลูมิเนียม 35.00 บาท หรือ 39.29 บาท/ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ก่อนและหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานฯ

พารามิเตอร์	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	มาตรฐาน*
พีเอช	10.47-10.80	9.18-9.28	5.5-9.0
ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	2,893	607-734	400
สี (ADMI)	864	196-215	300
อุณหภูมิ (°C)	30	32-33	40

* หมายเหตุ : มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมจำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้ายหรือเส้นใย

การบำบัดน้ำเสียจากการย้อมครามด้วย
ถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทาง
เศรษฐศาสตร์จาก 3 ส่วน ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่า
สารเคมีและค่าขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม กรณีใช้งาน 3 ชั่วโมง
มีค่าใช้จ่าย 1,426.60 บาท/ลูกบาศก์เมตร หากการใช้
งานขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด ส่วนที่จุ่มลงในน้ำเสียจน
ขั้วแอโนดละลายหมด มีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59
บาท/ลูกบาศก์เมตร

4. สรุปผลการทดลอง

การใช้งานขั้วขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในระดับ
ห้องปฏิบัติการ พบว่า ใช้งานได้ดีที่สุด 3 ครั้ง โดย
น้ำหนักขั้วลดลงร้อยละ 17.43 จากนั้นลักษณะขั้วจะ
เปลี่ยนรูปจากการกัดกร่อนอย่างชัดเจน โดยขั้วยัง
สามารถใช้งานได้แต่พื้นที่ผิวจะลดลง ส่วนขั้วแคโทด
สามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้งเนื่องจากมีการกัดกร่อน
น้อย

การทดลองใช้งานในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
ด้วยถึงปฏิกรณ์ต้นแบบ และเติมสาร Cationic
Polymer เพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตะกอน มี
ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 76.75
และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีเฉลี่ยร้อยละ 76.39
เปรียบเทียบค่าหลังการบำบัดกับค่ามาตรฐานการ
ระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ค่า pH และค่า
ซีไอดี มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนค่าสีมีค่าเป็นไป
ตามเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เน้น
การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กระดับ
ครัวเรือน หากมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน
น่าจะเพียงพอที่ไม่เปลี่ยนแปลงสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พิจารณาเฉพาะ
ค่าใช้จ่ายสิ้นเปลือง ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่า
ขั้วไฟฟ้าและค่าสารเคมี การบำบัดน้ำเสียด้วย
ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมซ้ำ 3 ครั้ง บำบัดน้ำเสียรวม 27 ลิตร
มีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 38.51 บาท หรือ 1,426.22 บาท/
ลูกบาศก์เมตร และหากการใช้ซ้ำของขั้วแอโนดจนละลาย
หมด จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 169.59 บาท/ลูกบาศก์
เมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและ
เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณในการ
ศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Erkan G, Sengül K, Kaya S. Dyeing of white and indigo dyed cotton fabrics with Mimosa tenuiflora extract. Journal of Saudi Chemical Society. 2014; 18(2): 139–48.
- [2] Lellis B, Fávaro- Polonio CZ, Pamphile JA, Polonio JC. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. Biotechnology Research and Innovation. 2019; 3(2): 275–90.
- [3] Secula MS, Crezescu I, Petrescu S. An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. Desalination. 2011; 277(1–3): 227–35.

- [4] Albuquerque LF, Salgueiro AA, Melo JLDS, Chiavone-Filho O. Coagulation of indigo blue present in dyeing wastewater using a residual bittern. *Separation and Purification Technology*. 2013; 104: 246–9.
- [5] Hu Y, Chen X, Liu Z, Wang G, Liao S. Activated carbon doped with biogenic manganese oxides for the removal of indigo carmine. *Journal of Environmental Management*. 2016; 166: 512–8.
- [6] Zhu X, Bao L, Wei Y, Ma J, Kong Y. Removal of toxic indigo blue with integrated biomaterials of sodium carboxymethyl cellulose and chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016; 91: 409–15.
- [7] Naciri N, et al. Effective photocatalytic decolorization of indigo carmine dye in Moroccan natural phosphate-TiO₂ aqueous suspensions. *Opt Mater (Amst)* 2016; 52: 38–43.
- [8] Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(5): 1663–79.
- [9] Anfruns-Estrada E, Bruguera-Casamada C, Salvadó H, Brillas E, Sirés I, Araujo RM. Inactivation of microbiota from urban wastewater by single and sequential electrocoagulation and electro-Fenton treatments. *Water Research*. 2017; 126: 450–9.
- [10] Elazzouzi M, Haboubi K, Elyoubi MS. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017; 117: 614–26.
- [11] Elazzouzi M, El Kasmi A, Haboubi K, Elyoubi MS. A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. *Process Saf Environ Prot*. 2018; 116: 506–15.
- [12] Deghles A, Kurt U. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2016; 104: 43–50.
- [13] Moradi M, Moussavi G. Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/ VUV photoreactor: Parametric and mechanistic evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 358 (April 2018): 1038–46.

- [14] Camcioglu S, Ozyurt B, Hapoglu H. Effect of process control on optimization of pulp and paper mill wastewater treatment by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection* 2017; 111: 300–19.
- [15] Khorram AG, Fallah N. Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018; 6(1): 635–42.
- [16] Hendaoui K, Ayari F, Rayana I Ben, Amar R Ben, Darragi F, Trabelsi- Ayadi M. Real indigo dyeing effluent decontamination using continuous electrocoagulation cell: Study and optimization using Response Surface Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 116: 578–89.
- [17] Zazou H, Afanga H, Akhouairi S, Ouchtak H, Addi AA, Akbour RA, et al. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*. 2019; 28(February): 214–21.
- [18] Bilinska L, Blus K, Gmurek M, Ledakowicz S. Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 358(October 2018): 992–1001.

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 10 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

ชื่อบทความภาษาไทย Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)
ชื่อบทความภาษาอังกฤษ 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

1. บทนำ

บทความนี้แสดงตัวอย่างแนวทางการเตรียมต้นฉบับของคุณเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น และโปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Window ความยาวของต้นฉบับจะต้องไม่เกิน 10 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 ให้ขีดทาบกรอบซ้าย แต่ละหัวข้อย่อยจะเว้น 1 บรรทัด (ปรับให้

บรรทัดมีขนาดเท่ากับอักษรขนาด 8 จุด) ส่วนหัวข้อย่อยให้เขียนตามตัวอย่าง ดังรายการต่อไปนี้

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 จัดชื่อบทความชิดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

ชื่อผู้แต่งให้พิมพ์ใต้ชื่อบทความ จัดชื่อผู้แต่งให้อยู่ชิดทางกรอบซ้าย ใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด ในกรณีมีผู้ทำวิจัยหลายท่านจากหน่วยงานต่างกันให้กำกับด้วยก^{1), 2)} ไว้หลังชื่อ สำหรับ Corresponding ให้ใส่เครื่องหมาย *กำกับไว้ท้ายชื่อ สถานที่ติดต่อ ให้พิมพ์ที่อยู่หน่วยงาน รหัสไปรษณีย์ ประเทศ พิมพ์ใต้ชื่อผู้แต่งใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด จัดชิดทางกรอบซ้าย

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้น พิมพ์ย่อหน้าใหม่ ให้พิมพ์บทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพิมพ์บทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ หรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและ สมการจะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ขีดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

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

7.2. รูปภาพและตาราง

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

รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็น รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับได้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2, ... พิมพ์หมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูป รูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความจะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

ในกรณีที่เป็นการอ้างอิงจะต้องมีคำบรรยายกำกับ
ตารางไว้เหนือตารางโดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ
จาก 1, 2, 3,... ตารางจะต้องกำหนดให้ชิดขอบซ้าย
ของเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัดก่อนคำบรรยาย
ตารางและหลังตาราง ตามตัวอย่างตารางดังนี้

ตารางที่ 1
ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

Redox moiety	Diluent	Method	k_0 (s ⁻¹)
R1	D1	ILIT	3.4×10^4
		CV	3.3×10^4
R2	D2	ILIT	6.0×10^4

ตารางที่ 2
ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

X	a_r / m_r	$2\zeta_r \omega_r$
0.1	2.7470e+01	2.7483e+01
0.5	3.5352e+01	3.5360e+01

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็น
คล้ายตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น
เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัย
บางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจ
นำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมี
ความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการ
ตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่ง
บทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุน
สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมี
ความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการ
ตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่ง
บทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์
(Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

ทั้งนี้เพื่อความสมบูรณ์และความน่าเชื่อถือของ
บทความท่านควรใช้เอกสารอ้างอิงจากวารสารที่อยู่ใน
ฐาน TCI (Thai Journal Citation Index Centre) ที่
สามารถตรวจสอบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และ
ควรใช้การอ้างอิงจากรายงานผลการวิจัย เอกสาร
ประกอบการประชุม และหรือวิทยานิพนธ์เท่าที่จำเป็น

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของ
บทความ ใช้ระบบตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับ
ของเอกสารที่มีการอ้างถึงในเนื้อหาและหมายเลขที่
อ้างถึงในเนื้อเรื่อนั้นจะต้องตรงกับหมายเลขที่มีการ
กำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ตัวเลขอา
รบิกในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิงใน
บทความ เช่น [1] หรือ [2-4, 8, 10] หมายถึงอ้างถึง
ลำดับผู้แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดย
เรียงลำดับจากหมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่
สุดท้าย ตามการอ้างอิงการเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง ท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และ
ใส่อ้างอิงในท้ายเรื่องเฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหา
บทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น

1. การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

[2] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. การออกแบบชิ้นส่วน
เครื่องจักรกล 1. เม็ดทรายพริ้นติ้ง:
กรุงเทพฯ; 2540.

2. การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

[3] Ramazan B, et al. 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(1): 321-8.

[4] สุกัญญา หงส์ทอง และ สมใจ ขจรชีพพันธุ์
งาม. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว
ด้วยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลภาวะเหนือ
วิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 2553;
18 (3): 20-6.

3. 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. การลดปริมาณสี
ย้อมผ้าไหมโดยการประยุกต์ใช้หลักการ
เทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ
ขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น:
มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2553.

4. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุม วิชาการ

[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 พัชร หอวิจิตร และ
สุนนา ราษฎร์ภักดี. การจัดการการใช้น้ำ
สำหรับกระบวนการย้อม ในอุตสาหกรรม
ผลิตพรมตามแนวทางเทคโนโลยีสะอาด.
การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่
14, 27-29 พฤษภาคม 2558, จังหวัด
เชียงใหม่; 2558.

5. 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/](http://www.nap.edu/books/0309074029/html/)
- [10] ทานตะวัน. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ วันที่
16 กรกฎาคม 2550]. เข้าถึงได้จาก:
[http://www.doae.go.th/html.detail.sunfl
ower.t2.gif](http://www.doae.go.th/html.detail.sunflower.t2.gif)