

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol. 7 No. 2 July - December 2021

Research Article

Comparison of catalytic acid pretreatment for improving enzymatic hydrolysis of cellulose in corn stover to bioethanol 87

Pranpreeya Upajak Torpong Kreetachat and Saksit Imman

The Investigation of Primary Physical Characteristics of Filter Cake in Sugar Processing Regarding to Biomass Pellets Conversion 105

Phakamat Noisuwan Kantapong Khaeso Peeranat Ansuree and Kittipong Laloon

Optimization on Tensile and Flexural Properties of Egg Shell-TiO₂ Reinforced Fly Ash/Epoxy Composite using Response Surface Methodology 120

Wisarat Chaochaiyaphum and Varinrumpai Seithtanabutara

Doping of Eucalyptus Wood Residue based-Activated Carbon with Monoethanolamine for Enhancement of CO₂ Adsorption 133

Nuttapong Bootthanu and Chaiphan Prakaraphan

The Number of Rice Seed Scoop Effecting the Seed Sowing Rate for Semi-Automatic Paddy Field Sowing Machine 148

Nattadon Pannucharoenwong Phadungsak Rattanadecho

Thodsatam Lasopha and Suwipong Hemathulin

Accumulation of Total Ammonia Nitrogen, Unionized Ammonia and Nitrate in the Recirculating Aquaculture System 159

Surapong Chawsuanngam Thana Radpukdee Panomchai Weerayuttil and Kulyakorn Khuanmar



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

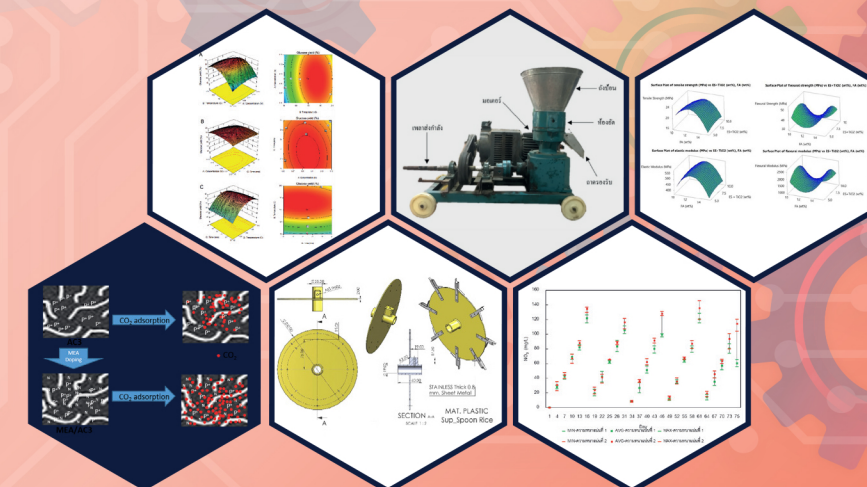
FEAT JOURNAL

วารสาร

วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี

การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol. 7 No. 2 July - Decemver 2021

ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2564

ISSN 2408-0985

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

กองบรรณาธิการ

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

บรรณาธิการ

ฝ่ายจัดการวารสาร

สำนักงาน

รศ.ดร. รัชพล สันติวรการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น

นางสาวปญญาศา ไชยบท

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

กำหนดเผยแพร่

พิมพ์ที่

ISSN

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

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

: 2408 - 0985

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

Editorial Board

Assoc.Prof.Dr.Chaiyan Chansiri	Department of Agricultral Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Khanita Khamwilaisak	Department of Chemical Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Kulyakorn Khunmar	Department of Environmental Engineering	Khon Kaen University
Dr.Watis Leelapatra	Department of Computer Engineering	Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Thana Radpukdee	Department of Industrial Engineering	Khon Kaen University
Asst.Prof.Dr.Weerachai Arjharn	School of Mechanical Engineering	Suranaree University of Technology
Asst.Prof.Dr.Niyom Kamlangdee	School of Science	Walailak University
Asst.Prof.Kumron Pitaks	Department of Industrial Engineering	Prine of Songkla University
Asst.Prof.Dr.Wipada Sanongraj	Department of Environmental Engineering	Ubon Ratchathani University
Asst.Prof.Dr.Sirivit Taechajedcadarungsri	Department of Mechanical Engineering	Ubon Ratchathani University
Asst.Prof.Rerkchai Srivoramas	Department of Civil Engineering	Ubon Ratchathani University
Assoc.Prof.Dr.Juckamas Laohavanich	Department of Mechanical Engineering	Maharakham University
Asst.Prof.Dr.Rampai Gaensakoo	Department of Biotechnology	Maharakham University

Editor-in-chief Assoc.Prof.Dr.Ratchaphon Suntivarakorn Khon Kaen University

Production team Ms.Bhunyisa Chaiyabot

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

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

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หรือ FEAT JOURNAL (Farm Engineering and Automation Technology Journal) เป็นวารสารทางวิชาการ ซึ่งบทความทุกเรื่องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น (peer-reviewed journal) แบบ double blinded วารสารรับผลงานทางวิชาการที่เป็นต้นฉบับ (original) ในด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ เพื่อเผยแพร่เทคโนโลยีที่มีคุณค่าแก่นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป โดยวารสารเคร่งครัดในเรื่องผลงานวิชาการที่เป็นต้นฉบับ 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 7 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2564 ฉบับนี้เป็นปีที่ 7 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 6 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

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

รองศาสตราจารย์ ดร.รัชพล สันติวรากร

บรรณาธิการ

ratchaphon@kku.ac.th

24 ธันวาคม 2564

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 และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมา เสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง
6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ภายหลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว
7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์กับวารสารทุกบทความ โดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความใน กระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
2. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้เขียนใน ด้านเชื้อชาติเพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้เขียน
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียนหรือผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิง ธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
4. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประโยชน์ของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือ แทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียน
5. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

บทความวิจัย

- การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยากรดในการปรับสภาพต้นข้าวโพด
เพื่อพัฒนาการย่อยเซลลูโลสโดยเอนไซม์ ในการผลิตไบโอเอทานอล 87
ปรานปรียา อุปลักร์ ต่อดวงค์ กรรฐาชาติ และ ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน
- การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกากหม้อกรอง
ในกระบวนการผลิตน้ำตาลสำหรับขึ้นรูปเป็นชีวมวลอัดเม็ด 105
ผกามาศ น้อยสุวรรณ กันตพงษ์ แซ่โล่ พิรณัฐ อันสุรีย์ และ กิตติพงษ์ ลาคุณ
- สภาวะที่เหมาะสมของคุณสมบัติเชิงกลวัสดุประกอบอีพอกซี
เติมแต่งด้วยเถ้าเบาขยะชุมชน ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ 120
วิศรุต เชาวชัยภูมิ และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธัญบุตร
- การเจือจางกัมมันต์เศษไม้ยูคาลิปตัสด้วยโมโนเอทานอลามีน
เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 133
อรอนงค์ ศรีขาว และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธัญบุตร
- จำนวนของขั้นตอนดักเมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีผลต่ออัตราการหยอดเมล็ด
ของเครื่องหยอดข้าวนาแบบกึ่งอัตโนมัติ 148
*ณัฐดนัย พรณูเจริญวงษ์ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ธัญธรรมษ์ ลาโสภา
และ สุวิพงษ์ เหมะภูลิน*
- การสะสมของแอมโมเนียทั้งหมด แอมโมเนียอิสระ และไนเตรท
ในบ่อเลี้ยงปลาระบบน้ำหมุนเวียน 159
สุรพงษ์ ชาวสวนงาม ธนา ราษฎร์ภักดิ์ พนมชัย วีระยุทธศิลป์ และ กัลยกร ขวัญมา

Research Article

- Comparison of catalytic acid pretreatment for improving enzymatic hydrolysis of cellulose in corn stover to bioethanol 87

Pranpreeya Upajak Torpong Kreetachat and Saksit Imman

- The Investigation of Primary Physical Characteristics of Filter Cake in Sugar Processing Regarding to Biomass Pellets Conversion 105

*Phakamat Noisuwan Kantapong Khaeso Peeranat Ansuree
and Kittipong Laloon*

- Optimization on Tensile and Flexural Properties of Egg Shell-TiO₂ Reinforced Fly Ash/Epoxy Composite using Response Surface Methodology 120

Wisarut Chaochaiyaphum and Varinrumpai Seithtanabutara

- Doping of Eucalyptus Wood Residue based-Activated Carbon with Monoethanolamine for Enhancement of CO₂ Adsorption 133

Onanong Srikhaow and Varinrumpai Seithtanabutara

- The Number of Rice Seed Scoop Effecting the Seed Sowing Rate for Semi-Automatic Paddy Field Sowing Machine 148

*Nattadon Pannuchaoenwong Phadungsak Rattanadecho
Thodsatam Lasopha and Suwipong Hemathulin*

- Accumulation of Total Ammonia Nitrogen, Unionized Ammonia and Nitrate in the Recirculating Aquaculture System 159

*Surapong Chawsuanngam Thana Radpukdee Panomchai Weerayutsil
and Kulyakorn Khuanmar*



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยากรดในการปรับสภาพต้นข้าวโพด เพื่อพัฒนาการย่อย เซลลูโลสโดยเอนไซม์ในการผลิตไบโอเอทานอล

Comparison of catalytic acid pretreatment for improving enzymatic hydrolysis of
cellulose in corn stover to bioethanol

ปราณปรียา อุปจักร¹⁾ ต๋อพงค์ กรีธาชาติ²⁾ และ ศักดิ์สิทธิ์ อิมแมน^{2)*}

Pranpreeya Upajak¹ Torpong Kreetachat and Saksit Imman^{1*}

¹⁾ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา ตำบลแม่กา อำเภอเมือง
จังหวัดพะเยา 56000

²⁾ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา ตำบลแม่กา อำเภอเมือง
จังหวัดพะเยา 56000

¹⁾ Master Student in Environmental Engineering, School of Energy and Environment, University of Phayao, Tambon
Maeka, Amphur Muang Phayao 56000, Thailand.

²⁾ Lecturer in Environmental Engineering, School of Energy and Environment, University of Phayao, Tambon Maeka,
Amphur Muang Phayao 56000, Thailand.

Received: 29 June 2020

Revised: 11 October 2021

Accepted: 12 October 2021

Available online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่ต่างกัน ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิก หาสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยากรดในการปรับสภาพต้นข้าวโพด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์ ในการผลิตไบโอเอทานอล ด้วยวิธีออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยโปรแกรม Design-Expert 10.0.1 วางแผนการทดลองด้วยวิธี Central Composite ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นกรด (0.05, 0.1 และ 0.15 โมลาร์) เวลาในการทำปฏิกิริยา (15, 30 และ 45 นาที) และอุณหภูมิ (90, 120, 150, 180 และ 210 องศาเซลเซียส) ต้นข้าวโพดหลังผ่านการปรับสภาพจะนำมาวิเคราะห์ทางกายภาพ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค

(XRD), สมบัติรูพรุน (BET) และ หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค (FTIR) หลังจากทำการปรับสภาพแล้วนำไปย่อยด้วย เอนไซม์ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกลูโคส (Glucose yield) เพื่อการผลิตไบโอเอทานอล ผล การศึกษา พบว่า การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นข้าวโพด สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้นมุ่งเน้นไปที่การผลิตน้ำตาล กลูโคสสูงสุดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ และเกิดสารยับยั้งในของเหลวหลังจากปรับสภาพต่ำ สภาวะที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตกลูโคส 91.34% จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของต้นข้าวโพดและการละลายของเฮมิ เซลลูโลส 99.39% เกิดสารยับยั้งในกระบวนการปรับสภาพต่ำ

คำสำคัญ: ต้นข้าวโพด การปรับสภาพด้วยสารละลายกรด การย่อยด้วยเอนไซม์ ตัวเร่งปฏิกิริยากรด

Abstract

The Central Composite based Response Surface Methodology (RSM) (Design-Expert 10.0.1) was used to optimize acid catalyzed pretreatment of corn stover. The experimental of pretreatment was conducted under the acid concentration of 0.05 - 0.15 M using sulfuric acid, formic acid and phosphoric acid as homogeneous promoters. The reaction time of 15 - 45 min were selected. The reaction temperature of 90 - 210°C was selected all the works. After pretreatment, enzymatic hydrolysis was also hydrolyzed the pretreated solid to evaluate the optimal pretreatment conditions for maximizing sugar production. The results showed that pretreatment with 0.1M sulfuric acid at 180°C for 30 min was found to be the optimal condition for pretreatment of corn stover. The optimal condition was focused on the highest sugar production from enzymatic hydrolysis with low inhibitory by-product detected in the aqueous phase after pretreatment. The optimum condition showed 88.93% reducing sugar and 89.26 glucose yield from enzymatic hydrolysis of pretreated corn stover. Hemicellulose solubilization of 85.08% was removed under the optimal condition. Scanning electron microscopy revealed disruption of the intact biomass structure allowing increasing enzyme's accessibility to the cellulose microfibrils which showed higher crystallinity index compared to the native biomass as shown by x-ray diffraction with a marked increase in surface area as revealed by BET measurement. The work provides an insight into effects of acid pretreatment on modification of physicochemical properties of corn stover and an efficient approach for its processing in biorefinery industry.

Keywords: Corn stover: Acid pretreatment: Enzymatic hydrolysis: Homogeneous catalyst

1. บทนำ

เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญและเป็นแหล่งพลังงานหลักทั่วโลก การเพิ่มขึ้นของประชากร และอุตสาหกรรมที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุของความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมและการขนส่ง ส่งผลมีความต้องการการใช้น้ำมันในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเฉพาะภาคการขนส่ง มีการใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.9 เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2562 [1] ดังนั้นการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในระบบขนส่ง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดการใช้น้ำมันฟอสซิล ลดปริมาณก๊าซ CO_2 ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ และเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน [2]

ในปัจจุบันไบโอเอทานอลถือเป็นทางเลือกที่สะอาดและสามารถผลิตได้จากชีวมวลหลายประเภท โดยเฉพาะวัตถุดิบประเภท Lignocellulose เช่น เศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร (ต้นข้าวโพด ฟางข้าว อ้อย ชานอ้อย ฯลฯ) เศษซากไม้ (เศษไม้ ขี้เลื่อย ใบไม้ จากป่า) และขยะชุมชน ดังนั้น การใช้ชีวมวลเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอเอทานอล ถือเป็นทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย และหากสามารถพัฒนาองค์ความรู้ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนวัตถุดิบเหล่านี้เป็นไบโอเอทานอล จะสามารถช่วยประเทศชาติในการลดอัตราการนำเข้าเชื้อเพลิงรวมทั้ง

ลดปัญหามลพิษทางอากาศจากการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การเปลี่ยนชีวมวลเป็นไบโอเอทานอลต้องผ่านขั้นตอนดังนี้ (1) การลดขนาดเชิงกล (2) ปรับสภาพ (3) การย่อยด้วยเอนไซม์ (4) การหมักและ (5) การกลั่น กระบวนการปรับสภาพชีวมวลนั้นมุ่งเน้นการสลายโครงสร้างที่เป็นผลึกของชีวมวล สลายเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพื่อให้เอนไซม์เข้าไปทำลายเส้นใยเซลลูโลส และย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลกลูโคส จากนั้นน้ำตาลกลูโคสจะถูกนำไปหมักเป็นไบโอเอทานอล ในขั้นตอนการปรับสภาพหรือการย่อยด้วยเอนไซม์จะต้องได้เซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีสารยับยั้งต่ำ

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ คือการนำต้นข้าวโพดมาผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดต่างชนิดกัน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการแยกองค์ประกอบต้นข้าวโพด เพื่อให้ได้เซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาณสารยับยั้งต่ำ เพื่อเพิ่มการผลิตน้ำตาลกลูโคสให้ได้มากที่สุด

2. วิธีการวิจัย

2.1. การเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอเอทานอลในการศึกษานี้ คือ ต้นข้าวโพด จากเกษตรกรหมู่บ้านผาคับ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน โดยนำต้นข้าวโพดมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อนและบดให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องบดชีวมวล (Retsch SM2000, Hann, Germany) แล้วนำมาแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 1, 0.625 และ 0.25 มิลลิเมตร แล้วนำไปหาองค์ประกอบทางเคมี

ตามมาตรฐาน NREL [3] ต้นข้าวโพดที่นำมาทดลองมี เซลลูโลส 31.62% เฮมิเซลลูโลส 28.75% ลิกนิน 18.44% และ เถ้า 2.45%

2.2. การหาค่าประกอบต้นข้าวโพด

2.2.1 เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

วิเคราะห์หาน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (กลูโคส ไสโลสและอาราบินอส) ในส่วนที่เป็นของเหลวหลังการปรับสภาพ ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ในขั้นตอนแรกนำส่วนที่เป็นของเหลวมาทำให้เป็นกลางด้วย CaCO_3 และกรองโดยใช้ไซริงค์ฟิลเตอร์สำหรับ HPLC ขนาด 0.2 ไมครอนเมตร วิเคราะห์ HPLC (LDC Model 4100, Shimadzu, Kyoto, Japan) โดยใช้ คอลัมน์ Aminex HPX-87 H (Bio-Rad, Hercules, CA, USA) และ 5 mM H_2SO_4 เป็นโมบายเฟส อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตร/นาที มาตรฐานน้ำตาลใช้กลูโคส ไสโลส และอะราบินอสเป็นมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ด้วย HPLC [4]

2.2.2 ลิกนิน

หาค่าประกอบและปริมาณลิกนินที่ละลายน้ำและลิกนินที่ไม่ละลายน้ำ โดยวิธี Klason lignin ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์ของ NREL [3]

2.3 การปรับสภาพด้วยตัวทำละลายกรด

การปรับสภาพทำปฏิกิริยาใน Reactor ขนาด 600 มิลลิลิตร (Parr Reactor 4560, Parr instrument, Moline, IL, USA) อัตราส่วนต้นข้าวโพด 1 กรัม ต่อกรด 15 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นกรด 0.05, 0.1 และ 0.15 โมลาร์ (M) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15, 30 และ 45 นาที และอุณหภูมิ 90, 120, 150, 180 และ 210 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดฟอสฟอริก และอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไปใน

เครื่องปฏิกรณ์ ปรับความดันเริ่มต้นที่ 20 บาร์ กวนที่ 100 รอบต่อนาที เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยานำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 (Whatman หมายเลข 4) ส่วนที่เป็นของแข็งนำไปอบแห้งอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปทำการทดลองขั้นต่อไป ส่วนของเหลวถูกเก็บรวบรวมเพื่อการวิเคราะห์หาน้ำตาลและสารยับยั้ง โดยเครื่อง HPLC

2.4 การย่อยด้วยเอนไซม์

ศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของเอนไซม์ หลังการปรับสภาพของต้นข้าวโพดโดยใช้เอนไซม์ เซลลูเลส (Cellic Ctec2) เพื่อศึกษาการผลิตน้ำตาล กลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์ในปฏิกิริยาการย่อยด้วยเอนไซม์มีปริมาตรรวม 1 มล. ประกอบด้วย ต้นข้าวโพดผ่านการปรับสภาพ 5% (w/v) เอนไซม์ Cellic Ctec2 (Novozymes A/S, Bagsvaerd, เดนมาร์ก) 25 FPU/g โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ (Sodium citrate buffer) 50 mM และโซเดียมเอไซด์ (Sodium azide) 1% บ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หมุน 30 รอบต่อนาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ในการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยใช้วิธีการ 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) [5] วิเคราะห์ปริมาณของน้ำตาลที่ได้หลังการย่อยด้วยเอนไซม์โดยเครื่อง HOLC (รุ่น LDC 4100, Shimadzu, Kyoto, Japan) คอลัมน์ Aminex HPX-87 H (Bio-Rad, Hercules, CA, USA) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 5 mM เป็นโมบายเฟส ที่อัตราการไหล 0.5 mL/min ปริมาณกลูโคส คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของกลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากเซลลูโลสที่มี

อยู่ในต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ (0.9 เป็นปัจจัยการแปลงกลูโคสเป็นเซลลูโลสเทียบเท่า) (สมการที่ 1)

$$\text{ปริมาณกลูโคส (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักกลูโคส} \times 0.9}{\text{น้ำหนักเซลลูโลส}} \times 100 \quad (1)$$

2.5 การวิเคราะห์ทางกายภาพของต้นข้าวโพดหลังปรับสภาพ

2.5.1 Scanning electron microscopy (SEM)

วิเคราะห์เส้นใยต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) JSM-6301F (JSM-6301F, JEOL ญี่ปุ่น) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะนำไปเคลือบด้วยทองเพื่อให้เห็นพื้นผิวได้ชัดเจนขึ้น ในการส่องวิเคราะห์ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนขนาด 20 kV

2.5.2 X-ray diffraction (XRD)

วิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพโดยวิธี X-ray diffraction (XRD) โดยใช้เครื่อง X'Pert PRO diffractometer (PANalytical, Almelo, The Netherlands) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะสแกนในช่วง $2\theta = 10^\circ - 30^\circ$ ด้วยขนาด 0.02° ที่ 500 kV และ 30 mA คำนวณค่าความเป็นผลึกตามสมการ 2 [6]

$$\text{CrI (\%)} = \left(\frac{I_{002} - I_{\text{amorphous}}}{I_{002}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ที่ I_{002} คือความเข้มกระจุกกระจายที่จุดสูงสุดของเซลลูโลส ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่รอบๆ ที่ $002 = 22.4$ และ $I_{\text{amorphous}}$ คือความเข้มที่กระจุกกระจายของส่วนสัณฐานที่ประเมินว่าการเลี้ยวเบนความเข้มต่ำสุด

ระหว่างระนาบหลักและระนาบรอง (ระนาบ 001 และ 002) ที่ $2\theta = 18.0$

2.5.3 Fourier transform Infrared (FTIR)

วิเคราะห์หาพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลของเซลลูโลสในต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพโดยวิธี FT-IR ด้วยเครื่อง Perkin-Elmer System 2000 (PerkinElmer, Waltham, MA, USA) โดยเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี KBr pellet ตั้งค่าความละเอียดการวัดไว้ที่ 4 cm^{-1} ความเร็ว 0.6329 cm/s ช่วงสเปกตรัมอินฟราเรด $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับที่ได้กราฟกับมาตรฐานเซลลูโลส

2.5.4 สมบัติรูพรุน (BET)

วิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size diameter) พื้นที่ผิวของผงตัวอย่าง (Surface area) ปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) ของต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพโดยใช้วิธีการของ Brunauer-Emmett และ Teller (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (TriStar II 3020, Micromeritics Co., USA)

2.6 การหมักเอทานอล โดยวิธี Simultaneous saccharification and fermentation (SSF)

การหมักแบบ SSF ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร (Biostat® b2, B. Braun (Thailand), Bangkok, Thailand) โดยในการหมักมีปริมาตรรวม 1.2 ลิตร ซึ่งในการหมักประกอบด้วย แอมโมเนียมซัลเฟต $5 \text{ g/L } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.025 g/L , สารสกัดจากยีสต์ 1.0 g/L , pH 4.8 และ ต้นข้าวโพด

ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่เหมาะสม 6.25% (w/v) นำไปหนึ่งเพื่อฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที

ทำการฟรีการย่อยด้วยเอนไซม์ Cellic Ctec2 ความเข้มข้น 25 FPU / g บ่มที่ 50 องศาเซลเซียส รอบการกวน 500 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพาะเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5339 บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในอาหารเลี้ยงเชื้อ YPD ซีดเชื้อยีสต์ปริมาตร 10% (v/v) ผสมลงในการย่อย Cellic Ctec2 ส่วนผสมการหมักจะบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสควบคุมค่า pH ให้อยู่ที่ 4.8 โดย กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ทำการหมักระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยกวนผสมอย่างต่อเนื่องที่ 300 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างเป็นระยะๆ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นจากการหมัก ปริมาณกลูโคส และไซโลส โดยเครื่อง HPLC คอลัมน์ Aminex HPX-87H (Bio-Rad, Hercules, CA, USA)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 องค์ประกอบของต้นข้าวโพด

ส่วนประกอบของต้นข้าวโพดที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่า มีเซลลูโลส $31.62\% \pm 0.53\%$, เฮมิเซลลูโลส $28.75 \pm 0.48\%$ ลิกนิน $18.44\% \pm 0.62\%$ เถ้า $2.45 \pm 0.38\%$ และ สารอื่นๆ $18.74 \pm 0.25\%$ คาร์โบไฮเดรต มีสัดส่วนประมาณ 60.37% (ในรูปของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยไซโลสประมาณ 95% และอะราบินอสประมาณ 5%

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central composite เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยกรดซัลฟูริก

Run No.	ความเข้มข้นกรด (M)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	Glucose yield (%)
1	0.05	90	15	49.81
2	0.1	150	30	86.05
3	0.15	90	45	53.03
4	0.15	150	30	81.15
5	0.05	210	15	75.57
6	0.15	210	15	75.97
7	0.05	210	45	73.18
8	0.1	90	30	59.53
9	0.1	210	30	79.17
10	0.1	150	30	86.05
11	0.15	90	15	55.79
12	0.05	150	30	79.19
13	0.1	150	45	83.93
14	0.1	150	30	86.05
15	0.1	150	30	86.05

3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก

การปรับสภาพเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญในกระบวนการเปลี่ยนวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นไบโอเอทานอล แต่เนื่องจากในกระบวนการมีค่าใช้จ่ายสูงและสิ้นเปลืองพลังงาน [7] การศึกษาจำนวนมากได้เน้นถึงความสำคัญของการพัฒนากระบวนการประหยัดพลังงาน โดยใช้สารเคมีในปริมาณที่น้อย อุณหภูมิต่ำ หรือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลงในการปรับสภาพสารละลายกรดเจือทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะ glycosidic ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกส่วนของเซลลูโลสและการแตกของเฮมิเซลลูโลส [8] เป้าหมายหลักของการปรับสภาพคือลดความเป็นผลึก

ของชีวมวล และเพิ่มการย่อยได้ของเอนไซม์ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนากระบวนการปรับสภาพ ไม่เพียงแต่การแตกของเฮมิเซลลูโลสและการกำจัด ลิกนินเท่านั้น แต่ยังรวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นใน กระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ด้วย [7] ในการศึกษา นี้ ได้นำวิธีแบบพื้นผิวตอบสนอง หรือ RSM โดย โปรแกรม Design-Expert 10.0.1 มาใช้เพื่อออกแบบ การทดลอง ปรับพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ปริมาณกลูโคสสูงสุดหลังจากการย่อยด้วย เอนไซม์ การออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 1 การทดลองปรับสภาพจากการออกแบบด้วยโปรแกรม ได้ 15 การทดลอง ส่วนประกอบของน้ำตาลและ สารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว

และอัตราการลดลงของของแข็งหลังปรับสภาพ แสดง ในตารางที่ 2 สารประกอบอื่นๆ ที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 หมายถึงสารยับยั้งและสารประกอบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นใน ขั้นตอนการปรับสภาพ

ในการปรับสภาพมีความเข้มข้นของไซโลสสูงสุด 2.02 กรัมต่อลิตร และอะราบินอสสูงสุด 0.11 กรัมต่อ ลิตร ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 0.05% M ระยะเวลา 45 นาที อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรด อุณหภูมิ และระยะเวลาใน การปรับสภาพ เพิ่มปัจจัยเหล่านี้ ยังเกิดสารยับยั้งมาก ขึ้น ความเข้มข้นของกรดมีผลต่ออัตราการละลายเฮมิ เซลลูโลสออกจากต้นข้าวโพดและอัตราการลดลงของ ของแข็งหลังปรับสภาพอย่างมาก

ตารางที่ 2 องค์ประกอบที่เป็นของแข็งและของเหลวหลังจากปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกของต้นข้าวโพด

Run No.	Liquid phase (hydrolysate)								Solid phase ^a		
	Glucose (g/L)	Xylose (g/L)	Arabinose (g/L)	Acetic acid (g/L)	Furfural (g/L)	HMF (g/L)	Formic acid (g/L)	Lactic acid (g/L)	Cellulose (g)	Hemicellulose (g)	%pulp
1	0.15	0.30	0.02	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	29.55	24.36	87.98
2	0.22	1.27	0.07	0.83	0.36	0.01	0.11	0.03	28.56	10.59	70.19
3	0.19	0.61	0.03	0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	28.96	19.98	81.57
4	0.25	1.42	0.07	0.23	0.05	0.00	0.03	0.01	28.22	8.52	67.31
5	0.27	1.79	0.09	0.74	0.36	0.03	0.10	0.03	27.95	3.16	60.18
6	0.38	0.36	0.02	0.88	0.46	0.05	0.09	0.03	26.53	0	50.39
7	0.32	2.02	0.11	1.55	1.26	0.14	0.16	0.03	27.31	0	51.47
8	0.16	0.42	0.02	1.85	0.88	0.06	0.13	0.03	29.35	22.74	85.62
9	0.32	2.00	0.11	1.01	0.71	0.07	0.10	0.04	27.24	0.16	52.41
10	0.22	1.27	0.07	0.83	0.36	0.01	0.11	0.03	28.56	10.59	70.19
11	0.16	0.46	0.02	1.28	0.68	0.06	0.08	0.01	29.38	22.12	85.08
12	0.21	0.72	0.04	1.53	0.66	0.05	0.16	0.03	28.73	18.48	79.88
13	0.28	1.43	0.08	0.07	0.10	0.00	0.05	0.02	27.74	8.38	64.79
14	0.21	0.72	0.04	0.83	0.36	0.01	0.11	0.03	28.73	18.48	79.88
15	0.21	0.72	0.04	0.83	0.36	0.01	0.11	0.03	28.73	18.48	79.88

เมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.05 M เป็น 0.15 M ทำการปรับสภาพที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการผลิตของของแข็งหลังปรับสภาพเพิ่มขึ้นจาก 33.51% เป็น 42.48% แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกรดที่สูงขึ้น อาจทำลายโครงสร้างของต้นข้าวโพด ลดความเป็นผลึก และมีการย่อยน้ำตาลให้เป็นสารประกอบอื่นๆ หรือสลายยังในการปรับสภาพด้วยกรด [9]

ค่าออกแบบการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่า ANOVA สำหรับพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสมการกำลังสอง ดังแสดงในตารางที่ 3 รูปแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายผลการทดลองจะขึ้นอยู่กับผลกระทบของทั้งสามปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด ระยะเวลาในการปรับสภาพ และอุณหภูมิ พารามิเตอร์ สำหรับความสัมพันธ์และปัจจัยกำลังสอง (สมการที่ 3) ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 สำหรับ Glucose yield ที่ได้เป็น 0.9960 ส่วนค่า R^2 ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง 0.9713 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 จากผลการทดลองคือ 0.9923

สมการกำลังสองของปัจจัยทั้งสาม ที่เกิดได้จากการออกแบบการทดลองสามารถใช้ในการคาดการณ์เกี่ยวกับการตอบสนองสำหรับระดับที่กำหนดของแต่ละปัจจัย สมการสุดท้ายจากปัจจัยทั้งสามดังแสดงในสมการที่ 3

Glucose yield (%) =

$$\begin{aligned} & - 84.06 + 528.80A + 1.57B \\ & + 0.8620C - 0.4996AB \\ & - 0.5650AC + 1.20BC \\ & - 1981.27 A^2 - 4.38 B^2 - 9.77 C^2 \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ A คือ ความเข้มข้นของกรด
B คือ อุณหภูมิ
C คือ ระยะเวลาในการปรับสภาพ

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ตารางความแปรปรวนสำหรับรูปแบบสมการกำลังสองของการตอบสนองพื้นผิว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	3240.65	9	360.07	273.76	0.0000
A-Con	2.84	1	2.84	2.16	0.1724
B-Temp	1058.22	1	1058.22	804.56	0.0000
C-Time	8.32	1	8.32	6.32	0.0307
AB	17.97	1	17.97	13.66	0.0041
AC	11.02	1	11.02	8.38	0.0160
BC	9.35	1	9.35	7.11	0.0236
A ²	67.47	1	67.47	51.30	0.0000
B ²	684.18	1	684.18	520.18	0.0000
C ²	13.29	1	13.29	10.10	0.0098
Residual	13.15	10	1.32		
Cor Total	3253.80	14			

Std. Dev. = 1.15 PRESS = 93.27 Mean = 74.22

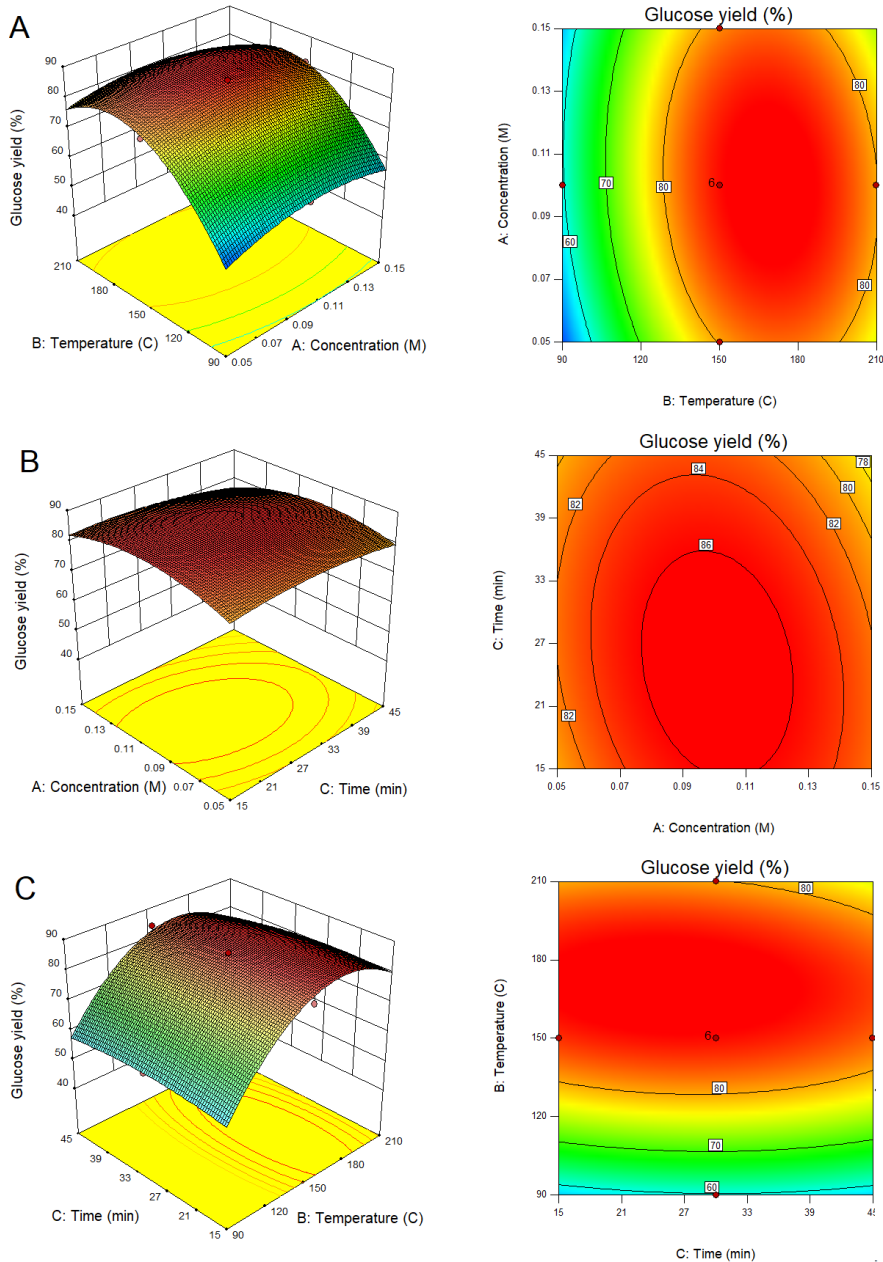
R-Sq = 99.60% R-Sq(pred) = 97.13%

R-Sq(adj) = 99.23%

โดยปกติแล้ว อัตราส่วนความแปรปรวน ค่า F-value จะมีค่าที่สูง การคาดการณ์ผลการทดลองจะมีนัยสำคัญ และค่า p-value ที่มากกว่า 0.05 หรือ $p < 0.05$ บ่งชี้ว่าเงื่อนไขของแบบจำลองมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นกว่า 95% หรือปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการทดลอง ในการออกแบบการทดลอง ตารางที่ 3 ค่า F-value ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 273.76 หมายถึง แบบจำลองเป็นไปอย่างมีนัยสำคัญ ค่า p-value ของความเข้มข้นของกรด ซึ่งมีค่า 0.1724 แสดงว่าปัจจัยความเข้มข้นกรดมีผลต่อการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของการผลิตน้ำตาล ในการทดลองนี้

รูปที่ 1 แสดงพื้นผิวการตอบสนองสามมิติแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ในการปรับสภาพ ต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของ

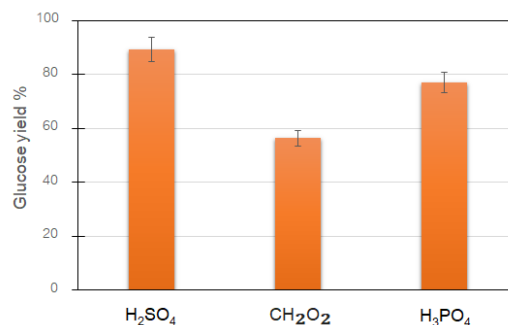
การปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยกรดซัลฟูริก มีผลต่อ ปฏิกริยาการย่อยด้วยเอนไซม์ เพื่อการผลิตกลูโคส (Glucose yield %) ของแต่ละปัจจัย



รูปที่ 1 พื้นผิวการตอบสนองสามมิติ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก อุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อ Glucose yield; A ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นกรด ที่เวลา 30 นาที, B ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรด และเวลา ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส, C ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นกรด 0.1 M

เพื่อให้ได้การตอบสนองสูงสุด ในรูปที่ 1A ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟริกต่ำ (0.25 M) และอุณหภูมิต่ำ (90 องศาเซลเซียส) Glucose yield จากการย่อยด้วยเอนไซม์อยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดซัลฟริกเป็น 0.05 M เวลา 30 นาที และอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ได้ Glucose yield จากการย่อยด้วยเอนไซม์สูงถึง 89.26% การเพิ่มความเข้มข้นกรดอุณหภูมิ และระยะเวลาในการปรับสภาพ สามารถเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสในการย่อยด้วยเอนไซม์ได้ [8] การเพิ่มความเข้มข้นกรดซัลฟริกจาก 0.25 เป็น 0.50 M ที่ระยะเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำให้ Glucose yield เพิ่มขึ้นจาก 79.19% เป็น 84.61% ของปริมาณกลูโคสตามทฤษฎี [8,10] แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.50 เป็น 0.75 M ทำให้ปริมาณกลูโคสลดลง อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของกรดสูงเกินไป และอุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณของแข็ง (solid recovery) ลดลง และน้ำตาลเปลี่ยนรูปเกิดเป็นสารยับยั้งได้ [10,11] รูปที่ 1B อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการปรับสภาพ เพื่อการผลิตกลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์ ที่อุณหภูมิต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการปรับสภาพต่ำ (15 นาที) การผลิตน้ำตาลกลูโคสอยู่ในระดับต่ำ (Glucose yield 49.81% - 55.79%) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด (210 องศาเซลเซียส) และเวลาการปรับสภาพนาน (45 นาที) การผลิตน้ำตาลกลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้น (69.39% - 76.72%) รูปที่ 1C อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและเวลาในการปรับสภาพ เพื่อการผลิตกลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์ ที่ความเข้มข้น 0.50 M อุณหภูมิ 180 องศา

เซลเซียส และทุกช่วงเวลา (15-45 นาที) การผลิตกลูโคสอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง (Glucose yield 77.14% - 89.26%)



รูปที่ 2 Glucose yield จากการปรับสภาพด้วยกรดของต้นข้าวโพดที่ความเข้มข้นกรด 0.1 M อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที

3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยากรดปฏิกิริยากรด H₂SO₄, CH₂O₂ และ H₃PO₄ ต่อการปรับสภาพต้นข้าวโพด

เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่ดีที่สุดของกรด ทั้ง 3 ชนิด จากสภาวะที่เหมาะสมของกรดซัลฟริก ที่ความเข้มข้นกรด 0.50 M อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 30 นาที มาเปรียบเทียบกับกรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิก ในการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์ จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ชัดว่า กรดซัลฟริกสามารถผลิตกลูโคสได้สูงกว่ากรดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ในความเข้มข้นของกรด ระยะเวลา และอุณหภูมิเดียวกัน ได้ Glucose yield 89.26% และ Glucose yield ของกรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิก ได้ 76.93% และ 56.31% ตามลำดับ

จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดฟอร์มิก ได้กลูโคสจากการย่อยด้วยเอนไซม์ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกที่สภาวะเดียวกัน หากมี

การศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของสภาวะอื่น ๆ ในการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดฟอร์มิก อาจได้ Glucose yield ที่ใกล้เคียงกันที่สภาวะที่แตกต่างกันอย่างใดก็ตามอาจเป็นเพราะในการปรับสภาพและการย่อยด้วยเอนไซม์ ของกรดฟอสฟอริกและกรดฟอร์มิก เกิดสารยับยั้งค่อนข้างสูง จึงทำให้มีการผลิตกลูโคสได้น้อย [12,13] ในงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการปรับสภาพชีวมวลประเภท ลิกโนเซลลูโลสด้วยกรด สามารถเกิดการก่อกวนของสารยับยั้ง เช่น เฟอรัลฟูรัล (furfural) สาร HMF (5-hydroxymethyl-2-furaldehyde) และสารประกอบอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพการเกิดสารยับยั้งเหล่านี้สามารถทำให้ปริมาณกลูโคสต่ำลง [14]

3.4 ลักษณะทางกายภาพของต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพ

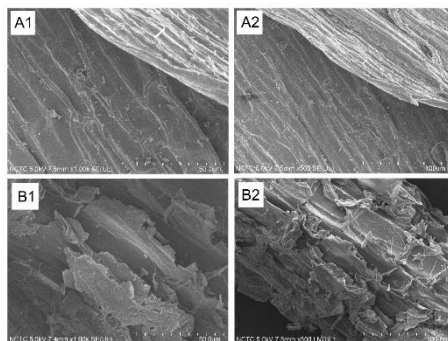
3.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของต้นข้าวโพด (Scanning electron microscopy)

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเทียบกับต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพ

ดังแสดงในรูปที่ 3 ในรูปที่ 3A ลักษณะพื้นผิวของต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพมีโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นระเบียบ และพื้นผิวเรียบเนียน หลังจากการปรับสภาพด้วยกรด โครงสร้างมีลักษณะขรุขระ มีความพรุนและเส้นใย เปื่อยยุ่ยให้โครงสร้างภายในของต้นข้าวโพด จึงแสดงให้เห็นว่ากระบวนการปรับสภาพส่งผลให้มีการกำจัดเส้นใยภายนอก ซึ่งจะเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้เซลลูโลสเข้าถึงเอนไซม์ได้มากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนในต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว สามารถเพิ่มการผลิตกลูโคสในระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์ [15]

3.4.2 วิเคราะห์ความเป็นผลึก (XRD analysis)

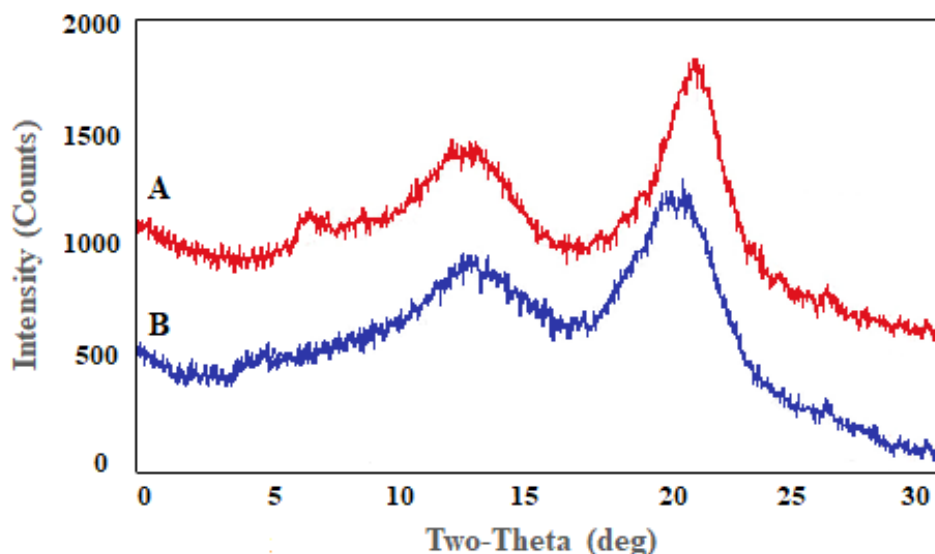
X-ray diffraction (XRD) หรือการวิเคราะห์ความเป็นผลึก เป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของเซลลูโลส [16] ต้นข้าวโพดผ่านการปรับสภาพแล้ว มีความเป็นผลึกที่ต่ำลงเป็นคุณสมบัติสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพมีผลต่อการย่อยได้ของเอนไซม์ [17]



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของต้นข้าวโพด; A ต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ, B ต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที)

ในการศึกษานี้คุณสมบัติของต้นข้าวโพดหลังจากผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกรดในสภาวะที่เหมาะสม (กรดซัลฟูริก 0.5 M อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที) เมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพนั้นมีความเป็นผลึกสูง (51.36%) หลังจากผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกรดค่าความเป็นผลึกของต้นข้าวโพดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 65.32% การลดลงของความเป็นผลึก

แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเซลลูโลสหลังจากการปรับปรุงสภาพต้นข้าวโพดมีการเรียงเป็นระบบในโครงสร้างของเส้นใย และการลดลงของผลึกทำให้ความสามารถในการเข้าถึงพื้นผิวของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น [18] การเพิ่มขึ้นของค่า CrI นั้นสัมพันธ์กับการปรับปรุงสภาพด้วยกรดต่อการกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ไส้แลนและ ลิกนิน ในการลดความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส [19]

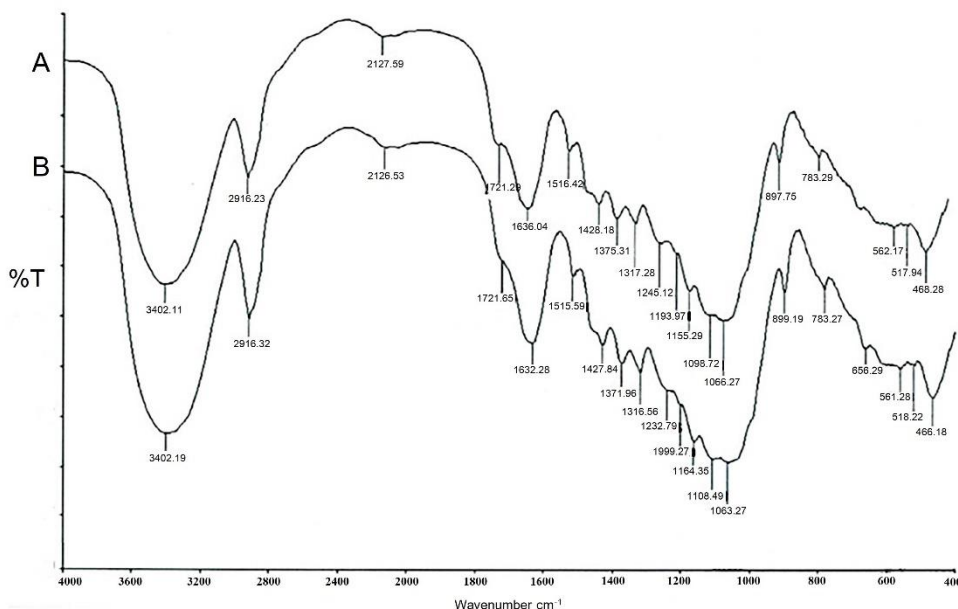


รูปที่ 4 การเลี้ยวเบนของรังสี X-ray ของต้นข้าวโพด; A ต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสภาพ, B ต้นข้าวโพดที่ปรับปรุงสภาพด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที)

3.4.3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโมเลกุล ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์ FTIR ของเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ $3402 - 897 \text{ cm}^{-1}$ นั้นสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันเซลลูโลส ที่ความยาวคลื่น 3402 cm^{-1} คือ

การยืดออกของพันธะระหว่างอะตอม O-H ที่ 2916 cm^{-1} คือ การหดตัวระหว่างอะตอมของพันธะ C-H ที่จุด 1427 cm^{-1} คือ การแบบยืดออกแบบสมมาตรของพันธะ CH_2 ที่จุด 1371 cm^{-1} คือ การสั่นของพันธะภายในโมเลกุลแบบงอ (bending) ของพันธะ CH



รูปที่ 5 แสดง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ของต้นข้าวโพด; A ต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ, B ต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที)

ที่จุด 1316 cm^{-1} คือ พันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนไฮเดรตเปลี่ยนมุมพันธะลักษณะการสั่นแบบอของ CH_2 ที่จุด 1164 cm^{-1} คือ การยืดแบบไม่สมมาตร (asymmetrical stretching) ของพันธะระหว่างอะตอม C-O และความยาวคลื่นที่จุด 899 cm^{-1} สอดคล้องกับการเปลี่ยนรูปแบบของพันธะไกลโคซิดิก C₁-H การสั่นของพันธะภายในโมเลกุลแบบวงแหวน ซึ่งเป็นลักษณะพันธะการเชื่อมโยงของ β -glycosidic ระหว่างกลูโคสในเซลลูโลส

ในรูปที่ 5 ที่จุด $1,721\text{ cm}^{-1}$ ของต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (A) เป็นผลมาจากกลุ่มคาร์บอนิลที่ไม่ละลายน้ำ (Unconjugated) ของเฮมิเซลลูโลส ที่จุด 1245 cm^{-1} เป็นสัญญาณการยืดออกพันธะ

ระหว่างอะตอม C-O ในเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าเฮมิเซลลูโลสลดลง หรือถูกกำจัดออกไปหลังจากขั้นตอนของการปรับสภาพ นอกจากนี้ที่จุด 899 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการลดลงของผลึกเซลลูโลสหลังจากการปรับสภาพ [20]

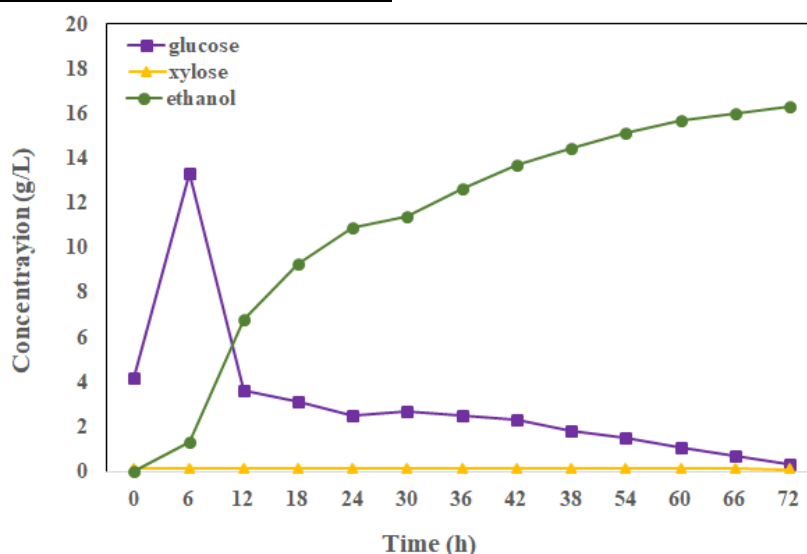
3.4.4 การวิเคราะห์ความพรุน (Porosity and surface analysis)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกมักจะมาพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การเข้าถึงเซลลูโลส [17] ในงานนี้ จะใช้วิธีของ Brunauer – Emmett Teller (BET) ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และ pore volume ของต้นข้าวโพดทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพพิจารณา

โดยใช้วิธีการดูดซับไนโตรเจน ค่าการคำนวณของพื้นที่ผิว และความพรุน ของต้นข้าวโพดทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพ ค่าของพื้นที่ผิวของต้นข้าวโพดหลังการปรับสภาพด้วยกรด พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.69 เป็น 13.39 cm²/g ซึ่งมากกว่า 20.19 เท่า และค่าความพรุนเพิ่มขึ้น 16.75 เท่า ดังนั้น ค่าความพรุนและพื้นที่ผิวชี้ให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยกรดนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว และความพรุนของเส้นใย ส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงของเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ [21, 22]

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและความพรุนของต้นข้าวโพดก่อนและหลังปรับสภาพ

	Untreated	Acid Pretreatment
BET surface area (m ² /g)	0.69	13.93
BJH pore volume (cm ³ /g)	0.004	0.067



รูปที่ 6 การหมักกลูโคสเป็นเอทานอล ส่วนผสมการหมักประกอบด้วย ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด 6.7% w/v

3.4 การหมักแบบ Simultaneous saccharification and fermentation (SSF)

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกสภาวะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับสภาพด้วยกรดของต้นข้าวโพดมาผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมักแบบ SSF ในการหมักปริมาณเริ่มต้นของต้นข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว 70 กรัมต่อลิตร เทียบเท่ากับกลูโคส 35 กรัมต่อลิตร ในการเริ่มการหมัก ต้นข้าวโพดจะนำไปทำการ pre-digested โดยเอนไซม์ Cellic Ctec2 จากนั้นจึงเติมเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* เพื่อทำการหมัก เปลี่ยนกลูโคสเป็นเอทานอล

ในขั้นตอนการ pre-hydrolysis ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพจะถูกย่อยเป็นกลูโคสอย่างรวดเร็วโดยมีความเข้มข้นของกลูโคสสะสมเฉลี่ยสูงสุดที่ 13.36 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยสูงสุดที่ 16.31 กรัมต่อลิตร

ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง เทียบเท่ากับทฤษฎีการเปลี่ยนกลูโคสเป็นเอทานอลได้ 94% [23] ด้วยประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล 0.23 กรัม / ลิตร / ชั่วโมง (รูปที่ 6) ตอนท้ายของการหมักกลูโคสที่เหลือ 0.3 กรัมต่อลิตร

อย่างไรก็ตาม การหมักเพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงจากการหมักของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ รวมทั้งลักษณะของชีวมวล วิธีการปรับปรุงภาพ เชื้อจุลินทรีย์หรือยีสต์ที่นำมาใช้ และพารามิเตอร์ทางกายภาพของกระบวนการหมัก

ในงานวิจัยที่ผ่านมาการหมักฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกรดและด่าง ได้เอทานอล 84.6% [24] และการหมักฟางข้าวโพดโดยปรับปรุงสภาพแบบ steam-pretreated ได้เอทานอล 72.4% [25] ในช่วงแรกของการหมักจะเกิดการสะสมของกลูโคสหรือมีกลูโคสในปริมาณที่สูง แต่เอทานอลต่ำ เนื่องจากเป็นช่วง lag phase ของการหมัก แต่เมื่อเชื้อจุลินทรีย์หรือยีสต์เริ่มมีการแพร่กระจายและเติบโต กลูโคสที่สะสมอยู่ในช่วงแรกก็จะเริ่มลดลง ถูกใช้ไป จากรูปที่ 6 หลังจากผ่านไป 8 ชั่วโมง ปริมาณเอทานอลมีความเข้มข้นขึ้นแสดงถึงการหมักที่สมบูรณ์

4. สรุป

การปรับปรุงสภาพด้วยกรดของต้นข้าวโพด เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์ให้ได้กลูโคสสูงสุด เพื่อการผลิตไบโอเอทานอล ในการวิจัยได้ Glucose yield สูงสุด 89.26% สภาวะที่ดีที่สุดในการปรับปรุงภาพที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 0.1 M อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 30 นาที ผลการวิจัยพบว่าในสภาวะ

ที่เหมาะสมนี้ เมื่อวิเคราะห์ในส่วนที่เป็นของเหลวหลังจากการปรับปรุงสภาพได้สารยับยั้งค่อนข้างต่ำ การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางกายภาพ และทางเคมีของต้นข้าวโพดหลังผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกรดซัลฟูริกมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการย่อยได้เอนไซม์ และสามารถเพิ่มการหมักเพื่อผลิตไบโอเอทานอล

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประเภทอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2560 คณะผู้วิจัยได้ขอพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Annual report 2018; 2018 [cites 2020 June 20]. Available from: <http://investor.impactgrowthreit.com/misc/ar/20180620-impact-ar-2018-en-03.pdf>.
- [2] Limayem A, Ricke SC. Lignocellulosic biomass for bioethanol production: current perspectives, potential issues and future prospects. Progress in Energy and Combustion Science. 2012; 38(4): 449-67.
- [3] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D, Crocker D. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytical Procedure. 2008; 1617: 1-16.

- [4] Sindhu R, Kuttiraja M, Binod P, Sukumaran RK, Pandey A. Physicochemical characterization of alkali pretreated sugarcane tops and optimization of enzymatic saccharification using response surface methodology. *Renewable Energy* 2014; 62: 362-8.
- [5] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D. Determination of sugars, byproducts, and degradation products in liquid fraction process samples. Golden. National Renewable Energy Laboratory. 2006.
- [6] Li C, Knierim B, Manisseri C, Arora R, Scheller HV, Aue M, Vogel KP, Simmons BA, Singh S. Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass: biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification. *Bioresource technology*. 2010; 101(13): 4900-6.
- [7] Shahabazuddin M, Chandra TS, Meena S, Sukumaran R, Shetty N, Mudliar S. Thermal assisted alkaline pretreatment of rice husk for enhanced biomass deconstruction and enzymatic saccharification: Physico-chemical and structural characterization. *Bioresource technology*. 2018; 263: 199-206.
- [8] Lu X, Zhang Y, Angelidaki I. Optimization of H₂SO₄-catalyzed hydrothermal pretreatment of rapeseed straw for bioconversion to ethanol: focusing on pretreatment at high solids content. *Bioresource technology*. 2009; 100(12): 3048-53.
- [9] Zhao X, Wang L, Lu X, Zhang S. Pretreatment of corn stover with diluted acetic acid for enhancement of acidogenic fermentation. *Bioresource technology*. 2014; 158: 12-8.
- [10] Alvira P, Tomás-Pejó E, Ballesteros M, Negro MJ. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*. 2010; 101(13), 4851-61.
- [11] Suriyachai N, Champreda V, Kraikul N, Techanan W, Laosiripojana N. Fractionation of lignocellulosic biopolymers from sugarcane bagasse using formic acid-catalyzed organosolv process. *3 Biotech*. 2018; 8(5): 221.
- [12] Schneider L, Dong Y, Haverinen J, Jaakkola M, Lassi U. Efficiency of acetic acid and formic acid as a catalyst in catalytical and mechanocatalytical pretreatment of barley straw. *Biomass and Bioenergy*. 2016; 91: 134-42.

- [13] Wu W, Rondon V, Weeks K, Pullammanappallil P, Ingram LO, Shanmugam K. Phosphoric acid based pretreatment of switchgrass and fermentation of entire slurry to ethanol using a simplified process. *Bioresource technology*. 2018; 251: 171-80.
- [14] Bao W, Binder T, Abbas C, Loveless L. C1-C2 organic acid treatment of lignocellulosic biomass to produce acylated cellulose pulp, hemicellulose, lignin and sugars and fermentation of the sugars. In. Google Patents, 2014
- [15] Ge L, Wang P, Mou H. Study on saccharification techniques of seaweed wastes for the transformation of ethanol. *Renewable energy*. 2011; 36(1): 84-9.
- [16] Li J, Zhang R, Siddhu MAH, He Y, Wang W, Li Y, Chen C, Liu G. Enhancing methane production of corn stover through a novel way: sequent pretreatment of potassium hydroxide and steam explosion. *Bioresource Technology*. 2015; 181: 345-50.
- [17] Li C, Cheng G, Balan V, Kent MS, Ong M, Chundawat SP, daCosta Sousa L, Melnichenko YB, Dale BE, Simmons BA. Influence of physico-chemical changes on enzymatic digestibility of ionic liquid and AFEX pretreated corn stover. *Bioresource technology* 2011; 102(13): 6928-36.
- [18] Mood SH, Golfeshan AH, Tabatabaei M, Abbasalizadeh S, Ardjmand M, Jouzani GS. Comparison of different ionic liquids pretreatment for corn stover enzymatic saccharification. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*. 2014; 44(5): 451-63.
- [19] Imman S, Laosiripojana N, Champreda V. Effects of liquid hot water pretreatment on enzymatic hydrolysis and physicochemical changes of corncobs. *Applied biochemistry and biotechnology*. 2018; 184(2): 432-43.
- [20] Zhang P, Dong SJ, Ma HH, Zhang BX, Wang YF, Hu XM. Fractionation of corn stover into cellulose, hemicellulose and lignin using a series of ionic liquids. *Industrial Crops and Products*. 2015; 76: 688-96.
- [21] Guo J, Catchmark JM. Surface area and porosity of acid hydrolyzed cellulose nanowhiskers and cellulose produced by *Gluconacetobacter xylinus*. *Carbohydrate polymers*. 2012; 87(2): 1026-37.
- [22] Tan IS, Lee KT. Solid acid catalysts pretreatment and enzymatic hydrolysis of macroalgae cellulosic residue for the production of bioethanol. *Carbohydrate Polymers*. 2015; 124: 311-21.

- [23] Bai F, Anderson W, Moo-Young M. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology advances*. 2008; 26(1): 89-105.
- [24] Weerasai K, Suriyachai N, Poonsrisawat, A, Amthong J, Unrean P, Laosiripojana N, Champreda V. Sequential acid and alkaline pretreatment of rice straw for bioethanol fermentation. *BioResources*. 2014; 9(4): 5988-6001.
- [25] Öhgren K, Bura R, Lesnicki G, Saddler J, Zacchi G. A comparison between simultaneous saccharification and fermentation and separate hydrolysis and fermentation using steam-pretreated corn stover. *Process Biochemistry*. 2007; 42(5): 834-9.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกากหม้อกรองในกระบวนการผลิตน้ำตาล สำหรับขึ้นรูปเป็นชีวมวลอัดเม็ด

The Investigation of Primary Physical Characteristics of Filter Cake in Sugar Processing Regarding to Biomass Pellets Conversion

ผกามาศ น้อยสุวรรณ¹⁾ กันตพงษ์ แซ่โล^{1, 2)} พีรณัฐ อันสุรีย์⁴⁾ และ กิตติพงษ์ ลาลูน^{1, 2, 3)*}Phakamat Noisuwan¹⁾ Kantapong Khaeso^{1, 2)} Peeranat Ansuree⁴⁾ and Kittipong Laloon^{1, 2, 3)*}¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น³⁾ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กทม.⁴⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา¹⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Khonkaen University²⁾ Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand³⁾ Postharvest Technology Innovation Center, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation,
Bangkok, Thailand.⁴⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan

Received: 12 May 2021

Revised: 21 June 2021

Accepted: 29 June 2021

Available Online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

กากหม้อกรองเป็นของเสียในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล พบว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกับ
ขาน้อยที่ให้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไปในโรงไฟฟ้าชีวมวลและสามารถอัดขึ้นรูปได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น มุมกอง และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และศึกษาการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองด้วยชุดทดสอบแบบลูกกลิ้งกดอัดบนแผ่นจานอัด ทำการทดสอบที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) โดยมีปัจจัยทดสอบคือ อัตราการป้อน 3 ระดับ ได้แก่ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ ได้แก่ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที จากผลการศึกษาพบว่ากากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ทำการขึ้นรูปที่อัตราการป้อน 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 210 รอบต่อนาที ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.66 ± 0.04 มิลลิเมตร ขนาดความยาวเฉลี่ย 31.53 ± 0.37 มิลลิเมตร ร้อยละเศษผงเฉลี่ย 1.31 ± 0.01 ความทนทานเฉลี่ย 98.26 ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 691.32 ± 5.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม ซึ่งสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าชีวมวลได้

คำสำคัญ: สมบัติทางกายภาพ กากหม้อกรอง ชีวมวลอัดเม็ด กระบวนการอัด

Abstract

Filter cake is a waste product which has a calorific value comparable to bagasse and can be used as a general fuel and can be extruded in biomass power plants, in the sugar production phase of the sugar factory. The objective of this research was to investigate the physical properties of filter cake, specifically moisture content, bulk density, angle of repose, and coefficient of friction. This includes investigating the formation of pellets from filter cake using a roller molding test set on a flat die. The analysis was carried out using a standardized moisture content of 30.26 percent wet basis together with the test factor including three ranges of feed rates: 40, 45, and 50 kg/h, as well as four levels of compression die speeds: 180, 190, 200, and 210 rpm. According to the study results, the filter cake with a wet basis moisture content at 30.26 percent, shaped at a feed rate of 45 kg/h, and the compression die at 210 rpm, is the most appropriate. Being in harmony with the standard range that the suitable pellets should have the following dimensions: average diameter 5.66 ± 0.04 mm, average length 31.53 ± 0.37 mm, average fines 1.31 ± 0.01 , average durability 98.26 ± 0.05 percent, and average bulk density 691.32 ± 5.00 kg / m³. It has an estimated calorific value of 11,928 J / g, specially designed for use as a supplemental fuel in the biomass electric power generation.

Keywords: Physical property: Filter cake: Biomass pellets: Pelletizing

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยพบว่า ปี 2017, 2018 และ 2019 มีการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 185,130.89 187,388.54 และ 193,439.15 ล้านกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ [1] ทำให้มีความต้องการเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น อันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติและเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้ทั่วโลกเกิดการตระหนักถึงปัญหาและหันมาเลือกใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวลอัดเม็ด

ความต้องการใช้พลังงานชีวมวลอัดเม็ดได้ถูกพูดถึงและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้น [2] โดยในต่างประเทศ ได้มีการผลิตเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมไม้แปรรูป มีปริมาณการผลิตไม้อัดเม็ด 2.5 16 และ 28 ล้านตัน ในปี 2000 2005 2010 และ 2015 ตามลำดับ [3] โดยสหภาพยุโรปถูกจัดเป็นผู้ผลิตไม้อัดเม็ดรายใหญ่ที่สุดในโลก [4] และในประเทศไทย มีการทำเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรเป็นหลัก ทำให้มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ได้จากการเก็บเกี่ยวข้าว แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ เศษยูคาลิปตัส จากอุตสาหกรรม

กระดาษ รวมไปถึงใบอ้อยและชานอ้อย ที่ได้จากไร่อ้อยและกระบวนการผลิตน้ำตาลของอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาล ซึ่งใบอ้อยและชานอ้อยนี้ จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยในปี 2021 มีโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย 223 แห่ง และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ความต้องการพลังงานชีวมวลจากอุตสาหกรรมเกษตรก็มีมากขึ้นเช่นกัน [5]

อุตสาหกรรมน้ำตาล มีขั้นตอนการผลิตน้ำตาลทราย เริ่มจากการสกัดน้ำอ้อยโดยลำเลียงอ้อยเข้าสู่โม่เพื่อสับลดขนาดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนผ่านเข้าลูกหีบ น้ำอ้อยที่ได้จากการสกัดจะนำเข้าสู่กระบวนการทำใส เพื่อแยกสิ่งเจือปนออกโดยการให้ความร้อนและผสมปูนขาว ทำให้น้ำอ้อยที่สะอาดนำมาต้มเพื่อระเหยเอาน้ำออกจะได้เป็นน้ำเชื่อม จากนั้นนำไปเคี่ยวในหม้อสุญญากาศจนเกิดเป็นผลึกน้ำตาล และนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลในหม้อปั่น ได้ผลผลิตหลักคือน้ำตาลทรายดิบออกมา นอกจากนี้ยังมีผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการทั้งหมด ที่กล่าวมาข้างต้นคือ กากน้ำตาล (molasses) ที่ได้จากการปั่นแยกผลึกน้ำตาล ซึ่งถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอล ชานอ้อย (bagasse) ได้จากกระบวนการหีบสกัด ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและต้มหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาล และกากหม้อกรอง (filter cake) ได้จากการกรองตะกอนในระบบสุญญากาศของการทำใส่น้ำอ้อย ซึ่งมีศักยภาพในการใช้บำรุงและเพิ่มธาตุอาหารในดินได้ดี ส่วนมากจึงนำไปใช้ประโยชน์ในเรื่องของการปรับปรุงดินและปุ๋ย [6]

จากข้อมูลพื้นที่เก็บเกี่ยวและปริมาณอ้อยส่งโรงงาน ปีการผลิต 2019/2020 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย พบว่า มีปริมาณอ้อยเข้าหีบ 75.97 ล้านตัน [7] ได้กากหม้อกรองจากกระบวนการผลิตน้ำตาลคิดเป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักอ้อยเข้าหีบ [8] ดังนั้น จึงมีกากหม้อกรองที่เหลือจากการผลิตน้ำตาล ปีละประมาณ 2.28 ล้านตัน โดยทั่วไปกากหม้อกรอง มีลักษณะเป็นตะกอน สีน้ำตาลเข้มและมีความชื้นสูง การจัดการกากหม้อกรองนั้น จะทำการกองรวมกันไว้ จึงอาจเกิดการสะสมของจุลินทรีย์จนเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็น อีกทั้งทุกโรงงานจะมีปริมาณของเสียนี้อยู่มาก ไม่สามารถจัดการให้หมดไปได้ จึงควรหาวิธีการแก้ไขปัญหานี้

ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลได้ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลัก แต่เนื่องจากในฤดูเปิดหีบอ้อย มีแค่ช่วงเดือนพฤศจิกายนจนถึงเมษายนของทุกปี [9] ทำให้ปริมาณขานอ้อยที่ได้รับไม่เพียงพอต่อการเป็นเชื้อเพลิงตลอดทั้งปี ต้องทำการรับซื้อเชื้อเพลิงเสริมเพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานในช่วงนอกฤดูเก็บเกี่ยวอ้อย อันได้แก่ ใบอ้อย แกลบ ไม้สับ หญ้า ชังข้าวโพด และฟางข้าว [10] จากการนำกากหม้อกรองไปหาค่าความร้อน พบว่า มีค่าความร้อนความใกล้เคียงกับขานอ้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาล จึงเกิดแนวคิดใช้หลักการเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (waste to energy) ด้วยการนำกากหม้อกรองที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริม ทำให้มีเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ต่อเนื่องมากขึ้น เพียงพอต่อความต้องการใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลและผลิตไฟฟ้า

เพื่อจำหน่าย ลดปริมาณการซื้อเชื้อเพลิงเสริม และถือเป็นการจัดการของเสียจากโรงงานให้หมดไป

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า กากหม้อกรองสามารถอัดขึ้นรูปได้แต่ยังมีความหนาแน่นต่ำและความทนทานไม่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้คุณภาพของชีวมวลอัดเม็ดจะขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลและกระบวนการอัด [11] ซึ่งชีวมวลแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะ จำเป็นต้องมีการศึกษาเงื่อนไขกระบวนการอัดที่เหมาะสมกับชีวมวลนั้น ๆ [12] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการอัดเม็ดขึ้นรูปกากหม้อกรอง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหาอัตราการบด และความเร็วรอบของเครื่องอัดแบบจานหมุนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่มีคุณภาพ และคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด

2. วิธีการวิจัย

กากหม้อกรองที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตน้ำตาล ที่ออกจากหม้อกรองในกระบวนการทำใส่น้ำอ้อยของโรงงานน้ำตาลเป็นตะกอนและมีสีดำค่อนข้างน้ำตาล มีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 65.29 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จากนั้นนำมาตากลดความชื้นแล้วทดสอบอัดเบื้องต้น โดยทำการตากแดดและทำการเก็บค่าความชื้น และทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ

2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพบางประการของกากหม้อกรอง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น มุมกอง สัมประสิทธิ์

ความเสียหาย เพื่อให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลนำไปประกอบการตัดสินใจในการผลิตเชื้อเพลิง ซึ่งมีวิธีดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติบางประการของกากหม้อกรอง ดังนี้

1) ความชื้น (moisture content) ความชื้นของวัสดุมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อการเก็บรักษา การขนถ่าย และกระบวนการผลิต [13] การหาค่าความชื้นของหม้อกรอง ทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบ (ตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความชื้นต้องมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 25 กรัม) จากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักหลังอบ [14] ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสามารถหาได้จากสมการที่ 1 ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ

$$MC\% = \frac{\text{Weight before drying} - \text{Weight after drying}}{\text{Weight before drying}} \times 100 \quad (1)$$

2) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความหนาแน่นเนื้อ รูปร่าง ขนาดลักษณะผิว สิ่งปะปน ความชื้น และวิธีการบรรจุ [13] การหาความหนาแน่นรวม วัดโดยชั่งน้ำหนักของกากตะกอนหม้อกรองต่อปริมาตรบรรจุ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร [15] ทำโดยปล่อยวัสดุลงในภาชนะบรรจุอย่างอิสระ ทำการปาดโดยใช้วัสดุผิวเรียบที่มีความยาวเกินของภาชนะบรรจุ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักวัสดุที่อยู่ในกล่อง โดยทำการทดสอบ 10 ซ้ำ คำนวณจากสมการที่ 2

$$\rho_b = \frac{m}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ_b = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m = น้ำหนักของกากตะกอนหม้อกรองที่อยู่ในกล่อง (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของภาชนะ (ลูกบาศก์เมตร)

3) มุมกอง (angle of repose) จะสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุและสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบขนถ่ายวัสดุที่อยู่ในอุปกรณ์ขนถ่ายและในถังเก็บวัสดุและยังใช้คำนวณหารูปทรงของถังเก็บวัสดุที่เหมาะสมและแรงที่กระทำกับถังเก็บวัสดุได้ [13] การหาค่ามุมกองของกากตะกอนหม้อกรอง โดยใช้อุปกรณ์ Filling Hopper มีฐานเป็นวงกลมที่ทราบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยปล่อยวัสดุลงอย่างอิสระ จากนั้นทำการวัดความสูงจากฐานถึงปลายของกองวัสดุ [16] โดยทำการทดสอบ 10 ซ้ำ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่ามุมกองตามสมการ 3

$$\text{Angle of repose} = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{D}\right) \quad (3)$$

เมื่อ H = ความสูงของกองวัสดุ (เซนติเมตร)

D = ความยาวของฐานกองวัสดุ (เซนติเมตร)

4) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of friction) มีบทบาทและความสำคัญในการออกแบบถังบรรจุ ถังเก็บ คำนวณออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น การตัด การหั่น หรือการอัดผลิตภัณฑ์ [13] การหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของกากตะกอนหม้อกรอง ใช้เครื่องมือวัดมุมเสียดทาน ทดสอบกับพื้นสแตนเลส พื้นสังกะสี พื้นเหล็ก และพื้นยาง โดยการสุมตัวอย่าง นำวัสดุวางที่แท่นของเครื่องมือวัดมุมเสียดทาน จากนั้นยกพื้นแท่นขึ้นจนวัสดุเริ่มไหล อ่านค่ามุมที่ได้ [17] ทำการทดสอบ

10 ข้า หาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผงดำนจาก
สมการที่ 4

$$\mu = \tan \theta \quad (4)$$

เมื่อ μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

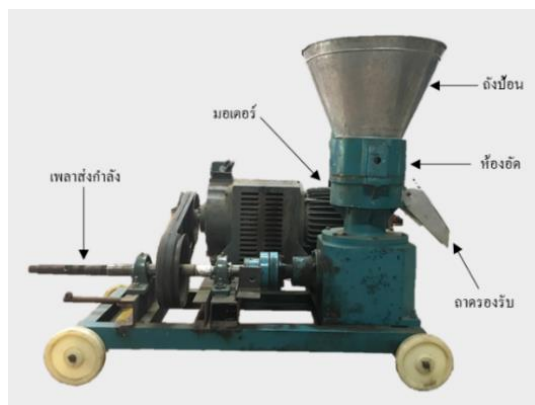
θ = มุมเสียดทานของกากตะกอนหม้อกรอง

2.2 การศึกษาการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวล อัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

หลังจากที่ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกาก
หม้อกรองที่แต่ละความชื้นแล้วทดสอบอัดเบื้องต้น
พบว่าที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก
สามารถอัดขึ้นรูปได้ จึงมาศึกษาการอัดขึ้นรูปเพื่อหา
คุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

โดยการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วย
เครื่องอัดแบบจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 1 ใช้มอเตอร์
ต้นกำลังขนาด 7.5 แรงม้า ภายในห้องอัด
ประกอบด้วยลูกกลิ้งเหล็ก 2 ลูก ที่มีลักษณะคล้าย
เฟือง ทำหน้าที่บิดและบีบอัดกากหม้อกรองผ่านรูอัด
บนจานอัดที่มีลักษณะทรงกรวยขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเริ่มจาก
การเดินเครื่องและปรับความเร็วรอบให้แผ่นจานอัด
หมุนโดยถูกกดด้วยลูกกลิ้ง 2 ชุด เกิดความร้อนบน
แผ่นอัด วัดอุณหภูมิห้องอัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ
แบบอินฟราเรด ให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100 – 120
องศาเซลเซียส จึงทำการป้อนกากหม้อกรองผ่านถัง
ป้อนในอัตราการป้อนที่กำหนด ชุดอัดจะทำการอัด
กากหม้อกรองให้ลงไปอยู่ในรูของแผ่นอัด โดยแผ่นอัดจะ
หมุนวนไปเรื่อย ๆ จนกากหม้อกรองลงไปช่องรูของ
แผ่นจานขนาด 6 มิลลิเมตร เมื่อถึงความยาวที่กำหนด
ใบมีดที่อยู่ใต้แผ่นอัดเม็ดจะทำหน้าที่ตัดและกากหม้อ
กรองอัดเม็ดตกลงมาสู่ถาดรองรับ จากนั้นนำไปตาก

ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ความร้อนระเหยออก และเพื่อให้
ตัวเม็ดเชื้อเพลิงเกิดการแข็งตัว ทำการตากทิ้งไว้จน
เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความชื้นที่ลดลงถึงค่ามาตรฐาน โดย
ชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนด ต้องมีค่าความชื้นต่ำกว่า 10
เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จึงเหมาะสำหรับการ
จัดเก็บและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการทดสอบนี้ได้
ศึกษาปัจจัยด้านความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ
180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็ว
รอบแผ่นอัดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Inverter) หรือ
คิดเป็นความเร็วเชิงเส้น 1.12 1.27 1.33 และ 1.40
เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนวัสดุ 3 ระดับ ได้แก่
40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ควบคุมอัตราการ
ป้อนด้วยสายพานลำเลียง โดยทำการปรับความเร็ว
ของสายพานลำเลียงจนได้อัตราการป้อนที่กำหนด มี
ค่าชี้ผลคือ 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2) ความยาว
3) ร้อยละเศษผง 4) ดัชนีความทนทาน และ 5) ความ
หนาแน่นรวม ของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่องอัดเม็ดแบบจานหมุน

2.3 การศึกษาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ด กากหม้อกรอง

ประเทศไทยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดในการนำเข้าหรือส่งออก อ้างอิงตามมาตรฐานของมาตรฐานยุโรป (EN 14961 และ ENplus) และมาตรฐานอเมริกา (pellet fuels institute, PFI) [18] ดังนั้น ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จำเป็นต้องผลิตให้ได้ตามมาตรฐานรวมไปถึงวิธีการทดสอบด้วย

การหาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ด กระทำหลังจากทดสอบในแต่ละปัจจัยศึกษา ตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปตากแดดเพื่อลดความชื้น จนกระทั่งชีวมวลอัดเม็ดมีค่าความชื้นลดลงเหลือต่ำกว่า 10 มาตรฐานเปียก ทำการหาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ประกอบไปด้วย

1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) สำหรับการหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชีวมวลอัดเม็ดจะหาค่าตามที่มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) ได้กำหนดไว้ดังนี้ ทำการสุ่มตัวอย่างกากตะกอนหม้อกรองอัดเม็ด 5 ตัวอย่าง และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ที่ความละเอียด 0.001 นิ้ว

2) ความยาว (length) สำหรับการหาค่าความยาวของชีวมวลอัดเม็ดจะหาค่าตามที่มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) โดยชั่งตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาค่าความยาว (IW) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม วัดความยาวด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ บันทึกค่าความละเอียดที่ 0.001 นิ้ว ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว แยกไว้ต่างหากและชั่งน้ำหนัก (LW) บันทึกผลการทดลอง และคำนวณหา

ค่าความยาวดังสมการที่ 5 ซึ่งจะแสดงเป็นค่าร้อยละของมวลของชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว จากตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่นำมาทดสอบ ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ

$$\text{ความยาว (เปอร์เซ็นต์} > 1.5 \text{ นิ้ว)} = \left(\frac{LW}{IW} \right) \times 100 \quad (5)$$

3) ร้อยละของเศษผง (fines) รายละเอียดการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) โดยชั่งน้ำหนักภาชนะ (BW) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม นำตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดใส่ลงในภาชนะและชั่งน้ำหนัก (IW) ร่อนด้วยตะแกรงร่อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว นำภาชนะรองรับได้ตะแกรงร่อนที่มีเศษผงตกลงมาไปยังน้ำหนัก (CFW) และชั่งน้ำหนักภาชนะรองรับ (CW) บันทึกผลและคำนวณหาค่าร้อยละของเศษผง ดังสมการที่ 6 ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

$$\% \text{ Fines} = \left(\frac{CFW - CW}{IW - BW} \right) \times 100 \quad (6)$$

4) ดัชนีความทนทาน (durability) รายละเอียดการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) ได้กำหนดไว้ คือชั่งตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 1100 กรัม ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม ร่อนด้วยตะแกรงร่อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว เก็บชีวมวลอัดเม็ดที่ค้างตะแกรงมาชั่ง 500 ± 2 กรัม (IW) นำไปเข้าเครื่องทดสอบความทนทาน หมุนด้วยความเร็ว 50 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำไปร่อนอีกครั้งเพื่อแยกส่วนที่แตกหักออกและชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลือ (WPW) บันทึกผลการทดลอง และคำนวณหาค่าความทนทานดังสมการที่ 7 ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

$$PDI = \left(\frac{WPW}{IW} \right) \times 100 \quad (7)$$

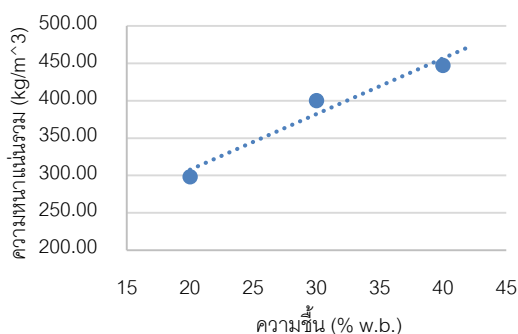
5) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM E 873 [19] ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ สำหรับการหาค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

6) ค่าความร้อน (heating value) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D240 [20] เป็นการตัวอย่างที่ต้องการทราบค่าความร้อน โดยใช้เครื่อง IKA C 5000 Automated Bomb calorimeter ทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง พบว่า ความชื้นของกากหม้อกรองที่ทดสอบ 3 ระดับ มีความชื้นเฉลี่ย 20.40 30.26 และ 40.47 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)



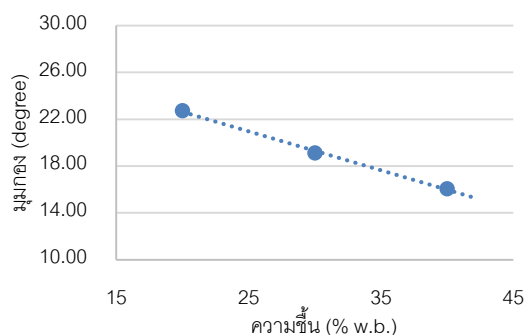
รูปที่ 2 ผลของความชื้นที่มีผลต่อ

ความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรอง

ผลการศึกษาความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรอง พบว่าความหนาแน่นรวมแปรผันตรงกับ

ความชื้น สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ ค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีความหนาแน่นรวมกากหม้อกรองเฉลี่ย 298.30 ± 11.92 400.47 ± 8.78 และ 447.41 ± 2.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ความชื้น 20.40 30.26 และ 40 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ

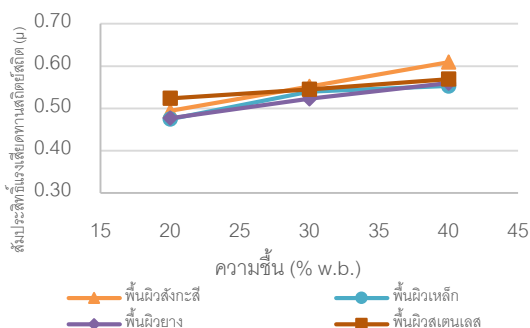
ผลการศึกษาค่ามูมกองของกากหม้อกรองพบว่า ค่ามูมกองแปรผกผันกับความชื้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาค่ามูมกองของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ ค่ามูมกองจะลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมามีค่ามูมกองของกากหม้อกรองเฉลี่ย 22.74 ± 1.63 19.12 ± 1.43 และ 16.06 ± 0.41 องศา ที่ความชื้น 20.40 30.26 และ 40.47 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ



รูปที่ 3 ผลของความชื้นที่มีผลต่อมูมกองของกากหม้อกรอง

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของกากหม้อกรอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแปรผันตรงกับความชื้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะ

เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพื้นผิวสังกะสี มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ยสูงสุดที่ 0.61 ± 0.94 รองลงมาคือ พื้นผิวสแตนเลสมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย 0.55 ± 0.84



รูปที่ 4 ผลของความชื้นที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียหายของกากหม้อกรอง

3.2 ผลการศึกษาการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ด้วยชุดทดสอบแบบลูกกลิ้งกดอัดบนแผ่นจานอัด (flat die pellet mill) จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง ที่ความชื้นเฉลี่ย 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จากนั้นนำกากหม้อกรองที่ความชื้นดังกล่าวมาทำการทดสอบอัดเม็ดกากหม้อกรอง โดยมีปัจจัยทดสอบได้แก่ อัตราการป้อน 4 ระดับ คือ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที

ผลการศึกษาพบว่า ทุกปัจจัยที่ศึกษาสามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกากหม้อกรองอัดเม็ดที่ได้มีสีดำเข้ม มีลักษณะผิวมันวาว เมื่อ

สัมผัสมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความหนาแน่นและแข็งแรง และมีความทนทานต่อการแตกหักระหว่างขนย้าย



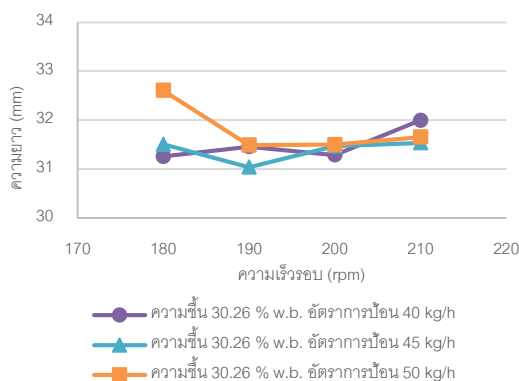
รูปที่ 5 ลักษณะเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

3.3 ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

3.3.1 ความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ตามมาตรฐานการทดสอบความยาว ซึ่งจะแสดงเป็นค่าร้อยละของมวลของชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว (38.1 มิลลิเมตร) จากตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่นำมาทดสอบ ตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) พบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง มีความยาวไม่เกิน 38.1 มิลลิเมตรทุกเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นทุกปัจจัยการศึกษาผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดมีความยาวเฉลี่ยสูงสุด 32.61 ± 0.41 มิลลิเมตร เนื่องจากกากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

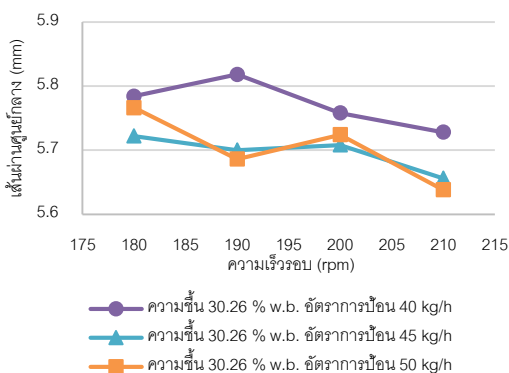
เมื่อนำมาทดสอบอัดเม็ดจะเกิดความร้อนระหว่างกระบวนการอัดและลิกนินเกิดการละลาย อนุภาคของกากหม้อกรองที่ประกอบด้วยความชื้น ความร้อน และลิกนิน จึงเกิดความเหนียวและเกิดการจับตัวกันของอนุภาคที่มีโครงสร้างแข็งแรง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการขึ้นรูปและยาวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

3.3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากกากหม้อกรองด้วยแผ่นอัดที่มีรูขนาด 6 มิลลิเมตร พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ 5.82 ± 0.07 มิลลิเมตร และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 5.64 ± 0.05 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

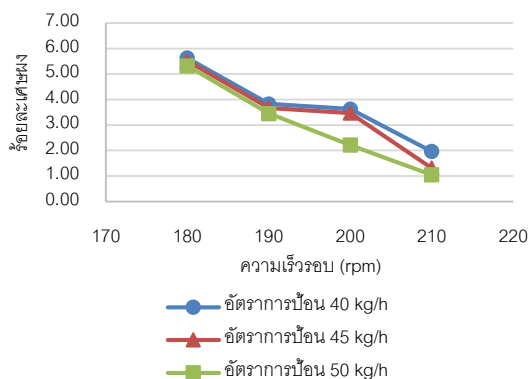


รูปที่ 7 เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ที่อัตราการป้อนต่างกันจะเห็นได้ว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกากหม้อกรองอัดเม็ดเล็กกว่าขนาดของรูอัด เนื่องจากว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ออกมาจากกระบวนการอัดในช่วงแรกยังมีความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่ในเม็ด เมื่อนำมาตากให้มีความชื้นที่ต่ำลง น้ำที่แทรกอยู่จะเริ่มระเหยออก ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการหดตัวและเล็กกว่าเดิม เมื่อความเร็วรอบของแผ่นอัดเร็วขึ้นทำให้ความหนาแน่นที่คลายตัวสุดท้ายของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลง และขนาดเม็ดที่เล็กลงเล็กน้อยหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากระยะเวลาการอัด (holding times) ที่กากหม้อกรองถูกอัดอยู่ในรูอัดของแผ่นอัดมีเวลาน้อยลงทำให้มีอัตราการคืนตัวสูง เมื่อชีวมวลอัดแท่งแข็งเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yadong Li และ Henry Liu [22]

3.3.3 ร้อยละเศษผงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบร้อยละเศษผง ปริมาณร้อยละเศษผงมักเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากการบดอัดขึ้นรูป หากมีกระบวนการอัดที่เหมาะสมกับชีวมวลนั้น ๆ ส่งผลให้การอัดเม็ดมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพิ่มร้อยละการขึ้นรูป มีเศษผงน้อยและลดขั้นตอนการดักเก็บฝุ่นซึ่งในกระบวนการร่อนเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากกระบวนการอัดตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) กำหนดให้ร้อยละของเศษผงไม่ควรเกิน 1.0 % (PFI standard และ PFI utility)



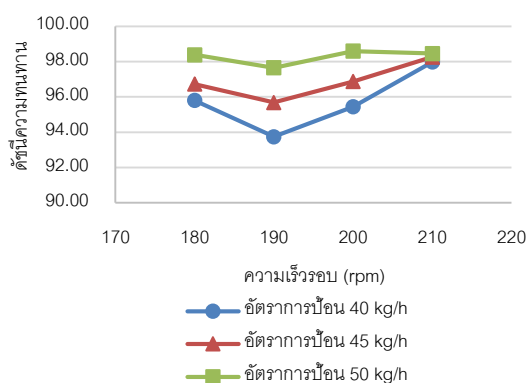
รูปที่ 8 ร้อยละเศษผงของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
กากหม้อกรอง

ผลการศึกษาร้อยละเศษผงในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง พบว่าค่าร้อยละเศษผงแปรผันตรงกับอัตราการป้อน และความเร็วรอบแผ่นอัด (รูปที่ 8) กล่าวคือ ร้อยละเศษผงมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนและความเร็วรอบแผ่นอัด เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของลูกกลิ้งกับแผ่นอัด ทำให้สารลิกนินในกากหม้อกรองละลายและประสานอนุภาคของกากหม้อกรองได้ดี เกิดการขึ้นรูปและจับตัวกันของอนุภาคได้ดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเศษฟุ้งน้อยลง

3.3.4 ดัชนีความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากผลการศึกษาดัชนีความทนทานของกากหม้อกรองอัดเม็ด พบว่าดัชนีความทนทานแปรผันตรงกับอัตราการป้อนและความเร็วรอบแผ่นอัด กล่าวคือ ดัชนีความทนทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน และเพิ่มความเร็วยรอบแผ่นอัด ที่ความขึ้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วยรอบแผ่นอัด 200 รอบต่อนาที มีค่าดัชนีความทนทานเฉลี่ยสูงสุดคือ

98.59±0.07 ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากการเกิด Starch gelatinization [23] จากช่วงอุณหภูมิของการเกิด Starch gelatinization เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นและมีความหนืดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [24] คือเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนและความเร็วยรอบ ทำให้เกิดความร้อน ทำให้สารลิกนินละลายประสานอนุภาคของกากหม้อกรองได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าเศษผงลดลง ความทนทานเพิ่มขึ้น แต่หากเม็ดแป้งถึงจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุดและให้ความหนืดสูงสุด จากนั้นเม็ดแป้งจะแตกถึงจุดสูงสุด ซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ทำให้ความทนทานลดลง ตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) กำหนดให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีดัชนีความทนทานมากกว่าหรือเท่ากับ 95.0 เปอร์เซ็นต์

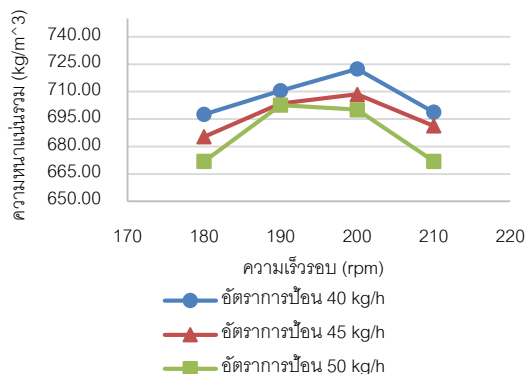


รูปที่ 9 ดัชนีความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดกากหม้อกรองความขึ้น 30.26 เปอร์เซ็นต์
(มาตรฐานเปียก)

3.3.5 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ผลการศึกษา พบว่าอัตราการป้อน แปรผกผันกับความหนาแน่นรวมดังแสดงในรูปที่ 10 กล่าวคือ ความ

หนาแน่นรวมลดลงเมื่ออัตราการบ้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบแผ่นอัดจาก 180 190 และ 200 รอบต่อนาที ความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบแผ่นอัด เพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 210 รอบต่อนาที เนื่องจากปรากฏการณ์ของน้ำและแป้ง (Starch คือ แป้ง เป็นโพลิเมอร์คาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช) เมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบ [24] ช่วงที่เพิ่มความเร็วรอบเป็น 210 รอบต่อนาที เป็นช่วงที่แป้งรวมตัวกับน้ำได้สูงสุดเมื่อกากหม้อกรองอัดเม็ดเย็นตัวลง น้ำที่มีอยู่จะหายไปทำให้เกิดช่องว่างภายในเม็ดเชื้อเพลิง ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 10 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหม้อกรองความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

3.3.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองมีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับขาน้อยที่เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็น

เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลแล้ว พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

4. สรุป

การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดชีวมวลจากกากหม้อกรองของโรงงานน้ำตาล เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีการอัดเม็ดขึ้นรูปจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) มีปัจจัยศึกษา คือ อัตราการบ้อน 3 ระดับ คือ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ ความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที คุณสมบัติทางกายภาพจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) มีค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 400.47 kg / m³ ค่ามุมกอง 19.12 องศา และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตสูงสุดที่พื้นผิวสังกะสี และพื้นผิวสเตนเลส คือ 0.55 ต่ำสุดที่พื้นผิวยางคือ 0.52 การขึ้นรูปอัดเม็ดจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ทุกปัจจัยที่ศึกษาสามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ดี มีความเหมาะสมในการนำไปอัดเม็ดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลทำ ที่อัตราการบ้อน 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ ความเร็วรอบแผ่นอัด 210 รอบต่อนาที ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่เหมาะสมมีความยาวเฉลี่ย 31.53±0.37 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.66±0.04 มิลลิเมตร ร้อยละเศษผงเฉลี่ย 1.31±0.01 ความทนทานเฉลี่ย 98.26±0.05 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 691.32±5.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร มีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม เนื่องจากลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหมักกรอง มีค่าคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกำหนด และมีค่าความร้อนซึ่งเหมาะแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการผลิตน้ำตาลและการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กทม. และขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนสถานที่รวมถึงสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 7 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=79&Itemid=200.
- [2] Laschi A, Marchi E, Gonzalez-Garcia S. Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. Energy. 2016; (130): 469-80.
- [3] Fiona MM. Global wood pellet market outlook [Internet]. 2015 [cited 2021 March 7]. Available from: <https://www.pellet.org/images/2015/FionaMcDermottHawkinsWright.pdf>.
- [4] Calderón C, Gauthier G, Jossart JM. AEBIOM statistical report 2015 [Internet]. 2015 [cited 2021 March 14]. Available from: <http://www.propellets.at/wpcontent/uploads/2015-aebiomstatisticalreportzusammenfassung.pdf>.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ข้อมูลโรงไฟฟ้าชีวมวล. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.dede.go.th/ewtnews.php?nid=41810>.
- [6] Goes T, Marra R, Silva GS. Setor sucroalcooleiro no Brasil situac,ao atual e perspectivas revista Política Agrícola. Revista de politica Agricola. 2008; 17(2): 39-51.
- [7] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยปีการผลิต 2562/63. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-1854.pdf>.
- [8] นวนรงค์ ชลคุป ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์ และ สุปงกช ไตโพนบูลย์. The Asian Biomass Handbook: A Guide for Biomass Production and Utilization. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ; 2551.

- [9] นิตยสารกานต์ กันตร์พีเกสร. สถานภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 30 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <http://webk.c.dede.go.th/testmax/no de/2151>.
- [10] มิตรผล. ภาพรวมธุรกิจไฟฟ้าชีวมวล. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : https://www.mitrphol.com/page_detail.php?p=2&topic=5.
- [11] Samuelsson R, Thyrel M, Sjöström M, Lestander TA. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*. 2009; 90(9): 1129–34.
- [12] Maraver1 AG, Carpio M. Biomass pelletization process. *WIT transactions on state of the art in science and engineering*. 2015; 85: 53-66.
- [13] สมโภชน์ สุดาจันทร์. สมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเกษตรและผลิตภัณฑ์. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2558.
- [14] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม และ วิลักษณ์นาม ผลเจริญ. การพัฒนาเครื่องคั่วเมล็ดทานตะวันกึ่งอัตโนมัติ. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*. 2559; 2(1): 23-32.
- [15] Kurlak A. The vertical screw conveyor powder properties and Screw conveyor design [Internet] 2005 [cited 2020 Mar 17]. Available from: <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/047.pdf>.
- [16] ASTM International. ASTM C 1444 standard test method for measuring the angle of repose of free-flowing mold powders. PA: American society for testing and materials; 2005.
- [17] The standard specific interest group for this test method TAPPI. T 815 om-01 coefficient of static friction (slide angle) of packaging and packaging materials. n.p.; 2016.
- [18] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปกร. โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอนาคต. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 17 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://e-lib.dede.go.th/>.
- [19] ASTM international. Standard test method for bulk density of densified particulate biomass fuels; 2013.

- [20] ASTM D240-17. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calori meter. ASTM International. West Conshohocken. PA: American society for testing and materials; 2017.
- [21] ก่อ ทวีเงิน ชัยยันต์ จันทศิริ และ กิตติพงษ์ ลาอุณ. คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของหญ้าเนเปียร์ก่อนสับ และหลังสับเพื่อผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 2, 11-12 กันยายน 2558, จังหวัดขอนแก่น; 2558.
- [22] Li Y, Liu H. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass bioenergy 2000; 19: 177–86.
- [23] Oduntan OB, Koya OA. Effect of speed, die sizes and moisture contents on durability of cassava pellet in pelletizer. Journal of research in agricultural engineering. 2015; 61(1): 35-9.
- [24] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนปนนท์. การเจลาตินไนซ์. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 30 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com>.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

สภาวะที่เหมาะสมของคุณสมบัติเชิงกลวัสดุประกอบอีพอกซีที่เติมแต่งด้วยเถ้าเบาขยะชุมชน
ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์

Optimization on Tensile and Flexural Properties of Egg Shell-TiO₂ Reinforced Fly Ash/Epoxy
Composite using Response Surface Methodology

วิศรุต เชาชัยภูมิ¹⁾ และ วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธณบุตร^{1),2)*}

Wisarat Chaochaiyaphum¹⁾ and Varinrumpai Seithtanabutara^{1),2)*}

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹⁾Energy Engineering Section, Engineering Faculty, Khon Kaen University, THAILAND

²⁾Center for Alternative Energy Research and Development, Khon Kaen University, THAILAND

Received: 26 May 2021

Revised: 8 June 2021

Accepted: 9 June 2021

Available Online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีที่เติมแต่งเสริมแรงด้วยเถ้าเบา ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลางภายใต้อิทธิพลของสองปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าเบา (ร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก) และปริมาณผสมของผงเปลือกไข่และไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก) โดยใช้สัดส่วนน้ำหนักผงเปลือกไข่ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์คงตัวเป็น 2 ต่อ 1 ส่วน ทั้งนี้เถ้าเบาที่ใช้มาจากโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชนจังหวัดขอนแก่น รวมทั้งผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกนำมาปรับปรุงพื้นผิวเบื้องต้นก่อนนำมาใช้เป็นสารเติมแต่ง วัสดุประกอบทั้งหมดที่เตรียมขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ออกแบบไว้จะถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล คือ ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานการบิดงอ และโมดูลัสการบิดงอ เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงสถิติจะทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยสำหรับแต่ละผลตอบสนองเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงพื้นผิว และสัดส่วนที่

เหมาะสมสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบนี้พบว่า การใช้เถ้าเบา ผงเปลือกไข่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และปริมาณอีพอกซี ปริมาณร้อยละ 10.8 4.95 2.47 และ 81.83 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติที่ดีที่สุด คือ มีความต้านทานแรงดึง 22.72 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานแรงดัด 43.11 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 521.5 เมกะปาสคาล และ ค่าโมดูลัสแรงดัด 1950 เมกะปาสคาล ซึ่งสภาวะนี้ได้รับการยืนยันจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: วัสดุประกอบ คุณสมบัติเชิงกล เถ้าเบาขี้เถ้าชุมชน ผงเปลือกไข่ ไทเทเนียมไดออกไซด์

Abstract

In this research, epoxy composites reinforced with fly ash, eggshell powder and titanium dioxide were prepared. Central composite technique was used for experimental design under the influence of two factors; amount of fly ash (10-15%wt.) and mixture amount of egg shell power and titanium dioxide (5-10 %wt.). The weight ratio of eggshell powder to titanium dioxide was fixed in 2:1. The fly ash provided from the municipal solid waste power plant in Khon Kaen province, including eggshell powder and titanium dioxide were surface pretreatment before used as the fillers. All composite materials prepared under the designed conditions were subjected to mechanical properties inspection of tensile strength, flexural strength, elastic modulus and flexural modulus. When statistical analysis was performed, a regression model for each response was obtained to analyze the results of surface response and optimum conditions for the preparation of this composite material. It was found that the optimum condition was fly ash, eggshell powder, titanium dioxide and epoxy of 10.8, 4.95, 2.47 and 81.83%wt., respectively. This optimum condition gave the composite material with the best of tensile strength, flexural strength, elastic modulus and flexural modulus of 22.72 MPa, 43.11 MPa, 521.5 MPa and 1950 MPa, respectively. Tri-replicated experiments confirmed this condition with an error less than 10 percent.

Keywords: Composite: Physical property: Municipal waste fly ash: Egg shell: Titanium dioxide

1. บทนำ

วัสดุประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) เป็นวัสดุวิศวกรรมที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป การนำกากของเสียมาใช้เป็นสารเสริมแรงวัสดุประกอบได้รับความสนใจมากขึ้น การใช้เถ้าเถ้า (Fly Ash, FA) จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เป็นสารเติมแต่ง (Filler) จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) และความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น [1] ซึ่งได้มีรายงานสอดคล้องกันกับการศึกษาของ Sim J และคณะ [2] ว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าเถ้า ตั้งแต่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงทนต่อการดัดโค้งมากขึ้น แต่การใช้ปริมาณเถ้าเถ้าที่มากเกินไปจะส่งผลให้วัสดุประกอบมีความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของเถ้าเถ้าไม่สม่ำเสมอ เพราะจะไปรวมตัวกันอยู่ที่จุดเดียว ดังนั้น จึงได้มีการปรับสภาพเถ้าเถ้าเบื้องต้นด้วยสารคู่ควบซิลาน (Silane Coupling Agent) Goh CK และคณะ [3] พบว่า การใช้เถ้าเถ้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุประกอบอีพอกซีมีคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นขึ้น เนื่องจากเถ้าเถ้าที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะมีพฤติกรรมกระจายตัวที่ดีมากในอีพอกซีเมทริกซ์ ในทำนองเดียวกัน มีรายงานโดย Nguyen TA [4] พบว่า การปรับสภาพผิวช่วยให้อนุภาคเถ้าเถ้าเข้าแทรกกระหว่างช่องว่างของการเชื่อมต่อแบบสายโซ่ของอีพอกซีเมทริกซ์ได้ดีกว่าเถ้าเถ้าไม่ปรับสภาพ โดยเฉพาะการใช้ที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำ

ให้ลดความยืดหยุ่น (Flexible) ของวัสดุประกอบ แต่เพิ่มความแข็ง (Hardness) นั้นหมายถึงเพิ่มความเปราะแก่วัสดุ

เนื่องจากเปลือกไขเป็นภาควัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงทดแทนแคลเซียมคาร์บอเนตในวัสดุได้ แต่มีงานส่วนน้อยในการนำวัสดุนี้มาใช้เป็นสารเสริมแรงวัสดุประกอบอีพอกซี ได้มีรายงานโดย Hamdi WJ และคณะ [5] พบว่า วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผงเปลือกไขจะมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal Stability) มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ลดลง มีอุณหภูมิแก้ว (Glass Temperature) สูงกว่าวัสดุอีพอกซีบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับสภาพผงเปลือกไขให้เหมาะสมก่อนนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งวัสดุประกอบอีพอกซี ทั้งนี้ เพื่อให้มีการกระจายตัวของอนุภาคได้ทั่วถึงส่งผลให้ความต้านทานแรงดัดของวัสดุประกอบมีค่าสูงขึ้น มีความเสถียรทางความร้อนที่ดีขึ้น ทั้งนี้อาจใช้ กรดสเตียริก (Stearic Acid) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [6-7]

สารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงอุตสาหกรรมพลาสติก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แต่ยังมีการนำมาใช้เป็นวัสดุเติมแต่งสำหรับโพลิเมอร์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ไม่กว้างขวางนัก ได้มีรายงานว่า วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยปริมาณนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจะมีสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล ที่ดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็น ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัด ซึ่งสูงกว่าวัสดุอีพอกซีบริสุทธิ์ [8-10] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้และสภาวะการเตรียมวัสดุด้วย ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กระดับนาโนทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลงส่งผลให้วัสดุมีค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นและโมดูลัสแรงดัดลดลง มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจากเดิม [11-12] ซึ่งมีความต้านทานแรงดัดสูงขึ้น

การศึกษานี้มุ่งเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีเถ้า เบบาสีเสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่และไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสมบัติเหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมต่อไป เช่น ฉนวนความร้อน แผ่นกันแสง แผ่นกัน วัสดุโครงสร้าง เพดาน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยการใช้สารเติมแต่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด คุณสมบัติ และปริมาณ ของสารเติมแต่งนั้นๆ รวมถึงกระบวนการในการผสม เพื่อให้มีการกระจายตัวของอนุภาคแต่ละชนิดในเนื้อวัสดุ ดังนั้น การเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีที่มีการใช้สารเติมแต่งมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป จำเป็นต้องคำนึงถึงสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเชิงกลโดดเด่นในแต่ละด้านตามคุณลักษณะของสารเติมแต่งนั้นๆ

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ด้วยการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามความต้องการภายใต้ปัจจัยที่กำหนดเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการโดยทั่วไปที่เป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) โดยจะมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology,

RSM) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีการนำเทคนิคทางสถิติ DOE และ RSM มาใช้ในการศึกษา และไม่พบการเตรียมวัสดุประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเถ้าเบบาสีจากโรงงานไฟฟ้าขยะชุมชน ผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำวิธีการนี้มาใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบดังกล่าว เพื่อให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติเชิงกลด้านแรงดึงและแรงดัด ที่ดีภายใต้สัดส่วนที่เหมาะสมของแต่ละสารเติมแต่ง

2. วิธีการวิจัย

2.1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เถ้าเบบาสี (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชน จ. ชอนแก่น Epoxy Resin 200A (Diglycidyl ether of Bisphenol-A) Hardener 200B (3-aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylamine benzyl alcohol) จากบริษัท Infinite Crafts Co., Ltd. Silane Coupling Agent (3-Glycidyloxypropyl) จากบริษัท Sigma Aldrich Co., Ltd. เปลือกไข่ (Eggshell) จากครัวเรือน และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกรดทางการค้า ชนิด P25 ไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ และกรดโอลิกจากเป็นเกรดห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเถ้าเบบาสี และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่มีขั้วและชอบน้ำ (Hydrophilic) ในขณะที่อีพอกซีเป็นสารที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ จึงต้องทำการปรับสภาพโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะ สูตรทั่วไปของสารคู่ควบไซเลน คือ $(\text{R}'\text{O})_x\text{-M-}(\text{R-X})_y$ โดย M เป็นหมู่

โลหะ เช่น Si, Ti, Zr และ X เป็นหมู่ไวไนล (-CH=CH₂) หรือ หมู่อะมิโน (-RNH₂) และ R เป็นหมู่อินทรีย์เชื่อมระหว่าง X กับ M กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารคู่ควบไฮโดรไลซิสจากน้ำที่ใส่เพิ่มหรือความชื้นบนผิวเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Silanols) จากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลจับกับหมู่ -OH บนพื้นผิวของน้ำหลุดออกเกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) และเกิดการยึดติดกับผิวของสารอนินทรีย์หรือสารตัวเติมและสุดท้ายสารคู่ควบไฮโดรไลซิสทำปฏิกิริยากันเองเกิดการยึดเกาะกันหลายชั้นเป็นตาข่ายหรืออาจเกิดเป็นสารเชื่อมกัน ในการศึกษานี้ Silane Coupling Agent (3-Glycidyloxypropyl) จะถูกเลือกใช้สำหรับอีพอกซีเรซิน [13] เริ่มต้นจะนำสารคู่ควบไฮโดรไลซิส (Silane Coupling Agent) ปริมาณ 2 กรัม มาละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร ให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 30 นาที แล้วค่อยๆ โปรยเข้าเบา หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 100 กรัม ลงไปภายใต้การกวนต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งๆ ละ 300 มิลลิลิตร และแยกอนุภาคด้วยเครื่อง Rotofix 32A อบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาบดและคัดขนาดให้ได้อนุภาค 200 เมช ขนาด 75 ไมครอน จะได้เป็นเข้าเบา และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพ

ส่วนเปลือกไข่จะถูกนำมาล้าง แยกเยื่อเมมเบรน แล้วบดละเอียดเป็นผงอนุภาค 200 เมช แล้วจึงนำมาปรับสภาพโดยการต้มล้างผงเปลือกไข่ 100 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์

ปริมาตร 3 ลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกรองแยก และอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาบดให้ได้ขนาด 75 ไมครอน จากนั้น เตรียมสารละลายกรดโอลิอิกในตัวทำละลายเอทานอล และน้ำกลั่น โดยใช้กรดโอลิอิก 5 กรัม เอทานอล 100 กรัม และน้ำกลั่น 300 กรัม กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงค่อยๆ โปรยผงเปลือกไข่ที่เตรียมไว้ และกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากครบตามเวลาแล้วนำไปกรอง และนำผงที่ได้ไปอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2.2 การเตรียมวัสดุประกอบ

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย 2 ปัจจัย คือ FA (X1, ร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก) และ ES+TiO₂ (X2, ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก) โดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ES ต่อ TiO₂ จะคงที่เป็น 2 ต่อ 1 ส่วน โดยเลือกใช้เทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เนื่องจากมีปัจจัยศึกษาเพียง 2 ปัจจัย และมีความเหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลยกกำลังสอง สำหรับปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) โดยทำการออกแบบที่ CCD 5 ระดับ ค่า alpha=0.5 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ได้ผลการออกแบบทั้งหมด 14 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ ตัวแปรตอบสนองมีทั้งหมด 4 ค่า คือ Tensile Strength Flexural Strength Elastic Modulus และ Flexural Modulus ในการเตรียมวัสดุประกอบ จะกำหนดมวลรวมของวัสดุประกอบทั้งหมดจะเป็น 150 กรัม สำหรับการหล่อในโมลด์ (Mold) อะคริลิกขนาด 20x20x0.3 เซนติเมตร โดยใช้ Hardener 200B

คงตัวที่ 50 กรัม ในการเตรียมชิ้นงานวัสดุประกอบ เริ่มจากนำ Epoxy Resin 200A และเถ้าเบามาชั่ง น้ำหนักให้ได้ตามสัดส่วน โดยทำการผสม Epoxy Resin 200A กับ Hardener 200B ปริมาณ 50 กรัม กวนให้เข้ากัน 20 นาที จากนั้นนำเถ้าเบาค่อย ๆ เปรย ลงไปเพื่อให้ผสมเข้ากันกับ Epoxy กับ Hardener ตาม ด้วยผงเปลือกไข่ และไทเทเนียมไดออกไซด์ กวนให้

เข้ากันอีก 5 ถึง 10 นาที เสร็จแล้วเทลงแม่พิมพ์ อะคริลิกที่เตรียมไว้ ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง แล้วจึง แกะขึ้นเพื่อนำไปตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานเลเซอร์ รุ่น BCL 1309 บริษัท Royal Intertrade Co., Ltd. ให้ได้ ตามมิติมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 [3, 14] และ ASTM 790 [15] สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

ตาราง 1 ผลการทดสอบของเชิงกลของแต่ละการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ CCD

Run	FA (X1, wt%)	ES+TiO ₂ (X2, wt%)	Tensile Strength (Y1, MPa)	Flexural Strength (Y2, MPa)	Elastic Modulus (Y3, MPa)	Flexural modulus (Y4, MPa)
1	13.75	7.50	20.04	41.97	452.61	1785.35
2	12.50	6.25	21.10	40.85	465.43	1730.75
3	12.50	7.50	25.22	38.02	579.14	1697.12
4	12.50	8.75	22.45	36.88	525.14	1314.99
5	11.25	7.50	21.24	44.94	475.02	1924.54
6	12.50	7.50	24.53	39.12	571.17	1647.93
7	12.50	7.50	24.87	38.72	599.73	1635.14
8	12.50	7.50	25.78	39.72	605.48	1662.18
9	12.50	7.50	24.69	38.36	588.09	1642.02
10	10.00	5.00	22.47	40.58	480.75	1713.18
11	10.00	10.00	18.98	40.81	467.25	1840.03
12	15.00	5.00	17.71	49.61	420.62	2215.13
13	12.50	7.50	24.25	38.15	612.79	1651.21
14	15.00	10.00	18.20	42.51	435.06	1857.71

2.3. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลวัสดุประกอบ

เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, INSTRON, Model EZ-LX) ขนาดโหลด เซลล์ 5 กิโลนิวตัน จะถูกใช้ในการทดสอบแรงดึง และแรงดัด ซึ่งในการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นทดสอบที่ใช้ เป็นประเภทที่ 1 [3, 14] เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus)

ส่วนในการทดสอบแรงดัด (Flexural Test) การทดสอบจะเป็นลักษณะแรงดัดโค้ง 3 จุด (3-Point Bending Test) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 790 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) และ ค่าโมดูลัสแรงดัด (Flexural Modulus) [15] โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 6 ซ้ำ แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการใช้โปรแกรม MINITAB 17 ในการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) จะได้ผลการออกแบบแสดงดังตารางที่ 1 ผลตอบสนองของสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่ได้จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขการออกแบบการทดลองแบบ CCD ทั้งหมด 14 การทดลอง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ซึ่งก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ได้มีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่เกิดขึ้นด้วยฟังก์ชัน

Graphical Summary และ Normality Test พบว่าข้อมูลตอบสนองของแต่ละค่าให้แผนภาพฮิสโตแกรมมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ และมี P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่ามัธยฐาน (Median) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น สามารถสรุปผลยืนยันได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติ และได้มีการยืนยันจาก การกระจายตัวของ Residuals พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความเสถียร จากผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง สรุปได้ว่าไม่มีความผิดปกติจากการทดลองที่เกิดขึ้น และข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 2 ค่า P-Value และ F-Value แต่ละเทอมของแบบจำลองการถดถอยของแต่ละผลการตอบสนอง

Response	Term	P-Value	F-Value	F-Value	
Tensile Strength (Y1)	Regression	0.025	5.09	3.87	Significant
	Linear	0.230	1.83	4.74	Insignificant
	Square	0.006	11.95	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.259	1.51	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<u>0.012</u>	<u>15.20</u>	<u>6.59</u>	<u>Significant</u>
$R^2=81.36\%$; $R^2\text{-adj.}=65.38\%$					
Flexural Strength (Y2)	Regression	0.020	5.53	3.87	Significant
	Linear	0.043	5.10	4.74	Significant
	Square	0.012	8.75	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.093	3.77	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<u>0.013</u>	<u>14.73</u>	<u>6.59</u>	<u>Significant</u>
$R^2=82.58\%$; $R^2\text{-adj.}=67.65\%$					
Elastic Modulus (Y3)	Regression	0.047	3.99	3.87	Significant
	Linear	0.562	0.63	4.74	Insignificant
	Square	0.007	11.22	4.74	Significant
	2-Way Interaction	0.768	0.09	5.59	Insignificant
	Lack-of-fit	<u>0.005</u>	<u>24.21</u>	<u>6.59</u>	<u>Significant</u>
$R^2=77.35\%$; $R^2\text{-adj.}=57.94\%$					
	Regression	0.022	5.36	3.87	Significant
	Linear	0.095	3.35	4.74	Insignificant

Response	Term	P-Value	F-Value	F-Value	
Flexural	Square	0.013	8.52	4.74	Significant
Modulus	2-Way Interaction	0.072	4.48	5.59	Insignificant
(Y4)	Lack-of-fit	<u>0.001</u>	<u>50.71</u>	<u>6.59</u>	<u>Significant</u>
	$R^2=82.12\%$; $R^2\text{-adj.}=66.79\%$				

ตารางที่ 3 สมการทำนายผลตอบสนองของสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ

<i>Tensile Strength (MPa)</i>	$Y1 = -89.7 + 19.2 * X1 - 0.51 * X2 - 0.837 * (X1)^2 - 0.112 * (X2)^2 + 0.159 * (X1) * (X2)$
<i>Flexural Strength (MPa)</i>	$Y2 = 237.1 - 43.5 * X1 + 19.08 * X2 + 1.860 * (X1)^2 - 1.080 * (X2)^2 - 0.293 * (X1) * (X2)$
<i>Elastic Modulus (MPa)</i>	$Y3 = -2984 + 557 * X1 + 32 * X2 - 23.0(X1)^2 - 2.9 * (X2)^2 + 1.12 * (X1) * (X2)$
<i>Flexural Modulus (MPa)</i>	$Y4 = 14582 - 2980 * X1 + 1492 * X2 + 126.6(X1)^2 - 85.9(X2)^2 - 19.37(X1) * (X2)$

ผู้วิจัยจึงดำเนินการตรวจสอบความแปรปรวนต่อ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha=0.05$) จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ค่าการขาดแคลนความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit) ค่าการกระจายข้อมูล (F-Value) ค่าความน่าจะเป็น (P-Value) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อเป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลอง หลังประมวลผลแล้วได้ค่าต่าง ๆ ดังสรุปเปรียบเทียบ แต่ละแบบจำลองถดถอยของแต่ละผลตอบสนองดัง ตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยสมการเชิงเส้น (Linear Model) สมการกำลังสอง (Quadratic Model) และ สมการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) หรือ อันตรกิริยา พบว่า แบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง Tensile Strength Elastic Modulus Flexural

Strength และ Flexural Modulus จะมีเฉพาะเทอมยกกำลังสอง (Square) ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ส่วนแบบจำลองการถดถอยของ Flexural Strength จะมีเทอม Linear ที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ด้วย และแบบจำลองการถดถอยของ Flexural Strength จะมีเฉพาะเทอมอันตรกิริยา (2-Way Interaction) ที่ให้ค่า P-Value มากกว่า 0.05 แต่แบบจำลอง Regression ที่ได้สำหรับผลตอบสนองแต่ละตัว ก็ยังคงให้ P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองแต่ละตัวที่ได้ จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ค่าความผันแปรทั้งหมด 100 หน่วย พบว่า R^2 ของแต่ละแบบจำลองมีค่าที่สูงแตกต่างกัน R^2 มีค่าเท่ากับ 81.36 82.58 77.35 และ 82.12 เปอร์เซนต์

สำหรับผลตอบสนอง Tensile Strength Flexural Strength Elastic Modulus และ Flexural Modulus ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของตัวแปรที่ได้จากผลวิเคราะห์ ANOVA ดังข้างต้น ถูกนำไปเขียนสมการทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปร จะได้สมการทำนายผลตอบสนองแต่ละตัวของวัสดุประกอบในรูป สมการถดถอยที่ระบุในรูปตัวแปร Uncoded Units ดังตารางที่ 3

สมการทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่ได้ เพื่อให้ได้วัสดุประกอบที่มีผลตอบสนองตามต้องการคือ มีความเหนียว มีความต้านทานแรงดึงและแรงบิดงอ ไม่ยืดหยุ่นง่าย ทนสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปภายใต้แรงดึงและแรงบิดงอ พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเติมแต่งสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบ ภายใต้พิจารณาค่าความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability) แล้ว พบว่า มีค่าความพึงพอใจเชิงสถิติสูงสุดถึง 100 เปอร์เซนต์ แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดที่ให้ค่าสูงสุดในทุกผลตอบสนอง และเข้าใกล้ค่าเป้าหมายความพึงพอใจมากที่สุด นั่นคือ วัสดุประกอบที่เตรียมจากการใช้เถ้าเบาปริมาณร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก ปริมาณผงเปลือกไข่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 7.42 โดยน้ำหนัก (สัดส่วนผงเปลือกไข่ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็น 2 ต่อ 1) จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติ Tensile Strength เป็น 22.72 เมกะปาสคาล Flexural Strength เป็น 43.11 เมกะปาสคาล Elastic Modulus เป็น 521.5 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus เป็น 1950 เมกะปาสคาล

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบค่าทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เตรียมจากสัดส่วนที่เหมาะสมนี้ เพื่อเปรียบเทียบค่าทำนายที่ได้จากแบบจำลองสมการที่ใช้ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จะได้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองสำหรับ Tensile Strength เป็น 22.63 เมกะปาสคาล Flexural Strength เป็น 43.32 เมกะปาสคาล Elastic Modulus เป็น 513.38 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus เป็น 1977.69 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่า สมการถดถอยที่ใช้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซนต์ ดังนั้นสมการทำนายที่ได้นี้ จึงสามารถนำมาใช้ทำนายได้ในการศึกษาครั้งนี้

3.2. การวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) จะเป็นการยืนยันความถูกต้องร่วมกับผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม (Optimization Analysis) โดยดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์เป็นคู่ ในรูปของกราฟพื้นผิว (Surface Plot) ของผลตอบสนองแต่ละตัวดังแสดงใน รูปที่ 1 เมื่อพิจารณาผลตอบสนอง Tensile Strength พบว่า การใช้ปริมาณ FA ที่ต่ำกว่าร้อยละ 12.55 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าทนแรงดึงวัสดุประกอบมีค่าสูงเมื่อใช้ปริมาณ ES+TiO₂ ที่อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 7.66 โดยน้ำหนัก ซึ่งค่าการทนแรงดึงสูงที่สุดเป็น 24.40 เมกะปาสคาล เมื่อใช้ปริมาณ FA ประมาณร้อยละ 12.05 และปริมาณ ES+TiO₂ ประมาณร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก แต่การใช้ปริมาณ FA และ ES+TiO₂ ที่สูงกว่านี้จะทำให้ค่าทนแรงดึงลดลง

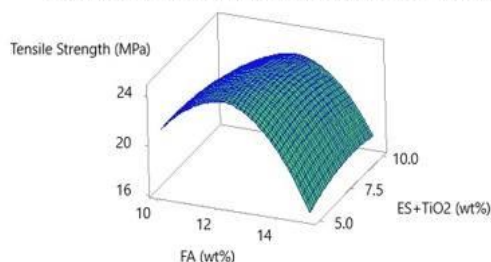
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Flexural Strength พบว่า การใช้ปริมาณ FA ในสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 10.2 โดยน้ำหนัก และปริมาณ ES+TiO₂ ระหว่างร้อยละ 6.68 ถึง 8.25 โดยน้ำหนัก จะให้วัสดุประกอบที่มีค่าทนแรงดัดสูง แต่เมื่อใช้สัดส่วน FA มากขึ้น จะทำให้ค่าทนแรงดัดลดลงโดยเฉพาะการใช้ปริมาณที่น้อยกว่าหรือมากกว่าช่วงนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สัดส่วน FA สูงมากกว่าร้อยละ 14.81 โดยน้ำหนัก และสัดส่วน ES+TiO₂ ระหว่างร้อยละ 5.35 ถึง 8.45 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้วัสดุประกอบมีค่าทนแรงดัดสูงเช่นเดียวกัน พบค่าสูงสุดประมาณ 53.36 เมกะปาสคาล ที่สัดส่วน FA ร้อยละ 15 และ ES+TiO₂ อยู่ที่ประมาณร้อยละ 6.78 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Elastic Modulus ระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ FA และ ES+TiO₂ พบว่า วัสดุประกอบจะมีค่า Elastic Modulus สูงสุด เมื่อใช้ FA ปริมาณร้อยละ 11.92 ถึง 12.68 และ ES+TiO₂ 6.88 ถึง 9.01 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้

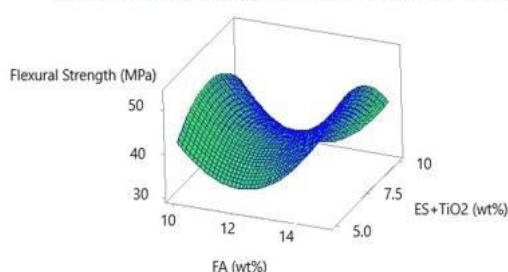
เมื่อใช้ FA สัดส่วนประมาณร้อยละ 12.29 และ ES+TiO₂ สัดส่วนประมาณร้อยละ 7.90 โดยน้ำหนัก จะให้ค่า Elastic Modulus สูงที่สุดเป็น 573.30 เมกะปาสคาล แต่การใช้ปริมาณ FA ที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงนี้จะส่งผลให้ค่า Elastic Modulus ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณ ES+TiO₂ ที่ใช้

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ Flexural Modulus ระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างเปอร์เซ็นต์ FA และ ES+TiO₂ พบว่า การใช้ปริมาณ FA ในสัดส่วนที่ต่ำกว่าร้อยละ 10.34 และใช้ ES+TiO₂ ปริมาณร้อยละ 6.25 ถึง 8.85 โดยน้ำหนัก จะให้วัสดุประกอบที่มีค่า Flexural Modulus สูง ซึ่งเมื่อใช้ปริมาณ FA ที่สูงขึ้น และใช้ปริมาณ ES+TiO₂ ที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงนี้ จะส่งผลให้ค่า Flexural Modulus ลดลง แต่การใช้ปริมาณ FA ที่สูงกว่าร้อยละ 14.75 และปริมาณ ES+TiO₂ ร้อยละ 5.35 ถึง 8.45 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้วัสดุประกอบมีค่า Flexural Modulus สูง

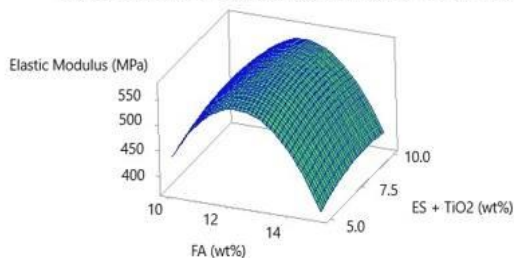
Surface Plot of tensile strength (MPa) vs ES+ TiO₂ (wt%), FA (wt%)



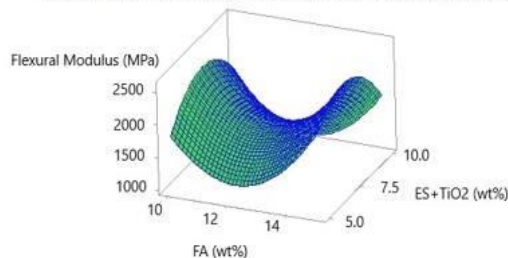
Surface Plot of flexural strength (MPa) vs ES+ TiO₂ (wt%), FA (wt%)



Surface Plot of elastic modulus (MPa) vs ES+ TiO₂ (wt%), FA (wt%)



Surface Plot of flexural modulus (MPa) vs ES+ TiO₂ (wt%), FA (wt%)



รูปที่ 1 โครงร่างและกราฟพื้นผิวตอบสนองแต่ละตัวระหว่าง FA (%) และ ES+TiO₂ (%)

แนวโน้มสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบในการศึกษานี้ จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goh CK [3] และ Shah AH และคณะ [6] คือ วัสดุประกอบจะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าเบาหรือผงเปลือกไข่เพิ่มขึ้น และการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดัดสูงขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับรายงานวิจัยของ Ozsoy I และคณะ [8] ดังนั้น การใช้สารเติมแต่งร่วมกันทั้งสามชนิดด้วยวิธีการขึ้นรูปในการศึกษาค้างนี้ จะทำให้ได้วัสดุประกอบมีสมบัติแรงดัดเทียบเคียงนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนพลาสติกอื่นๆ ได้ เช่น แผ่นโพลีคาร์บอเนต แผ่นโพลีเอทิลีน แต่อย่างไรก็ตาม ต้องได้รับการพัฒนาด้านสมบัติแรงดึงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

4. สรุปผล

จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงสถิติสำหรับแต่ละโมเดล Regression ที่ใช้ในการทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ พบว่า ค่า P-Value ของ X1 (ปริมาณ FA) น้อยกว่า ของ X2 (ปริมาณ ES+TiO₂) อีกทั้งสมการทำนายแสดงให้เห็นว่าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ X1 มีค่ามากกว่าของ X2 จึงยืนยันได้ว่า X1 เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองสมบัติเชิงกลมากกว่า X2 โดยสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเติมแต่งสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบ คือ การใช้เถ้าเบาที่ผ่านการปรับปรุงปริมาณร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก ผงเปลือกไข่ปริมาณร้อยละ 4.95 โดยน้ำหนัก ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2.47 โดยน้ำหนัก และปริมาณอีพอกซีร้อยละ 81.83 โดย

น้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีสมบัติ Tensile Strength = 22.72 เมกะปาสคาล, Flexural Strength = 43.11 เมกะปาสคาล, Elastic Modulus = 521.5 เมกะปาสคาล และ Flexural Modulus = 1950 เมกะปาสคาล อย่างไรก็ตาม หากมีการเตรียมวัสดุด้วยวิธีหรือสภาวะที่ต่างออกไปจากการศึกษานี้ อาจจะทำให้ได้สัดส่วนเหมาะสมและสมบัติวัสดุประกอบที่แตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้าขยะมูลฝอยชุมชน ตำบลโนนท่อน อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างเถ้าเบา และขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนงบประมาณส่วนหนึ่งในการศึกษาค้างนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sangamesh, Ravishankar KS, Kulkarni SM. Synthesis and comparison of mechanical behavior of fly ash-epoxy and silica fumes-epoxy composite. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; 225(1): 012299.
- [2] Sim J, Kang Y, Kim BJ, Park YH, Lee YC. Preparation of fly ash/epoxy composites and its effects on mechanical properties. Polymers (Basel). 2020; 12(1): 1–12.

- [3] Goh CK, Valavan SE, Low TK, Tang LH. Effects of different surface modification and contents on municipal solid waste incineration fly ash/ epoxy composites. Waste Management. 2016; 58: 309–15.
- [4] Nguyen TA. Effects of the Amount of Fly Ash Modified by Stearic Acid Compound on Mechanical Properties, Flame Retardant Ability, and Structure of the Composites. International Journal of Chemical Engineering. 2020; 2020: 6–11.
- [5] Hamdi WJ, Habubi NF. Preparation of epoxy chicken eggshell composite as thermal insulation. Journal of the Australian Ceramic Society. 2018; 54(2): 231–5.
- [6] Shah AH, Zhang Y, Xu X, Dayo AQ, Li X, Wang S, et al. Reinforcement of stearic acid treated egg shell particles in epoxy thermosets: Structural, thermal, and mechanical characterization. Materials (Basel). 2018; 11(10): 1872.
- [7] Dash C, Das A, Behera S, Bisoyi DK, Diffractometer X. Influence of Pretreatment on Mechanical properties of Bio waste Eggshell Composite. Indian Institute of Metals, NMD- ATM 7 1st Annual Technical Meeting; 2017 November 11-14: India; 2017.
- [8] Ozsoy I, Demirkol A, Mimaroglu A, Unal H, Demir Z. The influence of micro- And nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites. Strojinski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering. 2015; 61(10): 601–9.
- [9] Bezy NA, Fathima AL. Effect of TiO₂ nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy- Resin System. International Journal of Engineering Research and General Science 2015; 3(5): 143–51.
- [10] Kumar K, Ghosh PK, Kumar A. Improving mechanical and thermal properties of TiO₂ - epoxy nanocomposite. Composites Part B: Engineering. 2016; 97: 353–60.
- [11] Singh SK, Singh S, Kumar A, Jain A. Thermo- mechanical behavior of TiO₂ dispersed epoxy composites. Engineering Fracture Mechanics. 2017; 184: 241–8.
- [12] Battawi AA, Abed BH, Khuder AWH. Effects of reinforcements (fiber glass, TiO₂ and Y₂O₃) with different volume fraction on the mechanical properties of epoxy composite. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2019; 10(1): 507–15.

- [13] วิฑูร วิมลทรง. การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอเนต [วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2554.
- [14] ASTM D638-14. ISO 17296-3:2014, Additive manufacturing - General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, ASTM International, West Conshohocken. PA; 2014.
- [15] ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Annual Book of ASTM Standards. 2002. p. 1–12.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเจือถ่านกัมมันต์เศษไม้ยูคาลิปตัสด้วยโมโนเอทานอลามีนเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Doping of Eucalyptus Wood Residue based-Activated Carbon with Monoethanolamine for Enhancement of CO₂ Adsorption

อรอนงค์ ศรีขาว¹⁾ และ วรินทร์ไพ เศรษฐธัญญบุตร^{1),2)*}Onanong Srikhaow¹ and Varinrumpai Seithtanabutara^{1,2)*}¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹⁾Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Khon Kaen University, THAILAND²⁾Center for Alternative Energy Research and Development, Khon Kaen University, THAILAND

Received: 14 June 2021

Revised: 6 July 2021

Accepted: 17 July 2021

Available Online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้มุ่งพัฒนาตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกากชีวมวล โดยการนำเศษไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 20 กรัม มาแช่กระตุ้นภายใต้คลื่นอัลตราโซนิกในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 3 และ 6 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร เป็นเวลา 45 นาที แล้วนำไปคาร์บอนไนเซชันที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,330 ตารางเมตรต่อกรัม และมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นถ่านกัมมันต์นี้จึงได้ถูกคัดเลือกมาพัฒนาใช้เป็นตัวดูดซับโดยนำมาเจือสารโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลของวิธีการสองแบบ คือ วิธีการเจือแบบการต้มเคี่ยวด้วยเพลทให้ความร้อน และวิธีการเจือแบบแช่ผสมเขย่าร่วมคลื่นอัลตราโซนิก ที่มีต่อสมบัติของตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และ ปริมาตรรูพรุนรวม มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารเจือ

ทั้งนี้ การใช้วิธีการเจือแบบแช่ผสมเขย่าวร่วมคลื่นอัลตราโซนิกให้ผลของการลดลงสมบัติเหล่านี้น้อยกว่าวิธีการเจือแบบต้มให้ความร้อน ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือตัวดูดซับที่ได้จากการเจือสารโมโนเอทานอลามีนในความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยการใช้วิธีการเจือแบบแช่ผสมเขย่าวร่วมคลื่นอัลตราโซนิกให้ค่าเป็น 59.67 มิลลิโมลต่อกรัม

คำสำคัญ: ตัวดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ ยูคาลิปตัส โมโนเอทานอลามีน อัลตราโซนิก

Abstract

This study aimed to develop a carbon dioxide adsorbent from biomass residue. Eucalyptus wood residue of 20 grams was sonically activated in 160 ml of a phosphoric acid solution of 3 and 6 molar for 45 minutes. Then the activated samples were carbonized at 450°C for 1 hr in inert atmosphere. It was found that activated carbon prepared at immersion in 3 molar of phosphoric acid solution had a high specific surface area of 1,330.43 m²/g with mostly mesopores. Therefore, this activated carbon was selected to develop as an adsorbent by doping monoethanolamide at a concentration of 10-50% by weight. Effect of using two doping methods; hot-plate heating and shaking- ultrasonic, were compared on the adsorbent properties. Results showed that the specific surface area, pore size and total pore volume of these doped-adsorbent decreased with the concentration of the dopant. Using shaking-ultrasonic technique gave less reduction of these properties than that of heating technique. The adsorbent with the greatest ability to adsorb carbon dioxide gas of 59.67 mmol/g was prepared from doping 10 percent by weight of monoethanolamine by shaking-ultrasonic method.

Keywords: Adsorbent: Carbondioxide: Eucalyptus: Monoethanolamine: Ultrasonic

1. บทนำ

การควบคุมปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีหลากหลายวิธีการ ทั้งนี้การใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีราคาถูก ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) จึงเป็นตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้เพราะมีความเป็นรูพรุนสูง มีพื้นผิวมาก มีความหนาแน่นต่ำ มีโครงสร้างที่แข็งแรง และมีความเสถียรเชิงความร้อนสูง [1] ซึ่งผลิตได้จากวัตถุดิบชีวมวลโดยผ่านกระบวนการเผา (carbonization) ที่สภาวะอุณหภูมิและการกระตุ้น (activation) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้นิยมใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) มากกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) เนื่องจากมีความคุ้มค่าทางด้านพลังงาน และผลผลิตมากกว่า สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น [2] ทั้งนี้ขนาดรูพรุนขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ สารตั้งต้นและกระบวนการกระตุ้น จากการใช้ H_3PO_4 เป็นสารกระตุ้น พบว่าให้ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาวะการกระตุ้นและสภาวะการคาร์บอนไนเซชัน ถ่านกัมมันต์เปลือกส้มโอ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,252 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์จากหญ้าต้นอ่อน มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 675 ตารางเมตรต่อกรัม [3] ถ่านกัมมันต์จากผงขี้เลื่อย มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,509 ตารางเมตรต่อกรัม [4] ถ่านกัมมันต์เศษไม้ยูคาลิปตัส มีค่าพื้นที่

ผิวจำเพาะสูงถึง 1,875-2,117 ตารางเมตรต่อกรัม [5] เมื่อความเข้มข้นของ H_3PO_4 สูงขึ้น ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น [2] ได้มีการนำคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic) มาใช้ร่วมกระบวนการกระตุ้นทางเคมี เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ให้ได้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ดังเช่น การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ได้จากผงขี้เลื่อย พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในแช่กระตุ้น H_3PO_4 ภายใต้คลื่นอัลตราโซนิกทำให้ได้ถ่านกัมมันต์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนเพิ่มขึ้น [6] อีกทั้งใช้ระยะเวลาในสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์สั้นลงถึงร้อยละ 85 และได้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง

จึงได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้เป็นวัสดุดูดซับ CO_2 ซึ่งกลไกการดักจับจะเป็นทางกายภาพร่วมกับทางเคมี ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุน มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีปริมาตรรูพรุนสูง และมีกลุ่มฟังก์ชันพื้นผิวที่สามารถสร้างพันธะกับ CO_2 ได้ดี เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับได้สูง ดังเช่น ถ่านกัมมันต์จากต้นอ้อที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,122 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถดูดซับ CO_2 ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 และ 30 บาร์ สูงถึง 6.3 และ 15.4 มิลลิโมลต่อกรัม [7] ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มเตรียมจากการคาร์บอนไนซ์ที่ 600 องศาเซลเซียส แล้วกระตุ้นในอัตราส่วนของ KOH ต่อเปลือกปาล์มที่ 1:3 โดยน้ำหนัก สามารถดูดซับ CO_2 สูงถึง 4.4 และ 6.3 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ 25 และ 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่ความดัน 1 บาร์ [8] ถ่านกัมมันต์จากลูกมะกอกเหลืองที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH ร่วมกับการไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีปริมาณการดูดซับสูงถึง 10.5 มิลลิโมลต่อกรัม

ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ [9] ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วไพน์ที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH ที่อัตราส่วนของ KOH ต่อเปลือกถั่วไพน์ที่ 2 โดยน้ำหนัก และการคาร์บอนไนซ์ที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที มีปริมาณการดูดซับสูงถึง 5 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ 25 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 1 บาร์ และเมื่อลดอุณหภูมิลงที่ 0 องศาเซลเซียส ทำให้มีปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 7.7 มิลลิโมลต่อกรัม [10] ถ่านกัมมันต์จากเปลือกอาร์แกนจากการกระตุ้นด้วย KOH ร่วมกับการคาร์บอนไนซ์ที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการดักจับ CO₂ สูงถึง 5.63 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ [11]

ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมีที่มีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ CO₂ [12-13] จากรายงานการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกลุ่มเอมีนร่วมกับการอบให้แห้งที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [11] โดยใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายของโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ร่วมกับเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyl Diethanolamine, MDEA) ที่ 1:0.6 โดยโมล และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายเตตราเอทิลีนเพนตามีน (tetraethylenepentamine, TEPA) ที่ 1:0.3 โดยโมล พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยเอมีนสามารถดักจับ CO₂ ได้สูงขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วย MEA-MDEA สามารถดูดซับ CO₂ สูงถึง 10.6 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ปรับปรุงพื้นที่ผิวสามารถดูดซับ CO₂ เท่ากับ 9.6 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ 25 องศา

เซลเซียส ความดัน 25 บาร์ เช่นเดียวกัน ได้มีรายงานการศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มด้วย MEA และไดเอทานอลามีน (Diethanolamine, DEA) [14] ในปริมาตร 5 มิลลิลิตร (3% w/v) เป็นเวลา 15 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เจือสารเอมีนนี้ มีความสามารถดูดซับ CO₂ สูงถึง 5.3 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บาร์ จากการปรับปรุงพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ปอแก้วด้วย MEA ที่ 1:1 โดยน้ำหนัก สามารถดูดซับ CO₂ สูงถึง 2.07 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ความดัน 1.15 บาร์ [13]

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานเสนอวิธีที่เหมาะสมในการเจือ MEA ลงบนโครงสร้างถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซ CO₂ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์โครงสร้างรูพรุนพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่เตรียมจากเศษไม้ยูคาลิปตัส โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยตัวกระตุ้นกรดฟอสฟอริก ภายใต้คลื่นอัลตราโซนิก และมีการเปรียบเทียบสมบัติตัวดูดซับที่ผ่านการเจือโมโนเอทานอลามีนด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ตัวดูดซับที่ได้ถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวรูพรุน โครงสร้างเคมี ความเสถียรทางความร้อน และความสามารถในการดูดซับ CO₂

2. วิธีการวิจัย

2.1. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

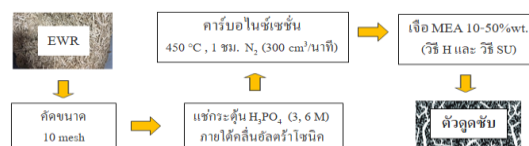
เศษไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Wood Residue, EWR) ถูกนำไปบดร่อนให้ได้ขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำให้สะอาดและอบให้แห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เศษไม้ยูคาลิปตัส 20 กรัม ถูกนำมาแช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 3 และ 6 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร แล้วนำมากระตุ้นต่อเนื่องในอ่างอัลตราโซนิก

ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ 100 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำไปผ่านการคาร์บอนไนซ์ในเตาเผาแนวนอนที่ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า (Horizontal electrical furnace) ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะไนโตรเจน หลังจากการเผาเสร็จสิ้น ตัวอย่างถ่านกัมมันต์เศษไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำ RO ร้อนสลับเย็น จนกระทั่งน้ำล้างที่แยกออกมามีค่าพีเอชเป็นกลางเพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ตกค้างออกไป แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 3 และ 6 โมลาร์ มีชื่อว่า AC3 และ AC6 ตามลำดับ

2.2. การเตรียมตัวดูดซับ

จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติโครงสร้างรูพรุน ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดถูกคัดเลือกมาใช้เป็นตัวดูดซับ CO_2 โดยนำมาเจือในโตรเจนด้วย MEA วิธีที่ใช้ในการเจือ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการเจือแบบการต้มเคี่ยวด้วยเพลทให้ความร้อน (Hot-plate heating, H) และวิธีการเจือแบบแช่ผสมเขย่าร่วมคลื่นอัลตราโซนิก (Shaking-ultrasonic, SU) ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์ถูกเจือด้วย MEA ในอัตราส่วนร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก โดยนำถ่านกัมมันต์ 5 กรัม ผสมให้กระจายตัวในเมทานอล 150 มิลลิลิตร และเจือจาก MEA ตามความเข้มข้นที่ต้องการลงในเมทานอล 50 มิลลิลิตร กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นหยดสารละลาย MEA ที่เตรียมไว้ลงไปในส่วนละลายเมทานอลที่มีถ่านกัมมันต์กระจายอยู่ กวนต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องสำหรับการเจือแบบ H ให้ความร้อนแก่สารผสมด้วย

เพลทให้ความร้อน (Hot plate) ที่ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง แล้วจึงนำตัวอย่างไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เจือด้วย MEA ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีนี้ให้ชื่อว่า 10%H, 20%H, 30%H, 40%H และ 50%H ตามลำดับ สำหรับการเจือด้วยวิธี SU สารละลายผสมเดียวกันนี้ ถูกนำไปเขย่าให้เข้ากันเป็นด้วยเครื่องเขย่า (Orbital shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนภายใต้คลื่นอัลตราโซนิกที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุดูดซับไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เจือด้วย MEA ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีนี้ มีชื่อว่า 10%SU, 20%SU, 30%SU, 40%SU และ 50%SU ตามลำดับ ทั้งนี้ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่ได้กล่าวมาถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับจากเศษไม้ยูคาลิปตัส

2.3. การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การทดสอบการดูดซับ CO_2 ทำการทดลองด้วยคอลัมน์เบดนิ่ง (Fixed bed) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร เนื่องจากการศึกษานี้มีความสนใจในการศึกษาการดักจับ CO_2 หลังกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความเข้มข้นของ CO_2 น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 15 โดยปริมาตร ดังนั้น ก๊าซผสมที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของ

ก๊าซอาร์กอนร้อยละ 85 โดยปริมาตร และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 โดยปริมาตร โดยทำการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ จากนั้นผ่านก๊าซผสมเข้าไป ที่อัตราการไหลรวม 30 มิลลิลิตรต่อนาที สภาวะการดูดซับที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สัดส่วนความเข้มข้นของ CO_2 ที่ออกจากคอลัมน์ที่ดูดซับถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี ระบบจะถูกควบคุมด้วยสวิตช์และตั้งเวลา ซึ่งจะทำงานต่อเนื่องจนกระทั่งถ่านกัมมันต์ไม่มีการดูดซับ CO_2 จึงเป็นอันสิ้นสุดการดูดซับ CO_2 สำหรับปริมาณการดูดซับ CO_2 ของตัวดูดซับ (Q_C , กรัม CO_2 ต่อกรัมตัวดูดซับ) คำนวณได้จากสมการที่ (1) ซึ่งค่าอินทิกรัลได้จากกราฟเบรคทวร์จ (breakthrough curve) ซึ่งพล็อตระหว่าง $\frac{C_{\text{exit}}}{C_0}$ และระยะเวลาการดูดซับ เมื่อ $F_{\text{CO}_2, \text{in}}$ คือ อัตราการไหลเข้าเชิงมวลของ CO_2 (กรัม CO_2 ต่อนาที) คำนวณได้จากสมการที่ (2) เมื่อ Mw_{CO_2} คือ มวลโมเลกุลของ CO_2 (กรัมต่อโมล) W คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม) F_T คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรโดยรวมของก๊าซผสม (มิลลิลิตรต่อนาที) C_{exit} คือ สัดส่วนเชิงโมลของ CO_2 ขาออกและ C_0 คือ สัดส่วนเชิงโมลของ CO_2 ขาเข้า P คือ ความดันของการดูดซับ (บาร์) R คือค่าคงที่ก๊าซ และ T คืออุณหภูมิของการดูดซับ (องศาเซลเซียส)

$$Q_C = \left(\frac{F_{\text{CO}_2, \text{in}}}{W} \right) \int_{t_i}^t \left[1 - \frac{C_{\text{exit}}}{C_0} \right] dt \quad (1)$$

$$F_{\text{CO}_2, \text{in}} = Mw_{\text{CO}_2} * F_T * \left(\frac{C_0 * P}{RT} \right) \quad (2)$$

ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง

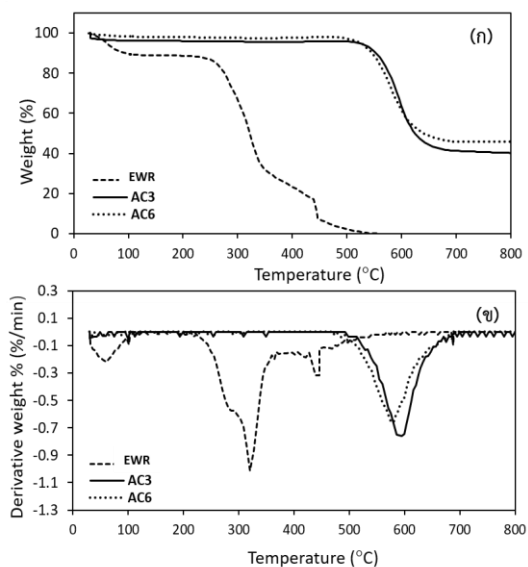
Thermogravimetric analysis (TGA) ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (functional group) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared region) ประมาณ 400-4000 cm^{-1} ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว (morphology) ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ส่วนโครงสร้างพื้นผิวรูพรุน (porous structure) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Pore size distribution) ด้วยการใช้ไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียส ในการดูดซับและคายซับพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, S_{BET}) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (V_T) ได้จากการคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับจนความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ประมาณ 0.99 ด้วยสมการจำลองการดูดซับ Brunauer-Emmett-Teller (BET) การกระจายขนาดของรูพรุนตัวอย่างถูกคำนวณด้วย Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (D_p) คำนวณได้จากสี่เท่าของสัดส่วนปริมาตรรูพรุนทั้งหมดต่อพื้นที่ผิวจำเพาะโดยสมมติฐานแบบจำลองรูพรุนเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform cylindrical pores)

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

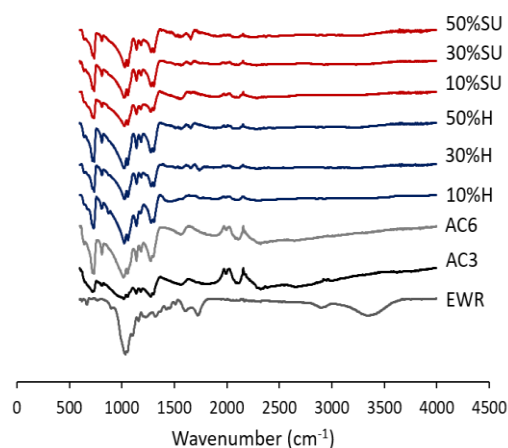
เส้นโค้ง TGA (รูปที่ 2ก) แสดงให้เห็นว่า EWR มีการสูญเสียน้ำหนัก 3 ช่วงอุณหภูมิ เป็นการระเหยน้ำ ปลดปล่อยสารระเหยง่ายที่เป็นเอมิเชลลูโลส เซลลูโลส และการสลายของลิกนิน ตามลำดับ

ส่วนถ่านกัมมันต์ AC3 และ AC6 มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าเป็นผลจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิกช่วยในการกระตุ้นสารเคมีให้แทรกเข้ายังโครงสร้างเซลล์ได้มากขึ้น เมื่อนำมาคาร์บอนไนซ์เซชันจึงส่งผลให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลซิกของ EWR ถูกกัดเซาะด้วยอิออนของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นภายใต้ความร้อนทำให้เกิดการแตกสลายตัวของโครงสร้างได้ง่ายขึ้นส่งผลให้เกิดโครงสร้างรูพรุนขึ้นมา ผลผลิตที่ได้จึงมีความเป็นคาร์บอนสูง เส้นโค้ง DTG (รูปที่ 2ข) แสดงให้เห็นว่า EWR มีพีคแสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักเด่นชัดหลายพีคสอดคล้องกับเส้นโค้ง TGA โดยมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดเป็นร้อยละ 0.32 ต่ออนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของเซลลูโลสและลิกนิน แต่ AC3 และ AC6 มีการสลายตัวที่คล้ายคลึงกันทั้งเส้นโค้ง TGA และ DTG ซึ่งมีช่วงพีคกว้างแสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดระหว่าง 450-650 องศาเซลเซียส บ่งบอกถึงการสลายตัวของลิกนิน



รูปที่ 2 (ก) เส้นโค้ง TGA และ (ข) DTG

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างด้วย FTIR ดังรูปที่ 3 อ้างอิงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2-3, 5, 1516] พบว่า AC3 และ AC6 ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน -OH stretching และ C-H stretching ที่ 3349 และ 2896 เซนติเมตร⁻¹ ดังที่ปรากฏในโครงสร้าง EWR เนื่องจากมีความเป็นคาร์บอนสูง และยังปรากฏหมู่ C=O และ C=C aromatic ring stretching ที่ 1723 เซนติเมตร⁻¹ และ C=C stretching ที่ 1450-1725 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีหมู่ฟังก์ชัน C-C vibration และ C-O vibration ที่เด่นชัดปรากฏที่ 1159-1032 เซนติเมตร⁻¹



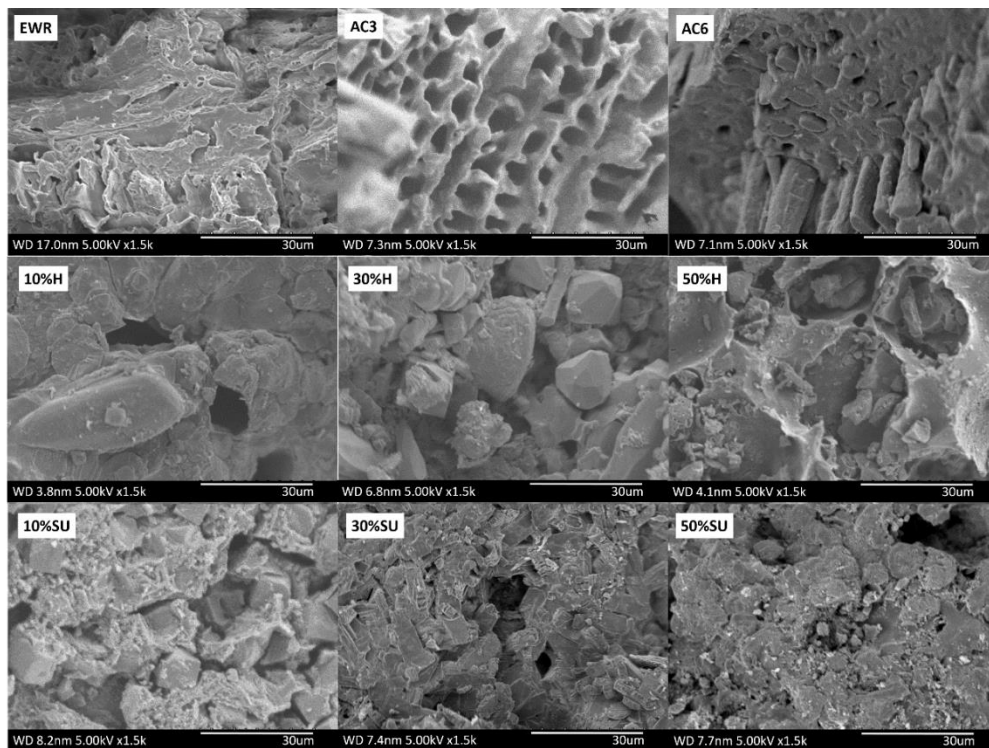
รูปที่ 3 เส้นโค้ง FTIR ของตัวดูดซับ

ส่วนถ่านกัมมันต์ AC3 และ AC6 ปรากฏการสั่นสะเทือนของ -OH stretching vibrations ใน Phenol ที่ 2400-2700 เซนติเมตร⁻¹ มีการสั่นสะเทือนของ C=C stretching ของ Alkyne groups ที่ 2350-2300 เซนติเมตร⁻¹ ช่วง 2400-1900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ Aldehydes ketones และ Esters อาจเกิดเนื่องจากการสั่นสะเทือนของ C=O stretching และที่ 1900-1600 เซนติเมตร⁻¹ เป็นพันธะ C=O ของ Carbonyl group ช่วง 1650-1550 เซนติเมตร⁻¹

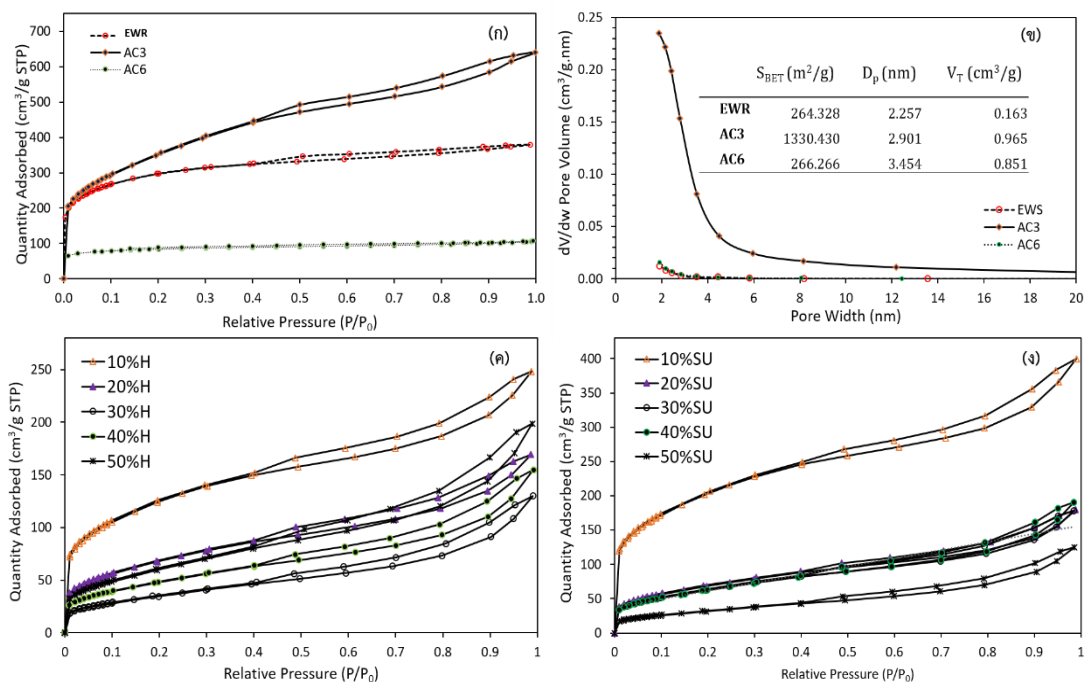
เป็นสารอะโรมาติก N-H bending และมีพันธะ C=C ช่วง 1400-1000 เซนติเมตร⁻¹ เป็นพันธะ C-O ของ Phenol ช่วง 1300-900 เซนติเมตร⁻¹ มีการสั่นสะเทือนของพันธะ P=O ใน P-O-C ของ Aromatics และมีการสั่นสะเทือนของ C-O stretching vibrations และ P=OOH เนื่องจากมีการใช้ H_3PO_4 กระตุ้นถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัส และช่วง 900-600 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ Bending vibration C-H bond ใน Aromatic ทั้งนี้ AC6 ปรากฏหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เด่นชัดกว่า AC3 เนื่องจากความเข้มข้นกรดที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าสูงกว่า

จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว ดังแสดงรูปที่ 4 พบว่า EWR มีโครงสร้างขรุขระและค่อนข้างหนาแน่นไม่มีรูพรุน เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน แต่ถ่านกัมมันต์ AC3 และ AC6 มีโครงสร้างพื้นผิวที่ประกอบด้วยรูพรุนกลางส่วนใหญ่และมีขนาดเล็กปะปนด้วย เนื่องจากผลของการแช่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเริ่มต้น ทำให้โครงสร้างโพลิเมอร์อะมอร์ฟัสของเฮมิ

เซลลูโลสและโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างโพลิเมอร์ใหม่ขึ้น เมื่อนำมาผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการระเหยของกรดฟอสฟอริก ดังนั้นฟอสฟอรัสออกไซด์จึงทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนกับกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนเกิดเป็นพันธะ C-O-P เชื่อมโยงเป็นโพลิอะโรมาติกส์ (cross-linking polyaromatic) พัฒนาเป็นโครงสร้างรูพรุน ซึ่ง AC3 มีโครงสร้างมีรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางเชื่อมต่อกันอยู่ภายในอย่างชัดเจนและมีความเป็นระเบียบ แต่ AC6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ได้โครงสร้างที่ไม่ระเบียบและมีความเป็นโครงสร้างขนาดกลาง สอดคล้องวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง [2-6, 15-16] ซึ่งได้มีการอภิปรายเพิ่มเติมไว้ว่าการใช้สารกระตุ้นที่มีความเข้มข้นต่ำ ทำให้เกิดการพัฒนารูพรุนเริ่มต้นอย่างช้า ๆ ภายใต้การคาร์บอนไนซ์เซชันซึ่งเป็นผลมาจากการระเหยของ H_3PO_4 แต่การใช้ความเข้มข้นที่สูงจะทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างรูพรุน



รูปที่ 4 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างพื้นผิวของตัวดูดซับ



รูปที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจน (ก, ค-ง) และการกระจายรูพรุน (ข) ของตัวดูดซับ

ดังนั้น เมื่อพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 5ก จากการแบ่งประเภทไอโซเทอร์มการดูดซับของ IUPAC classification [6] พบว่า EWR และ AC6 มีลักษณะของไอโซเทอร์มเป็นชนิดที่ 1 บ่งบอกถึงโครงสร้างของตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) โดยปริมาณของการดูดซับมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ๆ จากนั้นปริมาณการดูดซับก็เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อความดันของการดูดซับมีค่าสูงขึ้นจนเข้าใกล้ 1 มีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วน AC3 มีลักษณะของไอโซเทอร์มเป็นชนิดที่ 4 ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง โดยในช่วงแรกของการดูดซับมีความดันสัมพัทธ์ต่ำ จากนั้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นการดูดซับก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ แล้วจึงเกิดเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) จากนั้นเกิดการควบแน่นของ Capillary ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วงการคายซับ (Desorption) ซึ่งการควบแน่นของ Capillary ทำให้ช่วงการคายซับมีปริมาณการดูดซับที่สูงกว่าการดูดซับที่ความดันเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดรูพรุนด้วยวิธี BJH ดังแสดงรูปที่ 5ข เห็นได้ว่า EWR และ AC6 รูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ และมีรูพรุนขนาดกลางเล็กน้อย ดังนั้น AC6 จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเป็น 1330 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.901 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุนรวม 0.965 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ในที่นี้ได้ทำการ

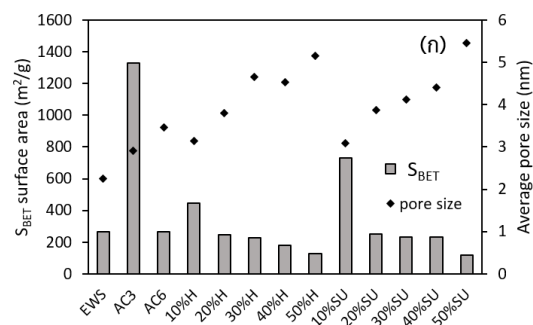
ตรวจสอบเพิ่มเติมในส่วนของพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า AC3 และ AC6 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าถ่านชาร์ที่ยังไม่ผ่านกระตุ้นทางเคมี (415 ตารางเมตรต่อกรัม) และสูงกว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 1 และ 5 โมลาร์ (1002 และ 1029 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ) จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้มีการอภิปรายไว้ว่าถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงส่งเสริมประสิทธิภาพในการดักจับ CO_2 ด้วยพันธะทางกายภาพได้ดี ดังนั้น AC3 จึงได้ถูกคัดเลือกนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นตัวดูดซับ CO_2 ในลำดับถัดไป

3.2 ผลของวิธีการเจือ MEA บนถ่านกัมมันต์

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับดังแสดงรูปที่ 2 พบว่า มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งตัวดูดซับหลังการเจือ MEA มีหมู่ฟังก์ชันที่ 2400-400 เซนติเมตร⁻¹ เด่นชัดขึ้น ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เป็นของไนโตรเจน โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของ MEA แต่ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันในช่วง 4000-2400 เซนติเมตร⁻¹ ดังที่มีในถ่านกัมมันต์ AC3 และ AC6 ทั้งนี้ เมื่อตรวจสอบจากวรรณกรรมอ้างอิง [11-14, 17-18] พบว่า เลขคลื่น 2100-1990 เซนติเมตร⁻¹ นั้นเป็นหมู่ฟังก์ชัน $\text{C}\equiv\text{N}$ vibration ของ Carboxylic groups ช่วง 1300-1290 เซนติเมตร⁻¹ เป็นหมู่ฟังก์ชัน N-O stretching เลขช่วงเลขคลื่น 1250-1020 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-N bond stretching ของสารประกอบเอมีน และกลุ่มฟังก์ชัน N-H bending ปรากฏที่เลขคลื่น 810 735 และ 731 เซนติเมตร⁻¹

จากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวดังแสดงรูปที่ 4 พบว่า พบว่าวัสดุดูดซับที่ถูกเจือด้วย MEA มีลักษณะพื้นผิวขรุขระเนื่องจากเกิดการทับถมของอนุภาค MEA ที่แพร่แทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่และปกคลุมบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ ซึ่งการใช้วิธีเจือแบบ H ส่งผลเกิดการทับถมและมีการกระจุยตัวของอนุภาค MEA บนพื้นผิวมากกว่า อีกทั้งการเจือ MEA ที่มากขึ้นทำให้โครงสร้างรูพรุนพังทลายและถูกปกคลุมมากขึ้น ดังโครงสร้าง 50%H เมื่อเปรียบเทียบกับ 10%H และ 30%H ซึ่งต่างจากการเจือแบบวิธี SU ที่ปริมาณการเจือ MEA เท่ากัน (10%, 30% และ 50%) ส่งผลให้อนุภาค MEA สามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างรูพรุนและบนพื้นผิวค่อนข้างสม่ำเสมอเกาะติดกับพื้นผิวที่ปราศจากรูพรุนได้ทั่วถึงขึ้นมากกว่าวิธีการเจือแบบ H ทั้งนี้เมื่อปริมาณการเจือ MEA เพิ่มขึ้น จะมีการแทรกและกระจายตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นดัง 50%SU เมื่อเปรียบเทียบกับ 10%SU และ 30%SU

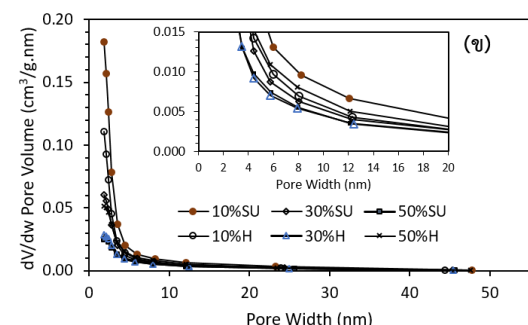
จากรูปที่ 5ค และ 5ง แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ผ่านการเจือทั้งสองวิธียังคงมีลักษณะไอโซเทอรัมเป็นชนิดที่ 4 แต่มีช่วง Hysteresis loop แคบลง บ่งบอกให้เห็นว่ายังคงมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางปะปนกัน บ่งบอกการมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่าน้อย



รูปที่ 6 (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ย (ข) การกระจายรูพรุนของตัวดูดซับ

กว่าตัวดูดซับ AC3 ทั้งนี้วัสดุดูดซับที่ได้จากการเจือด้วยวิธี SU มีค่าปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่สูงกว่าและบ่งบอกถึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าวัสดุดูดซับที่ได้จากการเจือด้วยวิธี H อภิปรายได้ว่า การเจือ MEA ด้วยวิธี SU ทำให้เกิดการกระจายตัวของเอมีนเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างรูพรุนและมีการยึดเหนี่ยวพันธะโควาเลนต์ระหว่างเอมีนและพื้นผิวของตัวดูดซับเริ่มต้นได้ดีกว่า

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแต่ละตัวดูดซับดังแสดงรูปที่ 6ก ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับมีค่าลดลงตามปริมาณ MEA ที่ใช้เจือเพิ่มขึ้น การใช้วิธีการเจือแบบ SU ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าการใช้วิธีการเจือแบบ H ทั้งนี้ MEA เข้าไปอุดตันภายในโครงสร้างรูพรุนและจับอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ พื้นผิวด้านบนถูกกีดขวางและทับถมส่งผลให้ตัวดูดซับมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางไปจนรูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยกว้างขึ้นและปริมาตรรูพรุนลดลง เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดรูพรุนด้วยวิธี BJH ดังแสดงรูปที่ 6ข เห็นได้ว่าเมื่อมีการเจือ MEA ที่มีปริมาณมากขึ้น ตัวดูดซับมีการกระจายรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและมีการดูดซับไนโตรเจนลดลง

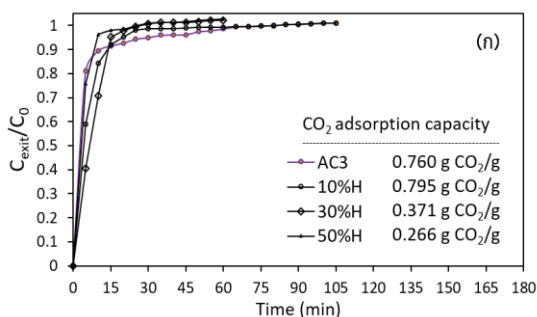


ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับ

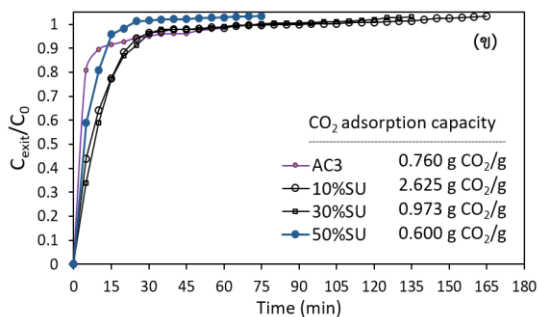
ตัวอย่าง	C (%wt.)	N (%wt.)	O (%wt.)	P (%wt.)
AC3	79.12	0.01	17.86	4.89
10%H	82.50	0.42	9.29	7.51
30%H	71.63	1.65	17.63	7.55
50%H	78.47	5.88	12.34	3.22
10%SU	82.96	0.89	11.33	4.59
30%SU	80.84	2.41	9.77	6.83
50%SU	72.68	6.55	15.82	4.44

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับทั้งหมดดังตารางที่ 1 พบว่า วัสดุดูดซับมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ฟอสฟอรัส (P) และ ไนโตรเจน (N) ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือสาร MEA ส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับมีสัดส่วนปริมาณธาตุ N เพิ่มขึ้น เนื่องจาก MEA เข้าไปแทรกโครงสร้างรูพรุนและปกคลุมบนพื้นผิวของตัวดูดซับมากขึ้น โดยเฉพาะวิธีการเจือแบบ SU เนื่องมาจากอิทธิพลของการเขย่าและการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วงส่งเสริมการถ่ายมวลสารของ MEA ไปยังโครงสร้างและพื้นผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างรูพรุนและกลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์เป็นสำคัญ

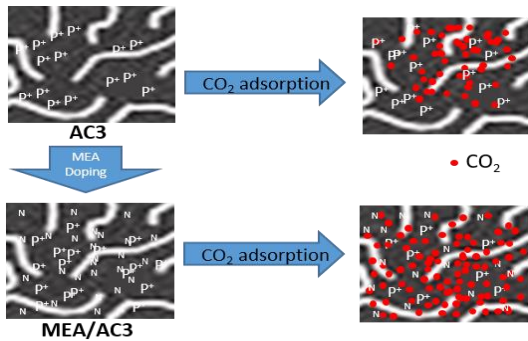
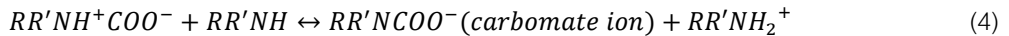
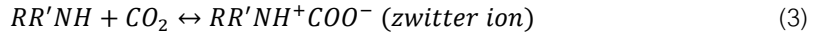
3.3 ความสามารถในการดูดซับก๊าซ CO₂



ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเจือ MEA จะมีโครงสร้างที่เป็นขั้วและมีความเป็นเบสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปดูดซับ CO₂ จากการศึกษาหาจุดเบรคทูร์และจุดหมดสภาพ (breakthrough curve) ของวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า ตัวดูดซับทั้งหมดมีการดูดซับ CO₂ อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการดูดซับ ค่าความเข้มข้นของ CO₂ ขาออกต่อค่าความเข้มข้นของ CO₂ ขาเข้าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถดูดซับได้อีกถูกนำมาคิดเป็นความสามารถในการดูดซับ CO₂ สะสมจนถึงจุดหมดสภาพ ($C/C_0 = 1$) ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์ AC3 หลังผ่านการเจือ MEA มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมลดลงตามความเข้มข้นของสารเจือ ตัวดูดซับ 10%H 10%SU และ 30%SU มีความชันของกราฟลดลงบ่งบอกถึงอัตราการแพร่สูง ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับ CO₂ มากขึ้น ในที่นี้ ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับ CO₂ มากที่สุดคือ 10%SU ให้ค่าเป็น 2.625 กรัม CO₂ ต่อกรัม หรือ 59.67 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวดูดซับถ่านกัมมันต์เจือ MEA จากรายงานที่เกี่ยวข้อง [5, 7-18]



รูปที่ 7 เส้นโค้ง breakthrough ของตัวดูดซับ



รูปที่ 8 การดูดซับ CO_2 ของถ่านกัมมันต์เจือ MEA

กลไกการกำจัด CO_2 ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการเจือ MEA มีเป็นทั้งทางเคมีเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง CO_2 กับกลุ่มเอมีน และทางกายภาพเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van de Waals forces) ทั้งนี้หมู่เอมีนของ MEA นั้นมีความเป็นเบสประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้กับ CO_2 ที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ในขั้นตอนแรกจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างหนึ่งโมล CO_2 กับหนึ่งโมล MEA ที่อยู่บนพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหนึ่งโมลของซวิตเตอร์ไอออน (zwitterion) ดังสมการที่ (3) ในขณะที่ปฏิกิริยาที่สองเกิดขึ้นระหว่างของซวิตเตอร์ไอออนขั้นกลางนี้ (intermediate zwitterion) กับหนึ่งโมล MEA เกิดเป็นโมเลกุลคาร์บาเมต (carbamate) ดังสมการที่ (4) ทำให้สมการปฏิกิริยาโดยรวมดังแสดงในสมการที่ (5) ดังนั้น การปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ จึงส่งเสริมการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างเอมีนกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและภายในโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [18] ดังแสดงในแบบจำลองแผนภาพ

รูปที่ 8 ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก๊าซ CO_2 ของตัวดูดซับที่ผ่านการเจือ MEA จึงเป็นผลจากกลไกทั้งทางกายภาพและทางเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างรูพรุนและสมบัติพื้นผิวของตัวดูดซับ ถึงแม้ปริมาณ MEA ที่สูงจะส่งผลให้การดูดซับ CO_2 ได้สูงขึ้นดังสมการข้างต้น แต่โครงสร้างรูพรุนจะถูกทับถมและพังทลาย ทำให้พื้นที่ไม่เพียงพอในการดูดซับ ดังนั้นสัดส่วนการเจือ MEA จึงมีนัยสำคัญ

5. สรุปผล

ถ่านกัมมันต์เศษไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมจากการแช่กระดุนภายใต้คลื่นอัลตราโซนิกในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดถึง 1,330 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.965 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.901 นาโนเมตร และมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำไปเจือสาร MEA ด้วยวิธีแบบ SU ทำให้ได้โครงสร้างรูพรุนที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ตัวดูดซับ CO_2 ดีกว่าวิธีการเจือแบบ H โดยมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางปะปนกัน กลไกการดักจับ CO_2 เป็นทั้งทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน ตัวดูดซับ AC3 ที่เจือ MEA ด้วยวิธีแบบ SU ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับก๊าซ CO_2 มากสุดเป็น 59.67 มิลลิโมลต่อกรัม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Inmanee N, Chaiwanga P, Chalermnsinsuwanab B, Piumsomboon P. Equilibrium curve of carbon dioxide adsorption-desorption using potassium carbonate on gamma-alumina in fluidized bed reactor. *Energy Reports*. 2020; 6: 231-6.
- [2] Seerod K and Seithtanabutara V. Optimization of activated carbon production from eucalyptus wood using H_3PO_4 as the activating agent. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*. 2019; 19(3): 13-27.
- [3] Sun Y, Li H, Li G, Gao B, Yue Q, Li X. Characterization and ciprofloxacin adsorption properties of activated carbons prepared from biomass wastes by H_3PO_4 activation. *Bioresource Technology*. 2016; 217: 239-44.
- [4] Li D, Yu W, Jiaojiao Z, Jicheng W, Xiaoyang L, Yuanyu T, et al. Drying before microwave-assisted H_3PO_4 activation to produce highly mesoporous activated carbons. *Materials Letters* 2018; 230: 61-3.
- [5] Heidari A, Younesi H, Rashidi A, Ghoreyshi A. Adsorptive removal of CO_2 on highly microporous activated carbons prepared from *Eucalyptus camaldulensis* wood: Effect of chemical activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2014; 45(2): 579-88.
- [6] Zhang Z, Xiao-yang LIU, Da-wei LI, GAO Tian-tian, Yu-q LEI, Bao-gui WU, et al. Effects of the ultrasound-assisted H_3PO_4 impregnation of sawdust on the properties of activated carbons produced from it. *New Carbon Materials* 2018; 33(5): 409-16.
- [7] Singh G, Kim IY, Lakhi KS, Srivastava P, Naidu R, Vinu A. Single step synthesis of activated bio-carbons with a high surface area and their excellent CO_2 adsorption capacity. *Carbon* 2017; 116: 448-55.
- [8] Ello AS, Souza LKC, Trokourey A, Jaroniec M. Development of microporous carbons for CO_2 capture by KOH activation of African palm shells. *Journal of CO_2 Utilization*. 2013; 2: 35-8.
- [9] Fiuza-Jr RA, Andrade RC, Andrade H. CO_2 capture on KOH-activated carbons derived from yellow mombin fruit stones. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016; 4(4): 4229-36.

- [10] Deng S, Wei H, Chen T, Wang B, Huang J, Yu G. Superior CO₂ adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures. *Chemical Engineering Journal* 2014; 253: 46-54.
- [11] Boujibar O, Souikny A, Ghamouss F, Achak O. CO₂ capture using N-containing nanoporous activated carbon obtained from argan fruit shells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018; 6(2): 1995-2002.
- [12] Han J, Zhang L, Zhao B, Qin L, Wang Y, Xing F. The N-doped activated carbon derived from sugarcane bagasse for CO₂ adsorption. *Industrial Crops and Products*. 2019; 128: 290-7.
- [13] Kamarudin KSN, Zaini N, Khairuddin NEA. CO₂ removal using amine-functionalized kenaf in pressure swing adsorption system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018; 6(1): 549-59.
- [14] Kongnoo A, Intharapat P, Worathanakul P, Phalakornkule C. Diethanolamine impregnated palm shell activated carbon for CO₂ adsorption at elevated temperatures. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016; 4(1): 73-81.
- [15] Gao X, Wu L, Li Z, Xu Q. Preparation and characterization of high surface area activated carbon from pine wood sawdust by fast activation with H₃PO₄ in a spouted bed. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2018; 20(2): 925-36.
- [16] Prahas D, Kartika Y, Indraswati N, Ismadji S. Activated carbon from jackfruit peel waste by H₃PO₄ chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*. 2008; 140(1-3): 32-42.
- [17] Pongstabodee S, Pornaroontham P, Pintuyothin N, Pootrakulchote N. CO₂ capture performance of bi-functional activated bleaching earth modified with basic-alcoholic solution and functionalization with monoethanolamine: isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Sciences*. 2016; 48: 126-37.
- [18] Lee CS, Ong YL, Aroua MK, Daud WMAW. Impregnation of palm shell-based activated carbon with sterically hindered amines for CO₂ adsorption. *Chemical Engineering Journal*. 2013; 219: 558-64.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

จำนวนของช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีผลต่ออัตราการหยอดเมล็ด
ของเครื่องหยอดข้าวนาแบบกึ่งอัตโนมัติ

The Number of Rice Seed Scoop Effecting the Seed Sowing Rate for Semi-Automatic
Paddy Field Sowing Machine

ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์^{1)*} ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช¹⁾ ธวัชธรรม ชลาโสภา²⁾ และ สุวิพงษ์ เหมะจุลิน²⁾

Nattadon Pannucharoenwong¹⁾ Phadungsak Rattanadecho¹⁾

Thodsatam Lasopha²⁾ and Suwipong Hemathulin^{2)*}

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

²⁾สาขาวิชาเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร สกลนคร 47000

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120

²⁾Department of Mechanical and Industrial, Rajabhat Sakon Nakhon University 47000

Received: 15 October 2021

Revised: 21 October 2021

Accepted: 21 October 2021

Available online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนของช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีผลต่ออัตราการหยอดเมล็ดของเครื่องหยอดข้าวนาแบบกึ่งอัตโนมัติ กำหนดจำนวนช้อนตักที่จะทำการทดสอบคือ 3, 5 และ 8 ช้อนตัก ตามลำดับ รอบของเครื่องยนต์ที่ใช้คือ 1500 rpm, 2000 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ โดยช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวมีความยาว 65 mm ความยาวของบริเวณช้อนตัก 25 mm และความกว้าง 4 mm ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องหยอดข้าวนาแห่งมีขนาด 1500 mm x 1200 mm x 1000 mm ต่อพ่วงรถไถขนาด 24 Hp ใช้เวลาในการทดสอบ 5 ชั่วโมงใช้น้ำมันดีเซล 10 ลิตร ระยะห่างของการหยอดข้าว 25 cm x 25 cm พบว่า

เมื่อใช้ช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวจำนวน 3, 5 และ 8 ช้อนตัก ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 rpm มีอัตราการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ข้าวเฉลี่ยต่ำสุด คือ 5.2, 6.3 และ 7.6 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าว เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวนาแห่งกิ่งอัตโนมัติ งานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว

Abstract

This research article aims to study the number of scoops affecting the seed sowing rate for semi-automatic paddy field sowing machine. The number of scoops to be tested were 3, 5 and 8 scoops, respectively. The engine speeds used in the test were 1500 rpm, 2000 rpm and 2500 rpm respectively. The rice seed scoop has a length of 65 mm. Length of scoop area 25 mm and width 4 mm. Install the equipment to the semi-automatic paddy field sowing machine with dimensions of 1500 mm x 1200 mm x 1000 mm attached to a tractor 24 Hp. Data was collected for 5 hours with a 10 liters fuel tank for diesel oil. The distance between each consecutive rice drop was 25 cm x 25 cm. At the engine speed of 1500 rpm the distance of rice seeding was 25 cm x 25 cm. It was found that 3, 5 and 8 scoops of rice seed scoops were used lowest average rice seed consumption rates 5.2, 6.3 and 7.6 kg/rai, respectively.

Keywords: Rice Seed Scoop: Semi-automatic paddy field sowing machine: Swivel disc

*ติดต่อ: pnattado@engr.tu.ac.th, 038259050-55

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชาชนประกอบอาชีพทางการเกษตรคิดเป็น 34% โดย 93% ของการทำเกษตรอยู่ในเขตชนบท [1] จำนวนพืชที่ปลูกมากที่สุดคือข้าวมีพื้นที่ปลูกประมาณ 67 ล้านไร่ ใช้สำหรับบริโภคและส่งออก คิดเป็นพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 11.3 % ของพื้นที่ทั่วประเทศ เกษตรกรชาวนาส่วนใหญ่ทำนาหว่านแทนการทำนาดำ เนื่องจากมีขั้นตอนในการทำที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนการผลิตต่ำกว่า แต่ผลที่ได้จากการทำนาหว่านยังไม่ได้พอต้นทุนการผลิตสูง ค่าจ้างแรงงานมีราคาสูง ปัจจุบันนิยมนำรถไถขนาดเล็กมาใช้ในงานเกษตรกรรมแทนแรงงานสัตว์และคน [2] แต่ก็ยังมีการใช้เมล็ดพันธุ์ลึนเปลืองได้ผลผลิตต่ำ มีการใช้ปุ๋ยที่ลึนเปลือง คุณภาพของข้าวยังไม่ดีพอ จึงมีการแข่งขันด้านราคากับต่างประเทศสูง จึงได้เปลี่ยนวิธีการปลูกข้าวจากการทำนาหว่านมาเป็นวิธีการใหม่คือการใช้เครื่องหยอดเมล็ดข้าวทำให้ต้นข้าวเจริญเติบโตสม่ำเสมอได้ผลผลิตต่อไร่สูง [3,4] ในต่างประเทศนิยมใช้เครื่องหยอดเมล็ดข้าวนาแห้งสูงถึง 80% [5] กระบวนการหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวเป็นส่วนสำคัญของเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวมีการ พัฒนาเทคนิคการหยอดเมล็ดพันธุ์แบบต่างๆ มาใช้กับเครื่องหยอดเมล็ดข้าว [6,7] เพื่อให้ได้ผลผลิตต่อไร่ที่สูงขึ้นและยังเป็นวิธีการที่ดีในการรับมือกับแรงงานที่กำลังขาดแคลน และมีราคาค่าจ้างแพงส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นด้วย [8] ในปี 2016 ได้มีการพัฒนานารถไถเดินตามมาติดตั้งเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้การ

วางจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวในแนวตั้งสามารถหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ครั้งละ 6 แถว ระบบกลไกการหยอดเมล็ดยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากควบคุมจำนวนเมล็ดที่หยอดลงได้ไม่สม่ำเสมอการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของรถไถเดินตามยังทำได้ไม่ละเอียดและยังมีความไม่สะดวกเนื่องจากยังต้องเดินตามรถเกิดความเหนื่อยล้าจึงได้คิดหาวิธีการต่อพ่วงเครื่องหยอดเมล็ดข้าวเข้ากับรถไถ 4 ล้อ เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานมากขึ้น [9-11] สามารถนั่งขับรถไถได้ตลอดเวลาในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานเนื่องจากสามารถคุมความเร็วรอบรถไถได้ง่ายและมีเพลาลำนำส่งกำลังต่อพ่วงอุปกรณ์

ปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์จังหวัดสกลนคร ได้ทำนาโดยใช้เครื่องหยอดเมล็ดข้าวนาแห้งเข้ามาช่วยในการทำนาโดยเครื่องหยอดเมล็ดข้าวที่ใช้อยู่เป็นแบบใช้จานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวในแนวตั้งต่อพ่วงกับรถไถนาขนาด 24 Hp ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันแต่มีปัญหาคือการออกแบบข้อต่อเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ใช้ปัจจุบันพบปัญหาคือการหยอดเมล็ดพันธุ์ต่อหนึ่งหลุมไม่เหมาะสม มีอัตราการหยอด 8-10 เมล็ดต่อหลุมระยะในการหยอดปัจจุบัน 15 cm x 15 cm ไม่เหมาะสมโดยปกติระยะในการหยอดต่อหลุมต้องห่างกันประมาณ 25 cm x 25 cm [12] ทำให้การงอกของต้นข้าวน้อยได้ผลผลิตไม่ดีและสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ข้าว

ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนของข้อต่อเมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีผลต่ออัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวของเครื่องหยอดเมล็ดข้าวนาแห้งโดยเปรียบเทียบจำนวนข้อต่อเดิมจำนวน 8 ข้อต่อ กับสิ่งที่จะศึกษา คือ จำนวนข้อต่อ 5 ข้อต่อ และ 3 ข้อต่อ เพื่อ

เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อ 1 ไร่ และทดสอบหาความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมในการหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยต่อฟางอุปกรณ์หยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวเข้ากับรถไถนาขนาด 24 hp ทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวบนพื้นที่แปลงนาแห่ง 10 ไร่

2. การออกแบบจานหมุนเมล็ดข้าวและข้อดักเมล็ดพันธุ์ข้าว

2.1 การศึกษาการออกแบบจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว

การออกแบบกลไกการทำงานของกรวางจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวใช้หลักการออกแบบโดยให้เมล็ดพันธุ์ข้าวอยู่ด้านบนแล้วไหลลงมาหาจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตั้งจากนั้นจานหมุนจะหมุนกวาดเมล็ดข้าวให้ตกลงไปในท่อส่งเมล็ดพันธุ์ข้าวซึ่งทำเป็นช่องไว้และไหลลงสู่พื้นดินโดยอาศัยกลไกการทำงานจากการเคลื่อนที่ของรถไถให้สัมพันธ์กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์และสัมพันธ์กับระบบเพลาส่งกำลังของรถไถโดยการออกแบบการวางจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวในแนวตั้งนี้แสดงในรูปที่ 1 การหาระยะห่างของรูหยอดเมล็ดบนจานหยอดเมล็ดแนวนอนใช้สมการที่ (1) และ การหาขนาดท่อหยอดเมล็ดพันธุ์ใช้สมการที่ (2) [13-14]

$$D = (1.2 - 1.3)L \quad (1)$$

$$d = (0.64 - 0.66)k \quad (2)$$

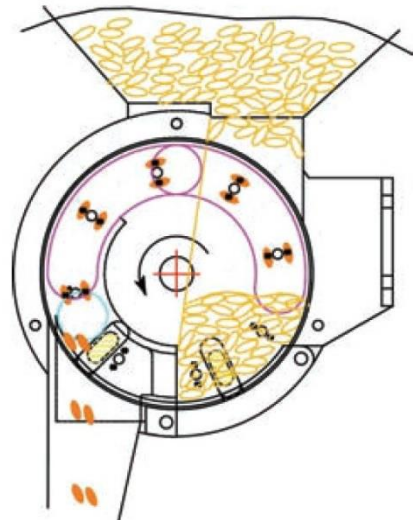
โดยที่

D : ระยะห่างของข้อดักเมล็ดพันธุ์, (มิลลิเมตร)

L : ความยาวเมล็ดพันธุ์ข้าว, (มิลลิเมตร)

d : ขนาดของท่อหยอดเมล็ดพันธุ์, (มิลลิเมตร)

k : ความหนาของเมล็ดพันธุ์ข้าว, (มิลลิเมตร)



รูปที่ 1 กำหนดระยะของจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว [13]

การหาจำนวนของข้อดักเมล็ดพันธุ์ข้าวในแนวตั้งเป็นที่นิยมมากในญี่ปุ่นและเกาหลี [13-15] คำนวณจากสมการที่ (3) และสมการที่ 4 โดยแสดงการทำงานของกลไกในรูปที่ 2

$$\Delta\theta_{\text{gap}} = \sin^{-1}(2t_s / D) \quad (3)$$

$$n = 360D_{\text{sc}} / 100\theta_g \quad (4)$$

โดยที่

$\Delta\theta_{\text{gap}}$: มุมช่องว่าง

t_s : ความหนาของเมล็ดพันธุ์ (mm)

D : เส้นผ่านศูนย์กลางจานหมุน (mm)

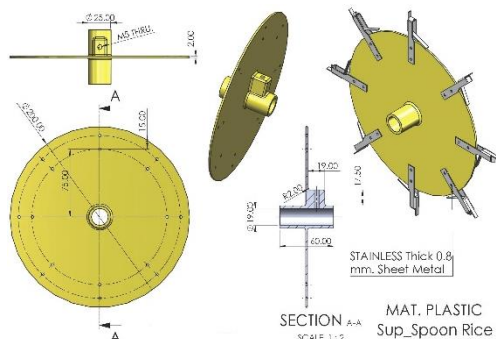
n : จำนวนของข้อดัก

θ_g : มุมเปิดของร่อง (°)

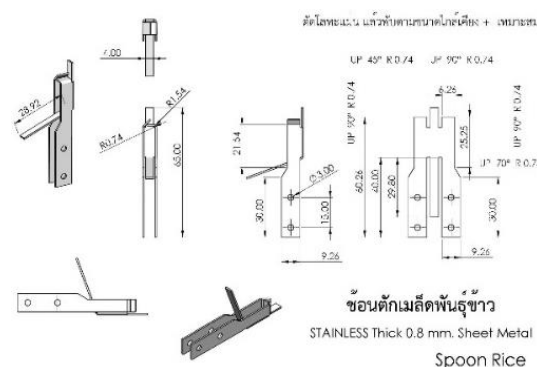
D_{sc} : ปริมาณการกระจายที่ต้องการ (%)

2.2 การออกแบบงานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว

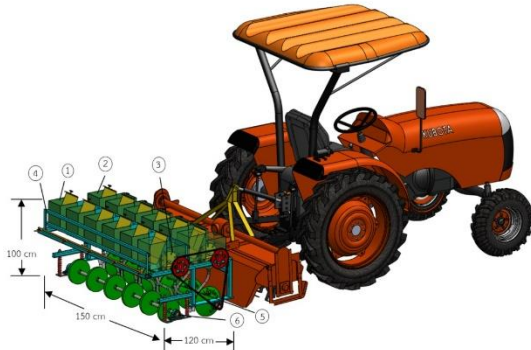
และระยะห่างระหว่างต้นข้าวคือ 25 cm x 25 cm โดย
ทำการจำลองติดตั้งเข้ากับรถไถนาขนาด 24 Hp แสดง
ในรูปที่ 5 มีส่วนประกอบดังนี้ (1) ช่องเก็บเมล็ดพันธุ์
ข้าว (2) ช่องหยอดปุ๋ย (3) จานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว
พร้อมข้อตักเมล็ดพันธุ์ข้าว (4) โครงสร้างเครื่องหยอด
เมล็ดพันธุ์ข้าว (5) ท่อลำเลียงเมล็ดพันธุ์ลงสู่พื้นดิน
(6) ส่วนควบคุมระยะห่างระหว่างผิวดินกับเครื่อง
หยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว [12] ดำเนินการออกแบบระบบ
เชื่อมต่อเข้ากับเพลาส่งกำลังของรถไถนาและ
ประกอบส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องหยอดเมล็ด
พันธุ์ข้าวให้สมบูรณ์ เพื่อดูส่วนประกอบทั้งหมดก่อน
ทำการสร้างเครื่องจริงและทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3 ออกแบบจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าว



รูปที่ 4 ออกแบบชั้นอนตักเมล็ดพันธุ์ข้าว



รูปที่ 5 เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวติดตั้งกับรถไถ

3. การทดลอง

การทดสอบมีการกำหนดตัวแปรดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรต้น คือ จำนวนของขั้นตอนการเมล็ดพันธุ์ข้าวที่กำหนดในการทดสอบคือ 3 ขั้นตอน 5 ขั้นตอน และ 8 ขั้นตอน
2. ตัวแปรตาม คือ อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อหลุม และอัตราการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ต่อไร่
3. ตัวแปรควบคุม คือ จำนวนรอบเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือ 1500 rpm, 2000 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ

ส่วนประกอบของเครื่องหยอดข้าวนาแห้งแสดงในรูปที่ 5 มีขนาด 150 cm x 120 cm x 100 cm ส่วนประกอบ (1) ช่องเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าว (2) ช่องหยอดปุ๋ย (3) จานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวพร้อมขั้นตอนการเมล็ดพันธุ์ข้าว (4) โครงสร้างเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว (5) ท่อลำเลียงเมล็ดพันธุ์ลงสู่พื้นดิน (6) ส่วนควบคุมระยะห่างระหว่างผิวดินกับเครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว

ติดตั้งจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวในแนวตั้งและเตรียมเมล็ดพันธุ์ข้าวในถังเก็บแสดงในรูปที่ 6 และต่อฟ่วงอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับรถไถขนาด 24 Hp สามารถ

หยอดเมล็ดพันธุ์ได้ครั้งละ 6 แถว แสดงในรูปที่ 7 ทดสอบการทำงานในพื้นที่จริงสถานที่ทำการทดสอบคือ วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ จังหวัดสกลนคร ทดสอบ 10 ไร่ ก่อนการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ต้องมีการเตรียมดินในแปลงนาที่จะใช้ในการทดสอบไว้โดยทำการไถและตีดินให้แตก ใช้เวลาในการทดสอบ 5 ชั่วโมง ใช้น้ำมันดีเซลทั้งหมด 10 ลิตร ระยะห่างของการหยอดเมล็ดข้าว 25 cm x 25 cm กำหนดความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็น 1500 rpm, 2000 rpm, และ 2500 rpm เกียร์ของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบกำหนดให้ใช้เกียร์ 1, 2 และ 3 กำหนดจำนวนขั้นตอนการเมล็ดพันธุ์ข้าวเป็น แบบ 3 ขั้นตอน 5 ขั้นตอน และ 8 ขั้นตอน ตามลำดับ ในรูปที่ 8 แสดงการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวในพื้นที่จำนวน 10 ไร่ ที่ได้เตรียมดินเตรียมพื้นที่ไว้แล้ว เมล็ดพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดสอบเป็นพันธุ์ข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเหมาะกับภูมิประเทศและภูมิอากาศของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และได้สรุปเงื่อนไขของการทดสอบครั้งนี้แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 เตรียมอุปกรณ์เครื่องหยอดและเมล็ดพันธุ์



รูปที่ 7 ต่อพวงเครื่องหยอดข้าวกับรถไถเตรียมทดสอบ



รูปที่ 8 ทดสอบหยอดข้าวในแปลงนาที่เตรียมไว้

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว

เงื่อนไขการทดสอบ	
1. พื้นที่ทดสอบ	10 ไร่
2. เวลาในการทดสอบ	5 ชั่วโมง
3. ปริมาณเชื้อเพลิง	10 ลิตร
4. ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ใช้	1500rpm, 2000rpm, 2500 rpm
5. จำนวนชั้นตักเมล็ดพันธุ์	3, 5, 8 ชั้นตัก
6. น้ำหนักเครื่องหยอดรวม	720 กิโลกรัม

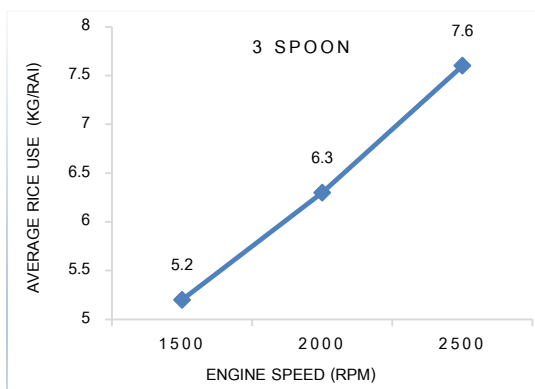
4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 การทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้ชั้นตัก 3 ชั้นตัก

จากการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้เครื่องหยอดข้าวนาแห่งกำหนดจำนวนชั้นตักเมล็ดพันธุ์ข้าว 3 ชั้นตัก โดยใช้ความเร็วรอบในการทดสอบคือ 1500 rpm, 2000 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดสอบโดยเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์จะส่งผลทำให้จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อหลุมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 4-6 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 5.2 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเป็น 2000 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 5-7 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 6.3 กิโลกรัมต่อไร่และเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 6-8 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 7.6 กิโลกรัมต่อไร่ ในรูปที่ 9 จะเห็นได้เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราการหยอดและจำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวแบบ 3 ชั้นตัก

รอบเครื่องยนต์ (rpm)	อัตราการหยอดเฉลี่ย (เมล็ด)	จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เฉลี่ย (กิโลกรัม/ไร่)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
1500	4-6	5.2	0.42
2000	5-7	6.3	0.48
2500	6-8	7.6	0.52



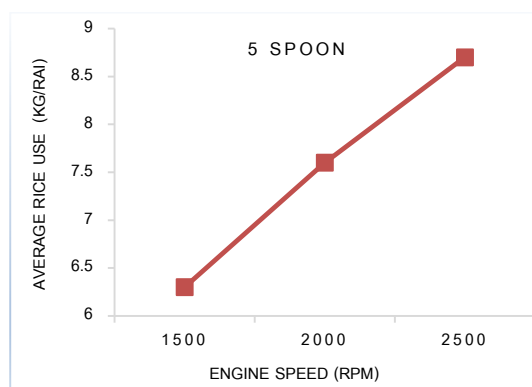
รูปที่ 9 ผลของความเร็วรอบต่ออัตราการหยอดเมล็ด

4.2 การทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอน

จากการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้เครื่องหยอดข้าวนาแห่งกำหนดจำนวนขั้นตอนที่เมล็ดพันธุ์ข้าว 5 ขั้นตอน โดยใช้ความเร็วรอบในการทดสอบคือ 1500 rpm, 2000 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อทำการทดสอบโดยเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์จะส่งผลทำให้จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อหลุมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 5-7 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 6.3 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเป็น 2000 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 6-8 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 7.6 กิโลกรัมต่อไร่และเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 7-9 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 8.7 กิโลกรัมต่อไร่ ในรูปที่ 10 จะเห็นได้เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราการหยอดและจำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เพิ่มขึ้นและใช้เมล็ดพันธุ์เฉลี่ยมากกว่าการใช้ขั้นตอนแบบ 3 ขั้นตอน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวแบบ 5 ขั้นตอน

รอบเครื่องยนต์ (rpm)	อัตราการหยอดเฉลี่ย (เมล็ด)	จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เฉลี่ย (กิโลกรัม/ไร่)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
1500	5-7	6.3	0.48
2000	6-8	7.6	0.52
2500	7-9	8.7	0.48



รูปที่ 10 ผลของความเร็วรอบต่ออัตราการหยอดเมล็ด

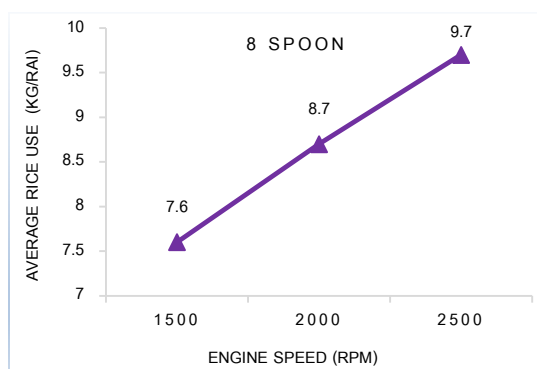
4.3 การทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้ขั้นตอนที่ 8 ขั้นตอน

จากการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยใช้เครื่องหยอดข้าวนาแห่งกำหนดจำนวนขั้นตอนที่เมล็ดพันธุ์ข้าว 8 ขั้นตอน โดยใช้ความเร็วรอบในการทดสอบคือ 1500 rpm, 2000 rpm และ 2500 rpm ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อทำการทดสอบโดยเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์จะส่งผลทำให้จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อหลุมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 6-8 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 7.6 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเป็น 2000 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่

7-9 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 8.7 กิโลกรัมต่อไร่และเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2500 rpm อัตราการหยอดเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยอยู่ที่ 8-10 เมล็ด จำนวนเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยต่อไร่คิดเป็น 9.7 กิโลกรัมต่อไร่ จากรูปที่ 11 จะเห็นได้เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราการหยอดและจำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เพิ่มขึ้นและใช้เมล็ดพันธุ์เฉลี่ยมากกว่าการใช้ช้อนตักแบบ 3 ช้อนตัก และ 5 ช้อนตัก

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวแบบ 8 ช้อนตัก

รอบเครื่องยนต์ (rpm)	อัตราการหยอดเฉลี่ย (เมล็ด)	จำนวนเมล็ดพันธุ์ต่อไร่เฉลี่ย (กิโลกรัม/ไร่)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
1500	6-8	7.6	0.52
2000	7-9	8.7	0.48
2500	8-10	9.7	0.48



รูปที่ 11 ผลของความเร็วรอบต่ออัตราการหยอดเมล็ด

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องหยอดข้าวนาแห่งที่ได้ทำการพัฒนาระบบจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวและพัฒนาช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวจากเดิมแบบ 8 ช้อนตัก ที่นิยมใช้กัน ได้พัฒนาระบบช้อนตักใหม่เป็นแบบ 3 ช้อนตัก และ 5 ช้อนตัก โดยจานหมุนเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ออกแบบช้อนตักแบบ 3 ช้อนตัก สามารถหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ 5.3 กิโลกรัมต่อไร่ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1500 rpm ซึ่งประหยัดเมล็ดพันธุ์ข้าวที่สุด ลำดับถัดมาคือการใช้ช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวแบบ 5 ช้อนตัก สามารถหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ 6.3 กิโลกรัมต่อไร่ที่ และสุดท้ายคือการใช้ช้อนตักเมล็ดพันธุ์ข้าวแบบ 8 ช้อนตัก อัตราการสิ้นเปลืองเมล็ดพันธุ์ข้าวอยู่ที่ 7.6 กิโลกรัมต่อไร่

ข้อเสนอแนะควรมีการเพิ่มระบบในการควบคุมรอบเครื่องยนต์ให้สามารถแบ่งรอบเครื่องยนต์ให้ละเอียดกว่าเดิมมากขึ้นและเพิ่มเงื่อนไขการทดสอบจำนวนช้อนตักให้เพิ่มมากขึ้นเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการหยอดเมล็ดพันธุ์ข้าว

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครที่ได้ร่วมวิจัยและพัฒนา รวมถึงวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์จังหวัดสกลนครที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nattadon P, Atichit W, Chatchai B, Jarinee J, Ponthe V. Comparison of Bio-Methane Gas Wobbe Index in Different Animal Manure Substrate. *Energy Procedia*. 2017; 138: 273-7.
- [2] Enamul H, Richard W, Kassam A, Nur Nobil M. Versatile Strip Seed Drill: A 2-Wheel Tractor-Based Option for Smallholders to Implement Conservation Agriculture in Asia and Africa. *Environments*. 2016; 3(1): 1-13.
- [3] Ali abdalla A, Misra AN, El-Azeem KM S. Effect of leaf cutting on physiological traits and yield of two rice cultivars. *African Journal of Plant Science*. 2008; 2(12): 147-50.
- [4] Konboon Y, Sripodok S, Rattanasriwong S. Rice leaf cutting in Dry-seed broad casting rice. Paper presented in Rice and temperate cereal crops annual conference. 2007; Bangkok, Thailand; 2007.
- [5] Fu W, Zhang Z, Zang Y, Luo X, Zeng S, Wang Z. Development and experiment of rice hill-drop drilling machine for dry land based on proportional speed regulation, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017; 10(4): 77-86.
- [6] Roshan VM, Gajanan PT, Swapnil KA. Design and implementation of multi seed sowing machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2013; 2(4): 422-9.
- [7] Kalay K, Moses SC. The design and fabrication of a manually operated single row multi - crops planter. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*. 2015; 8(10): 147-58.
- [8] Minghua Z, Zaiman W, Xiwen L, Ying Z, Wenwu Y, He X, et al. Review of precision rice hill-drop drilling technology and machine for Paddy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(3): 1-11.
- [9] Haque ME and Bell RW. Development of machinery for smallholders in South and SouthEast Asia. Paper presented in Workshop on Modern Conservation Farming Systems and CIMMYT Science Week. 2015; Lanzhou, China; 2015.
- [10] Panananda N, Daowiangkan S, Intaphrom N, Kantapam W. Influence of shock absorber installation angle to automotive vehicle response. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*. 2017; 5(2): 94-105.

- [11] วีรวัฒน์ เจเถื่อน ฉัตริน เจืองจอหอ มงคล
ศรพันธ์ กมลชนน วงศ์สถาน และ พยุงศักดิ์
จุลยุเสน. การพัฒนาระบบควบคุมการ
บังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ.
วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการ
ควบคุมอัตโนมัติ. 2019; 5(1): 1-11.
- [12] Hemathulin S, Lasopha T,
Pannucharoenwong N, Rattanadecho P,
Echaroj S. Effect of the orientation of the
rice seed swivel disc on the seed
consumption rate of the dry paddy field
sowing machine. Journal of Research
and Applications in Mechanical
Engineering. 2019; 7(2): 112 – 21.
- [13] Xing H, Zang Y, Wang ZM, Luo XW,
Zhang GZ, Cao XM. Design and
experiment of stratified seed-filling room
on rice pneumatic metering device.
Transactions of the Chinese Society of
Agricultural Engineering. 2015; 31(4):
42–8.
- [14] Zang Y, Xing H, Wang ZM, Luo XW, Cao
XM, Wang BL. Design and experiment of
shield device on rice pneumatic
metering device. Transactions of the
Chinese Society of Agricultural
Engineering. 2015; 46(5): 33–8.
- [15] Ryu IH and Kim KU. Design of roller type
metering device for precision planting.
American Society of Agricultural and
Biological Engineers. 2013: 41(4):
923-30.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การสะสมของแอมโมเนียทั้งหมด แอมโมเนียอิสระ และไนเตรท
ในบ่อเลี้ยงปลาในระบบน้ำหมุนเวียน

Accumulation of Total Ammonia Nitrogen, Unionized Ammonia and Nitrate
in the Recirculating Aquaculture System

สุรพงษ์ ชาชวนงาม¹⁾ ธนา ราษฎร์ภักดี²⁾ พนมชัย วีระยุทธศิลป์¹⁾ และ กัลยกร ขวัญมา^{1)*}

Surapong Chawsuanngam¹⁾ Thana Radpukdee²⁾ Panomchai Weerayutsil¹⁾

and Kulyakorn Khuanmar^{1)*}

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

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

Received: 10 November 2021

Revised: 1 December 2021

Accepted: 2 December 2021

Available online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสะสมของ แอมโมเนียทั้งหมด (TAN) แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และไนเตรท (NO_3) ในระบบเลี้ยงปลาแบบระบบน้ำหมุนเวียนเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเปลี่ยนถ่ายน้ำให้เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาด้วยระบบน้ำหมุนเวียนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตัวกรองชีวภาพ ในการทดลองได้เลี้ยงปลานิล 2 ความหนาแน่น คือ 30 ตัว/ลบ.ม. และ 40 ตัว/ลบ.ม. และเพื่อลดการสะสมของของเสียในบ่อเลี้ยงปลา ได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากบ่อเลี้ยงทดสอบทุก 2 สัปดาห์ จากผลการศึกษาพบว่า การสะสม TAN NH_3 และ NO_3 ในบ่อเลี้ยงปลาแปรผันตามความหนาแน่นของปลาในบ่อเลี้ยง หากอบการเปลี่ยนถ่ายน้ำกำหนดที่ 2 สัปดาห์ ปริมาณการสะสมของ TAN และ NO_3 อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการสะสมของ NH_3 เป็นปัจจัยหลัก

ที่จะต้องใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำ คือควรเปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 1 อาทิตย์เพื่อลดความเป็นพิษของ NH_3 ต่อปลา

คำสำคัญ: ปลานิล บ่อเลี้ยงปลาระบบน้ำหมุนเวียน แอมโมเนียทั้งหมด แอมโมเนียอิสระ ไนเตรท

Abstract

This research was to study the accumulation of total ammonia nitrogen (TAN), unionized ammonia (NH_3) and nitrate (NO_3) in the recirculating aquaculture system to be used in consideration of the appropriate water change for fish farming in the treated recirculating water system using biofilter treatment. In the experiment, two stocking tilapia densities were tested as follows: 30 fish/ m^3 and 40 fish/ m^3 . To reduce the accumulation of toxic substances from fish waste, the water from the test ponds were changed every 2 weeks. The study revealed that, the accumulation of TAN NH_3 and NO_3 in the fish ponds were proportional to the number of fish densities in the ponds. If the water change cycle was scheduled at 2 weeks, the accumulation of TAN and NO_3 was acceptable. However, the accumulation of NH_3 was the main factor that must be used to determine the water change interval. That was, water should be changed every 1 week to reduce toxicity to fish.

Keywords: Tilapia: Recirculating aquaculture system: Total ammonia nitrogen (TAN): Unionized ammonia (NH_3): Nitrate (NO_3)

*ติดต่อ: kulyakorn@kku.ac.th

1. บทนำ

การเลี้ยงปลาด้วยระบบน้ำหมุนเวียนเป็นระบบการเลี้ยงปลาที่ช่วยแก้ไขปัญหการเลี้ยงปลาแบบดั้งเดิมที่ไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำ และจัดการคุณภาพน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลาได้ ของเสียส่วนใหญ่มาจากการขับถ่ายของปลาก่อให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในบ่อเลี้ยง แอมโมเนียอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน (Ionized Ammonia, NH_4^+) และแอมโมเนียอิสระ (Unionized Ammonia, NH_3) ซึ่งจะละลายอยู่ในน้ำเรียกว่าแอมโมเนียทั้งหมด (Total Ammonia Nitrogen, TAN) ความสามารถในการ

ละลายน้ำของแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) และแอมโมเนียอิสระ (NH_3) จะละลายอยู่ในน้ำโดยขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยง ทั้งนี้แอมโมเนียที่เป็นพิษต่อปลาอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) หากต้องการนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำในระบบเลี้ยงปลาแบบน้ำหมุนเวียน แอมโมเนียทั้งหมด (TAN) จะต้องถูกบำบัดเพื่อลดความเป็นพิษจากแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ดังนั้นน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาจะต้องถูกบำบัดก่อนจึงจะสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำในบ่อเลี้ยงปลาได้ ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลาจะเปลี่ยนแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) ไปเป็นไนเตรท (NO_3)

ซึ่งสามารถลดความเป็นพิษเนื่องจากแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ได้ คุณภาพน้ำที่เหมาะสมและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในระบบเลี้ยงปลาแบบน้ำหมุนเวียน ควรมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะแสดงเฉพาะบางพารามิเตอร์คือ กรด-ด่าง (pH) แอมโมเนียทั้งหมด (TAN) แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และไนเตรท (NO_3)

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลา

พารามิเตอร์	ค่าที่เหมาะสม	อ้างอิง
pH	6.0-9.0	[1]
	6.5-8.5	[2]
TAN	<1.0 mg/l	[3]
	<8.0 mg/l	[2]
NH_3	<0.02 mg/l	[4]
	< 0.05 mg/l	[5]
NO_3	<1000 mg/l	[1]
	<250 mg/l	[2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการสะสมของ แอมโมเนียทั้งหมด (TAN) แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และไนเตรท (NO_3) ในระบบเลี้ยงปลาแบบระบบน้ำหมุนเวียนเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเปลี่ยนถ่ายน้ำให้เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาด้วยระบบน้ำหมุนเวียน

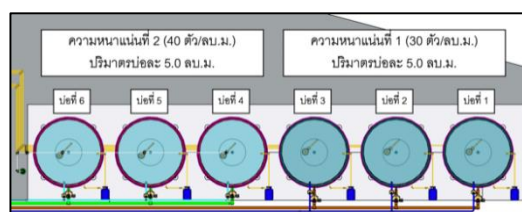
2. วิธีการวิจัย

การศึกษากการสะสมของแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และไนเตรท (NO_3) ในระบบเลี้ยงปลาแบบระบบน้ำหมุนเวียนน้ำเลี้ยงปลาได้ผ่าน

การบำบัดด้วยระบบแบบตัวกรองชีวภาพ (Biofilter Treatment) และได้ดำเนินการวิจัยดังนี้

2.1 การหมุนเวียนน้ำในบ่อเลี้ยงปลา

ในงานวิจัยนี้ทดลองเลี้ยงปลานิล 2 ความหนาแน่น ดังนี้ ความหนาแน่นที่ 1 เท่ากับ 30 ตัว/ลบ.ม. และ ความหนาแน่นที่ 2 เท่ากับ 40 ตัว/ลบ.ม. ในแต่ละความหนาแน่นมีบ่อเลี้ยงทดสอบความหนาแน่นละ 3 บ่อ ขนาดความจุบ่อละ 5 ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 1 น้ำเสียจากการเลี้ยงปลาจะถูกบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบตัวกรองชีวภาพ (Biofilter Treatment System) ซึ่งเป็นถังเติมอากาศ ขนาด 5.0 ลบ.ม. จำนวน 2 ถัง ต่ออนุกรมกัน โดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำเข้าสู่ระบบบำบัดจากบ่อเลี้ยงทดสอบบ่อละ 1.0 ลบ.ม./วัน จำนวน 6 บ่อ รวมเป็น 6 ลบ.ม./วัน และลดการสะสมของของเสียโดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากบ่อเลี้ยงทดสอบทุก 2 สัปดาห์ โดยทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากบ่อเลี้ยงทดสอบทุกบ่อปริมาตร 4.0 ลบ.ม. และทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำต่อเนื่อง 75 วัน



รูปที่ 1 บ่อเลี้ยงปลา 2 ความหนาแน่น

2.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำ วัดค่าโดยใช้ Multimeter แบบพกพา ยี่ห้อ HACH ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) วัดด้วยอุปกรณ์ Test Kit ยี่ห้อ MACHEREY-NAGEL

และ ค่าไนเตรท (NO_3) ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ Test Kit ยี่ห้อ MACHEREY-NAGEL

การคำนวณค่าแอมโมเนียอิสระ (NH_3) คำนวณจากการหาอัตราส่วนของ NH_3 จากการตรวจวัดค่า TAN โดยมีสมการในการคำนวณ NH_3 ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) [6]

$$\text{pK}_a = 0.09018 + 2729.92/T \quad (1)$$

เมื่อ pK_a = ค่าคงที่ของการแตกตัว

T = อุณหภูมิของน้ำ (เควิน)

$$f = 1/(10^{\text{pK}_a - \text{pH}} + 1) \quad (2)$$

เมื่อ f = สัดส่วนของแอมโมเนียอิสระ (ร้อยละ)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากผลการวิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิล 2 ความหนาแน่นคือ ความหนาแน่นที่ 1 เลี้ยง 30 ตัว/ลบ.ม. และความหนาแน่นที่ 2 เลี้ยง 40 ตัว/ลบ.ม. โดยมีระยะเวลาในการตรวจวิเคราะห์ต่อเนื่อง 75 วัน โดยมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า ดังนี้ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) ค่าแอมโมเนียอิสระ (NH_3) และค่าไนเตรท (NO_3) แสดงผลได้ดังนี้

3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากรูปที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำบ่อเลี้ยงปลาความหนาแน่นที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่าค่า pH ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลา คือ 6.5-8.5 [2] แต่จะมีแนวโน้มของค่า pH เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาแน่นที่ 1 มีค่าเฉลี่ย pH อยู่ในช่วง 6.54 – 7.81 และความหนาแน่นที่ 2 มีค่าเฉลี่ย pH อยู่ในช่วง 6.85 – 7.80 ซึ่งค่า pH ที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เนื่องจากสมดุลระหว่าง แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และ แอมโมเนียไอออน (NH_4^+) จะมีแนวโน้มที่จะเกิดแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ที่สภาวะ pH สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม pH จะมีค่าลดลงหลังจากที่มีการถ่ายน้ำ ดังจะเห็นได้ว่าปัจจัยจากการถ่ายน้ำมีความสำคัญที่ช่วยให้ค่า pH กลับสู่สภาวะที่เป็นกลาง

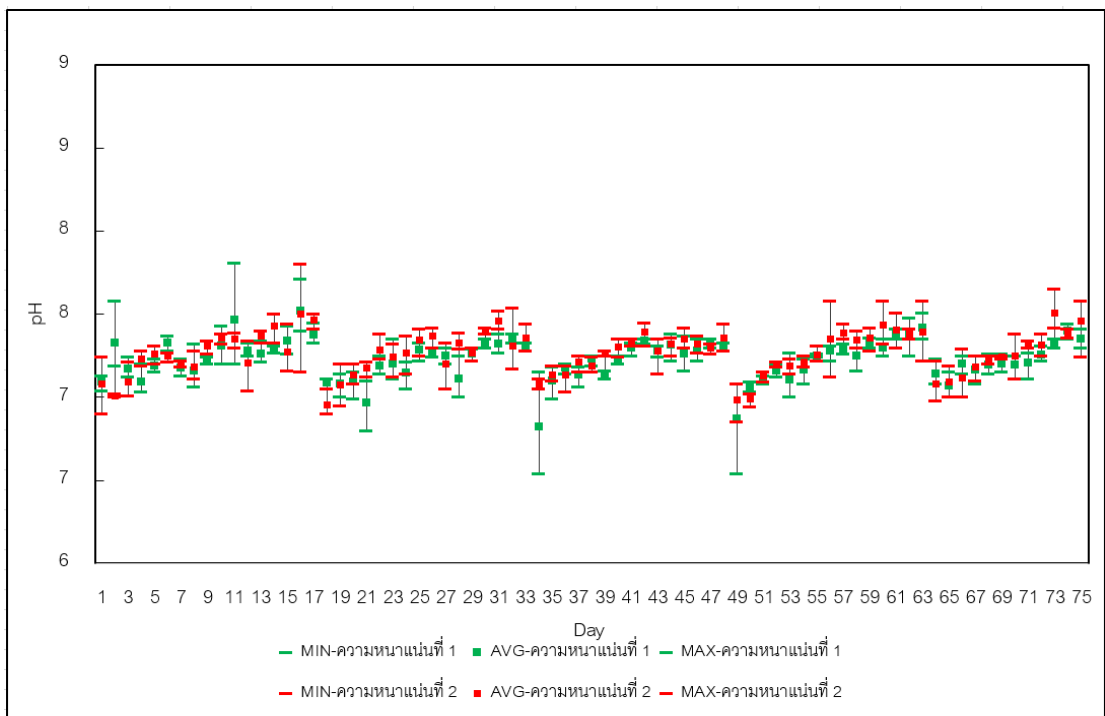
3.2 การสะสมของค่าแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) และแอมโมเนียอิสระ (NH_3)

จากผลการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) ข้อมูล pH และ อุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยง ได้นำมาคำนวณค่าแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ซึ่งเป็นรูปของแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อปลา ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3 และ 4

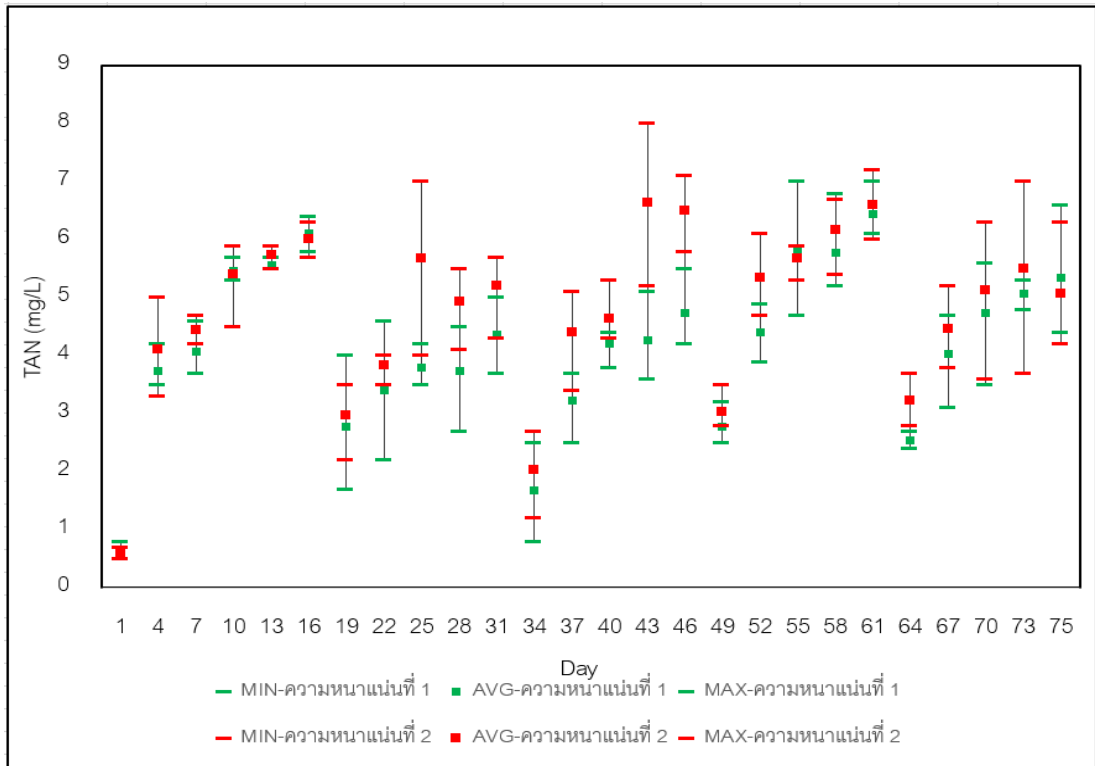
จากรูปที่ 3 แสดงการสะสมของแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) ที่ความหนาแน่นที่ 1 มีการสะสมของค่า TAN ระหว่าง 0.50 – 7.00 mg/l และความหนาแน่นที่ 2 มีการสะสมของค่า TAN ระหว่าง 0.50 – 8.00 mg/l ความหนาแน่นของปลาที่สูงขึ้นทำให้การสะสมของ TAN นั้นมีค่าสูงตามไปด้วยเนื่องจากการขับถ่ายของเสียจากปลาในบ่อเลี้ยงทดสอบ และทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนน้ำปริมาณ TAN ก็จะลดลง มีงานวิจัยได้แนะนำค่าที่เหมาะสมของ TAN ไม่เกิน 1.0 mg/l [3] และไม่เกิน 8.0 mg/l [2] อย่างไรก็ตามค่า

TAN ไม่ได้ถูกกล่าวอ้างถึงในการควบคุมคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลามากนัก แต่มีส่วนสำคัญในการนำมาคำนวณปริมาณของ NH_3 ณ pH และ อุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา

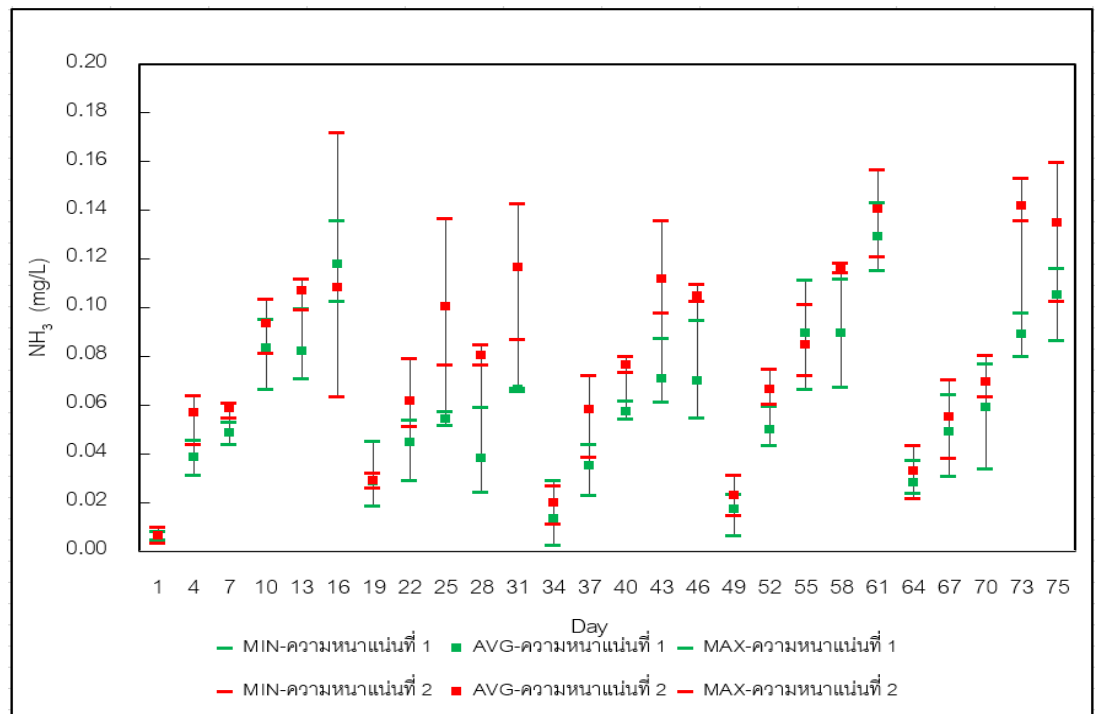
จากรูปที่ 4 ปริมาณการสะสมของ NH_3 ซึ่งได้จากการคำนวณ TAN มาคำนวณ ซึ่งแปรผันตาม pH และ อุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยง พบว่าในความหนาแน่นที่ 1 มีการสะสมของค่า NH_3 ระหว่าง 0.01 – 0.14 mg/l และความหนาแน่นที่ 2 มีการสะสมของค่า NH_3 ระหว่าง 0.01 – 0.17 mg/l โดยปริมาณที่เหมาะสม



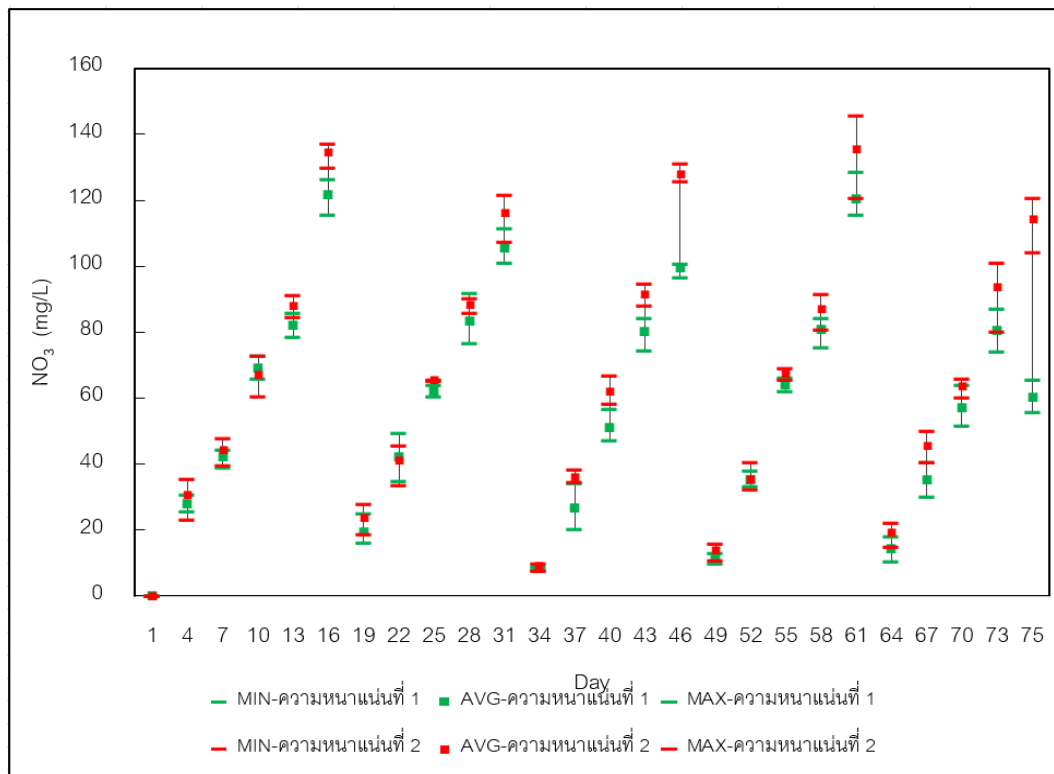
รูปที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำบ่อเลี้ยงปลาคความหนาแน่นที่ 1 และ 2



รูปที่ 3 ปริมาณการสะสมแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) บ่อเลี้ยงปลาความหนาแน่นที่ 1 และ 2



รูปที่ 4 ปริมาณการสะสมแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ในบ่อเลี้ยงปลาความหนาแน่นที่ 1 และ 2



รูปที่ 5 ปริมาณการสะสมไนเตรท (NO_3) ในบ่อเลี้ยงปลาความหนาแน่นที่ 1 และ 2

ควรมีค่า NH_3 ไม่เกิน 0.02 mg/l [4] และมีค่า NH_3 ไม่เกิน 0.05 mg/l [5] หากบ่อเลี้ยงปลามีค่า NH_3 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.10 – 0.40 mg/l จะทำให้สัตว์น้ำเจริญเติบโตช้า [7] และถ้าปริมาณสูงเกิน 0.6 mg/l จะส่งผลให้ปลาตาย [8]

โดยบ่อที่มีการเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูงทำให้มีปริมาณ NH_3 สูงขึ้นเนื่องมาจากการสะสมของ TAN และค่า pH ที่สูงขึ้นตามระยะเวลาจึงเป็นปัจจัยร่วมกันที่ทำให้การเกิด NH_3 สะสมสูงขึ้น การสะสมของแอมโมเนียจะมีค่าลดลงทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ดังนั้นความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะช่วยลดการสะสมของ NH_3 ได้

3.3 การสะสมของค่าไนเตรท

ผลการวิเคราะห์ไนเตรท (NO_3) แสดงค่าในรูปที่ 5 โดยในบ่อเลี้ยงทดสอบนั้นมีการสะสมของ NO_3 ของบ่อเลี้ยงทดสอบความหนาแน่นที่ 1 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.00 – 128.30 mg/l และความหนาแน่นที่ 2 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.00 – 145.60 mg/l ปริมาณ NO_3 มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำต่ำ มิงงานวิจัยได้แนะนำค่าที่เหมาะสมของ NO_3 ควรมีน้อยกว่า 1,000 mg/l [1] บางงานวิจัยแนะนำว่า NO_3 ควรมีน้อยกว่า 250 mg/l [2] ปริมาณ NO_3 สูงสุดที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงทั้งสองความหนาแน่นมีค่าไม่เกินค่าแนะนำในการเลี้ยงปลาน้ำจืด การเปลี่ยนถ่ายน้ำจากบ่อเลี้ยงช่วยลดการสะสมของ NO_3 ซึ่งการสะสมของ NO_3 ในระบบนั้นจะแปรผันตามความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงในบ่อเลี้ยง

4. สรุป

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) นั้นไม่แตกต่างกันมากสำหรับการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่น 30 และ 40 ตัว/ลบ.ม. แต่มีแนวโน้มที่ค่า pH สูงขึ้น ภายใน 2 อาทิตย์ การเพิ่มขึ้นของ pH ไม่เกินค่าที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลา และจะกลับมามีสภาวะเข้าใกล้ความเป็นกลาง (pH = 7) หลังจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากบ่อเลี้ยง

ในส่วน of ค่าแอมโมเนียทั้งหมด (TAN) และค่าแอมโมเนียอิสระ (NH_3) มีการสะสมเพิ่มขึ้น และการเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง จะมีการสะสม TAN และ NH_3 มากกว่าการเลี้ยงปลาในความหนาแน่นต่ำ หากพิจารณาค่าสูงสุดที่เหมาะสมของ NH_3 ในบ่อเลี้ยงไม่เกิน 0.05 mg/l รอบการเปลี่ยนน้ำควรจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำอาทิตย์ละ 1 ครั้ง จะช่วยลดการสะสมของ NH_3 ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้

เนื่องจากไนเตรท (NO_3) มีค่าที่แสดงความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยจึงสามารถมีในบ่อเลี้ยงปลาในปริมาณที่สูงได้ ดังนั้นการสะสมของไนเตรทในระยะเวลา 2 อาทิตย์ จึงไม่สะสมจนถึงจุดที่แสดงความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

อย่างไรก็ตามตัวแปรที่สำคัญต่อการควบคุมคุณภาพน้ำคือปริมาณการสะสมของ NH_3 ไม่ควรเกินระดับที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (ไม่ควรเกิน 0.02 mg/l) ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่ายน้ำให้พิจารณาที่ปริมาณการสะสมของ NH_3 เป็นหลัก และควรเปลี่ยนถ่ายน้ำอาทิตย์ละ 1 ครั้ง เพื่อลดความเป็นพิษของ NH_3 ต่อปลา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณในการศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang L, Chou L, Shieh, WK. Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. Water research. 2001; 35(13): 3097-108.
- [2] Dauda AB and Olusegun AA. Interrelationships among Water Quality Parameters in Recirculating Aquaculture System. Nigerian Journal of Rural Extension and Development. 2014; 7(2): 20-5.
- [3] Zweig RD, Morton JD, Stewart MM. Source Water Quality for Aquaculture: A Guide for Assessment. 1999
- [4] Buttner JK, Soderberg RW, Terlizzi DE. An introduction to water chemistry in freshwater aquaculture. Northeastern Regional Aquaculture Center, University of Massachusetts. Dartmouth North Dartmouth Massachusetts. 1993; 170: 1-4.

- [5] Masser MP, Rakocy J, Losordo TM.
Recirculating Aquaculture Tank
Production Systems. Management of
Recirculating Systems. Southern
Regional Aquaculture Center
Publication. 1992; 452.
- [6] Kenneth E, Russo RC, Lund RE,
Thurston R. Aqueous Ammonia
Equilibrium Calculations: Effect of pH
and Temperature. Journal of the
Fisheries Research Board of Canada.
1975; 32: 2379-83.
- [7] อังสนา ฉั่วสุวรรณ และ สักวาฬย์ ราชธรรมมา.
ผลกระทบของแอมโมเนียต่อสัตว์น้ำ.
รายงานผลการวิจัย. กรมวิทยาศาสตร์
บริการ: กรุงเทพฯ; 2549
- [8] Durborow R, Crosby D, Brunson M.
Ammonia in Fish Ponds. 1997; 32.

ข้อแนะนำในการส่งต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

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

ต้นฉบับบทความ

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

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

โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

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



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

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

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

Abstract

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

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

*ติดต่อ: E-mail, เบอร์โทรศัพท์, เบอร์โทรสาร

1. บทนำ

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

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

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

1.2 ชนิดตัวอักษร

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

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

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

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

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

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

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความขีดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

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

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินัยย่อหน้าใหม่ ให้พินัยบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินัยบทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพหรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่าง ๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการ จะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ชิดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

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

7.2. รูปภาพและตาราง

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

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

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

ตารางที่ 1

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

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

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

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

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนรูป ประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมาก เกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

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

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

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

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่อง เฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาของบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

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

1. การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

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

[4] สุกัญญา หงส์ทอง และ สมใจ ขจรชีพนันทงาม. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวด้วยกระบวนการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัย นครสวรรค์. 2553; 18(3): 20-6.

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

2. การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

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

[6] สิริประภา แพงคำแหง. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหม โดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาด สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2553.

3. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

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

4. การอ้างอิงเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

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