

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol. 7 No. 1 January - June 2021

Research Article

- Development of Plastic Green composite for Vacuum mold process 1
Anuwit Sonsiri Pramote Palicamin and Noppadon Amdee
- Development of A Semi-Automatic Straw Mushroom Substrate Briquetting Machine 10
Ponthep Vengsungnle Waree Srisorn Khanittha Chaibundit and Jarinee Jongpluempiti
- Pneumatic conveyor drying of agricultural seeds by using a Vertical Spiral pipe 21
Rungtawan Wiwattanasirikul Sakchai Dondee Pongputhai Udomariyasap Worachate Sangsida and Kamonrak Kangkham
- Development of a rainfall measurement system and data transmission via wireless communication system 32
Nuttapong Bootthanu and Chaiphan Prakaraphan
- Eco-efficiency of removal benzene using TiO₂/PLA-composite film by photocatalytic oxidation process 40
Pattamaphon Chanklom Kowit Suwannahong Tanongsak Yingratanasuk and Rotruedee Chotigawin
- Automatic Material Separator in Conveyor by PLC Controlled System 49
Piyawat Sritram Nattapong Buhga Weerachi Boonperm and Sanong Deesom
- Evaluation amount of rice grains in photograph using image processing techniques 60
Peeranat Ansuree Kittipong Laloon Chaiyan Junsiri Somposh Sudajan and Kantapong Khaeso
- Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Air Bubbles with Water Impinging Jet 71
Chattawat Aroonrujiphan Chinnadit Songnam Pathomporn Narato Natthaporn Kaewchoothong and Chayut Nuntadusit



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร
วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี
การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol. 7 No. 1 January - June 2021

ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 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
ผศ.ดร. กัลยากร	ขวัญมา	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร. วาอิส	ลีลาภัทร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. ธนา	ราษฎร์ภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. วีรชัย	อาจหาญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร. นิยม	กำลังดี	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. คำธณ	พิทักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. วิภาดา	สนองราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. สิริวิชัย	เดชะเกษราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ. ฤกษ์ชัย	ศรีวรรณาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. จักรมาศ	เลาหวนิช	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. จำเริญ	เกณท์สาคร	ภาควิชาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บรรณาธิการ

ฝ่ายจัดการวารสาร

สำนักงาน

รศ.ดร. รัชพล สันติวรการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น

นางสาวบุญญา ไชยบท

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

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

จ.ขอนแก่น 40002

กำหนดเผยแพร่

พิมพ์ที่

ISSN

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

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

: 2408 - 0985

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

Editorial Board

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

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

Production team Ms.Bhunyisa Chaiyabot

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

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

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หรือ FEAT JOURNAL (Farm Engineering and Automation Technology Journal) เป็นวารสารทางวิชาการ ซึ่งบทความทุกเรื่องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น (peer-reviewed journal) แบบ double blinded วารสารรับผลงานทางวิชาการที่เป็นต้นฉบับ (original) ในด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ เพื่อเผยแพร่เทคโนโลยีที่มีคุณค่าแก่นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป โดยวารสารเคร่งครัดในเรื่องผลงานวิชาการที่เป็นต้นฉบับ 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 1 ประจำเดือน มกราคม – มิถุนายน 2564 ฉบับนี้เป็นปีที่ 7 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 8 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

14 มิถุนายน 2564

จริยธรรมของการตีพิมพ์ (Publication Ethics)

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

บทบาทหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผลงานของผู้เขียนต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่นหากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของตนเองรวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ

3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสาร
4. ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคนต้องเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัยจริง
5. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมาเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาบทความของตนเอง

6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ๆ หลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว

7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

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

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน 2564

บทความวิจัย

การพัฒนาคุณสมบัติวัสดุผสมพลาสติกกรีซิ่งแวตล่อม เพื่อใช้เป็นวัสดุแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศ	1
อนุวิทย์ สนศิริ ปราโมทย์ พลิกามิน และ นพดล อ่ำดี	
การพัฒนาเครื่องอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดฟางแบบกึ่งอัตโนมัติ	10
พลเทพ เวงสูงเนิน วารีย์ ศรีสอน ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์ และ จาริณี จงปลื้มปิติ	
การอบแห้งเม็ดวัสดุทางการเกษตรขณะขนถ่ายด้วยลมร้อนในท่อเกลียวแนวตั้ง	21
รุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล ศักดิ์ชัย ดรดี พงษ์ภูไท อุดมอริยทรัพย์ วรเชษฐ์ แสงสีดา และ กมลรักษ์ แก้วคำ	
การพัฒนาระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย	32
ณัฐพงศ์ บุตรธนู และ ชัยพันธุ์ ประการะพันธ์	
ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดไอระเหยเบนซีนของ TiO ₂ /PLA-composite film ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	40
ปัทมพร จันทร์กลม โกวิท สุวรรณหงษ์ ทนงค์ศักดิ์ ยิ่งรัตน์สุข และ รจฤดี โชติกาวิรินทร์	
เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี	49
ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม ณัฐพงศ์ บุญงา วีระชัย บุญเพิ่ม และ สอนอง ดีสม	
การประเมินปริมาณของเมล็ดข้าวในภาพถ่าย โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ	60
พีรณัฐ อ้นสุริย์ กิตติพงษ์ ลาอุณ ชัยยันต์ จันทศิริ สมโภชน์ สุดาจันทร์ และ กันตพงษ์ แซ่โล	
การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ	71
ฉัตรวิมล อรุณรุจิพันธ์ ชินดิษฐ์ สองนาม ปฐมพร นะระโต ณัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต	

Research Article

Development of Plastic Green composite for Vacuum mold process	1
<i>Anuwit Sonsiri Pramote Palicamin and Noppadon Amdee</i>	
Development of A Semi-Automatic Straw Mushroom Substrate Briquetting Machine	10
<i>Ponthep Vengsungnle Waree Srisorn Khanittha Chaibundit and Jarinee Jongpluempiti</i>	
Pneumatic conveyor drying of agricultural seeds by using a Vertical Spiral pipe	21
<i>Rungtawan Wiwattanasirikul Sakchai Dondee Pongputhai Udomariyasap Worachate Sangsida and Kamonrak Kangkham</i>	
Development of a rainfall measurement system and data transmission via wireless communication system	32
<i>Nuttapong Bootthanu and Chaiphan Prakaraphan</i>	
Eco-efficiency of removal benzene using TiO ₂ /PLA-composite film by photocatalytic oxidation process	40
<i>Pattamaphon Chanklom Kowit Suwannahong Tanongsak Yingratanasuk and Rotruedee Chotigawin</i>	
Automatic Material Separator in Conveyor by PLC Controlled System	49
<i>Piyawat Sriram Nattapong Buhga Weerachi Boonperm and Sanong Deesom</i>	
Evaluation amount of rice grains in photograph using image processing techniques	60
<i>Peeranat Ansuree Kittipong Laloon Chaiyan Junsiri Somposh Sudajan and Kantapong Khaeso</i>	
Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Air Bubbles with Water Impinging Jet	71
<i>Chattawat Aroonrujiphan Chinnadit Songnam Pathomporn Narato Natthaporn Kaewchoothong and Chayut Nuntadusit</i>	



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาคุณสมบัติวัสดุผสมพลาสติกกระจกสังเคราะห์สิ่งแวดล้อม เพื่อใช้เป็นวัสดุแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศ

Development of Plastic Green composite for Vacuum mold process

อนุวิทย์ สนศิริ^{1)*} ปราโมทย์ พลิกามิน¹⁾ และ นพดล อำดี²⁾

Anuwit Sonsiri^{1)*} Pramote Palicamin¹⁾ and Noppadon Amdee²⁾

¹⁾สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 10120

²⁾สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง 70150

¹⁾Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep 10120

²⁾Department of Manufacturing Technology, Faculty of Industrial Technology Management,
Muban Chombung Rajabhat University 70150

Received: 2 September 2019

Revised: 18 February 2021

Accepted: 22 February 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาวัสดุผสมพลาสติกกระจกสังเคราะห์สิ่งแวดล้อม ระหว่าง วัสดุสังเคราะห์ ผสมรวมกับวัสดุธรรมชาติ ประกอบด้วย โพลีเอสเตอร์เรซินสภาวะของเหลว ผงอลูมิเนียม ผงทัลคัม และผงอิฐมอญ เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกล ด้านความแข็งแรง สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุ ของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง แม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ โดยการปฏิบัติการผสม วัสดุผสมพลาสติกกระจกสังเคราะห์สิ่งแวดล้อม ทำชิ้นงานทดสอบ (Specimen) จำนวน 32 ชิ้นทดสอบ กำหนดค่าน้ำหนักส่วนผสมแต่ละชิ้นเท่ากับ 20 กรัม และนำชิ้นงานทดสอบ ตรวจสอบค่าความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM D2240(1990) ระดับความแข็งแรง Shore-D ซึ่งผลจากงานวิจัยพบว่า ส่วนผสมวัสดุผสมพลาสติกกระจกสังเคราะห์สิ่งแวดล้อม อัตราส่วน โพลีเอสเตอร์เรซินสภาวะของเหลว 10 กรัม ผงอลูมิเนียม 2 กรัม ผงทัลคัม 4 กรัม และผงอิฐมอญ 4 กรัม ระยะเวลาการแข็งของส่วนผสม 6 ชั่วโมง มีคุณสมบัติความแข็งแรงดีที่สุด 84.6 Shore-D เหมาะสำหรับการใช้สร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ เพื่อเพิ่มทางเลือกของวัสดุในการผลิต ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ : พลาสติก เทอร์โมฟอร์มมิ่ง เรซิน ชิ้นงานทดสอบ

Abstract

This research presents a development of environmental-friendly plastic (EFP) composite material between synthetic materials mixed with natural materials, consisting of liquid polyester resin, aluminum powder, talcum powder and clay brick powder for use as a material create thermoforming process vacuum forming mold. The operating by mixed EFP composite material test specimen 32 pieces. Specify the weight of each ingredient equal to 20 grams and take the specimen check for hardness according to ASTM D2240(1990) Shor-D hardness level. Test results from the research found that mixed materials, EFP is 10 grams of liquid polyester resin, 2 grams of aluminum powder, 4 grams of talcum powder, 4 grams of brick and a setting time 6 hours powder with the best hardness of 84.6 Shor-D. Suitable for creating vacuum molds to increase the choice of materials in the production Industry sector.

Keywords : Plastic: Thermoforming: Resin: Specimen

*ติดต่อ: a.sonsiri@gmail.com, เบอร์ 080-507-2223

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติกของประเทศไทย เป็นเรื่องที่ต้องได้รับความสนใจเป็นพิเศษ ทั้ง ในภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และประชาชนทั่วไป โดยหลายภาคส่วนมีความพยายามในการใช้วัสดุ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกของประเทศไทย ที่เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว โดยมีแผนพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกปี พ.ศ. 2559-2564 มุ่งขยายการส่งออกผลิตภัณฑ์สู่กลุ่มประเทศ CLMV ส่งผลให้นำเงินตราเข้าประเทศนับพันล้านบาทและมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี อีกทั้งยังเน้นการส่งเสริมนวัตกรรมเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติก มุ่งเน้นพัฒนาเทคโนโลยีพลาสติกชีวภาพ ซึ่งกลุ่มผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐ

เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [1] รวมถึงการนำวัสดุทดแทนมาใช้ในงานอุตสาหกรรม การผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของงานผลิตพลาสติก ได้มีการใช้วัสดุโพลีเอสเตอร์เรซินซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์ผสมรวมกับผงทัลคัม ผงอลูมิเนียม ที่คัดค้านขึ้นมาเพื่อนำมาทดแทนการใช้งานของวัสดุประเภทโลหะ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีน้ำหนักเบา ราคาถูกกว่าโลหะตามสัดส่วนรูปร่าง สามารถแปรรูปได้ง่าย รวมไปถึงการช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่ใช้ในการแปรรูปอีกด้วย [2] อีกทั้งการพัฒนา ปรับปรุงโครงสร้างความเป็นผลึกวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอจากวัสดุธรรมชาติผสมกับอีพ็อกซีเรซินใช้ระบบสูญญากาศ และสารเติมแต่งในการขึ้นรูป ช่วยให้คุณสมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับเส้นใยคาร์บอนที่มีราคาต้นทุนสูงในการผลิต สามารถใช้ทดแทนเส้นใย

คาร์บอนที่ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การบิน ยานยนต์ ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เป็นต้น [3]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทดลองหาส่วนผสมของ โพลีเอสเตอร์เรซินสภาวะเหลว ผงอลูมิเนียม ผงทัลคัม ผงอิฐมอญผสมรวมและปล่อยแข็งตัว ให้ได้คุณสมบัติความแข็งแรงมากกว่า 80 Shor-D ซึ่งมีความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัสดุสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศเพื่องานบรรจุภัณฑ์พลาสติก

2. วิธีการวิจัย

ดำเนินการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุและวิธีการเพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.1 วัสดุผสม (Composite material) คือวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้เป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับคุณสมบัติและปริมาณของสารตั้งต้น รวมถึงรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว และประเภทของวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced) วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced) วัสดุผสมโครงสร้าง (structural) [4]

2.2 วัสดุดิบ (Materials)

โพลีเอสเตอร์เรซิน สภาวะพลาสติกเหลว มีลักษณะคันคล้ายน้ำมันเครื่อง กลิ่นฉุนแข็งตัวด้วยความร้อนสูง เป็นวัตถุไวไฟชนิดหนึ่ง มีอัตราการหดตัว 2% หลังเซตตัวเต็มที่ การแข็งตัวของโพลีเอสเตอร์เรซินสามารถแข็งตัวโดยใช้ตัวทำให้แข็ง(Hardener) +

ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (promote/ accelerator) ที่อุณหภูมิระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส [4]

ทัลคัม (Talcum) มีโครงสร้าง TOT เหมือนพวก Montmorillonite แต่ Al^{+3} ใน Octahedral sheet ถูกแทนที่ด้วย Mg^{+2} (Brucite sheet) แรงยึดกันระหว่างออกซิเจนของทัลคัม แต่ละชั้นไม่แข็งแรงจึงเป็นเหตุให้เกิดรอยแตกตามแนวตั้งฉากกับแกน C ได้ง่าย และเป็นเหตุทำให้มีเนื้อร่วนอ่อนนุ่ม ส่วนประกอบทางเคมีตามทฤษฎี คือ $63.5\% SiO_2$, $31.7\% MgO$ และ $4.8\% H_2O$ ทัลคัม มีคุณสมบัติพิเศษใช้เป็น ส่วนประกอบในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ อุตสาหกรรมกระเบื้องเคลือบผนัง เนื่องจากมีคุณสมบัติป้องกันการเกิดกรรณตัว (crazing) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวและมีคุณสมบัติต้านทานการเกิดการขีดครูดเนื่องจากความร้อน (thermal shock) อีกด้วย [5]

อลูมิเนียม (Aluminum) โลหะน้ำหนักเบาไม่สึกกร่อนโดยง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น เมื่อผสมโลหะอื่นบางชนิดลงไปเนื้ออลูมิเนียม ได้โลหะผสมซึ่งแข็งแรง ทนทาน และเหนียวกว่าอลูมิเนียมบริสุทธิ์มาก ใช้ทำสิ่งของเครื่องใช้ได้อย่างดี คุณสมบัติของอลูมิเนียมมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 ขนาดผงอลูมิเนียม สามารถจำแนกกลุ่มตามขนาดอนุภาคของผงเป็นกลุ่ม ดังนี้ กลุ่มขนาดอนุภาคผงหยาบ มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 20-60 ไมครอน กลุ่มขนาดผงละเอียดมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 6-20 ไมครอน กลุ่มขนาดอนุภาคผงละเอียดมาก มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 3-6 ไมครอน [6]

อิฐมอญ (Brick) เป็นวัสดุที่ผลิตมาจากการนำดินเหนียวมาเผาเพื่อให้ได้วัสดุที่คงรูปและมีความแข็งแรง มีคุณสมบัติ แสดงในตารางที่ 1 [7]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติอิฐมอญ

รูปแบบกายภาพ	หน่วย
ราคาต่อหน่วย	0.6
ราคารวมต่อ ตร.ม(บาท)	100-190
ขนาด(Volume) (cm ³)	7x16x3.5
ความหนาแน่น(ก.ก/ตร.ม)	1615-1650
จำนวนก้อนต่อ ตร.ม(ก้อน)	145
น้ำหนักต่อ ตร.ม(Kg/m ²)	130
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม "Q" (Thermal Transfer) (Watt/m ²)	30-45
ค่าการนำความร้อน "K" (Conductivity-K value) (W/m.K)	0.473
ค่าการต้านทานความร้อน "R" (Resistivity-R Value) (m ² K/W)	0.15
ค่าการจุความร้อน "C" (Thermal Capacity) (J/Kg.K)	800-1000
การต้านทานแรงอัด(Kg/cm ²)	35

2.3 เครื่องทดสอบความแข็ง ดูโรมิเตอร์ แบบชอร์ (Shore durometer) ใช้ในการวัดความแข็งของโพลีเมอร์, อีลาสโตเมอร์และยางแสดงในรูปที่1. โดยค่าความแข็งคือค่าความต้านทานของพื้นผิวต่อการกระแทกของหัวกดภายใต้สภาวะที่ถูกระบุขึ้นมี 2 แบบคือ ชอร์ เอ (Shore A) สำหรับยางหรือพลาสติกที่นุ่ม ส่วน ชอร์ ดี (Shore-D) สำหรับยางหรือพลาสติกที่แข็งกว่า [8]



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบความแข็งและการหาค่า

อนุชิต และ จิตติวัฒน์ [9] ได้ทำการวิจัยพบว่าค่าความต้านทานการรับแรง ดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น คุณสมบัติการดัดงอเนื่องจากความร้อนของคอมโพสิตที่ใช้สารช่วยผสมงานไวไนลไตรเมททอกซีไซเลน (PP/SCG-VTMS) มีค่าสูงที่สุด ส่วนคอมโพสิตที่มี ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งสูงที่สุดคือ PP/SCG-MA ที่ใช้พอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิก แอนด์ ไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสม ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ของรอยแตกหักที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกชี้ให้เห็นว่าการใช้สารไวไนลไตรเมททอกซีไซเลน (VTMS) และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์เป็น สารช่วยผสม ทำให้พอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์เข้ากันได้กับ กราฟท์ที่เป็นฟิลเลอร์เพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ของเมทริกซ์ให้สูงขึ้น จึงมีคุณสมบัติทางกล ที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่เติมสารช่วยผสม

2.4 วิธีการดำเนินงาน

ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุผสม โพลีเอสเตอร์เรซิน สภาวะเหลว ผงอลูมิเนียม ผงทัลคัม ผงอิฐมอญ และ ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้

2.4.1 ปฏิบัติการผสมวัสดุผสม

สร้างชิ้นทดสอบกำหนดน้ำหนัก 20 กรัม จำนวน 32 ชิ้น แยกสัดส่วนด้วยโปรแกรม Excel หาส่วนผสมที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงมากที่สุด เพื่อสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแผ่นพลาสติกด้วยสูญญากาศ มีส่วนประกอบของวัสดุผสม คือ โพลีเอสเตอร์เรซินสถานะเหลว เบอร์ 355E ผสมโคบอล และตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5% ผงทลคัมขนาด 325 Mesh ผงอลูมิเนียมขนาด 325 Mesh ผงอิฐขนาด 325 Mesh (325 Mesh = 44 Microns) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัตถุดิบของ วัสดุผสม

2.4.2 การสร้างชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติทางกล

ส่วนผสมคอมโพสิต สำหรับชิ้นงานทดสอบในการวิจัยนี้ประยุกต์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[2]โดยการใช้สารตัวเติมธรรมชาติและสารช่วยผสม ที่เพิ่มผงอิฐมอญให้สมบัติทางกลด้านความแข็งแรง และสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกด้วยสูญญากาศ สัดส่วนของโพลีเอสเตอร์เรซินคงที่เท่ากับ 10 กรัมส่วนผสมอื่นผันแปรไป ให้ได้ส่วนผสมแต่ละชิ้น มีน้ำหนัก 20 กรัม ซึ่งดำเนินการผสมส่วนผสม กระจ่ายแจกแจงบัญชีความแตกต่างของส่วนผสมด้วยโปรแกรม Excel [10]แสดงใน ตารางที่ 2 จากนั้นทำการผสมแต่ละชิ้นงานทดสอบ โดยการผสมกวนในภาชนะและเทลงแบบ ขนาด 6x25x25 มิลลิเมตรแสดงในวงกลมของรูปที่ 3. ปล่อยทิ้งให้แห้งเห็ดตัวที่

อุณหภูมิระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 สัดส่วนวัสดุผสม ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดลอง (Specimen)	เรซิน (Resin)	ผงอลูมิเนียม (Al)	ผงทลคัม (Tc)	ผงอิฐมอญ (B)	ส่วนผสมรวม (กรัม)
No.1	10	5	4	1	20
No.2	10	5	1	4	20
No.3	10	5	3.5	1.5	20
No.4	10	5	1.5	3.5	20
No.5	10	5	4.5	0.5	20
No.6	10	5	0.5	4.5	20
No.7	10	5	3	2	20
No.8	10	5	2	3	20
No.9	10	4	5	1	20
No.10	10	4	4	2	20
No.11	10	4	3.5	2.5	20
No.12	10	4	2.5	3.5	20
No.13	10	4	3	3	20
No.14	10	4	4.5	1.5	20
No.15	10	4	1.5	4.5	20
No.16	10	4	1	5	20
No.17	10	3	5	2	20
No.18	10	3	2	5	20
No.19	10	3	4	3	20
No.20	10	3	3	4	20
No.21	10	3	4.5	2.5	20
No.22	10	3	2.5	4.5	20
No.23	10	3	3.5	3.5	20
No.24	10	3	1.5	5.5	20
No.25	10	2	5	3	20
No.26	10	2	3	5	20
No.27	10	2	4	4	20
No.28	10	2	4.5	3.5	20
No.29	10	2	3.5	4.5	20
No.30	10	2	2.5	5.5	20
No.31	10	2	2	6	20
No.32	10	2	1.5	6.5	20

2.4.3. การทดสอบหาค่าความแข็งแรง ชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบจำนวน 32 ชิ้น จากข้อที่ 2.4.2 ทดสอบวัดค่าความแข็งแรง (Hardness testing) ดำเนินการทดสอบในชิ้นงานทดสอบ ที่บ่งบอกถึงความต้านทานต่อรอยกด ตามมาตรฐาน ASTM D2240(1990) ด้วยเครื่อง Shore hardness tester ของบริษัท Instron จำกัด รุ่นShore instruments, S/N 108817 แสดงในรูปที่ 1. สภาวะปรับสภาพ

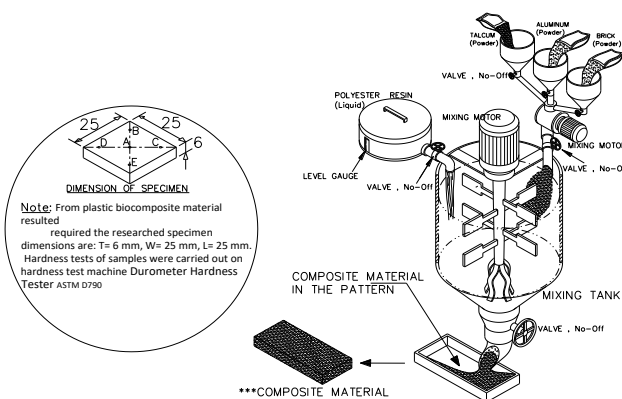
ชิ้นงานทดสอบ ควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส, ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ R.H. สภาวะน้ำหนักกด 5 กิโลกรัม จำนวน 5 จุดกดต่อ 1 ชิ้นทดสอบ แสดงในวงกลมรูปที่ 3. อ่านผลทดสอบ

ภายใน 3 วินาที ต่อ 1 จุดกด [11] ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3. หาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแข็งของขึ้นทดสอบดังนี้

สูตรหาค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความแข็ง Shor-D

$$\frac{A+B+C+D+E}{5} = \% \quad (1)$$

2.4.4 การผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศและผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อการบรรจุภัณฑ์ โดยนำอัตราส่วนผสมจากผลของค่าความแข็งที่ดีที่สุดคือ No.27 คือ ส่วนผสมของ โพลีเอสเตอร์เรซิน สภาวะเหลว 10 กรัม ผงอลูมิเนียม 2 กรัม ผงทัลคัม 4 กรัม ผงอิฐมอญ 4 กรัม รวมน้ำหนัก 20 กรัม ทำการเพิ่มอัตราส่วนของส่วนผสมพลาสติกกรีซสิ่งแวดลอมให้ได้น้ำหนัก 4,320 กรัม ผสมรวมในถังผสมดังแสดงในรูปที่ 3. เพราะเมื่อเทลงในแบบจะได้วัสดุผสม สำหรับสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ ขนาด หนา กว้าง ยาว เท่ากับ 50x150 x150 มิลลิเมตร ใช้ผลิต ผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อการบรรจุภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.



รูปที่ 3 เครื่องผสมวัสดุผสมและขึ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4 แม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ และผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อการบรรจุภัณฑ์

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการทดสอบความแข็งขึ้นงานทดสอบ 32 ชิ้น 5 จุดกดทดสอบแต่ละชิ้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 คือ ผงทัลคัม ผงอิฐมอญ มีผลต่อความแข็งอีกทั้งเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนผงอลูมิเนียม สามารถลดปริมาณส่วนผสมผงอลูมิเนียมโดยใช้ผงอิฐมอญแทน สำหรับใช้เป็นวัสดุสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ ในงานทดลองนี้เห็นได้ว่า ปริมาณของผงอลูมิเนียมที่ใช้ผสมในวัสดุผสมพลาสติกกรีซสิ่งแวดลอม ไม่มีผลต่อความแข็งวัสดุผสม จากตารางที่ 2 และ 3 ซึ่งการทดลองเพื่อพัฒนาวัสดุผสมพลาสติกกรีซสิ่งแวดลอมพบว่าขึ้นงานทดสอบ No.27 อัตราส่วนผสมของโพลีเอสเตอร์เรซินสภาวะเหลว 10 กรัม ผงอลูมิเนียม 2 กรัม ผงทัลคัม 4 กรัม

และผงอิฐมอญ 4 กรัม ระยะเวลาการแห้งแข็งของ ส่วนผสม 6 ชั่วโมง มีคุณสมบัติทางด้านความแข็งดีที่สุด 84.6 Shor-D สามารถใช้สร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศเพื่อการผลิต ผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อการบรรจุภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี และใช้เป็นวัสดุทดแทนโลหะ ในงานอุตสาหกรรมพลาสติกต่อไป

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยผลทดสอบความแข็ง Shor-D

ชิ้นทดสอบ	ตำแหน่งทดสอบ A	ตำแหน่งทดสอบ B	ตำแหน่งทดสอบ C	ตำแหน่งทดสอบ D	ตำแหน่งทดสอบ E	เปอร์เซ็นต์ความแข็ง
No.1	78	78	85	74	77	78.4%
No.2	76	84	62	79	67	73.6%
No.3	81	79	79	75	78	78.4%
No.4	79	79	74	64	68	72.8%
No.5	83	74	63	76	70	73.2%
No.6	78	85	76	79	70	77.6%
No.7	85	74	84	76	82	80.2%
No.8	81	83	76	83	77	80%
No.9	84	82	82	84	83	83%
No.10	83	81	83	80	80	79.8%
No.11	83	83	73	79	81	79.8%
No.12	77	72	72	82	79	76.4%
No.13	85	84	79	86	83	83.4%
No.14	83	85	79	85	79	82.2%
No.15	81	82	76	80	82	80.2%
No.16	82	84	81	85	84	83.2%
No.17	84	83	85	84	80	83.2%
No.18	85	79	83	82	86	83%
No.19	79	81	76	87	77	80%
No.20	86	84	77	86	82	83%
No.21	82	80	79	82	86	81.8%
No.22	83	83	71	85	76	79.6%
No.23	83	75	83	81	83	81%
No.24	82	82	79	84	83	82%
No.25	84	79	72	80	82	79.4%
No.26	74	82	61	79	68	72.8%
No.27	83	86	84	85	85	84.6%
No.28	85	82	81	84	85	83.4%
No.29	83	83	70	83	80	79.8%
No.30	84	85	84	83	83	83.8%
No.31	81	79	83	80	82	81%
No.32	76	82	84	81	85	81.6%

4. สรุป

ผลการวิจัยส่วนผสมวัสดุผสมพลาสติกกรีซ สิ่งแวดล้อม พบว่าอัตราส่วนผสม ผ่านการทดสอบได้ความแข็งเท่ากับ 84.6 Shor-D ภายใต้ส่วนผสม โพลีเอสเตอร์เรซิน 10 กรัม ผงอลูมิเนียม 2 กรัม ผงทัลคัม 4 กรัม และผงอิฐมอญ 4 กรัม ระยะเวลา แห้งตัว 6 ชั่วโมงโดยคุณสมบัติทางด้านความแข็ง สามารถเทียบเคียงกับวัสดุสำหรับใช้สร้างแม่พิมพ์ ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศที่ผลิตจากต่างประเทศ รายละเอียดวัสดุ Fast Cast Polyurethane resin Product : F50 [12] ที่มีราคาสูงกว่าวัสดุผสม พลาสติกกรีซ สิ่งแวดล้อมจากงานวิจัยนี้ ที่มีขนาด เท่ากันถึง 40% อีกทั้งในส่วนผสมของวัสดุผสม พลาสติกกรีซ สิ่งแวดล้อมนี้สามารถลดปริมาณวัสดุ สังกะสีโพลีเอสเตอร์เรซินลง 10% โดยประมาณ และเพิ่มปริมาณของวัสดุธรรมชาติชนิดอื่น ที่ สามารถผสมรวมได้อีก เช่น ผงปูนจิวเวลลีเศษวัสดุ เหลือจากกระบวนการหล่อจิวเวลลี เพื่อช่วยให้การ ทดแทนวัสดุสังเคราะห์อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายสนับสนุนเทคนิคด้านวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTECH) ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือทดสอบความแข็ง ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยเศรษฐกิจ ธุรกิจและเศรษฐกิจฐานราก ธนาคารออมสิน. (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม 2562]. เข้าถึงได้จาก: [http:// www.gsb.or.th/GSBResearch.aspx](http://www.gsb.or.th/GSBResearch.aspx).
- [2] Sonsiri A, Palicamin P, Singpommatt D. Optimal Composition of mixer Material for The Thermoforming Process. Applied Mathematics, Mechanics and Engineering. Technical University of Cluj-Napoca. Romania. 2018; 61(1): 99-104.
- [3] ขจร อัจฉิมาจิรัฐติกา และ กิตติ สถาพรประสาธน์. การพัฒนาการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ. วารสารเกษมบัณฑิต. 2558; 5(1): 94-111.
- [4] ศรุต อำมาตย์โยธิน. วัสดุเชิงประกอบ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์: กรุงเทพฯ; 2558.
- [5] วัตถุติบเชรามิกทัลคัม. (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2562]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaiceramicsociety.com>
- [6] วิชญ์วัฒน์ เกตุอุต. อิทธิพลของผงอลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือSKD11 ด้วยกระบวนการPMEDM. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2557.
- [7] คุณสมบัติของอิฐมอญ. (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2558]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ienergyguru.com>
- [8] กิตติสันต์ มงคลสุทธิรัตน์. เครื่องวัดความแข็งแรงและการเลื่อยใช้สเกล. Metrology info. 2558; 17(84): 8-11.
- [9] อนุชิต คงฤทธิ์ และ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. ผลกระทบของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟ. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2561; 11(1): 18-28.
- [10] สุภาภรณ์ คงสวัสดิ์. การประยุกต์ใช้ Excel กับงานบัญชี. Executive Journal. 2554; 31(4): 116-21.

- [11] พลาสติกประเภทและการใช้งาน. (สื่อออนไลน์).
[เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2562]. เข้าถึงได้
จาก: [http://www.mtec.or.th/th/special/
Biodegradableplastic/type.htm](http://www.mtec.or.th/th/special/Biodegradableplastic/type.htm)
- [12] AxsonTech2012-120322AxsonNA2011
Product Brochure. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ
วันที่ 10 ตุลาคม 2562]. เข้าถึงได้จาก:
<http://www.Professionalplasts.com>



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาเครื่องอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดฟางแบบกึ่งอัตโนมัติ

Development of A Semi-Automatic Straw Mushroom Substrate Briquetting Machine

พลเทพ เวงสูงเนิน วารี ศรีสอน ขนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์ และ จาริณี จงปลื้มปิติ*

Ponthep Vengsungnle Waree Srisorn Khanittha Chaibundit and Jarinee Jongpluempiti

สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Agricultural Machinery Engineering, Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

Received: 12 December 2019

Revised: 19 April 2021

Accepted: 23 May 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดฟางแบบกึ่งอัตโนมัติมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าต้นทุนในการผลิตและควบคุมคุณภาพของก้อนวัสดุเพาะให้ใกล้เคียงกันด้วยการใช้พีแอลซีควบคุมการทำงานของเครื่อง วัสดุเพาะเริ่มต้นมีความชื้นประมาณ 54 %wb ถูกเตรียมด้วยเครื่องย่อยให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 cm โดยมีตัวแปรที่ทดสอบคือแรงดันกระบอกอัด 3 4 และ 5 bar วัสดุเพาะเริ่มต้น 18 kg การทดสอบ 3 ซ้ำ ซึ่งในทางทฤษฎีจะต้องได้จำนวนก้อนทั้งสิ้น 30 bags โดยมีเกณฑ์ที่วัดคือค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.36-0.38 g/cm³ จากการทดสอบพบว่ามวลที่บรรจุได้ มวลสูญเสียและเวลามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นส่งผลให้แนวโน้มของค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นคือ 0.366±0.02, 0.371±0.02 และ 0.386±0.02 g/cm³ ตามลำดับ ค่าความสามารถในการอัดจะพิจารณาเพียงก้อนที่ผ่านเกณฑ์คือ 141±3 bag/hr, 188±2 bag/hr และ 138±3 bag/hr ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพการอัดมีค่า 63.34%, 86.67% และ 66.67% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแรงงานคนที่มีค่าใช้จ่าย 0.5 Baht/bag กับเครื่องอัดที่แรงดัน 4 bar ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการอัดก้อนเชื้อวัสดุเพาะ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าประมาณ 0.21 Baht/bag จึงมีผลต่างของค่าใช้จ่ายลดลงประมาณ 10,485 Baht/Month ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6 Month

คำสำคัญ: วัสดุเพาะเห็ดฟาง เครื่องอัดก้อน อัตโนมัติ

Abstract

The objectives for developing a semi-automatic straw mushroom briquetting machine were to reduce the production costs and control the similarity of products quality by using PLC to control the machine. The initial moisture content of the substrate was 54 %wb which was reduced to about 1 cm of size with the shredder machine. Initial pressure variables of pneumatic piston were 3, 4 and 5 bar. Experiments were done in triplicate, and every test had initial substrate of about 18 kg that, in theory, must produce about 30 bags. The metric value is density in the range of 0.36-0.38 g/cm³. The experiment found that in each pressure had similar mass in the bag, mass loss and compressed time. An increase in piston pressure resulted to a rising trend of the density at 0.366±0.02, 0.371±0.02 and 0.386±0.02 g/cm³. The compressive strength only considered the criteria of 141 ± 3 bag / hr, 188 ± 2 bag / hr and 138 ± 3 bag / hr. The efficiency of compression were 63.34%, 86.67% and 66.67% respectively. A comparison of the labor cost of 0.5 Baht / bag with the 4 bar pressure, which was the optimum condition, showed that the production cost was lower by about 0.21 Baht / bag, thus reducing the cost by approximately 10,485 Baht / month, resulting in a payback period of approximately 6 months.

Keywords: Straw mushroom substrate: Briquetting machine: Automatic

*ติดต่อ: Jarinee.jo@rmuti.ac.th, 0-4423-3073

1. บทนำ

เห็ดฟางข้าว straw mushroom) มีชื่อในทางวิทยาศาสตร์คือ *Volvariella volvacea* หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าเห็ดฟางหรือเห็ดจีน [1] ซึ่งเป็นหนึ่งในเห็ดที่ปลูกกันมากที่สุดในเข (ตร้อนและเขตร้อนชื้น [2] โดยทั่วไปเห็ดเหล่านี้จะมีอายุการเก็บรักษาที่จำกัดมากเช่นเดียวกับผักและผลไม้หลายชนิดที่มักจะเน่าเสียง่าย จึงไม่เหมาะสำหรับการเก็บรักษาในระยะยาวเห็ดชนิดนี้สามารถปลูกได้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวต่าง ๆ หยวกกล้วย เศษซากาแฟ ผุนชีเหลื่อย เป็นต้น [3] นอกจากนี้ยังสามารถปลูกด้วยเศษฟ้ายได้ดีและยังพบว่าก้อนเชื้อเห็ดที่เหลือจะเป็นแหล่งสารอาหารอินทรีย์ที่ดีอีกด้วย [4] สำหรับการเพาะเห็ดฟางในโรงเรือนระบบปิดมีต้นทุนการผลิต 266,223 บาทต่อไร่ต่อปี ผลตอบแทน 346,752 บาทต่อไร่ต่อปี คิดเป็นผลตอบแทนสุทธิ 80,528 บาทต่อไร่ต่อปี [5] การเพาะปลูกเห็ดฟางด้วยเศษฟ้ายซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานทอผ้ายังเป็นวัสดุปลูกที่ให้ผลผลิตมากกว่าชีเหลื่อยอีกด้วย [6] การเตรียมวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟางด้วยเศษฟ้ายเริ่มจากการนำเศษฟ้ายมาแช่น้ำให้ชุ่ม ในขณะเดียวกันก็ทำการหมักเปลือกถั่วเขียวในน้ำเพื่อให้เกิดการย่อยสลายเป็นปุ๋ยในระดับหนึ่ง แล้วจึงนำเศษฟ้ายหมักและเปลือกถั่วเขียวหมัก ปุ๋ย และแร่ภูเขาไฟ มาผสมกันให้เท่ากันแล้วทำการหมักทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 4 day โดยในแต่ละวันจะต้องทำการกลับกองของส่วนผสมนี้เพื่อไม่ให้ด้านล่างของกองมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป เมื่อหมักส่วนผสมทั้งหมดหรือที่เรียกว่า วัสดุเพาะเชื้อเห็ดได้ตามที่กำหนดแล้วจึงนำมาบรรจุลงถุงพลาสติกและใส่คอขวดตามด้วยสำลีปิดจุให้เรียบร้อย หลังจากนั้น

นำไปฆ่าเชื้อโรคด้วยการนึ่งด้วยไอน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 90 °C เป็นเวลา 5 hr. เมื่อนึ่งเสร็จเรียบร้อยแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนกว่าจะมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อม จึงนำมาหยอดเชื้อเห็ดในห่องปลอดเชื้อแล้วทำการปล่อยให้เชื้อเดินเต็มก้อนในห่อที่อับแสงและปราศจากการระบายอากาศ เมื่อเชื้อเห็ดเดินเต็มก้อนแล้วจึงนำไปเปิดดอกตามแต่ละวิธีที่เกษตรกรนิยมปลูก เช่น ในโรงเรือน ในตะกร้า บนกองตึ๋ย เป็นต้น

ในกระบวนการบรรจุลงถุงพลาสติกจะต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากในการนำวัสดุเพาะใส่ถุงและต้องออกแรงอัดให้แน่นจนเต็มถุงหรือมีน้ำหนักต่อก้อนอยู่ในช่วง 500-600 g ส่งผลให้เสียเวลาในการอัดก้อนแรงงานเกิดความเมื่อยล้า ไม่ทันต่อความต้องการของเกษตรกร และคุณภาพของก้อนเชื้อเห็ดไม่สม่ำเสมอซึ่งปัจจุบันการอัดก้อนเชื้อเห็ดได้มีการสร้างเครื่องอัดขึ้นมาเพื่อช่วยลดเวลา เพิ่มกำลังการผลิต และมีความสม่ำเสมอของแรงอัดทำให้ได้ก้อนเห็ดขนาดและความหนาแน่นใกล้เคียงกัน [7] ซึ่งมีนักวิจัยได้สร้างเครื่องอัดก้อนที่มีการพัฒนาให้มีกลไกไม่มากนักเพื่อเอื้อต่อการผลิตแบบครัวเรือนโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังแล้วส่งถ่ายกำลังผ่านสายพานไปยังจานเหวี่ยงเพื่อขับเคลื่อนกระบอกลดให้ขึ้นลงตามรอบที่กำหนดและใช้เวลาในการอัดก้อนน้อยที่สุด 1.40 min [8] แล้วเพิ่มจำนวนกระบอกลดเป็น 3 กระบอก และควบคุมการทำงานให้เป็นอัตโนมัติด้วยมอเตอร์ต้นกำลังแล้วส่งกำลังไปยังข้อเหวี่ยงเพื่ออัดแบบอัตโนมัติ [9] สามารถเพิ่มอุปกรณ์ทุนแรงแบบใช้เท้าเหยียบเพื่อลดแรงงานคนและค่าใช้จ่ายได้ อีกทั้งยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพการอัดเชื้อเห็ดให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันด้วยระบบไฮดรอลิกส์ และเพิ่มการผลิตก้อนด้วยเครื่องอัดแปดสถานี นอกจากนี้ยังมี

การพัฒนาสกรูอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดให้มีความชื้นของ
ท่อที่เรียวยาวเพื่อให้ก้อนเชื้อมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
[10]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าสกรูอัดก้อน
วัสดุเพาะเห็ดสามารถใช้เครื่องได้และมีข้อดีหลาย
อย่างเช่น เพิ่มผลผลิต ความหนาแน่นสม่ำเสมอ และ
สามารถลดการระคายเคืองแรงงานคนได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิด
เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดวัสดุเพาะเห็ดเห็ดฟาง
แบบกึ่งอัตโนมัติแบบ 4 กระบอกตวงที่สวม
ถุงพลาสติกด้วยคน ควบคุมปริมาณวัสดุเพาะด้วย
เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ หมุนกระบอกตวงด้วยมอเตอร์
ไฟฟ้าและอัดด้วยกระบอกสูบนิวแมติกส์ ซึ่งทุก
ขั้นตอนจะทำงานด้วยการควบคุมของโปรแกรมใน
ระบบพีแอลซี แต่เครื่องอัดที่มีในปัจจุบันส่วนใหญ่จะ
เป็นการอัดวัสดุเพาะที่ทำมาจากขี้เลื่อย ใน
ขณะเดียวกันถ้าเป็นวัสดุเพาะที่ทำมาจากเปลือกผัก
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หากทำให้มีขนาดเล็กก่อนจะ
สามารถอัดเป็นก้อนได้ดีกว่าไม่หั่นย่อย [11] จึงต้อง
เตรียมวัสดุเพาะก่อนบรรจุลงถุงให้มีขนาดเล็กเพื่อให้
สะดวกในการอัดก้อน

2. การออกแบบและสร้างเครื่องอัด

2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของก้อนเชื้อเห็ดฟาง

ก้อนเชื้อเห็ดฟางที่ทำการศึกษาค้นคว้าเป็นของ
ผู้ประกอบการผลิตก้อนเชื้อเห็ดจำหน่ายที่บ้านหนอง
ไม้ตาย อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดนครราชสีมา พบว่าวัสดุ
เพาะมีส่วนผสมของขี้เถ้า 17% เปลือกถั่วเหลือง 75%
มูลสัตว์ 5% ดินภูเขาไฟ 3% บรรจุลงถุงพลาสติก
สำหรับทำก้อนเชื้อขนาด 7" x 12" มวลหลังบรรจุวัสดุ
เพาะแล้วประมาณ 500-600 g/bag ความสูง

ประมาณ 17-18 cm เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อน
ประมาณ 10-11 cm และมีความหนาแน่น
ประมาณ 0.378 g/cm³ หรืออยู่ในช่วง 0.36-0.38
g/cm³ ด้วยแรงงานคนอัดใช้เวลา 28.8 sec/bags

2.2 การออกแบบกระบอกตวง

กระบอกตวงวัสดุเพาะทำจากท่อสแตนเลสขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm เนื่องจากขนาดถุงพลาสติก
มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11 cm คำนวณความสูงจาก
สมการที่ (1) ความหนาแน่นเฉลี่ยที่ 0.378 g/cm³ และ
น้ำหนักวัสดุเพาะสูงสุด 600 g

$$h = \frac{m}{\rho \pi r^2} \quad (1)$$

โดยที่

h	= ความสูง	(cm)
m	= มวล	(g)
ρ	= ความหนาแน่น	(g/cm ³)
r	= รัศมีวงกลม	(cm)

จะได้ว่าความสูงของก้อนเชื้อเห็ดหลังอัดแล้วไม่ควรเกิน
20 cm เมื่อนำวัสดุเพาะที่การลดขนาดประมาณ 1 cm
มาชั่งมวลให้ได้ 600 g จะต้องใช้ท่อยาว 40 cm และเมื่อ
ทำการลบความสูงหลังอัดจะเหลือท่อยาว 20 cm แต่
ต้องทำการเผื่อระยะช่องเพื่อให้เซนเซอร์จับวัตถุและ
เชื่อมติดกับแผ่นประคองด้านบนได้จึงต้องเพิ่มความ
ยาวท่อ 5 cm ดังนั้นกระบอกตวงควรมีความยาว 45 cm

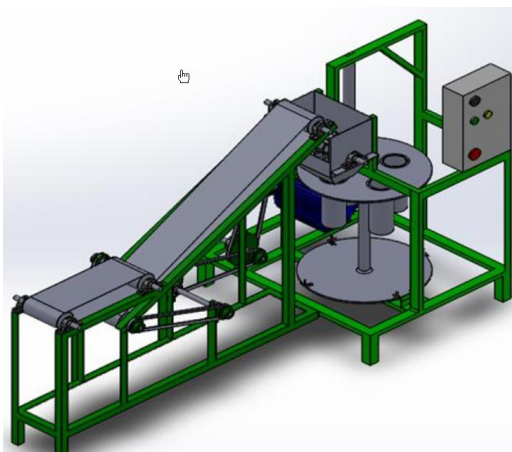
2.3 การออกแบบกระบอกนิวแมติกส์

กระบอกสูบลูกสูบที่เลือกใช้มีการทำงานสองทิศทางซึ่ง
ทำหน้าที่กดอัดวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟางให้มีความ
หนาแน่นมากขึ้น โดยเปลี่ยนพลังงานลมอัดให้เป็น
พลังงานกลและมีการทำงานในแนวเส้นตรง มีระยะชัก
50 cm จึงเลือกใช้กระบอกที่มีความยาว 50 cm

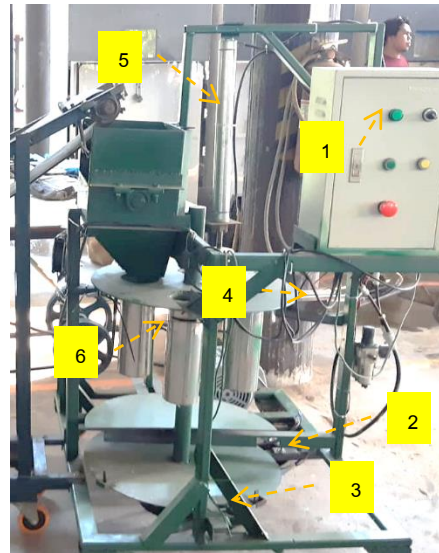
เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และที่ปลายก้านสูบมีแท่งพลาสติกชุปเปอร์ลินหนา 5 cm

2.4 การออกแบบระบบควบคุมด้วยพีแอลซี

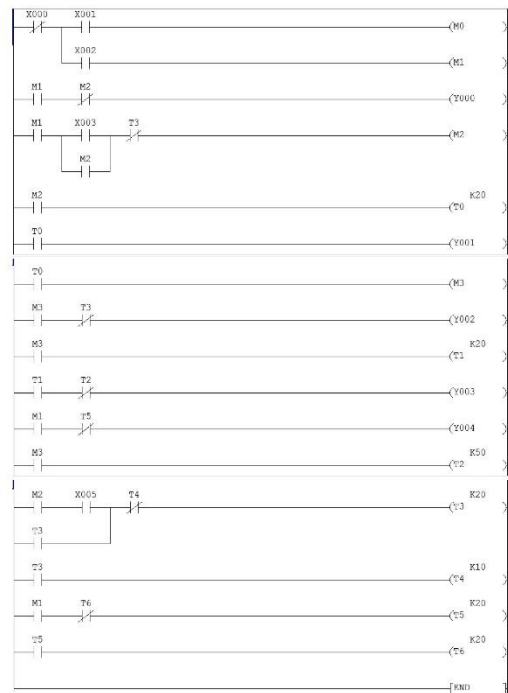
เมื่อทำการออกแบบเครื่องดังรูปที่ 1 และสร้างเครื่องพร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์แล้วแสดงดังรูปที่ 2 ทำการออกแบบระบบควบคุมอุปกรณ์โดยใช้ภาษา Ladder ในโปรแกรมพีแอลซีดังรูปที่ 3 และมีการแสดงตัวแปรตามตารางที่ 1 ให้มีการทำงานตามลำดับขั้น โดยมีมอเตอร์หมุน กระบอกนิวแมติกส์เบรกกระบอกตวง และกระบอกนิวแมติกส์อัดวัสดุเพาะ มีกระบวนการทำงานดังนี้ เมื่อทำการเปิดสวิทช์ระบบ (1) มอเตอร์หมุนชุดกระบอกตวงทำงาน (2) ขณะเดียวกันเซนเซอร์จับตำแหน่ง (3) ตรงตามที่ตั้งไว้แล้ว จะส่งผลให้มอเตอร์หยุดหมุนและจะส่งการต่อให้กระบอกเบรกทำงาน (4) เพื่อจับกระบอกตวงไม่ให้เคลื่อนที่เมื่อกระบอกอัด (5) เลื่อนลงอัดวัสดุเพาะพร้อมกับกระบอกตวงจะบรรจุวัสดุเพาะเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุทำงาน (6) จะส่งการให้มอเตอร์หมุนทำงาน ส่งผลให้ก้อนเชื้อเห็ดที่ถูกอัดแล้วหมุนมาตรงตำแหน่งนำออก แล้วระบบก็จะทำงานวนรอบเช่นนี้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 แบบเครื่องย่อยพร้อมอัดก้อนเชื้อเห็ดฟาง



รูปที่ 2 เครื่องอัดก้อนเชื้อเห็ดฟาง



ตารางที่ 1 ตัวแปรในการควบคุมโดยใช้ภาษา Ladder ในโปรแกรมพีแอลซี

ประเภท	ตัวแปร	คำสั่ง
Input	X000	เริ่มต้น
	X001	ระบบสั่งการด้วยคน
	X002	ระบบอัตโนมัติ
	X003	เซนเซอร์ตรวจจับโลหะส่งสัญญาณไปยัง Y000
	X005	เซนเซอร์แสงส่งสัญญาณไปยัง Y002
Output	Y000	สั่งให้มอเตอร์หมุนเปลี่ยนกระบอกทำงาน
	Y001	สั่งให้มอเตอร์หมุนเปลี่ยนกระบอกหยุดทำงานและสั่งให้กระบอกเบรกดันออก
	Y002	สั่งกระบอกเบรกถอยกลับ
	Y003	สั่งให้กระบอกอัดทำงาน
	Y004	สั่งให้พัดลมเป่าเศษฝ้าย
Timer	T0	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้มอเตอร์หมุนเปลี่ยนกระบอกทำงาน
	T1	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้กระบอกอัดดันออก
	T2	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้กระบอกอัดถอยกลับ
	T3	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้กระบอกเบรกถอยกลับ
	T4	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้มอเตอร์หมุนเปลี่ยนกระบอกหยุดทำงาน

ประเภท	ตัวแปร	คำสั่ง
	T5	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้พัดลมเป่าเศษฝ้ายทำงาน
	T6	ตั้งเวลาหน่วงและสั่งให้พัดลมเป่าเศษฝ้ายหยุดทำงาน
Relay	M0	สั่งให้ระบบสั่งการด้วยคนทำงาน
	M1	สั่งให้ Y004 ทำงาน
	M2	สั่งให้ T0 และ T3 ทำงาน
	M3	สั่งให้ T1 และ T2 ทำงาน

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 การเตรียมวัสดุเพาะ

วัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟางนำมาจากโรงงานผลิตก้อนเชื้อเห็ดฟางที่ได้ทำการผสมและหมักพร้อมที่จะบรรจุลงถุงในวันต่อไปมาทำการลดขนาดหรือการทำให้เส้นใยไม่จับกลุ่มกันด้วยเครื่องย่อย เมื่อย่อยแล้วจะมีขนาดประมาณ 1 cm แล้วทำการควบคุมความชื้นด้วยการกำด้วยมือหากแบมือแล้วยังจับตัวเป็นก้อนถือว่าใช้ได้ ซึ่งเมื่อนำวัสดุเดียวกันนี้มาอบเพื่อหาความชื้นพบว่าวัสดุเพาะก่อนบรรจุถุงมีความชื้นประมาณ 54 % และต้องควบคุมความชื้นด้วยการเติมน้ำให้ได้หรือตากแดดให้มีความชื้นใกล้เคียงกันทุกการทดสอบ

3.2 การทดสอบ

การทดสอบมีตัวแปรในการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรต้น คือ ความดันลมที่ส่งไปยังกระบอกอัด 3 ระดับ 3 4 และ 5 bar

2. ตัวแปรตาม คือ เวลาอัด มวล ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และจำนวนก้อน

3. ตัวแปรควบคุม คือ มวลเริ่มต้น 18 kg ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 54 % และอัตราการป้อนวัสดุเพาะ 27 g/s หรือ 98 kg/hr

4. ค่าชี้วัด คือ ก้อนที่ผ่านและไม่ผ่าน มวลสูญเสียความสามารถในการอัด และประสิทธิภาพในการอัด

ก้อนที่ผ่านต้องอยู่ในเกณฑ์ของค่าที่ยอมรับได้จากโรงงานดังนี้ ความสูงประมาณ 17-18 cm เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนประมาณ 10-11 cm แต่สิ่งที่เน้นคือมวลและความหนาแน่น ซึ่งมวลหลังบรรจุวัสดุเพาะแล้วประมาณ 550-600 g/bag และมีความหนาแน่นประมาณ 0.378 g/cm^3 หรืออยู่ในช่วง $0.360\text{-}0.380 \text{ g/cm}^3$

ร้อยละมวลสูญเสีย คำนวณได้จากมวลเริ่มต้นลบด้วยมวลที่บรรจุลงถุงได้ ดังสมการที่ (2)

$$m_l = \frac{m_b}{m_t} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่

m_l = มวลสูญเสีย (%)

m_b = มวลบรรจุลงถุงได้ (g)

m_t = มวลเริ่มต้น (g)

ความสามารถในการอัด คำนวณจากจำนวนก้อนที่ผ่านเทียบกับเวลาทั้งหมด ดังสมการที่ (3)

$$cap_{comp} = \frac{bag_p}{t_t} \quad (3)$$

โดยที่

cap_{comp} = ความสามารถในการอัด (bag/hr)

bag_p = จำนวนถุงที่ผ่าน (bag)

t_t = เวลาทั้งหมด (hr)

ประสิทธิภาพในการอัด คำนวณได้จากจำนวนก้อนที่ผ่านเทียบกับจำนวนก้อนทางทฤษฎี หรือประมาณมวลที่บรรจุได้เทียบกับมวลทางทฤษฎี (มวลทางทฤษฎี 18 kg ต้องได้จำนวนทางทฤษฎี 30 ก้อน) ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$eff_{comp} = \frac{bag_p}{bag_{the}} \times 100\% \quad (4)$$

$$eff_{comp} = \frac{m_b}{m_{the}} \times 100\% \quad (5)$$

โดยที่

eff_{comp} = ความสามารถในการอัด (bag/hr)

bag_p = จำนวนถุงที่ผ่าน (bag)

bag_{the} = จำนวนถุงทางทฤษฎี (bag)

m_b = มวลบรรจุลงถุงได้ (g)

m_{the} = มวลทางทฤษฎี (g)

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 การอัดก้อนวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟาง

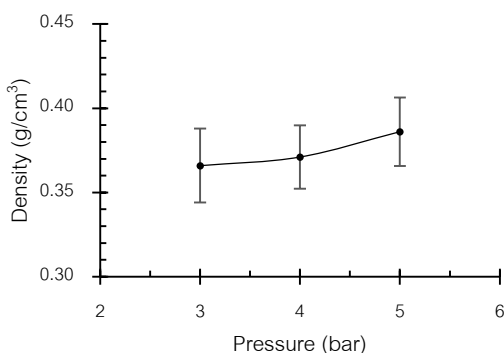
จากการอัดวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟางจำนวน 18 kg ซึ่งทางทฤษฎีจะบรรจุวัสดุเพาะได้ถุงละ 600 g รวมทั้งสิ้นจะได้ 30 bags ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ ได้ผลของความสูง (h) เส้นผ่านศูนย์กลาง (Dai.) มวลที่บรรจุได้ (m_{bag}) มวลสูญเสีย (m_{loss}) เวลาต่อก้อน (t) เวลารวม (t_t) ก้อนที่ผ่าน (bag_p) และก้อนทั้งหมดที่อัดได้ (bag_t) แสดงดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าที่ความดัน 3, 4 และ 5 bar มีความสูงของก้อนใกล้เคียงกันคือ 17.41 ± 0.25 , 17.29 ± 0.24 และ $17.13 \pm 0.12 \text{ cm}$ ตามลำดับ เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 10.57±0.24, 10.61±0.20 และ 10.69±0.23 cm ตามลำดับ มวลที่บรรจุลงถุงอยู่ระหว่าง 551.03±13.61, 566.65±14.36 และ 589.79±16.40 g ตามลำดับ ในส่วนของเวลาการอัดต่อกันจะมีค่าอยู่ในช่วง 20.35±0.42, 20.75±0.34 และ 21.81±0.47 s/bag ตามลำดับ และมีเวลารวมในการทดสอบต่อเนื้อ 18 kg ใช้เวลา 610.49±9.04, 622.51±7.53 และ 654.16±10.03 s ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการอัดก้อนวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟาง

P (bar)	3	4	5
h (cm)	17.41±0.25	17.29±0.24	17.13±0.12
Dia. (cm)	10.57±0.24	10.61±0.20	10.69±0.23
m ₀ (g/bag)	551.03±13.16	566.65±14.36	589.79±16.40
m ₁ (g/bag)	38.98±2.39	30.21±2.73	33.36±2.19
t ₁ (s)	610.49±9.04	622.51±7.53	654.16±10.03
t (s/bag)	20.35±0.42	20.75±0.34	21.81±0.47
bag _p (bag)	19	26	20
bag _g (bag)	30	30	30

จากรูปที่ 4 เมื่อค่าแรงดันเพิ่มจาก 3 4 และ 5 bar มีผลของค่าความหนาแน่นในการอัดก้อนเชื้อเห็ดฟาง 0.366±0.02, 0.371±0.02 และ 0.386±0.02 g/cm³ ตามลำดับ



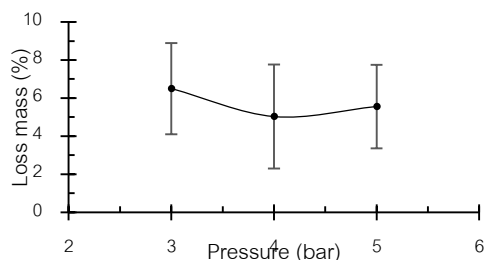
รูปที่ 4 ผลความหนาแน่นในการอัดก้อน

ซึ่งจากการสอบถามผู้ประกอบการทำให้ทราบว่าค่าความหนาแน่นจะมีผลต่อการเดินเชื้อของเห็ดฟาง

หากแน่นมากเกินไปเชื้อจะกระจายได้ยากมีผลต่อผลผลิตที่ออกปริมาณน้อย จึงเน้นค่าวัดผลที่ความหนาแน่นเป็นหลักคืออยู่ในช่วง 0.36-0.38 g/cm³ โดยที่ความดันลมเข้ากระบอกอัด 3 bar จะอัดได้ก้อนวัสดุเพาะที่มีความหนาแน่นต่ำจึงมีก้อนที่ผ่านเกณฑ์ 19 bags ในขณะที่เดียวกันที่ความดัน 5 bar จะมีความหนาแน่นสูงมีก้อนที่ผ่านเกณฑ์ 20 bags และที่ความดัน 4 bar จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้มากที่สุดส่งผลให้มีจำนวนก้อนที่ผ่านเกณฑ์มากที่สุด 26 bags

4.2 ร้อยละมวลสูญเสีย

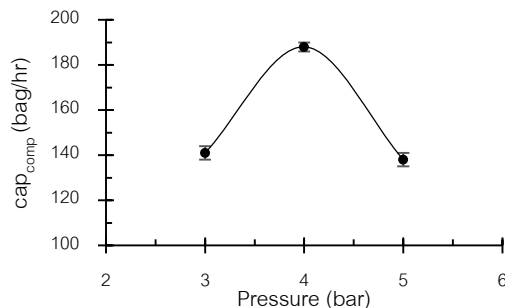
การบรรจุวัสดุลงกระบอกตวงจะมีเซนเซอร์ตรวจจับปริมาณวัตถุขณะที่กระบอกหมุนไปยังตำแหน่งต่อไปจะมีวัสดุเพาะตกลงมาบริเวณภาดหมุนด้านบน ส่งผลให้มีมวลที่สูญเสียดังรูปที่ 5 เห็นได้ว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น 3 4 และ 5 bar มีค่าเฉลี่ยของมวลสูญเสียต่อถุงใกล้เคียงกันคือ 6.50±2.39%, 5.04±2.73% และ 5.56±2.19% ของมวลเริ่มต้น (18 kg) หรือมีค่า 38.98±2.39, 30.21±2.73 และ 33.36±2.19 g/bag แต่ความดันไม่ได้มีผลโดยตรงกับการสูญเสีย แต่ขึ้นอยู่กับกลุ่มวัสดุเพาะที่ตกลงในกระบอกทำให้มีมุมกองที่ต่างกันส่งผลต่อค่าระดับของเซนเซอร์ตรวจจับได้ต่างกัน



รูปที่ 5 ผลร้อยละมวลสูญเสีย

4.3 ความสามารถในการอัดวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟาง

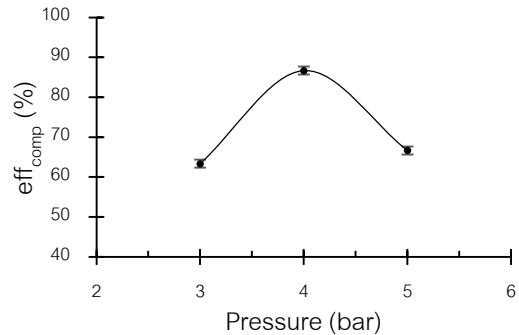
ความสามารถในการอัดจะพิจารณาจากจำนวนก้อนที่ผ่านเกณฑ์ ซึ่งจากข้อมูลเฉลี่ยทำให้ทราบว่าเวลาในการอัดของแต่ละความดันมีค่าใกล้เคียงกันแต่จำนวนก้อนที่ผ่านเกณฑ์ต่างกัน สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถกับความดันดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่ความดันลม 4 bar มีจำนวนก้อนที่ผ่านเกณฑ์มากที่สุดจึงมีค่าความสามารถสูงที่สุดคือ 188 ± 2 bag/hr ในขณะที่ 3 bar และ 5 bar มีค่าใกล้เคียงกันคือ 141 ± 3 bag/hr และ 138 ± 3 bag/hr ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลความสามารถในการอัดก้อน

4.4 ประสิทธิภาพในการอัดวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟาง

จากการทดสอบการอัดนำข้อมูลของมวลที่บรรจุได้เทียบกับมวลทางทฤษฎี และจำนวนถุงวัสดุเพาะที่ผ่านเกณฑ์เทียบกับจำนวนถุงทางทฤษฎี สามารถแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการอัดเทียบกับความดันแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 7 ผลประสิทธิภาพในการอัดก้อน

จากข้อมูลเฉลี่ยของมวลที่บรรจุได้ในแต่ละความดันแตกต่างกันน้อยมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถตรวจจับค่าได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาจำนวนก้อนเชื้อเห็ดฟางที่ผ่านเกณฑ์ในแต่ละระดับซึ่งประสิทธิภาพการอัดก้อนที่มีค่าสูงสุด 86.67% ที่ความดันกระบอกอัด 4 bar สำหรับความดัน 3 bar ยังไม่สามารถอัดก้อนให้ได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการขณะเดียวกันหากความดันที่ใช้อัดมีค่ามากเกินไปก็จะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่มากเกินไปทำให้เชื้อเห็ดกระจายได้ช้าและผลผลิตเห็ดฟางอาจได้ปริมาณที่ต่ำกว่าเกณฑ์

4.5 การคำนวณจุดคุ้มทุน

เครื่องย่อยพร้อมอัดวัสดุเพาะเชื้อเห็ดฟางมีต้นกำลัง 2 ส่วนคือ บั้มลขนาด 373 W และมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 hp หรือ 2,238 W ทำการทดสอบแรงดัน 3 4 และ 5 bar มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่อก้อน 0.0147, 0.0150 และ 0.0158 kWh/bag ตามลำดับ และเมื่อคำนวณค่าไฟฟ้า 6 Baht/kWh จะมีค่าใช้จ่ายต่อก้อน 0.0886, 0.0902 และ 0.0949 Baht/bag

ในส่วนของแรงงานคนที่มีความเร็วในการบรรจุก้อนสูงสุดคือ 125 bags/hr. หรือ 1,000 bags/day (8 hr./day) จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 0.5 Baht/bag

ผู้ประกอบการมีคำสั่งซื้อต่อเนื่องประมาณ 50,000 bags/Month เมื่อใช้แรงงานคนจะมีค่าใช้จ่าย 25,000 Baht/Month สำหรับการให้เครื่องย่อยพร้อมอัดเลือกที่ความดัน 4 bar เนื่องจากมีค่าที่ต่ำสุดในการทดสอบนี้ จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 17,015 Baht/Month ซึ่งประกอบด้วยค่าไฟฟ้า 4,515 Baht/Month และแรงงานในการสวมถุงเข้ากระบอกล้างและปิดปากถุง 0.2 Bath/bag หรือ 10,000 Baht/Month ดังนั้นจึงมีผลต่างระหว่างแรงงานคนและเครื่องประมาณ 10,485 Baht/Month หากเครื่องเครื่องย่อยพร้อมอัดมีมูลค่า 59,500 Baht จะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6 เดือน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดฟางแบบกึ่งอัตโนมัติมีการควบคุมการทำงานอัตโนมัติด้วยพีแอลซี การอัดที่แรงดัน 3.4 และ 5 bar วัสดุเพาะเริ่มต้น 18 kg สามารถอัดได้จำนวน 30 ก้อน ได้เท่ากัน โดยที่มีเวลาในการอัดต่อถุงใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันที่ค่าชีวัดคือความหนาแน่นในการอัดก้อนซึ่งอยู่ในช่วง 0.36-0.38 g/cm³ ซึ่งที่แรงดัน 4 bar มีก้อนวัสดุเพาะที่ผ่านเกณฑ์ค่าชีวัดมากที่สุดคือ 26 ก้อน ในขณะที่เดียวกันมีความสามารถสูงสุดคือ 188±2 bag/hr และมีประสิทธิภาพการอัดก้อนสูงสุด 86.67% สำหรับที่แรงดัน 3 bar มีก้อนวัสดุเพาะที่มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าเกณฑ์ และที่แรงดัน 5 bar ก้อนวัสดุเพาะมีความหนาแน่นมากเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อการเดินเชื้อของเห็ดที่ต้องใช้เวลานาน

สำหรับข้อเสนอแนะควรมีการปรับปรุงกลไกในการอัดก้อนวัสดุเพาะให้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเพื่อลดพื้นที่และอุปกรณ์ในการติดตั้ง อีกทั้งลดการใช้พลังงานจากปั๊มลม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ทุนอุดหนุนการวิจัยตามสัญญาเลขที่ NKR2561REVO40 และที่เชื้อเพื่อสถานที่ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahlawat OP, Tewari RP. Cultivation Technology of Paddy Straw Mushroom (Volvariella Volvacea). National Research Centre for Mushroom. Indian Council Agricultural Research. 2007; 213(1): 36.
- [2] Chen S, Ma D, Ge W, Buswell JA. Induction of Laccase Activity in the Edible Straw Mushroom, Volvariella Volvacea. FEMS Microbiology Letters. 2003; 218(1): 143-8.
- [3] Kamthan R, Tiwari I. Agricultural Wastes- Potential Substrates for Mushroom Cultivation. European Journal of Experimental Biology. 2017; 7(5): 31.

- [4] Kwak WS, Kim YI, Seok JS, Oh YK, Lee SM. Molasses and Microbial Inoculants Improve Fermentability and Silage Quality of Cotton Waste-Based Spent Mushroom Substrate. *Bioresource Technology*. 2009; 100(3): 1471–3.
- [5] Office of Agricultural Economics. *Agricultural Economics News*. (Internet). Press: 2019 [cited 2019 November 7]. Available from: <http://www.oae.go.th/>
- [6] Kwon H, Kim BS. *Cultivation Modes: Bag Cultivation. Mushroom Grower's Handbook 1: Oyster mushroom Cultivation*: 2004.
- [7] Saisin K, Saisin P. Design Construction and Efficiency of Press Equipment Mushroom Cube. *Vocational Education Innovation and Research Journal*. 2017; 1(1): 1–6.
- [8] Singhan K, Ninlawat S, Promlung N. The Development of Compressing Mushroom Grow Machine. *Journal of Innovative Technology Research*. 2017; 1(1): 119–29.
- [9] Pharanat C. Automatic Sawdust Pressing Machine for Mushroom Culture. *Rajabhat Maha Sarakham University Journal*. 2008; 2(1): 23–8.
- [10] Nukpook K, Rattanakam S, Thaitae S, Srijumpa N, Choengaksorn C. Development of Screw Press for Packing Corn Husk Substrate in Long Polythene Bag for Mushroom Cultivation. *Thai Agricultural Research Journal*. 2019; 37(1): 37–47.
- [11] Nukpook K. Study Equipment for Bagging Machine from Corn Shell in Long Shape for Mushroom Cultivation. Department of Agriculture. 2017.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การอบแห้งเมล็ดวัสดุทางการเกษตรขณะขนถ่ายด้วยลมร้อนในท่อเกลียวแนวตั้ง

Pneumatic conveyor drying of agricultural seeds by using a Vertical Spiral pipe

รุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล^{1)*} ศักดิ์ชัย ดรรดิ²⁾ พงษ์ภูไท อุดมอริยทรัพย์³⁾วรเชษฐ์ แสงสีดา⁴⁾ และ กมลรักษ์ แก่งคำ⁵⁾Rungtawan Wiwattanasirikul¹⁾ Sakchai Dondee²⁾ Pongputhai Udomariyasap³⁾ Worachate Sangsida⁴⁾and Kamonrak Kangkham⁵⁾^{1,2,3,4)} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนน ตาดโตน-ชัยภูมิ ตำบลนาฝาย อำเภอเมืองชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ 36000

⁵⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนน ตาดโตน-ชัยภูมิ ตำบลนาฝาย อำเภอเมืองชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ 36000

^{1,2,3,4)} Department of Mechanical Engineering, The project to establish

the Faculty of Engineering and Industrial Technology Chaiyaphum Rajabhat University

167 Tat Ton-Chaiyaphum Road, Na Fai Subdistrict, Mueang Chaiyaphum District, Chaiyaphum Province 36000

5) Department of Manufacturing Engineering, The project to establish

the Faculty of Engineering and Industrial Technology Chaiyaphum Rajabhat University

167 Tat Ton-Chaiyaphum Road, Na Fai Subdistrict, Mueang Chaiyaphum District, Chaiyaphum Province 36000

Received: 27 December 2019

Revised: 30 January 2021

Accepted: 1 February 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและศึกษาตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการป้อนวัสดุ อุณหภูมิอบแห้ง และความดันสูญเสียในท่ออบแห้ง ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้ง ข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด เมล็ดถั่วลิสง ด้วยเครื่องอบแห้งขณะที่มีการขนถ่ายวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้ง ร่วมกับพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อน โดยใช้ลมเป็นพาหะ รวมถึงการใช้พลังงานของการอบแห้งของผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว จากการศึกษาพบว่า ที่ค่าความชื้น 95 % ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้งทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความเร็วของลมมีค่าคงที่เท่ากันที่อัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะมีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ อุณหภูมิอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกันของวัสดุทั้ง 4 ชนิด จากการศึกษาที่อัตราการป้อนวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 90 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.73 % (w.b) และการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 4.09 MJ/kg_{water} สำหรับข้าวเปลือก และมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 13.16 % (w.b) และเท่ากับ 1.39

MJ/kg_{water} สำหรับข้าวโพดและถั่วลิสง ที่อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 70 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดเท่ากับ 2.64 % (w.b) และ 2.04 % (w.b) และการใช้พลังงานของการอบแห้งต่ำสุด เท่ากับ 6.94 MJ/kg_{water} และ 8.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อวัสดุทั้ง 4 ชนิดอยู่ในระบบนาน จะทำให้วัสดุมีการแตกหักมากขึ้น

คำหลัก: ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วลิสง การอบแห้งในท่อเกลียวแนวตั้ง

Abstract

The purpose of this research was to test and study the variables, including hot air velocity, solid mass flow rate, drying temperature, and pressure drop in the drying pipe that influence of moisture content of paddy rice grain, cassava particles, corn and peanut seed with the vertical spiral pipe pneumatic conveyor drying combined with hot air from the electrical heater. Moreover, the energy consumption of each material was also studied. According to studies at the 95 % confidence level, it has been found that the pressure drop in vertical spiral pipe of four materials is similar to increase. Also at the constant air velocity, the solid mass flow rate was increased the pressure drop is increase. For the influence of drying temperature on moisture content of all four materials, it was found that at constant solid mass flow rate, the drying temperature increases, the trend of moisture changes is increase similar for all four materials. From the study of paddy rice grain and cassava particles, the minimum solid mass flow rate of 0.03 kg/s, drying temperature of 90 °C, drying air velocity of 20 m/s the moisture content was highest at 7.73% (w.b) and 13.16 % (w.b) with the minimum energy consumption of 4.09 MJ/kg_{water} and 1.39 MJ/kg_{water}, respectively. For the corn and peanut seed at the minimum solid mass flow rate of 0.03 kg/s, drying temperature of 70 °C, drying air velocity of 20 m/s the moisture content was highest at 2.64% (w.b), and 2.04 % (w.b) with the minimum energy consumption of 6.94 MJ/kg_{water} and 8.99 MJ/kg_{water}, respectively. It is also found that if the materials are in the system too long, the damage of particles is similar increase for all materials.

Keywords: Paddy: Cassava particles: Corn: Peanut seed: Drying in vertical spiral pipe

*ติดต่อ: w_rungtawan@hotmail.com, 061-954-8228, 044-815-146

1. บทนำ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่มีความอุดมสมบูรณ์และมีการทำการเกษตรเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมากตามฤดูกาล โดยส่วนใหญ่ใช้บริโภคและขาย เป็นรายได้หลักของเกษตรกร นอกจากนี้ยังเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้เข้าประเทศต่อปีจำนวนมากมหาศาล แต่เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรที่ออกมาจำนวนมากในแต่ฤดูกาล ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับระยะเวลาในการจำหน่ายส่งผลถึงคุณภาพและราคาที่ตกต่ำลง [1-2] จึงได้มีแนวคิด

จากภูมิปัญญาท้องถิ่น ศึกษาหลักการต่าง ๆ เพื่อเป็นการยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิตเมล็ดพืชทางการเกษตร และสามารถลดการสูญเสียเวลาในการนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้น นอกจากนี้ผลผลิตทางการเกษตร [3-4] ที่เป็นพืชเศรษฐกิจ ที่มีมากในเมืองไทยโดยเฉพาะในจังหวัดชัยภูมิ ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง ข้าวโพด เป็นต้น ล้วนมีความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวสูง โดยเฉพาะข้าวเปลือก (Paddy) ที่เก็บเกี่ยวมาส่วนใหญ่มีความชื้นค่อนข้างสูงประมาณ 20 – 28 % มาตรฐานแห้ง [4-7] ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายจากเชื้อรา

ในระหว่างการเก็บรักษาได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาซึ่งโดยปกติแล้วต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกลงเหลือประมาณ 14% (มาตรฐานแห้ง) สำหรับผลผลิตทางการเกษตรอื่นก็เช่นกัน [1-2] ดังนั้นการลดความชื้นข้าวเปลือกและผลผลิตทางการเกษตรที่มีลักษณะเป็นเม็ดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิดแทนการลดความชื้นโดยใช้วิธีเดิม คือ การนำผลผลิตตากแดด หรือการนำมาผึ่งลมไว้ในที่ร่ม เช่น เครื่องอบแห้งแบบสปูเบดเด็ค (Spouted bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อน เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ เป็นต้น [1,3] เนื่องจากข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate material) การลดความชื้นข้าวเปลือกและมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) จึงมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพทางด้านพลังงานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การลดความชื้นด้วยวิธีอื่น [1,3-5] โดยทั่วไปกระบวนการลดความชื้นวัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในห้องอบแห้ง (Drying room) โดยอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง [8-11] แบบไหลตามกันหรือแบบไหลสวนทางกันกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกไปยังกระแสอากาศ เนื่องจากกระบวนการลดความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุกระจายในตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งอย่างทั่วถึง ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมากแม้ว่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบจะสั้นมากก็ตาม [1,3, 8-13] นอกจากนี้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมยังสามารถอบแห้งแบบต่อเนื่องได้อีกด้วย ซึ่งถือเป็นข้อดีของการนำเครื่องอบแห้งแบบนี้ไปใช้ในระดับครัวเรือน หรือในระดับอุตสาหกรรมได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวข้างต้น เครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีศักยภาพมากพอที่จะนำมาใช้ในการลดความชื้น ข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมทั่วไปความชื้นของข้าวเปลือกสามารถลงได้ 5 ถึง 6% (เทียบกับความชื้นเริ่มต้น) โดยใช้เวลาเพียง 4 วินาที [2,4-6] เท่านั้น และเมื่อนำมาใช้กับการอบแห้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง จะสามารถลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าวได้ดีเช่นกัน ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้มีค่าสูง [7-9] การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนี้ยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัสดุและลมร้อนขณะขนถ่ายโดยการเพิ่มการปั่นป่วนของกระแสลมหรือการลดระยะทางของการอบแห้งขณะที่มีการขนถ่ายวัสดุ โดยการเพิ่มพื้นที่การโอนความร้อนให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะทำการอบแห้ง [11-14] ซึ่งจะต้องทำการศึกษาค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด จากข้อดีอีกประการหนึ่งคือเครื่องอบแห้งประเภทนี้ยังสามารถขนถ่ายวัสดุได้ในขณะที่มีการอบแห้งด้วย ซึ่งเป็นข้อดีที่จะประยุกต์ใช้กับรถเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรต่อไป

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบการลดความชื้น ของข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง ทำการศึกษาดิถีพลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ และอากาศ ความชื้นของอากาศร้อนและของวัสดุ ความดันสูญเสียในระบบ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการใช้พลังงานในกระบวนการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว

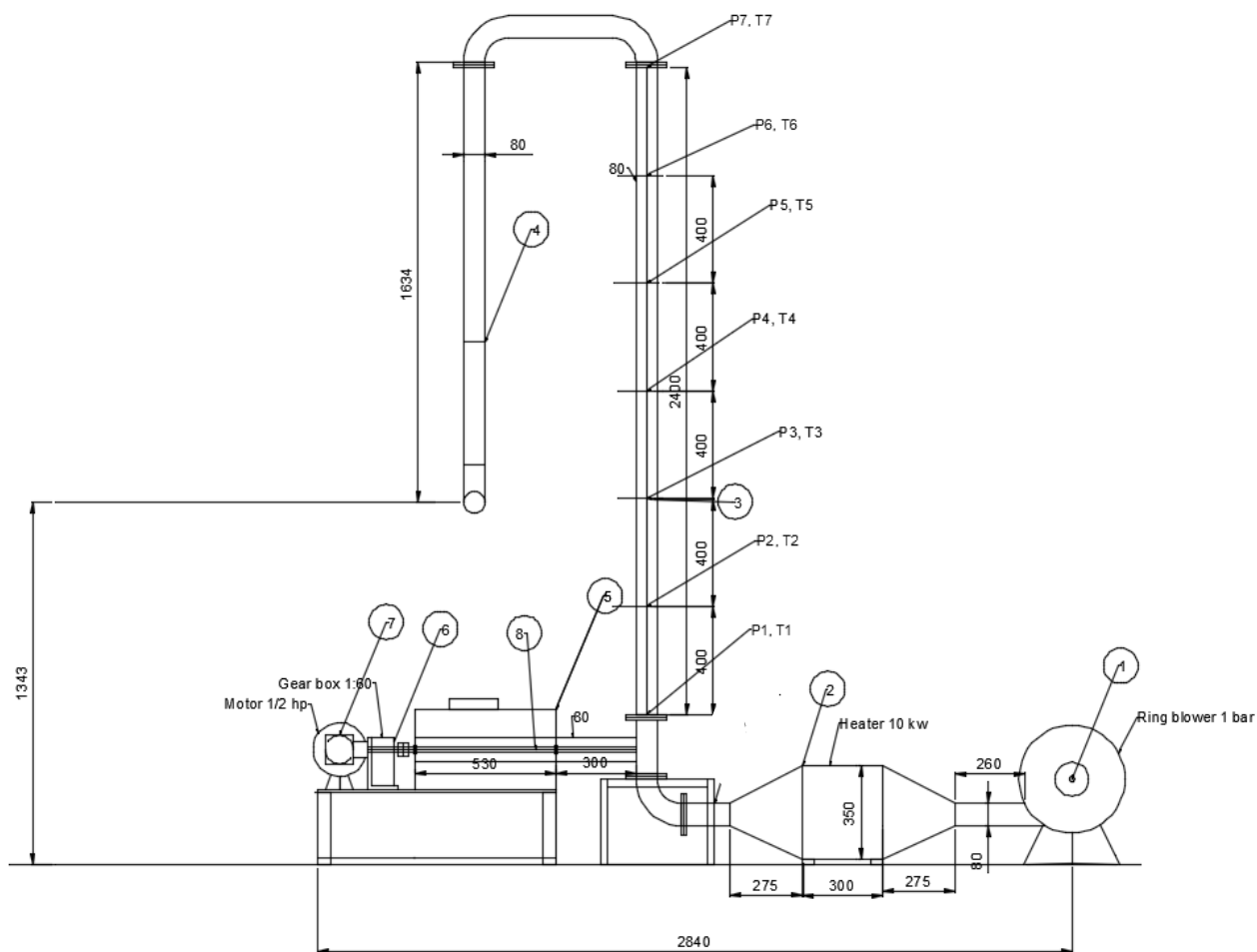
2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์วิจัย

เครื่องขนถ่ายวัสดุด้วยลมร้อนแบบมีเกลียวในท่อแนวตั้งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 1) พัดลมเป่าลม (Blower) ขนาด 200 cm³/min 1 เครื่อง 2) ห้องขดลวดความร้อนขนาด 4 kw 3) ห้องอบแห้งแบบมีเกลียว ภายในท่อแนวตั้ง

(Drying chamber) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ยาว 2.0 m และ P1,T1-P7,T7 คือจุดที่วัดความดัน (Pressure tap) โดยใช้มานอมิเตอร์และวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (T_1-T_5)

ตามลำดับ 4) ปล่องระบายอากาศและวัสดุ 5) ห้องพักวัสดุ 6) ชุดเฟืองทด 1:60 7) มอเตอร์กำลังขับชุดเฟืองทดส่งไปยังเครื่องป้อนวัสดุ 8) เกลียวป้อนวัสดุเพื่ออบแห้ง



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบทอเกลียวแนวตั้ง

2.2. วัสดุที่ใช้ทดลอง

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรที่ไหลผ่านทอเกลียวแนวตั้ง ในระบบที่มีความดันต่ำ (น้อยกว่า 1000 mmH₂O) โดยใช้ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ความหนาแน่น รูปร่าง อัตราส่วนความพรุนของวัสดุ ที่ความเร็วของลม และอัตราการขนถ่ายวัสดุเท่ากัน ได้แสดงลักษณะพิเศษของความดันสูญเสียรวมในระบบขนถ่ายด้วยลมที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วของลม (Air velocity) อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (Solids mass flow rate)

2.3 วิธีการทดลอง

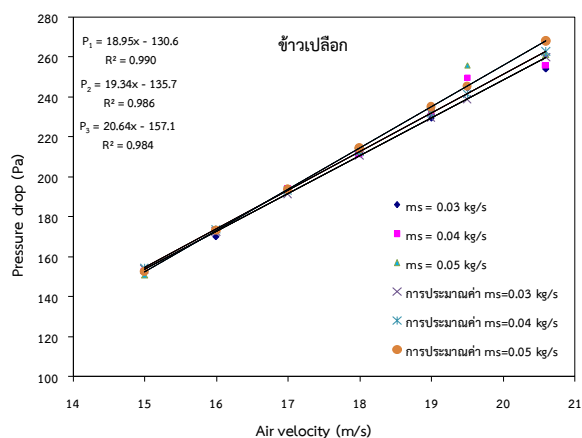
การทดลองได้ใช้เม็ดข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่มีขนาดแตกต่างกัน จึงต้องหาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุได้แก่ ความหนาแน่นของกองวัสดุ (Bulk Density) ความหนาแน่นของจริงของเม็ดวัสดุ (True Density) ขนาดเฉลี่ยของวัสดุ (Mean diameters) ความเป็นทรงกลมของวัสดุ (Spheresity) จากนั้นทำการทดลองหาความดันสูญเสียและปัจจัยต่าง ๆ ในการขนถ่ายวัสดุ โดยนำวัสดุที่เตรียมไว้ใส่ใน Hopper จนถึงระดับที่ตั้งไว้ เปิด Rotary feeder บันทึกค่าความดันรวม (P_t) และความดันสถิต (P_s) ของ L-Type Pitot Tube บันทึกค่าความดันสถิตแตกต่าง (ΔP_s) ของทอวัดอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ ขณะขนถ่ายโดยการเปิดท่อระบาย

ให้วัสดุไหลมาใส่ในภาชนะที่เตรียมไว้โดยจับเวลาขณะที่เปิด จากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (kg/s) วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของลมร้อน นำวัสดุที่ได้ไปชั่งหาค่ามวลก่อนอบและหลังอบ ปรับความถี่ของ Blower เพื่อเพิ่มความเร็วของลมร้อนและบันทึกค่า

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมแบบเบาบางของวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสงได้อธิบายดังต่อไปนี้

ข้าวเปลือก อิทธิพลของความเร็วลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุด้วยลมในท่อขนาด 50 mm ของวัสดุทั้ง 4 ชนิดดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ ความดันสูญเสียของวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วของลมและที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเพิ่มขึ้น แนวโน้มของความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด

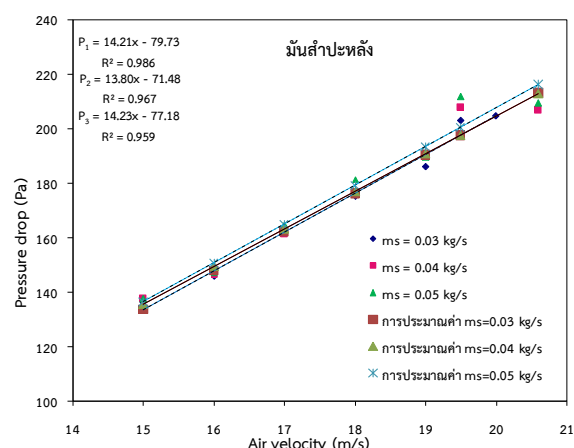


รูปที่ 2 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของข้าวเปลือก

รูปที่ 2 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนถ่ายฯ มีค่าคงที่ ความดันสูญเสียรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่าย ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ค่าหนึ่ง และพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความดันสูญเสีย กับความเร็วลม ในช่วงของการ

เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ เท่ากับ 16.8% ความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมฯ เท่ากับ 96.77% เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวเปลือก 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.990 0.986 และ 0.984 ตามลำดับ

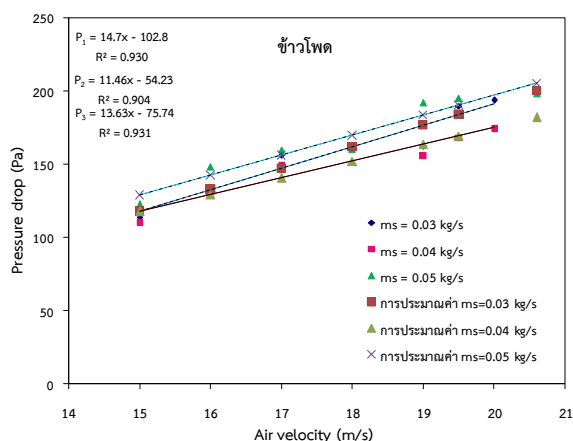
มันสำปะหลัง รูปที่ 3 แสดงการเพิ่มขึ้นของความดันสูญเสียรวมตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ของการไหลของมันสำปะหลังในช่วงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปนั่นคือ ที่ช่วงของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุเท่ากับ 89.50% เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่



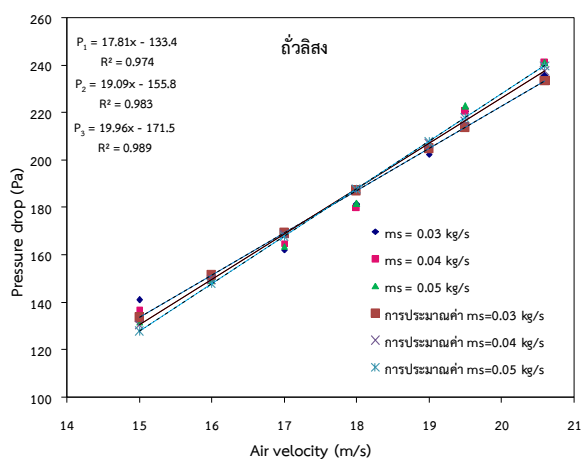
รูปที่ 3 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของมันสำปะหลัง

อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวมันสำปะหลัง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.986 0.967 และ 0.959 ตามลำดับ

ข้าวโพด รูปที่ 4 แสดงความดันสูญเสียของการขนถ่ายข้าวโพดในช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% พบว่าความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร็วลมที่ใช้ขนถ่ายเท่ากับ 96.78 % เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวโพด 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.930 0.904 และ 0.931 ตามลำดับ



รูปที่ 4 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของข้าวโพด ถั่วลิสง

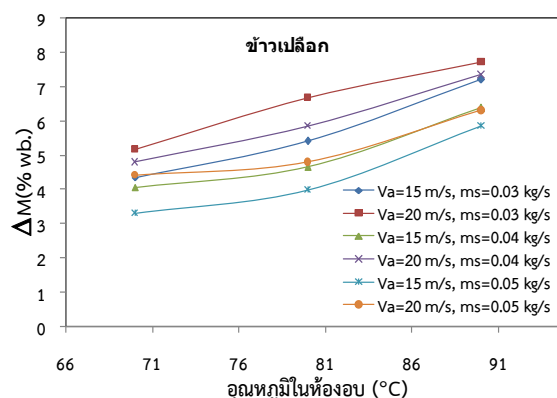


รูปที่ 5 อิทธิพลของความเร็วของลมที่มีผลต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของถั่วลิสง

สำหรับถั่วลิสง ดังรูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วที่ทำให้ความดันสูญเสียเปลี่ยนแปลงไป ที่ช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% เมื่อความเร็วของลมที่ใช้เพิ่มขึ้นทำให้ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกันเท่ากับ 95.10% เมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของถั่วลิสง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.974 0.983 และ 0.989 ตามลำดับ จากรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ ความดันสูญเสียรวม เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ และ แนวโน้มของเส้นความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเมื่อพิจารณาความเร็วของลมคงที่ ลักษณะพิเศษของความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด แต่ความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุเป็นปัจจัย

ที่ทำให้เกิดความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมในท่อตรงแนวดิ่ง ปัจจัยหนึ่งเท่านั้น นอกจากนั้นความดันสูญเสียรวมยังเกิดจากปัจจัยอื่นๆ สำหรับการไหลของวัสดุทางการเกษตรในท่อแนวดิ่งย่อมทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื่องจากขณะที่มีลมไหลผ่านท่อไปพร้อมกับวัสดุจะทำให้มีอุณหภูมิของลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการวิจัยนี้ยังได้มีการเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่านท่อด้วยขดลวดความร้อน ที่อุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 70°C 80°C และ 90°C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่เกิดขึ้นดังกล่าวต่อไป

อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพด และถั่วลิสง



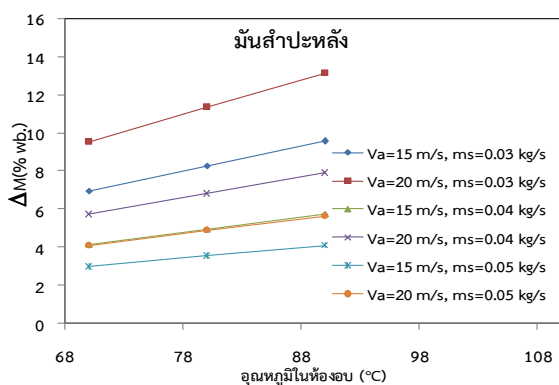
รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการไหลของวัสดุด้วยลมในท่อตรงแนวดิ่งแบบเบาบาง ที่เป็นผลจากอิทธิพลของค่าอุณหภูมิ ที่วัสดุไหลในท่อเหล็กขนาด 50 mm สำหรับวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด แสดงในรูปที่ 6 ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด

ข้าวเปลือก รูปที่ 6 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 98.90 % 98.90 % และ 89.20 % ตามลำดับ และที่ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 97.7 % 92.7 % และ 93.1 % ตามลำดับ

มันสำปะหลัง รูปที่ 7 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันสำปะหลังตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง

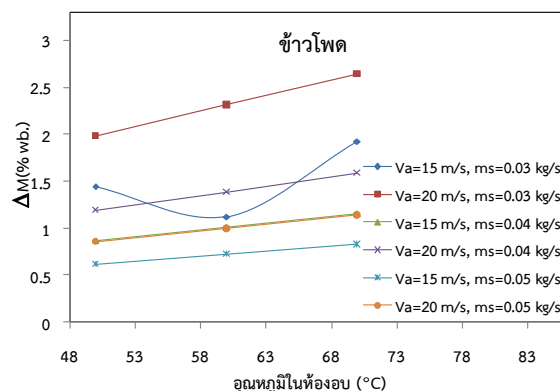


รูปที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันสำปะหลังที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

การเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.90 % 98.90 % และ 98.80% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 98.7 % 97.9 % และ 99.5 % ตามลำดับ

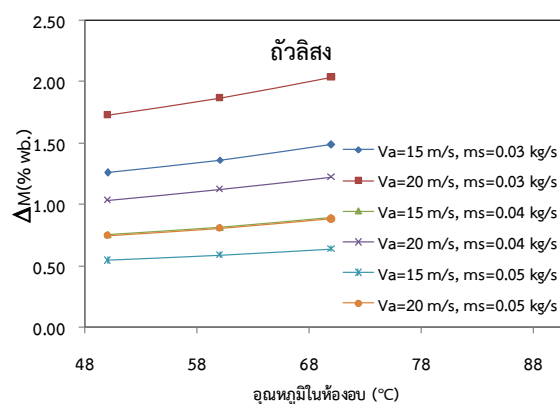
ข้าวโพด รูปที่ 8 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 95.80% 99.70% และ 99.70% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้น

และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 99.67% 99.8% 99.88% ตามลำดับ



รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

ถั่วลิสง รูปที่ 9 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วลิสงตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.8% 99.8% และ 97.7% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.8% 99.8% และ 98.9% ตามลำดับ

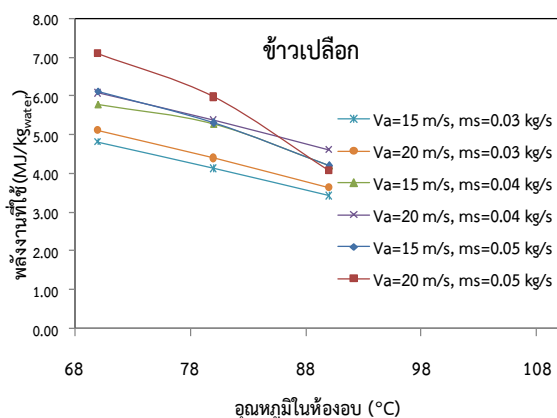


รูปที่ 9 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วลิสงที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

อิทธิพลของอุณหภูมิที่อัตราการป้อนค่าต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการใช้พลังงานในการอบแห้ง

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งสำหรับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทางการเกษตรที่อัตราการอบแห้งค่าต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานของการอบแห้งจะมีค่าลดลงที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุมีค่าเท่ากัน ซึ่งลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มลดลงเหมือนกันของวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนวัสดุ และความเร็วของลมคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้การระเหยของน้ำที่ออกจากวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น

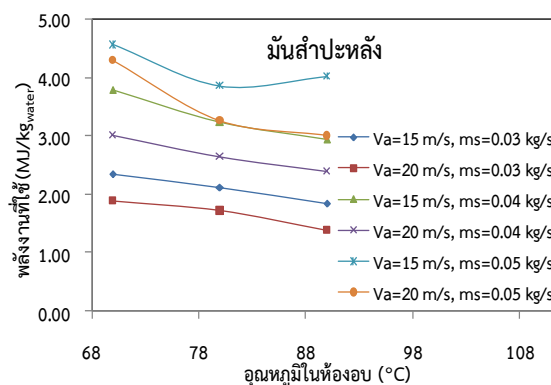
ข้าวเปลือก รูปที่ 10 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.9% 99.9% และ 99.9% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 98.4% 95.6% และ 99.9% ตามลำดับ



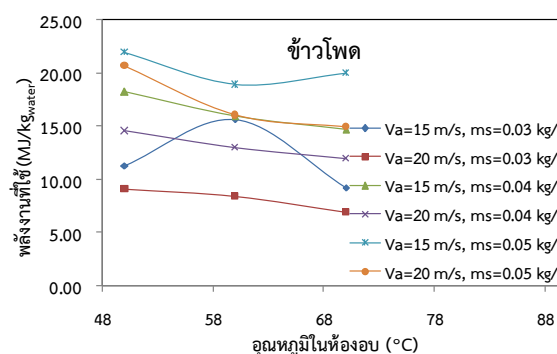
รูปที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

มันสำปะหลัง รูปที่ 11 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของมันสำปะหลังตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์

มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.7% 97.1% และ 93.1% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 96.8% 98.7% และ 98.5% ตามลำดับ



รูปที่ 11 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งมันสำปะหลังที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

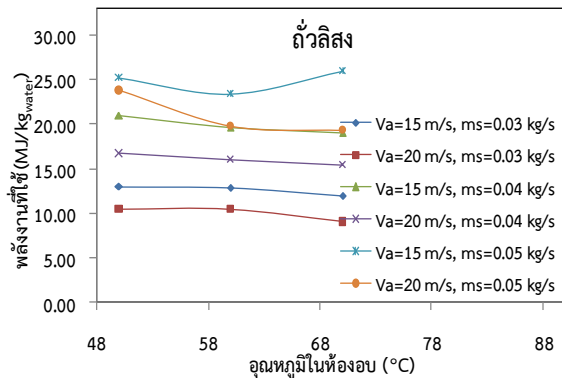


รูปที่ 12 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งข้าวโพดที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

ข้าวโพดรูปที่ 12 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของข้าวโพดตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.1% 97.0% และ 99.5% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 99.1% 97.0% และ 99.5% ตามลำดับ

ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 95.2% 98.8% และ 96.3% ตามลำดับ

ถั่วลิสง รูปที่ 13 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของถั่วลิสงตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s



รูปที่ 13 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งถั่วลิสง ที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 83.5% 98.9% และ 78.9% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 75.8% 99.9% และ 82.7% ตามลำดับ จากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิ จะพบว่า ที่อัตราการป้อนวัสดุ และความเร็วของลมร้อนมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของวัสดุจะมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิมีค่ามากที่สุด เนื่องจากท่อเกลียวมีความต้านทานการไหลจึงทำให้วัสดุสามารถไหลไปตามท่อได้ช้าทำให้น้ำที่อยู่ในวัสดุระเหยออกมาได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำนองเดียวกันการใช้พลังงานในการอบแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งมีค่าสูง เหตุผลเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4. สรุป

การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และ เมล็ดถั่วลิสง ในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ลมร้อนไหลพาวัสดุไปตามท่อภายในมีลักษณะเป็นเกลียวที่มีระยะห่างของสันเกลียวเท่ากับ 0.3 m ในแนวตั้งความยาวและขนาดของท่อหลักเท่ากับ 2 m และ 0.078 m ตามลำดับ ด้วยอัตราการป้อนที่ 0.03 kg/s 0.04 kg/s และ 0.05 kg/s ความเร็วลมร้อนที่ 15 m/s และ 20 m/s อุณหภูมิการอบแห้งเปลี่ยนจาก 70°C 80°C และ 90°C สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกและมันสำปะหลัง ส่วนการอบแห้งข้าวโพด และถั่วลิสง มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบแห้งที่ 50 °C 60 °C และ 70°C เพื่อให้วัสดุมีการคงคุณภาพหลังการอบแห้ง การทดลอง ในครั้งนี้เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิ อัตราการป้อนของวัสดุ นอกจากนี้ยังได้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทั้ง 4 ชนิดข้างต้น โดยใช้เครื่องอบแห้งวัสดุด้วยลมความดันต่ำ (ต่ำกว่า 1 bar) โดยระบบประกอบด้วยพัดลมเป่าอากาศชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ความดันต่ำ ถึงเก็บวัสดุ เกลียวป้อนวัสดุ ท่อภายในเป็นเกลียวแนวตั้ง

การทดลองหาค่าความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมร้อนแบบพาบางในท่อเกลียวภายในแนวตั้งที่ค่าความเชื่อมั่น 95% พบว่าเป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของสมบัติต่าง ๆ คือ สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง รูปทรง ความหนาแน่น สมบัติของท่อขนถ่าย ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ คุณภาพของท่อ ความยาวท่อ สมบัติของแก๊ส ได้แก่ ความหนาแน่น ความเร็ว ความหนืด เรโนลด์ นัมเบอร์ และสมบัติอื่น ได้แก่ อัตราการป้อนของวัสดุ จากการทดลองพบว่า ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้งทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่สร้างขึ้นกับการทดลอง พบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและ ถั่วลิสง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.990 0.986 0.984 0.986 0.967 0.959 0.930 0.904

0.931 และ 0.974 0.983 0.989 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วของลมมีค่าเท่ากันที่อัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะมีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วย

อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ อุณหภูมิอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกันของวัสดุทั้ง 4 ชนิด โดยที่อัตราการป้อนวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 90 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.73% (มาตรฐานเปียก) สำหรับข้าวเปลือก และมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 13.16% (มาตรฐานเปียก) สำหรับ ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่ อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 70 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดเท่ากับ 2.64% (มาตรฐานเปียก) และ 2.04% (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อัตราการป้อนต่ำ และความเร็วลมสูงทำให้การระเหยน้ำที่อยู่ในวัสดุทั้ง 4 ชนิดได้ดี เพราะ อุณหภูมิในห้องอบสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่อยู่ในวัสดุ อัตราการป้อนต่ำทำให้การกระจายตัวของวัสดุในท่อมามากจึงมีพื้นที่ผิวสำหรับการระเหยน้ำได้มาก และความเร็วลมที่สูงทำให้เกิดการพาไอน้ำที่อยู่ผิวของวัสดุได้มาก ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งที่ลดลงด้วย โดยการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งของข้าวเปลือกและมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 90 °C อัตราการป้อนวัสดุ เท่ากับ 0.03 kg/s ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s จะมีค่าเท่ากับ 4.09 MJ/kg_{water} และ 1.39 MJ/kg_{water} ตามลำดับ สำหรับข้าวโพดและถั่วลิสงที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70 °C อัตราการป้อนวัสดุ เท่ากับ 0.03 kg/s ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.94 MJ/kg_{water} และ 8.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้โอกาสในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณโครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์

ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในงานวิจัย และขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่สละเวลาทุ่มเททำงานจนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guner M. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. Food Engineering. 2007; 80(3): 904-13.
- [2] พรชัย จงจิตรไพศาล. ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม. สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี: กรุงเทพฯ; 2548.
- [3] Lalit RV, Chung MT. Pneumatic conveying of grains. Louisiana state University. Journal for Hawaiian and Pacific Agriculture. 1993; 4: 1-13.
- [4] Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI Book Publishing: New York; 1992.
- [5] Arun S Mujumdar. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Science Publishers Inc. New Hampshire: United States of America; 2000.
- [6] Bunyawanchakul P, Walker GJ, Sargison JE, Doe PE. Modelling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying in a Simple Pneumatic Dryer. Biosystems Engineering. 2007; 96(3): 335-44.
- [7] Tanaka F, Uchino T, Hamanaka D, Atungulu GG. Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. Journal of Food Engineering. 2008; 88(4): 492-8.
- [8] Rajan KS, Srivastava SN, Pitchumani B, Mohanty B. Simulation of gas– solid heat transfer during pneumatic conveying. Use of multiple gas inlets along the duct. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2006; 33(10): 1234-42.

- [9] Rajan KS, Srivastava SN, Pitchuman B, Dhasandhan K. Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2008; 28(14-15): 1932–41.
- [10] Rajan KS, Dhasandhan K, Srivastava SN, Pitchumani B. Studies on gas–solid heat transfer during pneumatic conveying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51 (11-12): 2801–13.
- [11] Zheng Y, Pugh JR, McGlinchey D, Ansell RO. Simulation and experimental study of gas- to-particle heat transfer for non-invasive mass flow measurement. *Measurement*. 2008; 41(4) : 446–54.
- [12] ZHOU JS, LUO ZY, Xiang GAO, NI MJ and Cen KF. Effect of particle loading on heat transfer enhancement in a gas-solid suspension cross flow. *Journal of Zhejiang University Science*. 2002; 3(4): 381–6.
- [13] Hidayat M, Rasmuson A. Heat and mass transfer in u- bend of a pneumatic conveying dryer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007; 85(A3): 307–19.
- [14] Rabinovich E, Kalman H. Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems. *Powder Technology*. 2011; 207(1-3): 119–33.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การพัฒนาระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย

Development of a rainfall measurement system and data transmission via wireless communication system

ณัฐพงศ์ บุตรธนู และ ชัยพันธ์ ประการะพันธ์

Nuttapong Bootthanu and Chaiphan Prakaraphan

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

Faculty of Mechatronics and Robotics Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

Received: 18 December 2019

Revised: 17 July 2020

Accepted: 16 November 2020

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และสัญญาณจากเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดปริมาณน้ำฝน ซึ่งข้อมูลนี้มีการกำหนดค่าของปริมาณน้ำฝนตามค่ามาตรฐานจากกรมอุตุนิยมวิทยา ดังนี้ 1) ฝนตกล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 0.1 - 10.0 มม., 2) ฝนตกปานกลาง มีค่าเท่ากับ 10.1 - 35.0 มม., 3) ฝนตกหนัก มีค่าเท่ากับ 35.1 - 90.0 มม. และ 4) ฝนตกหนักมาก มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 90.1 มม. การทดสอบระบบจำลองสภาพอากาศฝนตกในวันที่ 21 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. ถึงวันที่ 22 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. รวมระยะเวลา 24 ชม. ผลลัพธ์ที่ได้ คือสภาพอากาศฝนตกหนักมาก ปริมาณน้ำฝนอยู่ในระดับมากกว่า 90.1 มม. ทำให้ระบบการแจ้งเตือนส่งข้อมูลแจ้งเตือนทุก 1 นาทีผ่านแอปพลิเคชัน NETPIE บนสมาร์ทโฟน และทดสอบสภาพอากาศฝนตกจริง วันที่ 23 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. ถึงวันที่ 24 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. รวมระยะเวลา 24 ชม. ผลลัพธ์ที่ได้ คือสภาพอากาศฝนตกล็กน้อย ปริมาณน้ำฝนอยู่ในระดับน้อยกว่า 10.0 มม. ผลลัพธ์ที่ได้นี้สามารถนำข้อมูลจากการวัดปริมาณน้ำฝนไปประยุกต์ใช้งานต่างได้ เช่น แจ้งเตือนปริมาณน้ำในชุมชน หรือเตือนภัยน้ำท่วมสำหรับพื้นที่การเกษตรได้

คำสำคัญ: เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ระบบแจ้งเตือนปริมาณน้ำ การส่งข้อมูลไร้สาย

Abstract

This research presents a development of a solar-powered rain gauge system with wireless data transmission. In addition, the rainfall was recorded to an electrical signal. It can be divided into four situations of rainfall such as 1) 0.1 - 10.0 mm. (small rainfall), 2) 10.1 - 35.0 mm. (medium rainfall), 3) 35.1 - 90.0 mm. (heavy rainfall), and 4) the rainfall is greater than or equal to 90.1 mm is defined as the highest heavy rainfall. In the experiments, the rainfall was recorded on June 21, 2019 at 7:00 am until June 22, 2019 at 7:00 am, total duration 24 hrs., in rainfall model. The results showed that the rainfall was greater than 90.1 mm., which indicated that the rainfall was highest heavy rainfall. Furthermore, the data of rainfall was sent in every 1 minute via NETIPE appellation on smart phone. Moreover, the rainfall was recorded in real situation on June 21, 2019 at 7:00 am until June 22, 2019 at 7:00 am, total duration 24 hrs. The obtained data from the rainfall is less than that 10.0 mm., which mean that the small rainfall. From the results, it can confirm that the proposed system can be used for measuring the rainfall.

Keywords: Rain gauge: Water level notification system: Wireless data transmission

* ติดต่อ: E-mail : nuttapong.bo@udru.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 085-6590900

1. บทนำ

ปัจจุบันการตรวจวัดระดับน้ำของกรมชลประทานส่วนใหญ่เป็นระบบการตรวจวัดที่ต้องอาศัยมนุษย์เป็นผู้ตรวจสอบระดับน้ำที่อยู่บนแผ่นวัดระดับน้ำ (Staff gauge) อยู่เป็นระยะ ๆ และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดระดับน้ำที่มีจำหน่ายหรือในงานวิจัยมีหลากหลายประเภทตามหลักการทำงาน เช่น เทคนิคของ Acoustical gas resonator [1] โดยวิธีดังกล่าวประกอบด้วย ท่อนาคลิ้นที่ปลายหนึ่งจมอยู่ในของเหลวและปลายอีกด้านถูกปิด โดยมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่น และไมโครโฟนไว้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonator) เป็นฟังก์ชันกับระยะทางระหว่างปลายที่ถูกปิดกับผิวน้ำ สามารถตรวจวัดระดับของเหลวได้เมื่อทราบคุณลักษณะของความถี่เรโซแนนซ์ที่โหมดต่าง ๆ แต่มีข้อจำกัดคือ ค่าความแตกต่างของความยาวท่อกับระดับน้ำสูงสุดที่ตรวจวัดต้องมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาคลิ้น นอกจากนี้ วิธีนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดระดับของน้ำที่ปนไปด้วยทรายและมีผลตอบสนองที่ช้า หรือใช้หลักการวัดด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Dielectric electrical properties) เป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระดับน้ำ เช่น การวัดระดับของเหลวด้วยหลักการค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance sensor) [2-5] เป็นวิธีการวัดที่อาศัยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากค่าไดอิเล็กตริกที่ต่างกันระหว่างของเหลวกับอากาศ วัดค่าได้เป็นค่าความจุไฟฟ้า [6] การวัดแบบนี้จะทำให้เกิดการกักตัวของผิวเซนเซอร์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งและในที่สุดข้อมูลที่อ่านได้จะมีความผิดพลาด

เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ Siphon เป็นเครื่องมือช่วยในการพยากรณ์เดือนกายน้ำท่วม รวมถึงการใช้ข้อมูลปรับปรุงพัฒนางานชลประทาน เครื่องวัดน้ำฝนแบบ Siphon จัดทำขึ้นเพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลเข้าระบบจัดบันทึกข้อมูล และเป็นต้นแบบในการที่จะพัฒนาเป็นระบบโทรมาตรที่สมบูรณ์แบบในขั้นต่อไป ซึ่งเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Siphon มีข้อดี คือไม่มีส่วนใดที่เคลื่อนไหว จึงประหยัดค่าบำรุงรักษา และสามารถผลิตขยายผลให้ทั่วพื้นที่ชลประทานได้ในอนาคตต่อไป

จากสภาพปัจจุบันเกิดปัญหาน้ำท่วมในหลาย ๆ พื้นที่ และการแจ้งเตือนยังล่าช้า ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบแจ้งเตือนปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย ทดสอบโดยการจำลองสภาพอากาศฝนตก ใช้สปริงเกอร์แบบหมุนรอบตัว 360 องศา กระจายน้ำเพื่อให้เป็นเม็ดเหมือนฝนตก จำลองสภาพอากาศฝนตกหนักมาก ฝนตกปานกลาง ฝนตกเล็กน้อย และทดสอบจากสภาพอากาศฝนตกจริง จากการทดสอบนั้นระบบวัดปริมาณน้ำฝนจะทำการประมวลผลและส่งข้อมูลไปเก็บและแสดงบนฐานข้อมูลของ Network Platform for Internet of Everything (NETPIE) [7] ทำให้สามารถดูค่าความหนาแน่นของน้ำในทุกที่ทั่วโลกได้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

2. การออกแบบพัฒนาระบบ

2.1 หลักการทำงานของระบบวัดปริมาณน้ำฝน

หลักการทำงานของระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย ดังรูปที่ 1 การทำงานของระบบใช้โหนดเซลล์เซนเซอร์ซึ่งนำหนักซึ่งปริมาณน้ำในกระบอกตวง และใช้ Node MCU

ESP8266 ในการรับค่าและประมวลผล แล้วส่งข้อมูล เก็บบนฐานข้อมูล NETPIE วิเคราะห์ข้อมูล และสามารถเข้าสู่ข้อมูลผ่านแอปพลิเคชัน NETPIE บน สมาร์ทโฟน ทำให้ได้รับข้อมูลจากผลกระทบ และ เตรียมป้องกันจากปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในปริมาณ มาก อาจเกิดน้ำท่วมได้

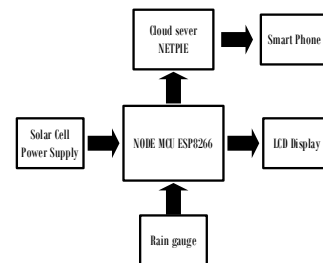
2.2 วงจรควบคุมระบบวัดปริมาณน้ำฝน

วงจรควบคุมใช้แหล่งจ่ายพลังงาน โดยการรับ แสงแดดผ่านโซลาร์เซลล์เข้าวงจรชาร์จเก็บพลังงานใน แบตเตอรี่เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรควบคุม โหลดเซลล์เซนเซอร์ ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์รับแรงดัน จากวัตถุส่งค่าผ่านโมดูลขยายสัญญาณ HX7711 เพื่อ ส่งข้อมูลให้ Node MCU ESP8266 ประมวลผลเป็น ค่าน้ำหนัก นำค่าน้ำหนักที่ได้จาก โหลดเซลล์เซนเซอร์ นำมาคำนวณหาความสูงของกระบอกตวง แล้วนำไป เทียบกับเกณฑ์การวัดปริมาณน้ำฝน ดังสมการที่ 1

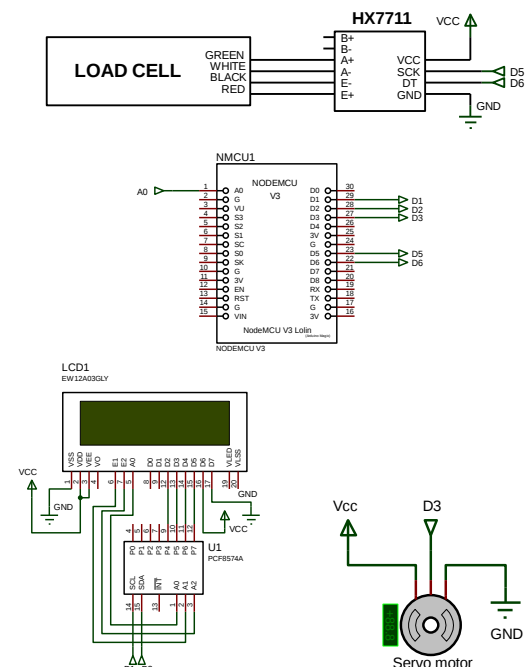
$$h = \frac{weight}{\pi r^2} \quad (1)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของระดับน้ำ, $weight$ คือ น้ำหนักซึ่งจากโหลดเซลล์ มีหน่วยเป็นกรัม และ πr^2 คือ ขนาดพื้นที่ปากกระบอกตวง มีหน่วยเป็นตาราง เซนติเมตร ในขณะเดียวกัน Node MCU ESP8266 จะทำการส่งข้อมูลไปยัง หน้าจอ LCD และ NETPIE เพื่อทำการแสดงผล และแจ้งเตือนผ่านสมาร์ทโฟน ดังรูปที่ 2

ส่วนเซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝน เมื่อมีน้ำฝนจะ ทำงาน ส่ง ข้อมูล ให้ Node MCU ESP8266 แล้วทำการประมวลผลตามเงื่อนไข เมื่อเปิดระบบ เวลา 7.00 น. สั่งการให้ Servo ปิดวาล์วน้ำเพื่อรองรับ น้ำไม่ให้น้ำไหลออกจากกระบอกตวง และเมื่อเวลา ผ่านไป 24 ชม. คือ เวลา 7.00 น. ของวันถัดไป สั่งการ ให้ Servo เปิดวาล์วน้ำ ระบบจะทำงานลักษณะแบบ นี้ไปตลอด เพื่อระบายน้ำออกจากกระบอกตวง



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมระบบแจ้งเตือนปริมาณน้ำฝน

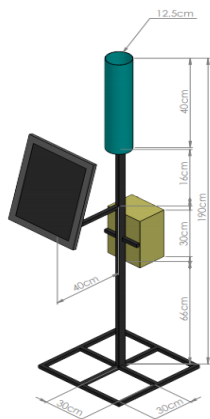


รูปที่ 2 วงจรควบคุมระบบวัดปริมาณน้ำฝน

และส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย

2.3 การออกแบบโครงสร้างเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน

การออกแบบระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย โครงสร้างมีความสูง 190 ซม. ใช้กล่องเหล็กขนาด 1.5 นิ้ว × 1.5 นิ้ว เชื่อมติดกันเพื่อเป็นฐานและโครงสร้างไว้ติดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในส่วนของกระบอกวัดปริมาณน้ำฝนมีความยาว 40 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. และแผงโซลาเซลล์ขนาด 20 วัตต์ 12 โวลต์ มีความกว้าง 39 ซม. ความยาว 49 ซม. ส่วนฐานของตัวโครงสร้างเป็นกล่องเหล็กยื่นออกด้านละ 30 ซม. เพื่อเป็นตัวช่วยยึดฐานของโครงสร้างไม่ให้เคลื่อน ช่วยในการวัดปริมาณน้ำฝนได้อย่างแม่นยำ ส่วนตำแหน่งการวางของกระบอกวัดน้ำฝนจะอยู่เหนือวัตถุต่าง ๆ ไม่ให้วัตถุใด ๆ มากีดกันน้ำฝนที่ตกลงมากระบอกวัดน้ำฝน เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ ส่วนแผงโซลาเซลล์มีการตั้งทำมุมกับพื้น 15 องศาให้แผงโซลาเซลล์ทำงานรับแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ได้กระแสมากที่สุด ดังรูปที่ 3 (ก) รูปที่ 3 (ข) แสดงเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน



(ก) แบบจำลอง

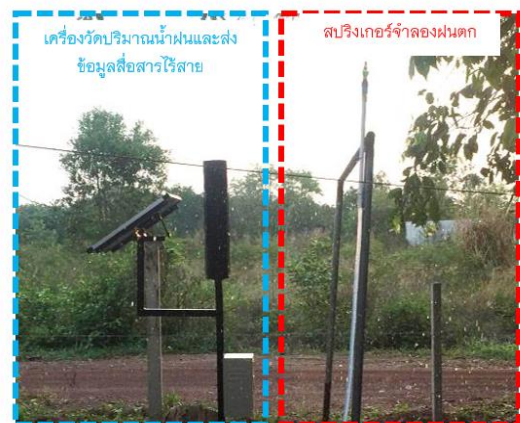


(ข) โครงสร้างจริง

รูปที่ 3 โครงสร้างเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน

3. วิธีการทดลอง

ผู้วิจัยได้จำลองสภาพอากาศฝนตกโดยเปิดแรงดันน้ำผ่านระบบสปริงเกอร์เพื่อกระจายน้ำเหมือนเม็ดฝนที่ตกลงมาจากท้องฟ้าดังรูปที่ 4 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวา คือ ระบบจำลองสภาพอากาศฝนตก และรูปในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้าย คือ เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการวัดจากเครื่องวัดนี้ จะมีระดับการวัดดังนี้ ฝนตกเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 0.1-10.0 มม. ปานกลาง มีค่าเท่ากับ 10.1-35.0 มม. หนัก มีค่าเท่ากับ 35.1-90.0 มม. และหนักมาก มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 90.1 มม. [8] จากนั้นใช้กระบอกวัดปริมาณน้ำฝนของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สายแบบเรียลไทม์ (Real time) ไปเก็บแสดงในฐานข้อมูลของ NETPIE และสามารถดูประวัติการบันทึกข้อมูลย้อนหลังได้ในฐานข้อมูลบน NETPIE



รูปที่ 4 ทดลองการวัดค่าความหนาแน่นของน้ำฝน

4. ผลการทดลอง

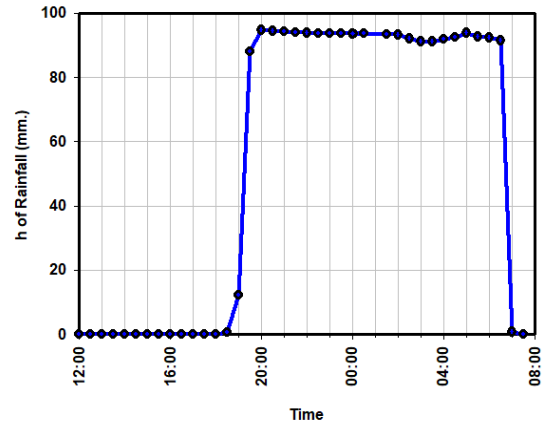
4.1 ผลการทดลองจำลองสภาพอากาศฝนตก

จากรูปที่ 4 เริ่มทดสอบการวัดปริมาณน้ำฝนในวันที่ 21 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. โดยเปิดระบบเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย เวลา 7.00 – 18.30 น. สภาพอากาศปกติไม่มีฝนตก และในช่วงเวลา 18.30 -20.00 น. ได้จำลองสภาพอากาศฝนตก เปิดแรงดันน้ำผ่านระบบสปริงเกอร์เพื่อกระจายน้ำเหมือนเม็ดฝนที่ตกลงมาจากท้องฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้มีปริมาณฝนตก สังเกตจากกราฟที่แสดงปริมาณน้ำฝนจะเห็นเส้นกราฟเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ฝนตก จนถึงช่วงเวลาที่ฝนหยุดตกเวลา 20.00 น. ปริมาณน้ำที่วัดได้จะคงที่จนกระทั่งเวลา 07.00 น. ของวันที่ 22 มิถุนายน 2563 ระบบจะปล่อยน้ำที่อยู่ในกระบอกวัดปริมาณน้ำฝนทิ้งจนน้ำในกระบอกวัดปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 0 หรือจนหมดจากกระบอกวัด ข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลของ NETPIE ดังรูปที่ 5 และนำข้อมูลที่บันทึกได้พล็อตกราฟ เพื่อให้เห็นการส่งข้อมูลได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 6 และหากปริมาณน้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 90.1 มม. ระบบจะส่งข้อมูลแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน NETPIE Notification บนสมาร์ตโฟนโดยตั้งค่าให้แจ้งเตือนทุก 1 นาที ดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 ข้อมูลระดับปริมาณน้ำฝน

วันที่ 21-22 มิถุนายน 2562 บนฐานข้อมูล NETPIE



รูปที่ 6 ข้อมูลระดับปริมาณน้ำฝน

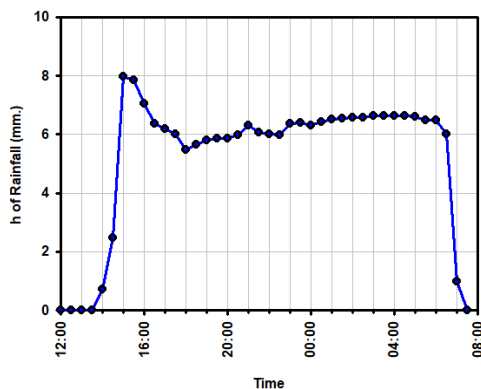
วันที่ 21-22 มิถุนายน 2562

4.2 ผลการทดลองสภาพอากาศฝนตกจริง

ทดสอบวัดปริมาณน้ำฝนจากสภาพอากาศจริง วันที่ 23 มิถุนายน 2562 เวลา 7.00 น. โดยเปิดระบบเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย เวลา 7.00 – 14.00 น. สภาพอากาศปกติไม่มีฝนตก และในช่วงเวลา 14.00 – 15.00 น. สภาพอากาศเริ่มมีปริมาณน้ำฝนตกลงมาจากท้องฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้ มีปริมาณน้ำฝนเล็กน้อย โดยสังเกตจากกราฟที่แสดงปริมาณน้ำฝนจะเห็นเส้นกราฟเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ฝนตก จนถึงช่วงเวลาที่ฝนหยุดตกเวลา 15.00 น. ปริมาณน้ำที่วัดได้จะคงที่จนกระทั่งเวลา 07.00 น. ของวันที่ 24 มิถุนายน 2562 ระบบจะปล่อยน้ำที่อยู่ในกระบอกวัดปริมาณน้ำฝนทิ้งจนน้ำในกระบอกวัดปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 0 หรือจนหมดจากกระบอกวัด ข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลของ NETPIE ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ข้อมูลแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน NETPIE



รูปที่ 8 ข้อมูลระดับปริมาณน้ำฝน
วันที่ 23-24 มิถุนายน 2562

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวัดปริมาณน้ำฝนและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย มีหลอดเซลล์โซลาร์วัดค่าน้ำหนักของปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่กระบอกตวง ผลลัพธ์ที่ได้นำไปคำนวณในสมการที่ 1 โดยใช้ Node MCU ESP8266 เป็นตัวประมวลผล

ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับความสูงของปริมาณน้ำฝนที่อยู่ในกระบอกตวง หากมีปริมาณน้ำฝนมาก หรือตกหนักมาก ระดับความสูงตั้งแต่ 90.1 มม. ระบบจะแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชัน NETPIE นอกจากนี้ระบบยังสามารถบันทึกข้อมูลไว้บนฐานข้อมูลของ NETPIE ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่อนุญาตให้ใช้บริการฟรี ทำให้สามารถดูข้อมูลได้ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และสามารถดูประวัติการบันทึกข้อมูลย้อนหลังได้ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เช่น แจ้งเตือนปริมาณน้ำในชุมชน หรือ เตือนภัยน้ำท่วมสำหรับพื้นที่การเกษตรได้ แต่ข้อควรพิจารณาและการศึกษาวิจัยต่อ คือ ทดลองประสิทธิภาพทนต่อสภาพอากาศทุกสถานการณ์ ทดลองประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ และพื้นที่ที่ไม่มีเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจะมีวิธีการจัดการระบบแบบใด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ในการสนับสนุนด้านงบประมาณ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนพื้นที่การทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Donlagic D, Završnik M, Sirotić I. The use of one-dimensional acoustical gas resonator For fluid level measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2000; 49(5): 1095-100.
- [2] Canbolat H. A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009; 58(10): 3762-8.
- [3] Bera SC, Ray JK, Chattopadhyay S. A low cost noncontact capacitance-type Level transducer for a conducting Liquid. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006; 55(3). 788-6.
- [4] Reverter F, Li X, Meijer GCM. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. Sensors and Actuators A: Physical. 2007; 138(1): 1-8.
- [5] อติสร นวลอ่อน, นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์, ชลธิ์ โพธิ์ทอง, อภิรัฐ ศิริธาราวิวัฒน์. การตรวจสอบการเจือปนของน้ำในน้ำผึ้งด้วยเซนเซอร์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแกนร่วม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2558; 10(2): 9-18.
- [6] ศุภกร กตาทิการกุล และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์. การวัดระดับน้ำโดยใช้เทคนิคความจุไฟฟ้าแบบกึ่งทรงกระบอก. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2554; 38(2): 179-86.
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. (สื่่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2562]. เข้าถึงได้จาก: <https://netpie.io>
- [8] กรมอุตุนิยมวิทยา. (สื่่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2562]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.tmd.go.th>



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดไอระเหยเบนซีนของ TiO_2/PLA -composite film ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

Eco-efficiency of removal benzene using TiO_2/PLA -composite film
by photocatalytic oxidation process

ปัทมพร จันทร์กลม โกวิท สุวรรณหงษ์ ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และ รจฤดี โชติกาวิรินทร์

Pattamaphon Chanklom Kowit Suwannahong Tanongsak Yingratanasuk and Rotruedee Chotigawin^{*}

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131, ประเทศไทย

Faculty of Public Health, Burapha University, Chon Buri 20131, Thailand

Received: 13 July 2020

Revised: 10 October 2020

Accepted: 13 November 2020

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยีบำบัดอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นวิธีการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องฟอกอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสเทียบกับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยใช้ฟิล์ม $5\%\text{TiO}_2/\text{PLA}$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวบนแผ่นฟิล์มเป็นอย่างดี วิเคราะห์ด้วย UV-VIS พบว่าค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นลักษณะของผลึกอนาเทส และตรวจด้วย ATR-FTIR พบโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์และพีแอลเอ จากผลการศึกษาพบว่าการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันและกระบวนการโฟโตไลซิสนาน 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเท่ากับ 44% และ 9% ตามลำดับ โดยเบนซีนถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0188 และ 0.0133 ตามลำดับ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเท่ากับ 0.346 และ 0.007 ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่ใช้ $5\%\text{TiO}_2/\text{PLA}$ สามารถบำบัดเบนซีนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

คำสำคัญ: โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โฟโตไลซิส เบนซีน ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

Abstracts

Eco-efficiency assessment in air pollution treatment by photocatalytic oxidation contributes to the application of effective air control pollution. The purpose of this research is to study eco-efficiency assessment of removal efficiency of benzene by photolysis and photocatalytic oxidation using 5%TiO₂/PLA-composite film which synthesized by blown film technique. The result from SEM showed well dispersion of TiO₂ on film. UV-VIS showed the band gap is 3.22 eV, band gap of anatase TiO₂. ATR-FTIR showed anatase TiO₂ and PLA in the film. The result showed removal efficiency of benzene by photocatalytic oxidation and photolysis within 24 hours of reaction time are 44% and 9%, respectively. Benzene can be degraded to CO₂ and H₂O by photocatalytic oxidation and photolysis, was following the first order kinetic. The removal rate constants (k) were 0.0188 and 0.0133, respectively. The eco-efficiency was 0.346 and 0.007, respectively. In summary, the photocatalytic oxidation using 5%TiO₂/PLA-composite film is suitable for removal benzene and high eco-efficiency.

Keywords: Photocatalytic oxidation: Photolysis: Benzene: TiO₂/PLA-composite film: Eco-efficiency

* ติดต่อ: E-mail : rotruedee@go.buu.ac.th

1. บทนำ

คุณภาพอากาศทั้งนอกและในอาคารนั้นส่งผลต่อสุขภาพ [1, 2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพอากาศในสถานที่ทำงานและโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีสารอันตรายระเหยง่ายหลายชนิดที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ เช่น เบนซีนพบได้ในโรงงานปิโตรเคมี พบว่าผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัสเบนซีนจากการทำงาน 1.11 ± 2.61 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเกินค่าที่นักสุขภาพศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (ACGIH) แนะนำ [3]

วิธีการบำบัดสารอันตรายระเหยง่ายภายในอาคารมีหลายวิธี ได้แก่ เทคโนโลยีกายภาพ เทคโนโลยีเคมี และเทคโนโลยีชีวภาพ [4] เช่น การดูดซับ (adsorption) ด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) การใช้พืชในการบำบัด (biofiltration) [5] กระบวนการโฟโตไลซิส (photolysis) การใช้โอโซน (ozonation) [6] การใช้ปฏิกิริยาความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (thermal catalytic oxidation) [7]

และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation) [8]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันถูกใช้อย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาด [9] กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการบำบัดสารมลพิษซึ่งจะได้เป็นสารที่ไม่เป็นพิษหรือเรียกว่า green chemistry อันได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม [10] มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ [7] สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง [11] และสามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ (bioaerosol) ได้ [12, 13]

ปัจจุบันมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการบำบัดสารอันตรายระเหยง่าย เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการซึ่งได้รับความนิยม เนื่องจากราคาถูก ปลอดภัย หาได้ง่าย และมีความเสถียร [10] โดยนำไททาเนียมไดออกไซด์ตรึงบนวัสดุตัวกลางต่าง ๆ เช่น พลาสติก [14] โลหะ แก้ว [15] อิฐ ปูนซีเมนต์ [16] และยางพารา [17] หลังจาก

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหมดอายุการใช้งาน วัสดุตัวกลางจะกลายเป็นขยะตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากปิโตรเคมี

พลาสติกชีวภาพจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโพลีแลคติกแอซิดหรือพีแอลเอ (polylactic acid หรือ PLA) เนื่องจากการผลิตพีแอลเอใช้พลังงานลดลงถึง 30-50% ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 50-70% สามารถรีไซเคิลได้ เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และสามารถย่อยสลายได้ [18-20] จึงนับได้ว่ามีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ผลิตจากพีแอลเอและไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย [19]

การพัฒนาอย่างยั่งยืน (sustainable development) เป็นวิธีการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการในปัจจุบันโดยไม่เบียดบังการตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในรุ่นถัดไป การพัฒนาจะยั่งยืนได้นั้นต้องมีการพัฒนาทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนไปพร้อมกัน [21]

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (eco-efficiency) เป็นหนทางหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเกิดขึ้นได้จากการลดต้นทุนการผลิตเพื่อส่งมอบสินค้าและบริการในราคาที่แข่งขันได้ ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ นำมาซึ่งคุณภาพชีวิต ใช้ทรัพยากรตลอดวงจรชีวิตอย่างคุ้มค่า ขณะเดียวกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการผลิต ขนส่ง บริโภค และการกำจัดขยะจากผลิตภัณฑ์ลดลง ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจยังเป็นแนวทางพัฒนาที่ใช้ได้ทุกระดับ และยังบูรณาการได้ทุกกิจกรรม [22]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจโดยประยุกต์ใช้กับการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอาศัยฟิล์ม 5%TiO₂/PLA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเปรียบเทียบกับกระบวนการโฟโตไลซิส

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส (cosmetic grade) พีแอลเอจากบริษัท nature work โดยสังเคราะห์ได้แผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และใช้เบนซีนจากบริษัท Merck เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในการศึกษา

2.2 การสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

การสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film โดยใช้ ไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส 5%โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดเบนซีน [20] ผสมกับพีแอลเอด้วยเครื่อง twin screw extruder ยี่ห้อ Lab Tech, LTE16-40 และนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง blown film machine ยี่ห้อ Lab tech, LE20-30/C & LF-250 [20]

ฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้นำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS และวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเครื่อง ATR-FTIR [19]

2.3 ถึงปฏิกิริยาร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

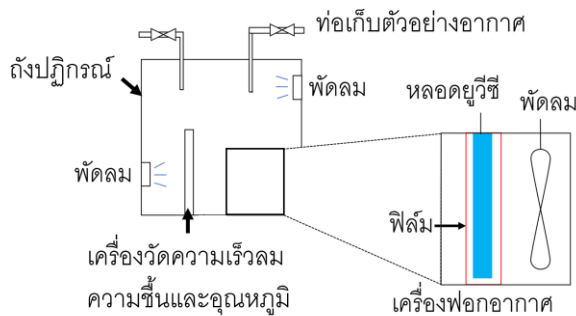
ถึงปฏิกิริยาระบบปิดขนาด 785 ลิตร ใช้จำลองแทนห้องที่มนุษย์อาศัย ภายในติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม ความชื้น และอุณหภูมิ จากนั้นวางเครื่องฟอกอากาศขนาดกว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร มีความเร็วลม 4 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ติดตั้งฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film แบบ annular reactor และติดตั้งหลอดรังสียูวีซีภายในเครื่องฟอกอากาศ หลอดรังสี ยูวีซียี่ห้อ Philips ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ขนาด 18 วัตต์ วัดความเข้มแสงยูวีซีด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงยูวีซียี่ห้อ Sanpometer ที่ผิวฟิล์มเท่ากับ 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตรวจสอบการรั่วไหลของถึงปฏิกิริยาโดยอัดแรงดันในถึงปฏิกิริยาและใช้เกจวัดความดันที่เปลี่ยนแปลงไป [20]

2.4 การทดลองควบคุม

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการทดลองควบคุมทำโดยฉีดพ่นเบนซินเข้าสู่ปฏิกรณ์ระบบปิด เมื่อเบนซินแพร่ถึงจุดสมดุลจึงเปิดหลอดยูวีซีในเครื่องฟอกอากาศที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film วัดติดตามระดับเบนซินนาน 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศผ่านท่อเก็บตัวอย่างอากาศ

2.5 การทดลองบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันทำโดยฉีดพ่นเบนซินเข้าสู่ปฏิกรณ์ระบบปิด เมื่อเบนซินแพร่ถึงจุดสมดุลจึงเปิดหลอดยูวีซีในเครื่องฟอกอากาศที่ได้ติดตั้งแผ่นฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film วัดติดตามระดับเบนซินนาน 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศผ่านท่อเก็บตัวอย่างอากาศ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film ติดตั้งในเครื่องฟอกอากาศที่วางในถังปฏิกรณ์

สภาวะที่ใช้ในการทดลองกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่ทำการทดลอง

สภาวะ	ค่าที่ทำการทดลอง
ความชื้นสัมพัทธ์	55%
ความเข้มข้นเบนซินเริ่มต้น	5 ส่วนในล้านส่วน (ppm)
อัตราการไหลของอากาศ	4 ลิตรต่อนาที (L min ⁻¹)
ความเข้มแสง	5 มิลลิวัตต์ต่อซม. ² (mWcm ⁻²)
อุณหภูมิ	28-35 องศาเซลเซียส (°C)

2.6 การวิเคราะห์เบนซินและคาร์บอนไดออกไซด์

นำอากาศในถังปฏิกรณ์ไปตรวจระดับเบนซินทุก 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง GC-MS และวัดระดับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง GC-TCD ยี่ห้อ Shimadzu

2.7 ประเมินความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ซึ่งพิจารณามูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ลดลง [23] โดยงานวิจัยนี้พิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซินเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเบนซินตลอด 24 ชั่วโมง ดังสมการที่ 1

$$\text{Eco-efficiency} = E/P \quad (1)$$

เมื่อ Eco-efficiency คือ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ
P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 24 ชั่วโมง
E คือ ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซิน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

ฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้นำมาวิเคราะห์การกระจายตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวบนผิวของฟิล์มอย่างดี [19]

วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร คำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film เท่ากับ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นลักษณะของไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส [19]

วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเครื่อง ATR-FTIR พบโครงสร้างของพีแอลเอและไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม [19]

3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซิน

กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซินในเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของเบนซินเริ่มต้น

5 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 9% และ 44% ตามลำดับ โดยคำนวณตามสมการ

$$\% \text{ removal} = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ % removal คือ ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน (%)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นของเบนซีนเริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ที่ภาวะสมดุล และ ณ เวลาใด ๆ ตามลำดับ (ppm)

พิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยคำนวณจากความเข้มข้นของเบนซีนในแต่ละช่วงเวลา พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยารวมขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง ซึ่งเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) คำนวณได้จากสมการ

$$r = -d[A]/dt = k[A] \quad (3)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ppm min^{-1})

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate constant) จะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสารตั้งต้นทุกชนิดมีความเข้มข้นเท่ากับหนึ่งหน่วย (ppm min^{-1})

$[A]$ คือ ความเข้มข้นของเบนซีน (ppm)

โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตไลซิสต่ำกว่าค่าของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0133 และ 0.0188 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตไลซิสสามารถบำบัดเบนซีนได้ช้ากว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน [24]

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามแบบจำลองของสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด [25] ดังสมการที่ 2

$$r = -dC/dt = kKC/(1+KC) \quad (4)$$

เมื่อ r คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (ppm min^{-1})

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นของเบนซีนเริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ที่ภาวะสมดุล และ ณ เวลาใด ๆ ตามลำดับ (ppm)

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ออกซิเดชัน (ppm min^{-1})

K คือ ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ (ppm^{-1})

เมื่อแทนค่าสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดดังสมการที่ 2 เข้าสู่ mass balance equation [26] จะได้ดังสมการที่ 3

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{kK} \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) + \frac{1}{k} (C_0 - C) \quad (5)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของเครื่องฟอกอากาศ (L)

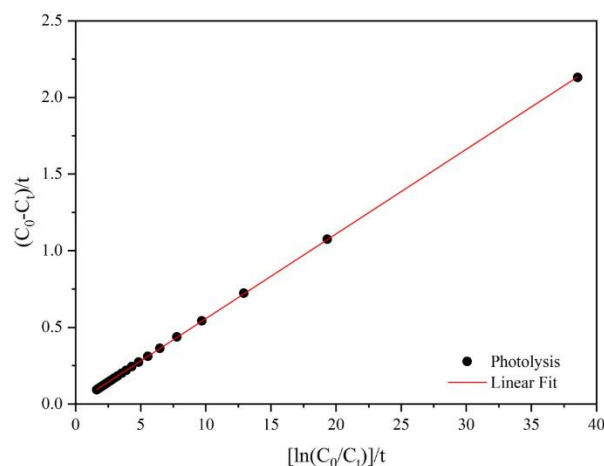
Q คือ อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องฟอกอากาศ (L min^{-1})

C_0 คือ ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น (ppm)

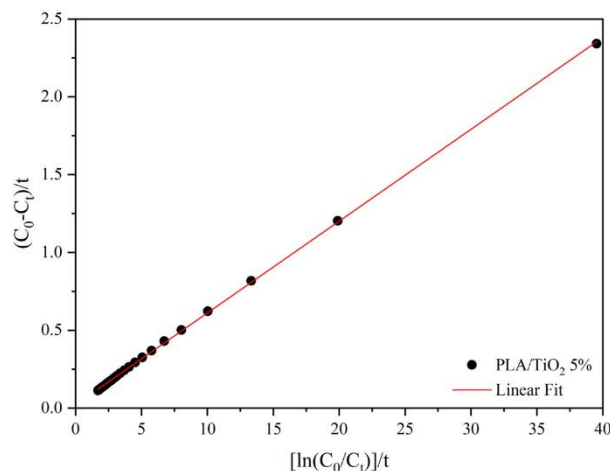
เขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 4

$$\frac{t}{C_0 - C} = \frac{1}{kK} \frac{\ln(C_0/C)}{(C_0 - C)} + \frac{1}{k} \quad (6)$$

จากการใช้แบบจำลองสมการของแลงเมียร์ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood: LH) พบว่ากระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.9999 และ 0.9988 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ากระบวนการทั้งสองสามารถทดสอบได้ด้วยแบบจำลองนี้ และเขียนแสดงเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0 - C_t)]/t$ เมื่อบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0 - C_t)]/t$ เมื่อบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

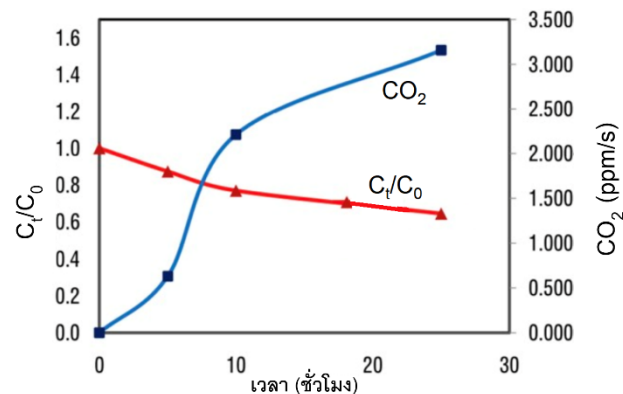
จากการวิเคราะห์หาค่าคงที่ของอัตราการดูดซับและค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเท่ากับ 0.0047 และ 0.1975 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ในการบำบัดเบนซินที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน

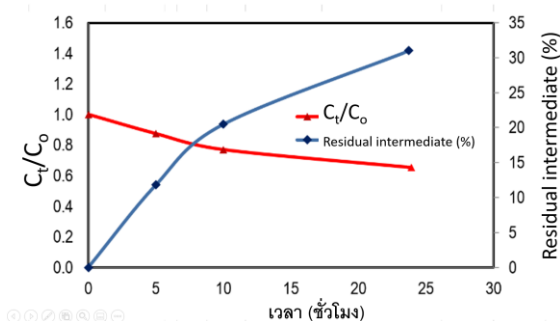
กระบวนการ	K	k	R ²
กระบวนการโฟโตไลซิส	0.0552	0.0046	0.9999
5%TiO ₂ /PLA-composite film	0.1975	0.0047	0.9988

3.3 ระดับคาร์บอนไดออกไซด์และสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

เมื่อพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์และสารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้น รวมถึงสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ 5 จะพบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เบนซินลดลง พบสารมัธยันตร์มีปริมาณสูงขึ้น กระบวนการย่อยสลายของเบนซินก่อนจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสารต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่าสารมัธยันตร์ ได้แก่ benzaldehyde, benzoic acid, benzyl alcohol และ phenol [27] ซึ่งตรวจจาก GC-MS



รูปที่ 4 คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชัน



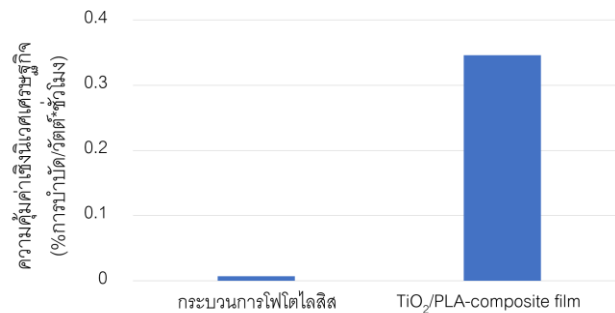
รูปที่ 5 สารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นและสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

3.4 ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (eco-efficiency)

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ได้ใช้ในการบำบัดเบนซิน และประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซิน เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเบนซิน 24 ชั่วโมงคำนวณได้จากหลอดรังสียูวีที่ 18 วัตต์ และเครื่องฟอกอากาศ 35 วัตต์ เปิดนาน 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1,272 วัตต์

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film มีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจมากกว่ากระบวนการโฟโตไลซิสซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.346 และ 0.007 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 6 ค่าความเข้มข้นในอากาศ
ในการบำบัดเบนซีน ด้วยกระบวนการโฟโตคะ
ตะไลติกและการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชัน

4. สรุป

ตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยแสงชนิด 5%TiO₂/PLA-composite film มีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสูงกว่ากระบวนการโฟโตไลซิส อีกทั้งยังมีความเข้มข้นในอากาศสูงกว่ากระบวนการโฟโตไลซิส ซึ่งเป็นหนทางนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้วิธีการประเมินความเข้มข้นในอากาศของเครื่องฟอกอากาศที่อาศัยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนในสถานที่จริง ศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพ รวมถึงศึกษาการย่อยสลายของฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอรำลึกในพระมหากรุณาธิคุณของพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีและขอขอบพระคุณมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีที่ได้สนับสนุนการค้นคว้าวิจัยฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณผศ.ดร.โกวิท สุวรรณหงษ์ รวมถึง

คณาจารย์ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ที่ให้ความช่วยเหลือเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cincinelli A, Martellini T. Indoor Air Quality and Health. International journal of environmental research and public health 2017; 14(11): 1286.
- [2] Pei J, Dong C Liu J. Operating behavior and corresponding performance of portable air cleaners in residential buildings. China. Building and Environment. 2019; 147: 473-81.
- [3] Chung EK, Jang JK, Koh DH. A comparison of benzene exposures in maintenance and regular works at Korean petrochemical plants. Journal of Chemical Health and Safety. 2017; 24(3), 21-6.
- [4] Bouchaala. Volatile Organic Compound Removal Method: A Review. American Journal of Biochemistry and Biotechnology. 2012; 8: 220-9.
- [5] Torpy F, Clements N, Pollinger M, Dengel A, Mulvihill I, He C, et al. Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone. Air quality, atmosphere and health. 2018; 11(2): 163-70.
- [6] Filho BMC, Silva GV, Boaventura RAR, Dias MM, Lopes JCB, Vilar VJP. Ozonation and ozone-enhanced photocatalysis for VOC removal from air streams: Process optimization, synergy and mechanism assessment. Science of The Total Environment. 2019; 687: 1357-68.
- [7] Shah WK, Li W. A Review on Catalytic Nanomaterials for Volatile Organic Compounds VOC Removal and Their Applications for Healthy Buildings. Nanomaterials 2019; 9(6): 910.

- [8] He C, Cheng J, Zhang X, Douthwaite M, Pattisson S, Haoet Z. Recent Advances in the Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds: A Review Based on Pollutant Sorts and Sources. *Chemical Reviews*. 2019; 119(7): 4471-568.
- [9] Sendogdular ST, Gouma P. A Brief Overview of TiO_2 Photocatalyst for Organic Dye Remediation: Case Study of Reaction Mechanisms Involved in Ce- TiO_2 Photocatalysts System. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 13.
- [10] Khami S, Khamwicht W, Rangkupan R, Suwannahong K. Volatile Organic Compound (VOC) Removal via Photocatalytic Oxidation Using TiO_2 Coated Nanofilms. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2017; 15(7): 491-501.
- [11] Huang Y, Ho SSH, Lu Y, Niu R, Xu L, Cao J, et al. Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect. *Molecules*. 2016; 21(1): 56.
- [12] Djellabi R, Ali J, Zhao X, Saber A. CuO NPs incorporated into electron-rich TCTA@PVP photoactive polymer for the photocatalytic oxidation of dyes and bacteria inactivation. *Journal of Water Process Engineering*. 2020; 36: 101238.
- [13] Regmi C, Joshi B, Rau SK, Gyawala G, Pandwt RP. Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Frontiers in Chemistry*. 2018; 6(33): 1-6.
- [14] Suwannahong K, Sirivithayaoakorn S, Noophan P, Sanongraj W. Improvement of TiO_2 /LDPE Composite Films for Photocatalytic Oxidation of Acetone. *Advanced Materials Research*. 2014; 931-932: 235-40.
- [15] Muangmora R, Kemacheevakul P, Chuangchote S. Removal of gaseous benzene by photocatalytic oxidation process using TiO_2 film coated on glass sheets under UVC irradiation. *Thai Environmental Engineering Journal*. 2019; 33(3): 9-16.
- [16] Rachel A, Subrahmanyam M, Boule P. Comparison of photocatalytic efficiencies of TiO_2 in suspended and immobilised form for the photocatalytic degradation of nitrobenzenesulfonic acids. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2002; 37(4): 301-8.
- [17] Sriwong C, Wongnawa S, Patarapaiboolchaib O. Rubber sheet strewn with TiO_2 particles: Photocatalytic activity and recyclability. *Journal of Environmental Sciences*. 2012; 24(3): 464-72.
- [18] Lackner M. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons Inc: New Jersey; 2015.
- [19] Chanklom P, Yingratanasuk T, Chotigawin R, Suwannahong K. Improvement of PLATiO₂-composite film for photocatalytic VOCs degradation. *Conference of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*; 2020 April 6-9; Gold Coast, Australia. APSDEWES; 2020.

- [20] Tharasawatpipat C, Kreetachat T. Application of Photocatalytic Oxidation Technology in an Air Purifier for Benzene Removal by Using TiO_2 /PLA Film. *Suan Sunandha Science and Technology Journal*. 2019; 6(1): 1-5.
- [21] Heilala J, Ruusu R, Montonen J, Vatanen S. Product Concept Manufacturability and Sustainability Assessment with Eco Process Engineering System. *Sustainable Design and Manufacturing*. 2014: 875-86.
- [22] Prashar A. Eco-efficient production for industrial small and medium-sized enterprises through energy optimisation: framework and evaluation. *Production Planning & Control*. 2020: 32(3); 198-212.
- [23] Charlearmkwun M, Thirawat C. Application of Eco-Efficiency for the Sustainable Development of Automotive Parts Industry. *The Journal of Industrial Technology*. 2018; 14(1): 64-73.
- [24] Liu CY, Tseng CH, Wang HC, Dai CF, Shih YH. The Study of an Ultraviolet Radiation Technique for Removal of the Indoor Air Volatile Organic Compounds and Bioaerosol. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(14): 2557.
- [25] Liu H, Zhiwe L, Xiaojang Y, Wenfeng S. Kinetic analysis of photocatalytic oxidation of gas-phase formaldehyde over titanium dioxide. *Chemosphere*. 2005; 60(5): 630-5.
- [26] Ao CH, Lee SC, Yu JZ, Xu JH. Photodegradation of formaldehyde by photocatalyst TiO_2 : effects on the presences of NO , SO_2 and VOCs. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2004; 54(1): 41-50.
- [27] Boyjoo Y, Sun H, Liu J, Pareek VK, Wang S. A Review on Photocatalysis for Air Treatment: From Catalyst Development to Reactor Design. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 310(2): 537-59.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี**Automatic Material Separator in Conveyor by PLC Controlled System**

ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม* ณัฐพงศ์ บุญหา วีระชัย บุญเพิ่ม และ สนอง ดีสม

Piyawat Sritram* Nattapong Buhga Weerachi Boonperm and Sanong Deesom

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Esan Surin Campus

Received: 17 October 2020

Revised: 18 March 2021

Accepted: 22 March 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดฝึกเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี (โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์) ได้นำเอาความรู้เรื่องระบบการลำเลียงขนถ่ายและในเรื่องการทำงานแบบอัตโนมัติ มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเครื่องจักรให้สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ชุดฝึกมีส่วนประกอบ 2 ส่วนในด้านฮาร์ดแวร์ที่เป็นโปรแกรมสั่งงานและด้านฮาร์ดแวร์ที่เป็นระบบกลไกต่าง ๆ ของระบบนิวแมติกส์ไฟฟ้า โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่ควบคุมการลำเลียงขึ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการ การทดสอบหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องหาค่าความผิดพลาดของการคัดแยกประเภทวัสดุ ผลการทดสอบการทำงานตามโปรแกรมควบคุมของชุดฝึกเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซีนั้น สามารถคัดแยกประเภทวัสดุควบคุมเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยประสิทธิภาพการคัดแยกประเภทวัสดุมีค่าเท่ากับ 97 %

คำสำคัญ: เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ระบบควบคุม นิวแมติกส์ไฟฟ้า

Abstract

This research paper presents the design and creation of automatic material separator in conveyor by PLC controlled system (programmable logic controller). It was applied the knowledge of control system method from automatic transfer and automatic control system method to operate this model. It consists of 2 parts, programming software and hardware which the structure of hardware are operates by DC-motor and electro pneumatics system for transfers and selects type of material to the correct position. Its efficiency can find from the selected type error of material. The model worked well under most conditions and the capability of the model was at 97 % accuracy.

Keywords: Automatic material separator: Programmable logic controller: Control system:

Electro pneumatics

*ติดต่อ: sritram_1111@hotmail.com

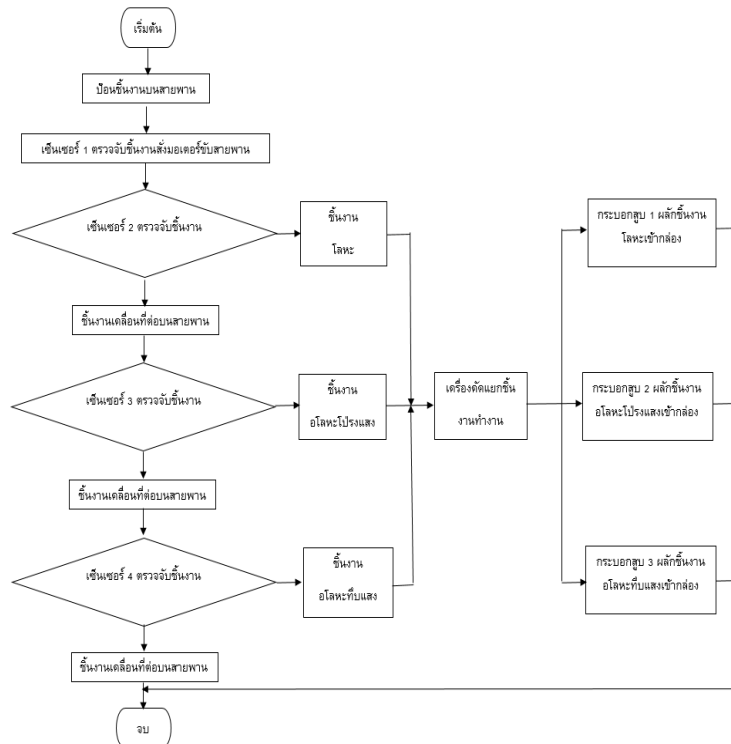
1. บทนำ

การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลนั้นเน้นใช้การประหยัดพลังงานและการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติ ส่งผลให้การผลิตสินค้ามีคุณภาพสูงและได้มาตรฐาน [1] โดยที่เครื่องจักรกลชนิดหนึ่งๆ จะออกแบบให้มีลักษณะของโครงสร้างและรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ขึ้นอยู่กับงานแต่ละประเภทและจะมีหน้าที่การทำงานในด้านต่างๆ ตามการควบคุมโดยตรงของมนุษย์ การควบคุมระบบต่าง ๆ ในการสั่งงานระหว่างเครื่องจักรกล หุ่นยนต์ และมนุษย์สามารถทำงานได้ด้วยระบบปกติและอัตโนมัติ โดยทั่วไปเครื่องจักรกลและหุ่นยนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสำหรับงานที่มีความยากลำบาก [2] การนำเครื่องจักรอัตโนมัติมาใช้แทนแรงงานคนจะทำให้กระบวนการในการผลิตมีความถูกต้องแม่นยำและมีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กระบวนการผลิต

มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยที่พีแอลซี หรือ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller, PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในงานระบบควบคุมเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม [3,4] และเป็นอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน่วยความจำในการเก็บโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่อเข้ากับอินพุตและเอาต์พุต โดยทำงานตามโปรแกรมที่บันทึกในหน่วยความจำภายใน PLC ถือเป็นอุปกรณ์ควบคุมที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการควบคุมเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมให้ทำงานอย่างอัตโนมัติ เราสามารถใช้ PLC ทำงานเลียนแบบวงจรรีเลย์ซีเคานซ์ได้ ใช้โปรแกรมเลียนแบบการทำงานของอุปกรณ์ เช่น รีเลย์ ตัวตั้งเวลา ตัวนับและใช้โปรแกรมต่อสายระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้เพื่อให้ได้วงจรที่สามารถทำงานควบคุมได้เหมือนรีเลย์ซีเคานซ์ [4] ดังนั้นผู้วิจัยจึงออกแบบและสร้างชุดฝึกเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ขึ้นมา

โดยโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดฝึก
เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิก

คอนโทรลเลอร์ และหาประสิทธิภาพการทำงานของ
เครื่อง



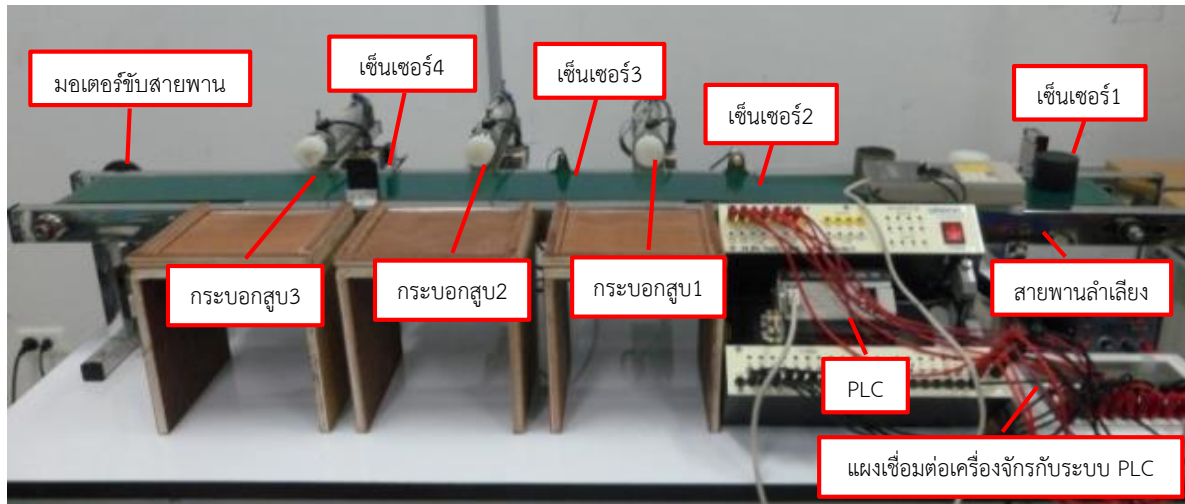
รูปที่ 1 Flow Chart การทำงาน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

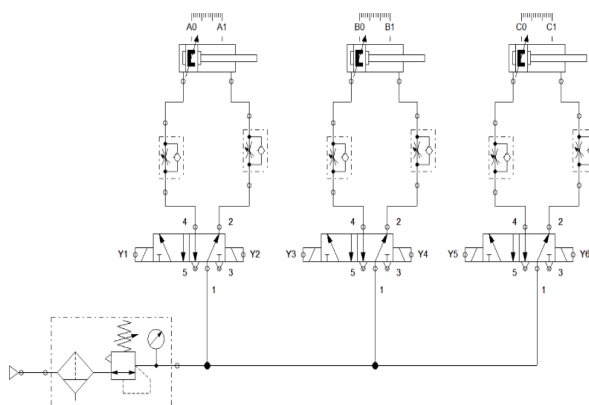
2.1 การออกแบบระบบ

ในการออกแบบเครื่องจักรแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สายพานลำเลียง และเครื่องคัดแยกวัสดุ โดยทำการออกแบบทั้งโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และออกแบบการควบคุมทางซอฟต์แวร์ของระบบด้วย PLC ด้วยการเขียนโปรแกรม PLC ในภาษาแลดเดอร์ (Ladder Diagram) [6,8] โดยการออกแบบเป็นระบบควบคุมแบบปิด หรือ Feedback control [7] ใช้อุปกรณ์ระบบนิวแมติกส์ในการออกแบบสร้างเครื่องคัดแยกวัสดุ โดยสายพานลำเลียงมีขนาด 120×1500 มม. ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และระบบโซ่ส่งกำลัง ติดตั้งกระบอกลูกสูบ 3 ตัวที่สายพานลำเลียง

และที่ปลายก้านสูบจะติดตั้งหน้าแปลนเพื่อดันชิ้นงานที่ต้องการออกจากสายพานลำเลียง โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับชิ้นงานไว้ก่อนถึงชุดกระบอกลูกสูบทั้ง 3 ตัว เพื่อควบคุมการทำงานของกระบอกลูกสูบในการคัดแยกชิ้นงานแต่ละประเภท ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ขนาด โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกลูกสูง 50 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 45 และ 55 มม. และแต่ละขนาดทำมาจากวัสดุต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ โลหะเหล็ก อโลหะโปร่งแสงและอโลหะทึบแสง



รูปที่ 2 เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติด้วย PLC



รูปที่ 3 วงจรเครื่องคัดแยกวัสดุในระบบนิวแมติกส์

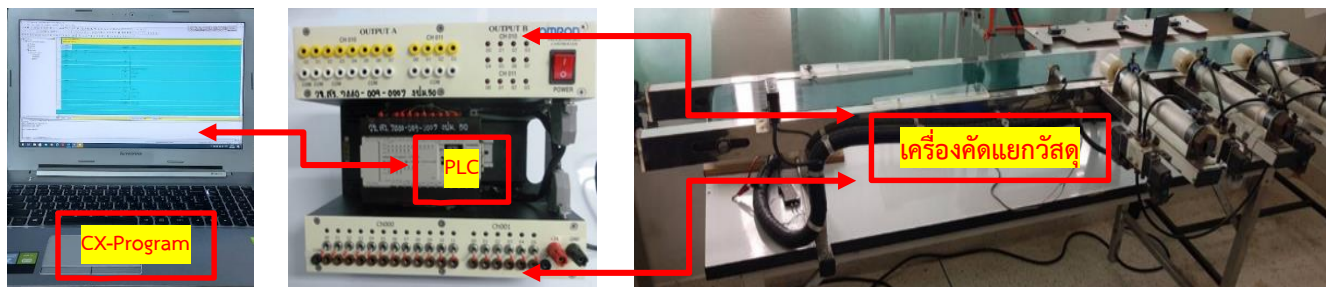
2.2 หลักการทำงานของเครื่อง

วางชิ้นงานทดสอบบนสายพานลำเลียง ทำการวัดระยะห่างของการวางชิ้นงานทดสอบ สายพานจะเริ่มทำงานเมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ไปที่เซ็นเซอร์สตาร์ท และเมื่อชิ้นงานที่เป็นโลหะเคลื่อนผ่านเซ็นเซอร์ตรวจจับโลหะ เซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณให้กระบอกลูกสูบตัวที่ 1 เคลื่อนที่ออกผลักชิ้นงานที่เป็นโลหะเข้ากล่องรับชิ้นงาน แต่ถ้าชิ้นงานเป็นซูเปอร์ไลน์สีขาวเคลื่อนผ่านไปที่เซ็นเซอร์ตรวจจับซูเปอร์ไลน์สีขาว เซ็นเซอร์จะส่ง

สัญญาณให้กระบอกลูกสูบตัวที่ 2 เคลื่อนที่ออกผลักชิ้นงานที่เป็นซูเปอร์ไลน์สีขาวเข้ากล่องรับชิ้นงาน และเมื่อชิ้นงานที่เป็นซูเปอร์ไลน์สีดำเคลื่อนผ่านเซ็นเซอร์ทั้งสองไปที่เซ็นเซอร์ตรวจจับซูเปอร์ไลน์สีดำ เซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณให้กระบอกลูกสูบตัวที่ 3 เคลื่อนที่ออกผลักชิ้นงานที่เป็นซูเปอร์ไลน์สีดำเข้ากล่องรับชิ้นงาน และจะสิ้นสุดการทำงานของเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ในรูปที่ 3 จะเป็นการออกแบบจำลองวงจรกำลังกระบอกลูกสูบในระบบนิวแมติกส์ของชุดฝึกเครื่องคัดแยกวัสดุในสายพานลำเลียง ในการออกแบบและการ simulation จะใช้โปรแกรม Fluid SIM เพื่อจำลองและตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมด้วยนิวแมติกส์ [8] ในการออกแบบการเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานในพีแอลซี ในที่นี้จะใช้ภาษาแลดเดอร์เขียนโปรแกรมดังกล่าว และมีการกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของโปรแกรมหางแสดงในตารางที่ 1

2.3 Programmable logic controller (PLC)

วงจรระบบ Programmable logic controller (PLC)



รูปที่ 4 ระบบควบคุมการทำงานด้วย PLC

2.3.1 โค้ดในการเขียน Programmable logic controller (PLC) ใช้ รุ่น CPM 2 A ของ OMRON

กำหนดโค้ดในการเขียน Programmable logic controller (PLC) แสดงการกำหนดค่า channel และ bit ในการเชื่อมต่อ input และ output สามารถเขียนได้ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 1 แสดงการกำหนดค่า channel และ bit ในการเชื่อมต่อ input

Input	Sensor	Sensor	Sensor	Sensor	Sensor	Sensor	Sensor
	Star	A1	B1	C1	S1	S2	S3
Code PLC	00000	00001	00002	00003	00004	00005	00006

ตารางที่ 2 แสดงการกำหนดค่า channel และ bit ในการเชื่อมต่อ output Relay

Output in PLC	Relay	Relay	Relay	Relay	Relay	Relay	Relay	Relay
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Code PLC	2.00	2.01	2.02	2.03	2.04	2.05	2.06	2.07

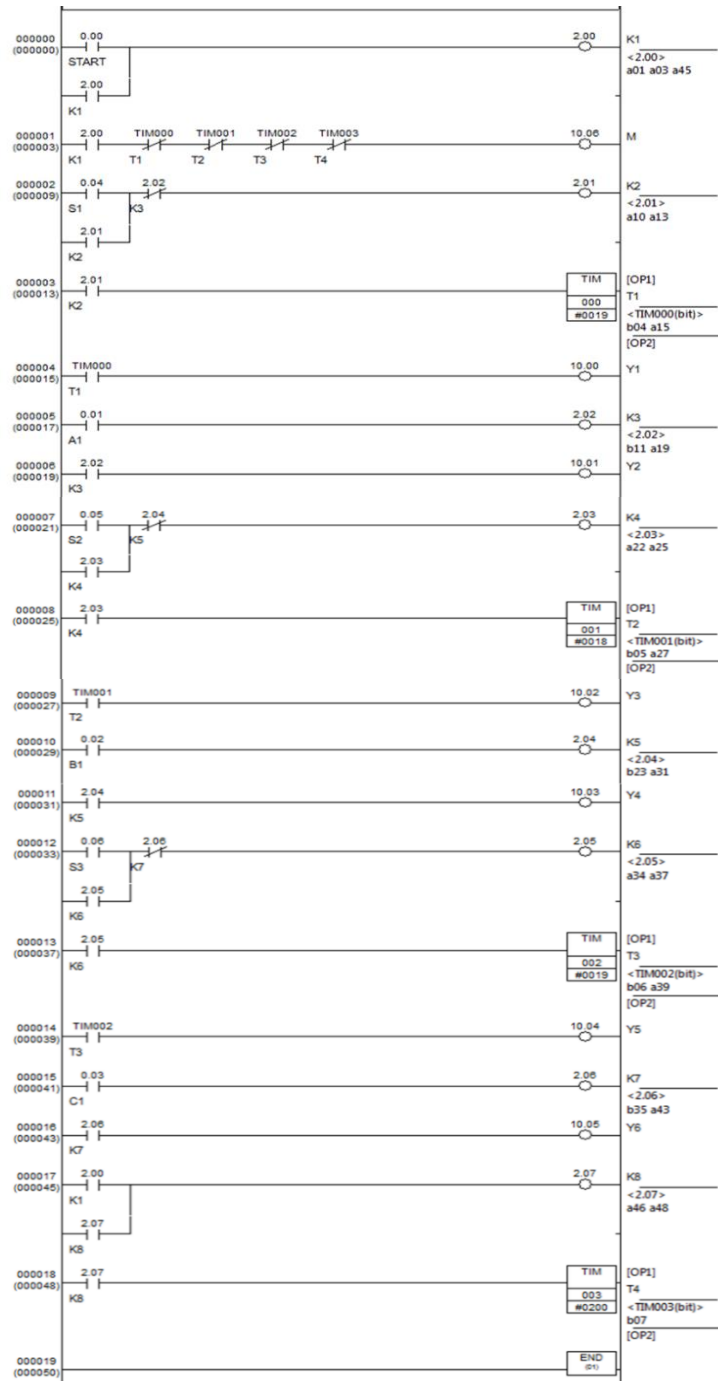
ตารางที่ 3 แสดงการกำหนดค่า channel และ bit ในการเชื่อมต่อ output Solenoid Valve

Output	Sol. valve	Sol. valve	Sol. valve	Sol. valve	Sol. valve	Sol. valve	DC Motor
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	1
Code PLC	10.00	10.01	10.02	10.03	10.04	10.05	10.06

ตารางที่ 4 แสดงการกำหนดค่า channel และ bit ในการเชื่อมต่อ output Timer

Output in PLC	Timer	Timer	Timer	Timer
	Tim 01	Tim 02	Tim 03	Tim 04
Code PLC	000	001	002	003

2.3.2 Ladder Diagram



รูปที่ 5 การเขียนโปรแกรม Ladder Diagram ในระบบควบคุมด้วย PLC

2.4 วิธีการทดลองและการเก็บข้อมูล

2.4.1 การหาค่าความเหมาะสมของความดันลมที่ใช้กับเครื่องจักร โดยการปรับความดันลมที่ 1 บาร์ แล้วนำชิ้นงานมาวางบนสายพานที่ละชุด โดยวางชิ้นงานแต่ละชิ้นห่างกัน 50 ม.ม. โดยปรับความดันลมเพิ่มขึ้นทีละ 1 บาร์ ตั้งแต่ 2-10 บาร์ บันทึกผลการทดสอบ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเหมาะสมของความดันลมที่ใช้กับเครื่องจักร

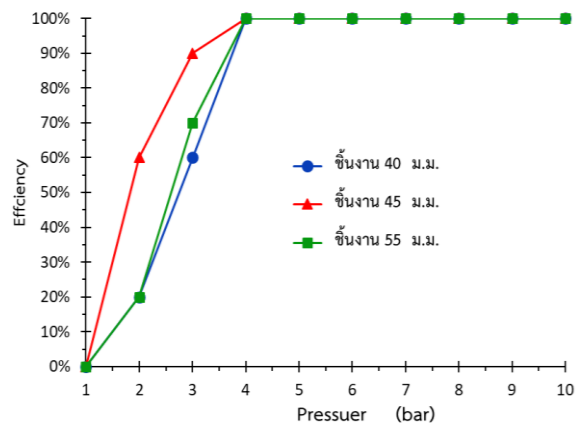
2.4.2 การหาค่าความผิดพลาดของระยะห่างในการวางชิ้นงานที่ใช้กับเครื่องจักร โดยการปรับค่าความเหมาะสมของความดันลมที่ใช้กับเครื่องจักรที่ 4 บาร์ เปิดเครื่องแล้วนำชิ้นงานมาวางบนสายพานทีละชุด เรียงชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจากวัสดุโลหะเหล็ก วัสดุอลูมิเนียมชุบเปอร์ลิโนสีขาว และชุบเปอร์ลิโนสีดำ โดยวางชิ้นงานแต่ละชิ้นห่างกัน 10 ม.ม. บันทึกผลการทดลอง จากนั้นทดสอบต่อโดยวางชิ้นงานแต่ละชิ้นห่างกัน 20 30 40 50 และ 60 ม.ม. จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาระยะห่างในการวางชิ้นงานที่ใช้กับเครื่องจักร

2.4.3 การหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักร โดยตั้งค่าตามผลทดสอบการหาค่าระยะห่างในการวางชิ้นงานและการหาค่าความดันลมที่เหมาะสมกับเครื่องแล้ว ทำการปรับตั้งตามค่าที่ได้จากการทดลอง จากนั้นป้อนชิ้นงานที่คละกั้นระหว่างวัสดุทั้ง 3 ชนิดอย่างต่อเนื่องเรียงจากขนาด 40 ม.ม. 45 ม.ม. และ 50 ม.ม. เก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์หาความเร็วและประสิทธิภาพการทำงาน

3. ผลการวิจัย

3.1 การหาค่าความเหมาะสมของความดันลม

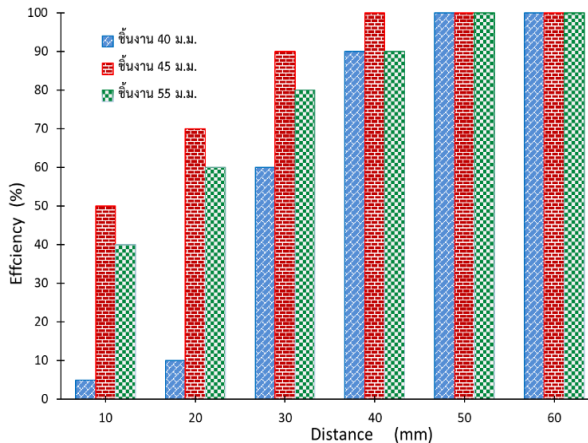
จากผลการหาค่าความผิดพลาดการทดสอบหาความดันลม พบว่าค่าความดันลมที่ใช้กับเครื่องสามารถทำงานได้ดีอยู่ในช่วง 4-10 บาร์ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การทำงานที่ 100 % ไม่เกิดค่าความผิดพลาด จะเห็นว่าที่ความดันลม 4 บาร์ เป็นค่าความดันในการเริ่มต้นใช้งานในระบบที่เหมาะสม ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพในการแยกวัสดุของเครื่อง

3.2 การหาค่าความผิดพลาดของระยะห่างในการวางชิ้นงาน

ผลทดสอบหาระยะห่างในการแยกชิ้นงานแบบคละกั้นที่แรงดันลม 4 บาร์ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดการทดสอบของเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติ พบว่าที่ระยะห่างการวางชิ้นงานตั้งแต่ 50 ม.ม. เป็นต้นไป ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดและมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0 % จะเห็นได้ว่าระยะที่ 50 ม.ม. มีความเหมาะสมที่สุดในการวางชิ้นงาน เมื่อเทียบกับค่าระยะห่าง 10 20 30 และ 40 ม.ม. ดังรูปที่ 7



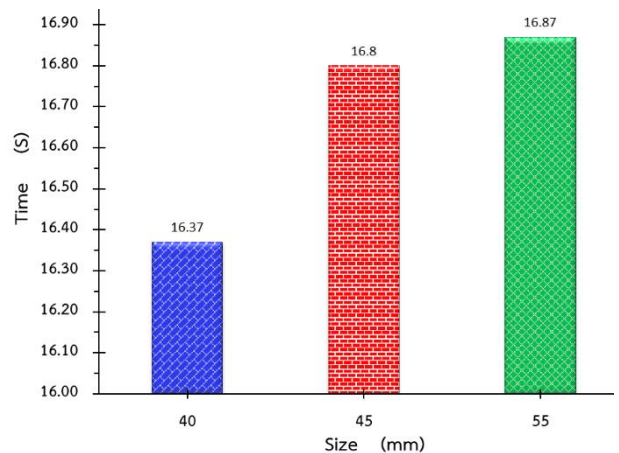
รูปที่ 7 ประสิทธิภาพในการแยกวัสดุที่ระยะห่าง
ระหว่างชิ้นงาน 10-60 ม.ม.

3.3 การหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักร

ผลการทดลองสามารถหาประสิทธิภาพของการทำงาน จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังที่ผลิตได้}}{\text{กำลังที่ป้อน}} \times 100 \quad (1)$$

ใช้ความดันลมที่ 4 บาร์ โดยวางชิ้นงานทดสอบให้มีระยะห่าง 50 ม.ม. ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องจักร ป้อนชิ้นงานทดสอบคละกั่นระหว่างวัสดุทั้ง 3 ชนิด อย่างต่อเนื่องจำนวน 100 ชิ้น คิดเป็น 100 % เริ่มจากขนาด 40 45 และ 55 ม.ม. พบว่าชิ้นงานขนาด 40 ม.ม. มีเวลาในการทำงานเฉลี่ยต่อชิ้นน้อยสุดที่เวลา 16.37 วินาที ผิดผลาด 6 ชิ้น มีประสิทธิภาพการทำงานที่ 94 % ขนาด 45 ม.ม. ใช้เวลามากกว่า 0.43 วินาที ผิดผลาด 3 ชิ้น มีประสิทธิภาพการทำงานที่ 97 % และชิ้นงานขนาด 55 ม.ม. ใช้เวลามากกว่า 0.5 วินาที ผิดผลาด 6 ชิ้น มีประสิทธิภาพการทำงานที่ 94 % ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 เวลาในการแยกวัสดุที่ความดันลม 4 บาร์

4. การอภิปรายผล

ค่าที่ได้จากการทดสอบของการเปรียบเทียบหาความดันลมที่เหมาะสมของชิ้นงานที่คัดแยก ชิ้นงานที่ทำจากโลหะเหล็ก อโลหะซูเปอร์อัลลอยและซูเปอร์อัลลอยดำ มี 3 ขนาด คือ 40 45 และ 55 ม.ม. จากการทดสอบพบว่า ความดันลมที่ 4 บาร์ เป็นความดันที่เหมาะสมในการเริ่มต้นใช้งานของระบบ จากการหาระยะห่างที่เหมาะสมของการวางชิ้นงาน ผลทดสอบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหล็ก ซูเปอร์อัลลอยขาว และซูเปอร์อัลลอยดำ ที่ขนาด 40, 45 และ 55 ม.ม. ที่ความดันลม 4 บาร์ พบว่าที่ระยะห่างการวางชิ้นงานตั้งแต่ 50 ม.ม. ขึ้นไปนั้นจะไม่เกิดความผิดพลาดในการแยกชิ้นงานของเครื่องจักร การทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติ โดยป้อนชิ้นงานอย่างต่อเนื่องและคละกั่นในการป้อนเข้าเครื่อง โดยตั้งค่าความดันลมที่ 4 บาร์ พบว่าเครื่องจักรสามารถทำงานได้ไม่ผิดพลาดและเมื่อกำหนดระยะห่างการวางชิ้นงาน 50 ม.ม. พบว่าชิ้นงานขนาด 40 ม.ม. มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 94 % เวลาในการทำงาน 16.37 วินาทีต่อชิ้น

ขึ้นงานขนาด 45 ม.ม. อยู่ที่ 97 % เวลาในการทำงาน 16.8 วินาทีต่อชิ้น และขึ้นงานขนาด 55 ม.ม. มีค่า 94 % โดยใช้เวลา 16.87 วินาทีต่อชิ้น

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี หรือ โปรแกรมเมเบิลโลจิกคอนโทรลเลอร์ และเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Ladder Diagram ซึ่งเป็นภาษาที่นิยมอย่างมากในการเขียนคำสั่งป้อน PLC เพื่อควบคุมเครื่องจักร ตลอดจนการดำเนินการวิจัย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบงานวิจัยของ Sriyotha S. et al. [4], Sritram P. [8] และ Prewthaisong K. [9] ที่ใช้ PLC ในการควบคุมเครื่องจักร การดำเนินการวิจัยเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงาน พบว่าค่าตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานนั้น ได้แก่ ค่าความดันในการตั้งระบบ ระยะห่างของการวางชิ้นงาน และขนาดของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อเวลาในการทำงานของเครื่องจักร จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันไม่มาก สาเหตุอาจเกิดจากการลื่นไถลของชิ้นงานที่จุดปล่อยชิ้นงานลงบนสายพาน และอาจเกิดจากความยาวของก้านสูบของเครื่องคัดแยก ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่และอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการดันชิ้นงานออกจากสายพานลำเลียง ดังนั้นควรมีการปรับเปลี่ยนกระบอกลูกสูบให้ก้านสูบมีความยาวที่เหมาะสม และเลือกประเภทสายพานชนิดที่เป็นหนังหรือเป็นยาง เพื่อลดการลื่นของชิ้นงาน [4]

การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาระบบ จากผลการทดลองค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหรือประสิทธิภาพในการทำงานที่มีความแตกต่างของระบบนั้น อาจมีสาเหตุหลัก 2 ประการ ได้แก่ ข้อที่ 1 เกิดจากความ

ล่าช้าในการเคลื่อนที่ของก้านสูบของกระบอกลูกสูบ (ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันลมขณะทำงาน) เมื่อก้านสูบมีการเคลื่อนที่ช้า (จากที่แรงดันลมต่ำ) ในขณะที่ความเร็วของสายพานลำเลียงมีค่าคงที่ (ตามความเร็วของมอเตอร์ที่ปรับตั้งไว้) เป็นสาเหตุให้การทำงานของกระบอกลูกสูบเกิดความผิดพลาด และข้อที่ 2 เกิดจากตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุบริเวณหน้ากระบอกลูกสูบ ซึ่งในการเขียนโปรแกรมควบคุมนั้น จะต้องพิจารณาเวลาการเคลื่อนที่ของก้านสูบในการดันชิ้นงานออกจากชุดสายพานให้สัมพันธ์กับความเร็วของสายพานในการพาวัตถุเคลื่อนที่ด้วย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงที่ควบคุมด้วยพีแอลซีนั้น สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุม ผลการทดสอบโปรแกรมสามารถควบคุมเครื่องให้ทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยมีค่าเริ่มต้นของความดันลมที่ใช้งานตั้งแต่ 4 บาร์ และระยะห่างการวางชิ้นงานเริ่มต้นที่ 50 ม.ม. การทดสอบการใช้ชิ้นงานขนาด 45 ม.ม. มีประสิทธิภาพในการคัดแยกวัสดุสูงสุดที่ 97 % ที่เวลาในการทำงาน 16.8 วินาทีต่อชิ้น โดยทดสอบลักษณะการทำงานที่ป้อนชิ้นงานชนิดของวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชนิด คือ โลหะเหล็ก อโลหะซูเปอร์อัลลอยและซูเปอร์อัลลอยดำ จากการทดสอบการทำงานของเครื่อง ควรพิจารณาถึงระยะการตรวจจับของเซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่นำมาทดลอง และควรมีการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ โดยพิจารณาถึงการปรับตั้งรอบของมอเตอร์ในการขับสายพาน

ขนาดของสายพานลำเลียง เงื่อนไขความดันในระบบ และระยะห่างการวางชิ้นงานตามขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้สถานที่เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Poorahong T, Prainetr S. The control of a robot arm using speed pulse control method. Naresuan University Journal. 2010; 18(1): 70-3.
- [2] Ganyatong G, Tadsanason A, Panno M, Ganjana A. Haptic Robot Arm Control. Proceedings of The 3rd National Conference on Industrial Technology and Engineering. 2017 May 3-4; Ubonratchathani, Thailand; 2017.
- [3] Rukhua C, Noppawong N, Ayutthaya T. Quality Inspection Automatic Machine. Proceedings of The 7th ECTI-CARD 2015. 2015 July 8-10; Trang, Thailand; 2015.
- [4] Sriyotha S, Unphikul B, Kengtone T, Sawangnet T, Tummaman R. A Simple Material Selection Educational Training Kit Controlled by PLC. Proceedings of The 21st conference of Mechanical engineering network of Thailand. 2007 October 17-19; Chunburi, Thailand; 2007.
- [5] Vongparamate T. Computed torque design for 3 link planar robot [MEn Thesis]. Pathumthani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2012.
- [6] Deanhagkom N, Chotipuwapipad N, Piftayapasedkun N. Linking and Processing of 2 Degrees of Freedom for the Automatic Aiming System to Fire Control by RS 232 Cable. Proceedings of The 24th Conference of Mechanical engineering network of Thailand. 2010 October 20-22; Ubonratchathani, Thailand; 2010.
- [7] Sengdang Y, Junyusen P, Thermsuk S, Singpoment D. Appropriated trajectory of end effector for para rubber tapping. Farm Engineering and Automation Technology Journal. 2017; 3(1): 25-36.

- [8] Sritram P. Robot arm picked up the material from the automatic sorting machine with conveyor belt. Farm Engineering and Automation Technology Journal. 2018; 4(1): 19-27.
- [9] Prewthaisong K. Automatic Sorting Machine with Conveyor Belt. Rajamangala university of Technology Tawan-ok Research Journal. 2014; 7(1): 88-96.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การประเมินปริมาณของเมล็ดข้าวในภาพถ่าย โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ

Evaluation amount of rice grains in photograph using image processing techniques

พีรณัฐ อันสุรีย์^{1,2,3)} กิตติพงษ์ ลาลูน^{1,2,3)*} ชัยยันต์ จันทศิริ^{1,2,3)}สมโภชน์ สุตาจันทร์^{1,2,3)} และ กันตพงษ์ แซ่โล^{1,2,3)}Peeranat Ansuree^{1,2,3)} Kittipong Laloon^{1,2,3)*} Chaiyan Junsiri^{1,2,3)}Somposh Sudajan^{1,2,3)} and Kantapong Khaeso^{1,2,3)}¹⁾ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพมหานคร³⁾ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹⁾ Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.²⁾ Postharvest Technology Innovation Center, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok, Thailand.³⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.

Received: 2 February 2021

Revised: 21 May 2021

Accepted: 23 May 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การเก็บเกี่ยวข้าวด้วยรถเกี่ยวขนาดข้าว มีปัจจัยที่ส่งผลต่อความสูญเสีย ได้แก่ ปัจจัยด้านการปรับแต่งเครื่อง ที่สามารถควบคุมได้ และปัจจัยด้านสภาพพืช ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นของพืช เนื่องจากความหนาแน่นของข้าวในแต่ละพื้นที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ดัชนีล่อโน้มไม่เหมาะสมกับกลุ่มข้าว ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการประเมินความหนาแน่นของเมล็ดข้าว โดยพัฒนาอัลกอริทึมคัดแยกเมล็ดข้าวจากภาพถ่ายของกล้องดิจิทัล เพื่อนำไปพัฒนาเป็นระบบหวั่นเกี่ยวข้าวที่ปรับความเร็วของล่อโน้มได้อัตโนมัติ ภาพถ่ายต้นข้าวจากภาคสนาม จะถูกวิเคราะห์ด้วยการจับภาพนิ่งส่วนต่างๆ ของต้นข้าว แบ่งเป็นกลุ่มได้แก่ เมล็ดข้าว, ใบ, ลำต้น, และ ฟัน โดยมีปัจจัยศึกษาได้แก่ ความชื้นของข้าว และระดับความสูงการถ่ายภาพ อัลกอริทึมที่พัฒนาจะ

พบว่า Model ให้ความแม่นยำของการทำนายกลุ่มต่างๆจากพิกเซล อยู่ในช่วง 59.43-86.94 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการทำนายพบว่า เปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวในรูปภาพอยู่ที่ 3.08-6.92 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทราบถึงปริมาณของพิกเซลเมล็ดข้าวในภาพถ่าย ซึ่งสามารถใช้อ้างอิงเป็นความหนาแน่นของเมล็ดข้าวได้ และสามารถใช้ปริมาณการทำนายนี้ ในการอ้างอิงการพัฒนาปรับตั้งระบบหัวเกี่ยวข้าว ที่ปรับความเร็วของล้อโน้มได้อัตโนมัติ เพื่อให้ได้ดัชนีล้อยโน้มที่เหมาะสมกับความหนาแน่นข้าว

คำสำคัญ : ประมวลผลภาพ ประเมินความหนาแน่นของเมล็ดข้าว พิกเซลเมล็ดข้าว

Abstract

Threshing the rice from using combine harvesters has direct impacts variously on the rice yield. The problem caused from the machine itself does not a real matter since the users can manage the machine independently. However, the great unmanageable problem to be primarily considered is the condition of rice in the field such as its growing intensity. Due to the partially inconsistent number of the rice growing in a field, a steady speed of reel index of the combine harvesters will damage the grain in a particular part of the rice field. In the study, the researcher introduces rice grain intensity estimating method by using rice grain screening algorithm system by capturing a digital picture through a camera attached at the top of the combine harvesters in order to further develop the rice combine harvester header with a real-time reel index speed adjusting system. Grains, leaves, stalks and soil surface condition are captured and analyzed concerning the rice moisture content and the altitude at which the picture is captured in real time. The developed rice grain screening algorithm system uses model random forest classification to estimate the rice grain quantity by indicating different color of each part of the rice. During the test, the analyzed result from using rice grain screening algorithm system precisely classified each part of the rice between 59.43 to 86.94 percent of the entire photo pixels. After the process of analyzing, the analyzed intensity of rice production ranges between 3.08 to 6.92 percent. Then the readers can use the result in this study for citation to develop the rice combine harvester header with a real-time reel index speed adjusting system.

Keywords: Image processing: Estimate the grain density: Rice grain pixel

1. บทนำ

การเก็บเกี่ยวข้าวของประเทศไทยนั้น ได้มีการพัฒนารูปแบบการเก็บเกี่ยวมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพัฒนาจากแรงงานสัตว์ เป็นเครื่องมือเครื่องจักร จนพัฒนามาเป็นรถเกี่ยววนวดข้าวในปัจจุบัน โดยรถเกี่ยววนวดข้าวนั้นเป็นที่ยอมรับเนื่องจากให้ความสะดวกสบายและลดการใช้แรงงาน และให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่มากกว่าและความสูญเสียน้อยกว่าแรงงานคน แต่ความสูญเสียก็ยังเกิดขึ้น แต่จะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของข้าว โดยมีการศึกษาการเก็บเกี่ยวข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ที่มีความสูญเสียจากหัวเกี่ยว 3.43 เปอร์เซ็นต์ ความสูญเสียจากการคัดแยกและทำความสะอาด 1.60 เปอร์เซ็นต์ และความสูญเสียจากการนวดซึ่งมีค่าน้อยมาก 0.0215 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความสูญเสียรวม 5.05 เปอร์เซ็นต์ [1] ทั้งนี้เนื่องจากข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 มีเอกลักษณ์ที่เมล็ดร่วงหล่นได้ง่ายเมื่อสุกแก่ จึงทำให้การนวดนั้นง่าย ส่งผลให้มีความสูญเสียจากหัวเกี่ยวสูงกว่าส่วนอื่น ส่วนข้าวนาปรังที่มีเอกลักษณ์เมล็ดร่วงได้ยากกว่าเมื่อสุกแก่ จึงทำให้มีความสูญเสียจากการคัดแยกและทำความสะอาดสูงกว่าหัวเกี่ยวและขูดนวด [2]

จากการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความสูญเสียจากระบบการเกี่ยวโดยใช้เครื่องเกี่ยววนวด ประกอบไปด้วย พันธุ์ข้าว ความชื้นเมล็ดข้าว มุมเอียงต้นข้าว อัตราส่วนเมล็ดต่อฟาง และความหนาแน่นของต้นข้าว จากที่กล่าวมา ชี้ให้เห็นว่าสภาพพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสูญเสียจากการเกี่ยวโดยใช้เครื่องเกี่ยววนวด และนอกจากปัจจัยสภาพพืช ก็ยังมีปัจจัยด้านการปรับแต่งเครื่อง ที่ส่งผลต่อความสูญเสียที่เกิดขึ้น [3] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยได้กล่าวไว้ว่า

ดัชนีลื้อโน้มที่เหมาะสมกับข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิอยู่ที่ 1.5-3.0 ซึ่งปัจจัยตัวนี้เป็นตัวที่ส่งผลต่อความสูญเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด อยู่ที่ 33.95 เปอร์เซ็นต์ [4] แต่เนื่องจากว่า สภาพความหนาแน่นของข้าวในความเป็นจริงนั้นแปรปรวน ไม่เท่ากันแต่ละพื้นที่ [5] จึงทำให้ผู้ขับได้ละเอียดเลยในส่วนนี้ไป แล้วก็ยอมรับความสูญเสียที่เกิดขึ้น หรือยิ่งถ้าเป็นการรับจ้างเกี่ยว ซึ่งคิดค่าจ้างเป็นราคาต่อพื้นที่ ไม่ใช่ผลผลิต จึงมีการเก็บเกี่ยวที่รวดเร็ว ทำให้ดัชนีลื้อโน้มไม่เหมาะสมกับกลุ่มข้าวในแต่ละจุด ส่งผลต่อความสูญเสีย และผลผลิตที่ควรจะได้รับ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา AI, Machine Learning, Deep Learning หรือระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ มีบทบาทอย่างมากแก่หลาย ๆ อุตสาหกรรม ซึ่งในทางอุตสาหกรรมเกษตรก็เช่นกัน ได้มีการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้ ยกตัวอย่างเช่น การใช้ Machine Learning หรือ Deep Learning มาใช้ในงานหาความหนาแน่นของพืช [6] การตรวจสอบความเครียดของพืช [7] การจำแนกสายพันธุ์ด้วยระบบ AI [8] การใช้ Robot ในการตรวจจับผลไม้ [9] การใช้ระบบประมวลผลภาพในการติดตามการออกดอก [10] รวมไปถึง ระบบ Smart Farming หรือระบบอัตโนมัติ เช่น แขนกลจับขึ้นงานจากเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติ ตามสายพาน [11] การพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ [12] และการควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบอัตโนมัติไร้สายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดนางฟ้า [13] เป็นต้น จะเห็นได้ว่างานวิจัยต่าง ๆ ที่ยกตัวอย่างมานั้น มีพื้นฐานมาจากการทำงานและประสบการณ์ของมนุษย์ ซึ่งในการทำงานของมนุษย์นั้น อาจจะมีการผิดพลาดและไม่แม่นยำ [14] ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงคิดว่า

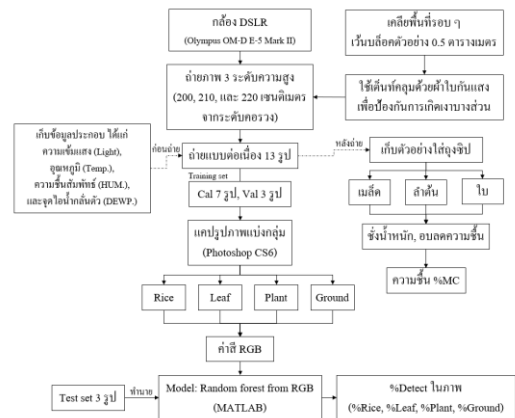
หากมีการนำระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้กับการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวนาข้าว โดยจะใช้ระบบประมวลผลภาพ เข้ามาช่วยตรวจจับปริมาณเมล็ดหน้าหัวเกี่ยว เพื่อที่จะได้นำค่าปริมาณของข้าวไปเป็นตัวอ้างอิงในการปรับตั้งนี้ล้อโน้มให้เหมาะสมกับกลุ่มข้าว ก็จะเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาที่เกิดจากความหนาแน่นของสภาพพืชที่มีความแปรปรวนไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานแก่ผู้ใช้งาน ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น ส่งผลต่อผลผลิตที่ควรจะได้มากขึ้น

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประเมินสมบัติทางกายภาพของข้าว โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ เริ่มจากการนำภาพถ่ายมุมสูงในแปลงข้าว มาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของเมล็ดข้าวในภาพถ่าย ที่ความขึ้น และความสูงการถ่ายที่แตกต่างกัน ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือสามารถนำเทคนิคประมวลผลภาพมาประเมินปริมาณเมล็ดข้าวในรูปภาพ เพื่อที่จะนำอัลกอริทึมนี้ไปพัฒนาเป็นระบบตรวจจับเมล็ดข้าว และสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบหัวเกี่ยวข้าวที่สามารถปรับความเร็วของล้อโน้มได้แบบอัตโนมัติ

2. วิธีการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำวิธีการ Image processing มาประเมินสมบัติทางกายภาพของข้าว เพื่อที่จะนำอัลกอริทึมนี้ไปพัฒนาเป็นระบบตรวจจับเมล็ดข้าว และสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบหัวเกี่ยวข้าวที่สามารถปรับความเร็วของล้อโน้มได้แบบอัตโนมัติ ในการออกแบบการทดสอบนี้ จึงมีบางส่วนอ้างอิงจากการติดตั้งบนรถเกี่ยวนาข้าว ยกตัวอย่างเช่นระดับความสูงการถ่ายภาพ โดยมีภาพรวม

การศึกษาดังแสดงในภาพที่ 1 และมีวิธีการดำเนินการศึกษา ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 การศึกษาการประเมินสมบัติ

ทางกายภาพด้วยเทคนิคประมวลผลภาพ

1) การเก็บตัวอย่างภาคสนาม

ด้วยการใช้กล้อง DSLR (Olympus OM-D E-5 Mark II) ติดตั้งกับฐานกล้องที่สามารถปรับระดับความสูงได้ ทำการถ่ายภาพข้าวในแปลงภาคสนาม ซึ่งกรอบการถ่ายภาพนั้น จะมีการตัดแต่งข้าวรอบกรอบพื้นที่ โดยจะเหลือข้าวไว้แค่ในกรอบขนาด 0.5 ตารางเมตร (ภาพที่ 2) เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณตัวอย่างให้เท่ากัน และในทุกการถ่ายรูปเก็บตัวอย่างนั้น จะมีการบันทึกค่าความเข้มแสงไว้ใช้เป็นข้อมูลประกอบ และเมื่อทำการถ่ายรูปเสร็จสิ้น จะทำการเก็บตัวอย่างของข้าว เพื่อที่จะนำไปหาน้ำหนักและแปลงเป็นความชื้นของตัวอย่าง



รูปที่ 2 ลักษณะการเก็บตัวอย่าง

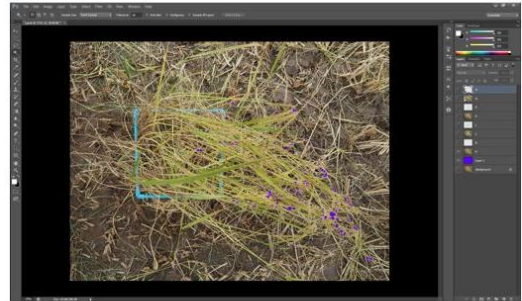
กำหนดปัจจัยในการศึกษาได้แก่ ระดับความสูงการถ่าย 3 ระดับ ได้แก่ 200, 210, 220 เซนติเมตรจากระดับกล้อง ถึงระดับในการเก็บเกี่ยว (ได้คอรวง 30 เซนติเมตร) และ ความชื้นของข้าว 6 ระดับ โดยทำการเก็บตัวอย่างในแต่ละวัน ซึ่งเป็นอายุข้าวตั้งแต่ 24-34 วันหลังออกดอก (เก็บตัวอย่างวันเว้นวัน เพื่อทิ้งให้ความชื้นข้าวลดลง) โดยมีขอบเขตการศึกษาเป็นช่วงของค่าความเข้มแสง และทดสอบกับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในจังหวัดขอนแก่น

2) การวิเคราะห์ภาพ (Image processing)

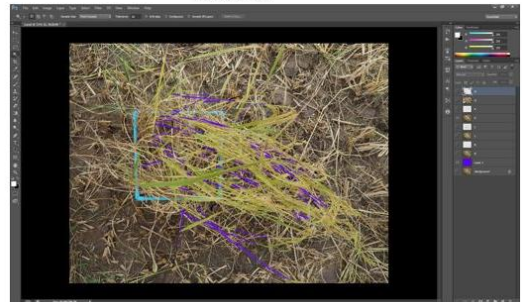
หลังจากมีการเก็บตัวอย่างภาคสนาม ในแต่ละชุดตัวอย่างของแต่ละความชื้น จะทำการเลือก Data ภาพถ่ายชุดต่อเนื่อง จำนวน 10 ภาพ เพื่อที่จะนำมาทำ Model โดยจะแบ่งเป็นชุด Training set ซึ่งจะแบ่งเป็น Calibration set = 7 ภาพ และ Validation set = 3 ภาพ (70 เปอร์เซ็นต์) และเลือก Data ภาพถ่าย มาเป็น Test set = 3 ภาพ (หมายเหตุ: Test set เป็นภาพใน Condition เดียวกัน แต่ไม่ใช่ภาพในชุด Cal และ Val) รวมทั้งหมด 13 ภาพต่อ 1 ความชื้น โดยในแต่ละภาพจะใช้โปรแกรม Photoshop PC6 ในการแปรรูปภาพ เพื่อจะแบ่งกลุ่มในภาพ เพื่อที่จะนำกลุ่มค่าสีไปทำการ Classification ด้วยวิธี Random

forest classification โดยจะแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) Pixel ข้าว, 2) Pixel ใบ, 3) Pixel ลำต้น, และ 4) Pixel พื้นและอื่น ๆ (ภาพที่ 3)

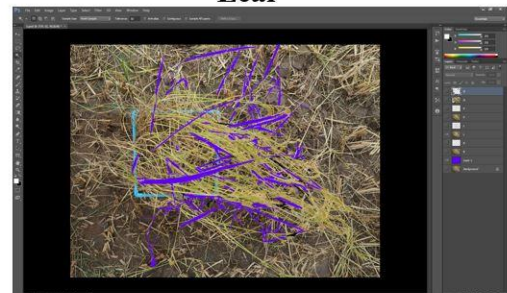
Rice



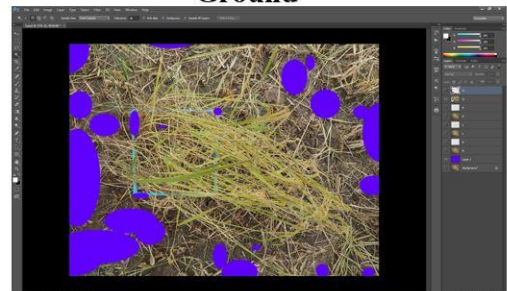
Plant



Leaf



Ground



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการแปรรูปภาพแบ่งเป็น 4 กลุ่ม

ใช้โปรแกรม Matlab (R2019b and Simulink for KCU staff and students: KCU Licence) ในการวิเคราะห์โดยชุดข้อมูล Calibration set (7 ภาพต่อ 1 ความชื้น) และ Validation set (3 ภาพต่อ 1 ความชื้น) เกิดจากการนำ Data ของแต่ละกลุ่มมาต่อกัน โดยในของชุด Calibration set จะสุ่มข้อมูล 500,000 พิกเซลต่อกลุ่ม จะได้ $X_{cal} = 500,000 \times 4 = 2,000,000$ pixel, $Y_{cal} = 2,000,000$ pixel โดยกำหนด 1-500,000 คือ กลุ่ม 1, 500,001-1,000,000 คือ กลุ่ม 2, 1,000,001-1,500,000 คือ กลุ่ม 3, 1,500,001-2,000,000 คือ กลุ่ม 4 และในชุด Validation set จะทำการสุ่ม Data = 200,000 พิกเซลต่อกลุ่ม จะได้ $X_{val} = 200,000 \times 4 = 800,000$ pixel, $Y_{val} = 800,000$ pixel โดยกำหนด 1-200,000 คือ กลุ่ม 1, 200,001-400,000 คือ กลุ่ม 2, 400,001-600,000 คือ กลุ่ม 3, 600,001-800,000 คือ กลุ่ม 4 (หมายเหตุ: กำหนดจำนวน พิกเซลต่อกลุ่ม ตามจำนวนพิกเซลรวมกันสูงสุดที่แคปได้ทั้งหมด) เมื่อเตรียมข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะสร้างแบบจำลอง Random forest classification เพื่อที่จะใช้ทำนายปริมาณพิกเซลของเมล็ด โดยใช้ภาพ Test set หาค่าเฉลี่ยของค่าสี RGB ในแต่ละ Model

ในการตรวจสอบความถูกต้องหรือความแม่นยำของ Model จะนำผลการ Predict มาตรวจสอบความถูกต้องด้วยการใช้วิธีลบกันของตัวเลข Y_{val} ลบกับ ผล Predict ซึ่งจะได้ค่าตัวเลข -3 -2 -1 0 1 2 3 ดังตารางที่ 1 และนำเสนอตัวแปรตามบทความของ Shiny Abraham [15] โดยจะมีการระบุค่าการจำแนกประเภทที่ถูก และไม่ถูกต้องลงในเมทริกซ์โดยมีตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ TP (True Positive), FN (False Negative), FP (False Positive), DP

(Detection Percent), และ QP (Quality Percent) และสมการที่ใช้ มีรายละเอียดดังสมการที่ 1, 2

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผล Y_{val} - ผล Predict

	Val	1	2	3	4
Cal		Rice	Leaf	Plant	Ground
1	Rice	0	-1	-2	-3
2	Leaf	1	0	-1	-2
3	Plant	2	1	0	-1
4	Ground	3	2	1	0

$$DP = \frac{100 \times TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$QP = \frac{100 \times TP}{TP + FN + FP} \quad (2)$$

หมายเหตุ: DP = Detection Percent (เปอร์เซ็นต์ที่ทำนายถูก)

QP = Quality Percent (คุณภาพ หรือความแม่นยำของโมเดล)

TP1 = จำนวนพิกเซล 0 ของ Rice, Rice

TP2 = จำนวนพิกเซล 0 ของ Leaf, Leaf

TP3 = จำนวนพิกเซล 0 ของ Plant, Plant

TP4 = จำนวนพิกเซล 0 ของ Ground, Ground

FN1 = ผลรวมจำนวนพิกเซล -1 -2 -3 ในแถว Rice

FN2 = ผลรวมจำนวนพิกเซล 1 -1 -2 ในแถว Leaf

FN3 = ผลรวมจำนวนพิกเซล 2 1 -1 ในแถว Plant

FN4 = ผลรวมจำนวนพิกเซล 3 2 1 ในแถว Ground

FP1 = ผลรวมจำนวนพิกเซล 1 2 3 ในหลัก Rice

FP2 = ผลรวมจำนวนพิกเซล -1 1 2 ในหลัก Leaf

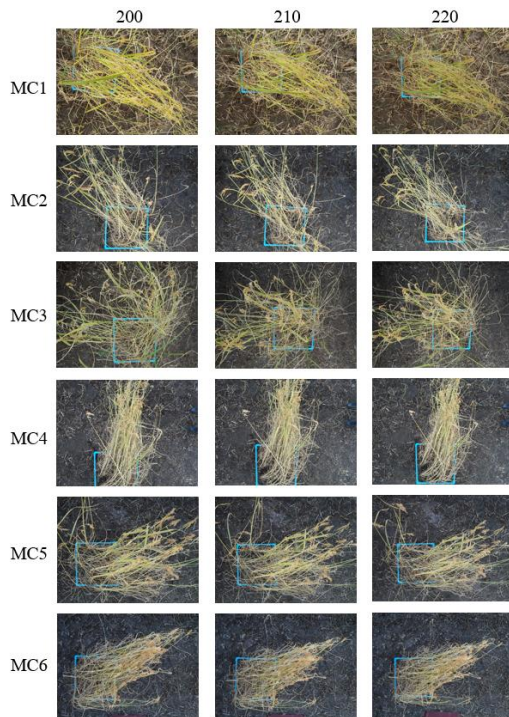
FP3 = ผลรวมจำนวนพิกเซล -2 -1 1 ในหลัก Plant

FP4 = ผลรวมจำนวนพิกเซล -3 -2 -1 ในหลัก Ground

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

1) ผลการเก็บตัวอย่างภาคสนาม

จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้ความชื้นของตัวอย่างอยู่ที่ 14.0, 14.9, 20.5, 23.6, 25.6, และ 32.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และค่าความเข้มแสงอยู่ในช่วง 553.00-1121.00 (807.56 ± 160.20) ลักซ์ โดยมีตัวอย่างภาพถ่าย ดังแสดงในภาพที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลภาพถ่าย ทั้ง 6 ความชื้น และ ทุกระดับความสูง

2) ผลการวิเคราะห์ภาพ (Image processing)

หลังจากการเก็บข้อมูลภาคสนามเสร็จสิ้น กระบวนการต่อไปในการทำงานคือการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งจะเลือกชุดรูปภาพที่โดนผลกระทบจากลมไม่มากเกินไป เพื่อที่จะเป็นการคัดเลือกตัวอย่างที่คงที่ได้ ค่าเฉลี่ยของสี RGB เมล็ดอยู่ที่ 205 ± 22 , 184 ± 28 , 137 ± 40 หากพิจารณาค่าสี RGB จะพบว่าในกรณีที่ค่าแสง (Light) ใกล้เคียงกัน แต่ความชื้นต่างกัน จะส่งผลให้ค่าสี RGB ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ค่าสี RGB ของเมล็ดใน MC1 - H210 - Light = 941 - RGB = 199 179 106 กับ MC3 - H210 - Light = 944 - RGB = 191 169 120 จะเห็นได้ว่า ค่า R และ G ลดลง และค่า B สูงขึ้น ซึ่งพอให้เห็นความแตกต่าง ดังแสดงในภาพที่ 5 แต่เมื่อพิจารณาอีก 1 คู่ พบว่า ที่ MC2 - H200 - Light = 627 - RGB = 207 186 137 กับ MC6 - H220 - Light = 638 - RGB = 208 183 146

จะเห็นว่า ค่า R และ G ไม่ได้ลดลงอย่างกรณีแรก แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนคล้ายกรณีแรกคือ ค่า B สูงขึ้น และเมื่อนำค่าสีมาเปรียบเทียบกับสายตา พบว่า ยิ่งความชื้นของเมล็ดลดลง สีที่ออกมาจะมีความเป็นสีน้ำตาลอ่อนๆ ต่างที่ความชื้นสูง จะมีเฉดสีเป็นสีครีมน้ำตาลอมเขียว ดังแสดงในภาพที่ 6 จึงสามารถตอบได้ว่า ที่ความชื้นของเมล็ดที่ลดลง ส่งผลให้ค่าสีฟ้า (B) สูงขึ้น (ในกรณีที่ค่าความเข้มแสงเท่ากัน)

MC1 - H210 - Light = 941 RGB = 199 179 106	MC3 - H210 - Light = 944 RGB = 191 169 120
---	---

รูปที่ 5 ภาพเปรียบเทียบค่าสี RGB ของความชื้น เมล็ดที่ 1 และ 3 ในระดับค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกัน

MC2 - H200 - Light = 627 RGB = 207 186 137	MC6 - H220 - Light = 638 RGB = 208 183 146
---	---

รูปที่ 6 ภาพเปรียบเทียบค่าสี RGB ของความชื้น เมล็ดที่ 2 และ 6 ในระดับค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกัน

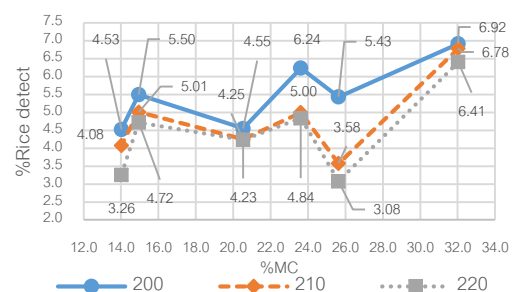
ในส่วนของการ Model Classification โดยการใช้ Machine Learning – Random forest classification จากการทดสอบ พบว่า ในแต่ละ Condition นั้น จะได้ค่า QP ที่แตกต่างกัน โดย Model ที่ได้ค่า QP ในการทำนายเมล็ดข้าวสูงสุดคือ MC5 – H200 ซึ่งได้ค่า QP ที่ 86.94% และ Model ที่ได้ค่า QP ในการทำนายเมล็ดต่ำสุดคือ MC1 – H200 ซึ่งได้ค่า QP ที่ 59.43% โดยเหตุผลที่ Model ในแต่ละ Condition มีค่า QP ต่างกัน เนื่องจากค่าสี RGB ที่สวามิโนเดรนนั้นต่างกัน ในกรณีที่ QP น้อยนั้นหมายถึงว่า ค่าสี RGB ในแต่ละ Class มีความใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น ที่ MC1

ที่ได้ QP ของเมล็ดน้อยเนื่องจากว่าค่าสีของเมล็ดนั้นใกล้เคียงกับสีของใบและต้น ดังนั้น Model จึงทำนาย Class ดังกล่าวเป็น เมล็ด ซึ่งเป็นการเพิ่มตัวหารให้แก่ QP จึงทำให้ค่านั้นลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2

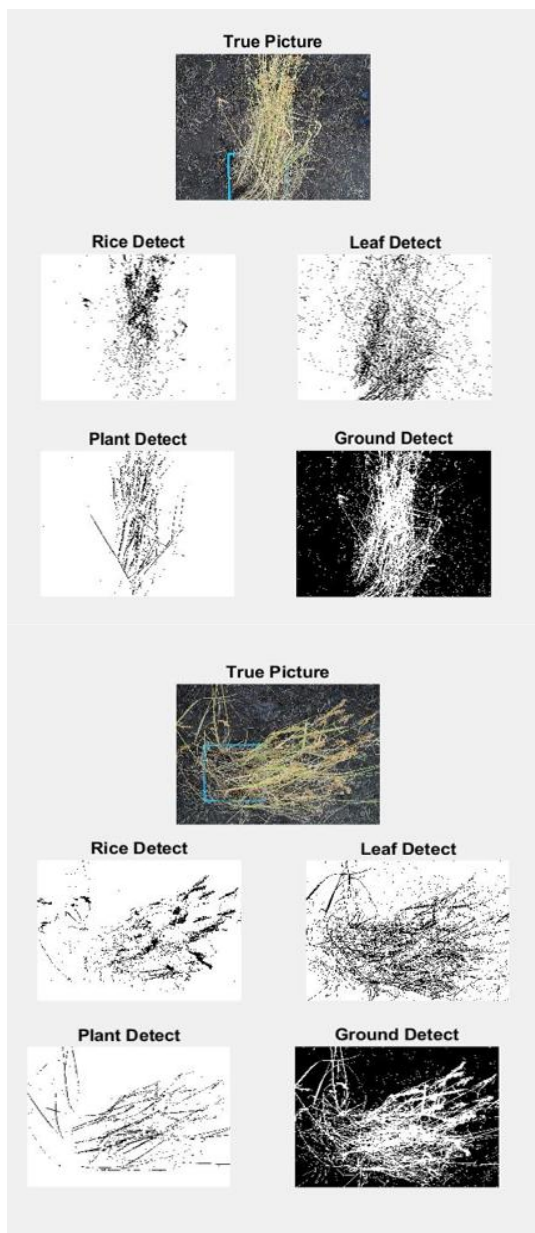
ตารางที่ 2 ข้อมูลการวิเคราะห์ Random forest classification ใน Condition ต่าง ๆ

MC (%w.b.)	H (cm)	Class	DP (%)	QP (%)
(1) 32.0	200	1	79.88	59.43
		2	68.00	56.76
		3	69.03	53.66
		4	98.00	95.88
	210	1	80.75	60.61
		2	57.74	46.92
		3	71.32	54.24
		4	97.44	92.85
	220	1	80.14	61.61
		2	57.46	45.58
		3	70.55	53.35
		4	95.72	88.82
(2) 25.6	200	1	89.67	79.11
		2	72.67	60.70
		3	81.59	66.52
		4	97.98	95.72
	210	1	89.88	77.91
		2	73.72	63.45
		3	84.50	69.59
		4	97.86	96.83
	220	1	88.86	77.46
		2	75.10	63.61
		3	80.90	65.57
		4	97.76	96.58
(3) 23.6	200	1	84.23	72.20
		2	73.75	59.55
		3	78.53	64.55
		4	98.51	95.82
	210	1	90.65	80.30
		2	75.11	63.08
		3	78.09	62.94
		4	98.61	97.16
	220	1	90.69	78.99
		2	74.00	62.69
		3	78.12	62.64
		4	98.68	97.77
(4) 20.5	200	1	89.64	78.31
		2	66.96	55.32
		3	80.56	62.71
		4	97.93	97.05
	210	1	90.49	79.53
		2	68.75	55.44
		3	77.44	61.36
		4	98.21	97.12
	220	1	85.68	72.79
		2	66.79	54.92
		3	81.30	63.78
		4	98.52	97.61
(5) 14.9	200	1	95.63	86.94
		2	76.00	61.91
		3	75.86	63.48
		4	97.68	95.23
	210	1	93.81	83.30
		2	67.30	56.18
		3	78.98	61.91
		4	97.86	95.87
	220	1	91.70	82.55
		2	73.87	61.07
		3	81.74	67.41
		4	98.21	97.07
(6) 14.0	200	1	91.28	79.45
		2	77.61	65.50
		3	81.39	69.15
		4	97.81	97.00
	210	1	89.65	76.83
		2	74.74	61.38
		3	76.55	62.85
		4	98.11	97.43
	220	1	91.13	76.74
		2	77.47	64.12
		3	77.56	67.44
		4	98.03	96.84

หลังจากได้ Model Random forest classification ของแต่ละ Condition แล้ว จึงมีการนำภาพ Test set มาทำการทำนายกลุ่มจาก Model ของ Condition นั้น ๆ เพื่อตรวจหากกลุ่มต่าง ๆ ในภาพจริง พบว่า เปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวในภาพถ่าย อยู่ในช่วง 3.26- 6.92 เปอร์เซ็นต์ และจากปัจจัยการศึกษาที่ระดับความสูงที่ต่างกันนั้น พบว่า เปอร์เซ็นต์ข้าวที่ตรวจจับได้ (%Rice Detect) ในแต่ละระดับความสูงจะเห็นได้ว่า ระดับความสูงนั้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ที่ตรวจจับได้นั้นต่างกัน โดยจะมากที่สุดที่ระดับความสูง 200 เซนติเมตรจากพื้นดิน ต่อมาเป็น 210 และ 220 เซนติเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 7) เนื่องจากการถ่ายภาพที่ระยะใกล้กว่านั้น ส่งผลให้ภาพวัตถุที่เราถ่ายมานั้นมีขนาดใหญ่ในภาพ เมื่อทำการตรวจจับวัตถุ นั้น ๆ จึงทำให้ค่า pixel นั้นสูง จึงสามารถตอบได้ว่า ระดับความสูงการถ่ายภาพนั้น ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำ (%Accuracy) ในการสร้าง Model แต่จะส่งผลให้วัตถุในภาพนั้นแตกต่างกัน ตามระดับความสูง โดยมีตัวอย่างผลแสดงการทำนายโดยใช้ภาพจริง ดังแสดงในภาพที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%w.b.) กับเปอร์เซ็นต์ข้าวที่ตรวจจับได้ (%Rice Detect) ในแต่ละระดับความสูง



รูปที่ 8 ตัวอย่างผลแสดงการทำนายโดยใช้ภาพจริง

4. สรุป

Model Random forest classification ให้ผลการทำนายที่มีความแม่นยำสูงถึง 86.94 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็ขึ้นอยู่กับความขึ้นของตัวอย่างด้วย เนื่องจากความขึ้นที่ต่ำ ตัวอย่างจะมีสีที่ใกล้เคียงกัน (เมล็ด, ใบ, ลำต้น) แต่เมื่อความขึ้นลดลง ในส่วนของเมล็ดจะมีสีออกน้ำตาล จะเริ่มแตกต่างออกจาก ใบ และลำต้น

จึงทำให้ Model มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น และหลังจากการทำนายโดยใช้ Model แล้ว พบว่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวในรูปภาพอยู่ที่ 3.08-6.92 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทราบถึงปริมาณของเมล็ดข้าวในภาพถ่าย และสามารถใช้ค่านี้ ในการอ้างอิงปรับตั้งดัชนีลือโน้มให้เหมาะสม

ในการทำ Random forest classification จะเห็นความแตกต่างในแต่ละ Condition จากข้อมูลในการสร้างโมเดล หากข้อมูลมีความแตกต่างกันมาก QP ที่ได้ จะมีค่าสูง แต่หากข้อมูลในการสร้างโมเดลนั้น มีความใกล้เคียงกันในแต่ละ Feature จะทำให้ได้ QP ที่ต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ที่ใช้ Random forest classification มีผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบงานวิจัยที่ใช้ Random forest classification

ชื่องานวิจัย	ชื่อนักวิจัย	ปี	Classification	ผล
การประเมินสมบัติทางกายภาพของข้าวโดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ	กันตพงษ์ แซ่โล	2562	เมล็ดข้าวในภาพถ่าย	59.43-86.94%
An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification [16]	V.F.Rodriguez-Galiano et. al.	2012	จำแนกพื้นผิวดินที่มีความซับซ้อน	92%
Identification of weeds in sugarcane fields through images taken by UAV and Random Forest classifier [17]	Inacio H. et al	2016	วัชพืชในแปลงอ้อย	82%
Comparison of support vector machine, random forest and neural network classifiers for tree species classification on airborne hyperspectral APEX images [18]	Edwin Racsko and Bogdan Zagajewski	2017	จำแนกต้นไม้ในป่าจากการถ่ายภาพด้วย Airborne Prism EXperiment sensor	62%
Classification of Soils into Hydrologic Groups Using Machine Learning	Shiny Abraham, Chau Huynh and Huy Vu	2019	จำแนกเนื้อดินตามสามเหลี่ยม Soil textural class	83%

ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ Random forest classification สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ และผลในการวิจัยของงานวิจัยอื่น ๆ ก็มีความแม่นยำในการทำนายใกล้เคียงกัน จึงสามารถยอมรับผลในการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการสนับสนุนวิจัยจาก ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กทม. และขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนสถานที่รวมถึงสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วินิต ชินสุวรรณ, สมชาย ขวณอุดม, วสุ อุดมเพทายกุล, วราจิต พะยอม, ณรงค์ ปัญญา. ความสูญเสียในการเก็บเกี่ยวข้าวหอมมะลิโดยใช้แรงงานคนและใช้เครื่องเกี่ยวนวด. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2542; 4(2): 4-7.
- [2] วินิต ชินสุวรรณ, นิพนธ์ ป้องจันทร์, สมชาย ขวณอุดม, วราจิต พะยอม. ผลของอัตราป้อนและความเร็วลูกนวดที่มีต่อสมรรถนะการนวดของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวแบบไหลตามแกน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2546; 10(1): 9-14.
- [3] ชัยยนต์ จันทร์ศิริ และ วินิต ชินสุวรรณ. ผลของปัจจัยการทำงานของเครื่องเกี่ยวนวดที่มีต่อความสูญเสียจากชุดหัวเกี่ยวเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. การประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 28-29 มิถุนายน 2550, กรุงเทพมหานคร; 2550.
- [4] ชัยยนต์ จันทร์ศิริ. การทำนายความสูญเสียจากระบบการเกี่ยวของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวในประเทศไทย. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร]. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2553.
- [5] ชัยยนต์ จันทร์ศิริ. พารามิเตอร์การทำงานของเครื่องเกี่ยวนวดที่มีผลต่อความสูญเสียจากชุดหัวเกี่ยวสำหรับข้าวพันธุ์ ข้าวดอกมะลิ 105. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2551; 13(5): 613-20.
- [6] Ribera J, Chen Y, Boomsma C, Delp EJ. Counting plants using deep learning. IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. 2017; 1344-8.
- [7] Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Singh A, Sarkar S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018; 115(18): 4613-8.
- [8] Ise T, Minagawa M, Onishi M. Identifying 3 moss species by deep learning, using the "chopped picture" method. Open Journal of Ecology; 2017; 8(3): 166-73.
- [9] Sa I, Ge Z, Dayoub F, Upcroft B, Perez T, McCool C. Deepfruits: a fruit detection system using deep neural networks. Sensors. 2016; 16(8): 1222.

- [10] Xiong X, Duan L, Liu L, Tu H, Yang P, Wu D, et al. Panicle-seg: a robust image segmentation method for rice panicles in the field based on deep learning and superpixel optimization. *Plant Methods*. 2017;13(1):104.
- [11] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม. แขนกลจับขึ้นงานจากเครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติตามสายพาน. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*. 2561; 4(1): 19-27.
- [12] ธีรวัฒน์ เจเื่อน, ฉัตริน เรืองจอหอ, มงคล คุหาพันธ์, กมลชนน วงศ์สถาน, พยงค์ศักดิ์ จุลยุเสณ. การพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*. 2562; 5(1): 1-11.
- [13] จาริณี จงปลื้มปิติ, พลเทพ เวงสูงเนิน, สาวิตรี ประภาการ, ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์, พลกฤต ปูนนอก. การควบคุมจากค่าปรับตั้งที่ใช้ในการควบคุมสถานะแวดล้อม แบบอัตโนมัติไร้สายภายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดนางฟ้า. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*. 2563; 6(1): 40-9.
- [14] Desai, SV, Balasubramanian VN, Fukatsu T., Ninomiya S, Guo W. Automatic estimation of heading date of paddy rice using deep learning. *Plant Methods*. 2019; 15(1): 76.
- [15] Abraham S, Huynh C, Vu H. Classification of Soils into Hydrologic Groups Using Machine Learning. *MDPI Data*. 2019; 5(1): 2.
- [16] Rodriguez-Galiano VF, Ghimireb B, Roganb J, Chica-Olmoa M, Rigol-Sanchez JP. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2012; 67: 93–104.
- [17] Yano IH, Alves JR, Santiago WE, Mederos BJT. Identification of weeds in sugarcane fields through images taken by UAV and Random Forest classifier. *ScienceDirect IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(16): 415–20.
- [18] Raczko E, Zagajewski B. Comparison of support vector machine, random forest and neural network classifiers for tree species classification on airborne hyperspectral APEX images. *European Journal of Remote Sensing*. 2017; 50(1): 144-54.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน
ของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ
Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Air Bubbles
with Water Impinging Jet

ฉัตรวิมล อรุณรุจิพันธ์ ชินดิษฐ์ สองนาม ปฐมพร นระระโต ญัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต*

Chattawat Aroonrujiphan Chinnadit Songnam Pathomporn Narato Natthaporn Kaewchoothong
and Chayut Nuntadusit*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Mechanical and Mechatronics Engineering,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Received: 12 April 2021

Revised: 1 June 2021

Accepted: 4 June 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมอากาศที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวเรียบที่จมในน้ำ โดยกำหนดให้เลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 และระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ในการศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศในเจ็ทน้ำใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอากาศที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 สำหรับระยะพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ และมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทน้ำที่ไม่ผสมฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมของฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดการรวมตัวกัน

เป็นฟองขนาดใหญ่แล้วไหลปะทะพื้นผิว และฟองอากาศขนาดเล็กที่ไหลปะทะบนพื้นผิวและรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน

คำสำคัญ: เจ็ทน้ำพุ่งชน การเติมฟองอากาศ พฤติกรรมการไหลของฟองอากาศ การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน

Abstract

In this research, the effect of air bubble addition on the heat transfer enhancement of a water impinging jet was investigated on a submerged smooth surface. The parameters for Reynolds number of water is 2.4×10^4 , the ratio between the volumetric flow rate of the air to the total volumetric flow rate of 0.0 and 0.1 and the distance from the jet exit to the impingement surface at $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ and $10D$ were studied. The behaviour of air bubbles in a water jet was visualized using a high-speed camera. The heat transfer on the impingement surface was measured with a thermal imaging camera. According to the results, the air addition at the ratio between the volumetric airflow rate and the total volumetric flow rate was 0.1 for the impingement distance at $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ and $10D$ can increase the average Nusselt number along radial direction about 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% and 8.10%, respectively, compared to the case of the pure water jet. This is caused by the behaviour of small air bubbles that coalesce to form large bubbles and then impinged against the surface and small air bubbles that impinge on the surface and disturb the thermal boundary layer.

Keywords: Water impinging jet: Air bubble addition: Bubble flow behavior: Heat transfer enhancement

1. บทนำ

การจัดการพลังงานความร้อนถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง ทำให้อัตราการเกิดความร้อนต่อขนาดอุปกรณ์ที่เพิ่มสูงมากขึ้น และขนาดอุปกรณ์ที่เล็กลงทำให้ยากต่อการระบายความร้อน และอาจเกิดปัญหาความร้อนที่กำเนิดบนชิ้นส่วนที่สูงเกินไป จึงเป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงและสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานความร้อนส่วนเกินและมีการควบคุมอุณหภูมิที่มีสมรรถนะสูงสามารถตอบสนองการเพิ่มของความร้อนได้อย่างรวดเร็ว เพื่อยืดอายุการใช้งานและหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ [1, 2]

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอบแห้ง อุตสาหกรรมโลหะ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และกังหันใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ เป็นต้น [3-6] เนื่องจากเป็นวิธีการระบายความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในบริเวณที่เจ็ทของไหลพุ่งชน จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยใช้น้ำหรือของเหลวเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีความสามารถระบายความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับอากาศ ส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชน ต่อมา มีการศึกษาเทคนิคเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น โดย

การเติมอนุภาคนาโนผสมในเจ็ทของเหลว ซึ่งจะเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลเมื่อเทียบกับน้ำหรือของเหลวเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนเพิ่มสูงขึ้น แต่การเติมอนุภาคนาโนลงในน้ำ มักพบปัญหาการเกิดคราบตะกอนของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวที่พุ่งชน ส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง อีกทั้งระบบการทำงานของปั๊มจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้น [7]

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวด้วยน้ำผสมฟองอากาศถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยฟองอากาศเมื่อพุ่งชนกับพื้นผิวที่ร้อน จะก่อให้เกิดการรบกวนในชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิวและเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ทเป็นผลให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับตัวกลางที่เป็นน้ำ

ที่ผ่านมา Donoghue และคณะ [8] ได้ศึกษาหลักการถ่ายเทความร้อนของฟองอากาศเดี่ยวขณะปะทะกับพื้นผิวในน้ำ ในงานวิจัยได้ใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ฟองอากาศปะทะและใช้กล้องความเร็วสูงในการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยฟองอากาศเดี่ยวจะไหลออกจากรูออริฟิสที่มีขนาด 1 mm เข้าปะทะกับพื้นผิวร้อนที่ห่างจากรูออริฟิสที่ 30 mm พบว่าพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวแบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยในช่วงแรกฟองอากาศขณะปะทะกับพื้นผิวจะมีรูปร่างแบน โดยจะมีการกักเก็บพลังงานในรูปของแรงตึงผิว เมื่อปะทะกับพื้นผิวพลังงานนี้จะถูกปลดปล่อย และเข้าสู่ช่วงที่สองที่ฟองอากาศ

จะกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง ฟองอากาศจะมีรูปร่างกลมและพลังงานที่ถูกกักเก็บในรูปของแรงตึงผิวในตอนแรกจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ จากนั้นฟองอากาศจะเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง และเข้าสู่ช่วงที่สามที่ฟองอากาศจะเคลื่อนที่บนพื้นผิว และพบว่าในช่วงแรกที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวและในช่วงที่สองฟองอากาศกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้งจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้โดยเฉพาะในช่วงแรก ต่อมา Donoghue และคณะ [9] ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนสำหรับฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวในน้ำ พบว่าบริเวณที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือบริเวณที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวโดยตรง หลังจากนั้นฟองอากาศจะเกิดการกระดอนออกจากพื้นผิว และน้ำในบริเวณรอบจะถูกดึงและก่อให้เกิดการหมุนวนปะทะพื้นผิวซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวด้วยน้ำผสมฟองอากาศ Choo และ Kim [10] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและคุณลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศจากหัวฉีดแบบท่อในกรณีที่อากาศอยู่รอบลำเจ็ท โดยศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0 ถึง 0.9 ที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงผนังถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จากผลการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3

ฟองอากาศจะมีรูปร่างบิดเบี้ยวและไม่ต่อเนื่อง โดยรอบฟองจะเป็นน้ำ ต่อมาในช่วง 0.4 ถึง 0.5 ฟองอากาศมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนเคลื่อนที่ในท่อน้ำ และในช่วงสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม 0.5 ถึง 0.9 จะมีลักษณะการไหลแบบวงแหวนกระสุน ซึ่งน้ำจะไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ ซึ่งบริเวณกลางท่อจะเป็นอากาศ ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนพบว่า ค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ดี้ที่เจ็ทไหลปะทะมีค่าสูงสุด เมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมมีค่า 0.2 ถึง 0.3 โดยในช่วงแรกที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม เท่ากับ 0.1 พบว่าให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 30% เมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ และในช่วง 0.1 ถึง 0.3 พบว่าค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ดี้ที่เจ็ทไหลปะทะเพิ่มขึ้นสูงสุดตามลำดับ เนื่องจากมีฟองอากาศมารบกวนการไหลของเจ็ทน้ำ ซึ่งช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และในช่วงสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม 0.4 ถึง 0.9 พบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ เนื่องจากอากาศส่วนใหญ่อไหลปะทะบนพื้นผิว

Friedrich และคณะ [11] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ดี้ที่จุดพุ่งชน (Stagnation point) สำหรับเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศจากหัวฉีดแบบท่อในกรณีที่อากาศอยู่รอบลำเจ็ท ในการทดลองกำหนดให้อัตราการไหล

ของน้ำค้างที่ และเพิ่มอัตราการไหลของอากาศโดยกำหนดสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.9 ที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงผนังถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์ที่จุดพุงชนกับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5 พบว่าค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรง เนื่องจากลักษณะการไหลในช่วงนี้จะมีลักษณะการไหลแบบน้ำผสมฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเป็นผลทำให้จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นตาม ช่วงที่สองที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.8 พบว่าค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซโพเนนเชียล ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดและช่วงที่สามที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.9 พบว่าค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์มีค่าลดลง เนื่องจากการไหลมีปริมาตรของอากาศมากเกินไป จึงส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง

Glaspell และคณะ [12] ศึกษาการใช้เจ็ทพุงชนพื้นผิวโดยใช้น้ำผสมกับฟองอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พวกเขากำหนดเงื่อนไข

ของระยะที่เจ็ทพุงชนพื้นผิวตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.51 และค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.3 ถึง 0.8 จากการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นที่การลดลงของระยะที่เจ็ทพุงชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นได้ดีบริเวณจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) Baghel และคณะ [13] ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำมันพื้นผิวโค้ง พวกเขากำหนดเงื่อนไขระยะของเจ็ทพุงชนเท่ากับ 4 ภายใต้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,036 ถึง 42,590 จากการทดลองพบว่า ผลของพื้นผิวโค้งทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดหยุดนิ่ง ในขณะที่ Alnak และคณะ [14] ศึกษาการใช้เจ็ทพุงชนโดยใช้น้ำในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทรงกระบอก พวกเขากำหนดเงื่อนไขการทดลองและกำลังการไหลที่ระยะพุงชนของเจ็ทเท่ากับ 4, 6 และ 10 ตามลำดับ ในขณะที่กำหนดค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงถึง 20000 จากการทดลองพวกเขาพบว่า การถ่ายเทความร้อนลดลงที่การเพิ่มขึ้นของระยะพุงชนและยังลดการปะทะของลำเจ็ทบนพื้นผิวทรงกระบอก และยังพบว่าที่ระยะพุงชนเท่ากับ 4 ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ไม่นานมานี้ Aroonrujiphan และ Nuntadusit [15] ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนบนพื้นผิวโดยใช้น้ำผสมฟองอากาศ พวกเขา กำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0 ถึง 0.7 ที่ระยะพุงชนเท่ากับ 2 โดยกำหนดค่าตัวเลขเรย์โนลด์คงที่ที่ 24,000 ในการทดลองได้ใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน จากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราการไหล

เชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.2 ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 33% เมื่อเทียบกับที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0

จากผลการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะเป็นเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบรอบลำเจ็ทเป็นอากาศ (แบบ Free-surface jet) แต่ยังไม่มีการศึกษาเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบรอบลำเจ็ทเป็นน้ำ (แบบ Submerged jet) โดยทั่วไปแล้วเจ็ทของไหลพุ่งชนต่างชนิดกัน มีผลทำให้โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนต่างกัน และการศึกษาโดยการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนโดยส่วนใหญ่ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนพื้นผิวพุ่งชน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งเฉพาะจุดเท่านั้น [10- 15]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยลักษณะของหัวฉีดเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) พิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน และศึกษาผลของการเติมอากาศผสมในเจ็ทน้ำปริมาณน้อย ในการศึกษาได้บันทึกภาพพฤติกรรมของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศและวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อระบายความร้อน

2. วิธีการวิจัย

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท

(Pipe nozzle) โดยน้ำจะไหลออกจากท่อเจ็ทที่ทำจากท่ออะคริลิกในห้องทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D = 9.5 \text{ mm}$ จากนั้นจะไหลพุ่งชนกับพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยมีน้ำเป็นของไหลที่อยู่บริเวณรอบของลำเจ็ท ในการทดลองจะกำหนดให้การไหลของเจ็ทเป็นแบบปั่นป่วน มีเลขเรย์โนลด์สของน้ำ $Re = 2.4 \times 10^4$ (พิจารณาจากอัตราการไหลของน้ำและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท) หรือมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ปั๊มตู้ปลา และกำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 0.0 และ 1.0 ลิตรต่อวินาที หรือสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0 และ 0.1 ตามลำดับ สำหรับการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำกับอากาศ

สำหรับเลขเรย์โนลด์สของน้ำของการไหลแบบสองสถานะในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงการไหลแบบ Bubbly flow [16] จึงสามารถคำนวณจากสมการ

$$Re_w = \frac{4\rho_w \dot{Q}_w}{\pi D \mu_w} \quad (1)$$

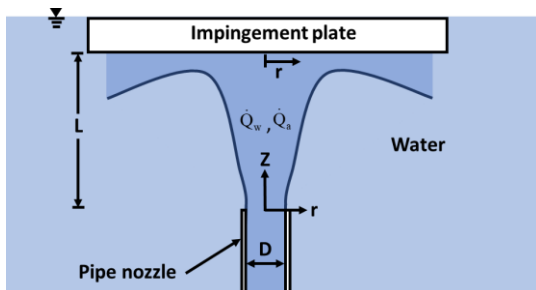
โดยที่ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 $\dot{Q}_w$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (m^3/s)
 μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของน้ำ (kg/m.s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท (m)

และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมคำนวณจากสมการ

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_w + \dot{Q}_a} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{Q}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (L/min)

$\dot{Q}_w$ คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (L/min)



รูปที่ 1 โมเดลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา น้ำที่อยู่ในถังพักน้ำ (Reservoir tank) ซึ่งมีชุดท่อทองแดงที่มีสารทำความเย็นไหลผ่านจุ่มอยู่เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำ จากนั้นน้ำจะถูกดูดเข้าปั๊มน้ำเข้าสู่ถังสำหรับควบคุมอุณหภูมิ น้ำ ซึ่งจะติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้อุณหภูมิของเจ็ทน้ำคงที่ระหว่างการทดลอง ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตารีเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ในขณะที่อากาศจะถูกส่งจากปั๊มลมเข้าสู่ชุดวัดความชื้นและวาล์วปรับความดัน (ในการทดลองปรับที่ความดันเกจ 5.0 bar) จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตารีเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ต่อมาน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเวนจูรี

เพื่อสร้างของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ โดยในการทดลองจะวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนการผสมที่ท่อเวนจูรีด้วยหัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100 และกำหนดอุณหภูมิของน้ำและอากาศที่ $28 \pm 0.1^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิในห้องทดลองมีค่าเท่ากับ $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ จากนั้นของไหลที่เป็นน้ำผสมพองอากาศจะไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบต่อไป

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของส่วนทดสอบและผนังวัดการถ่ายเทความร้อน โดยของไหลที่เป็นน้ำผสมพองอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเจ็ทที่มีความยาวท่อ 1 เมตร เพื่อให้เกิดการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow) ก่อนไหลออกจากท่อเจ็ท จากนั้นของไหลจะไหลออกจากท่อเจ็ทเข้าพุ้งชนกับพื้นผิวของผนังวัดการถ่ายเทความร้อนที่วางในแนวระดับเหนือท่อเจ็ท จากนั้นเจ็ทที่พุ้งชนและไหลบนพื้นผิวของผนังจะไหลออกจากส่วนทดสอบ ไหลกลับเข้าสู่เข้าสู่ถังพักน้ำและหมุนเวียนในระบบต่อไปโดยผนังวัดการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นแผ่นสแตนเลส (SUS 304) ที่มีความกว้าง 100 mm ความยาว 100 mm และความหนา 0.03 mm แผ่นสแตนเลสจะถูกยึดเข้ากับแผ่นอะคริลิกและด้านหลังของผนังพุ้งชนประกอบเป็นกล่องสำหรับวัดอุณหภูมิจากด้านหลังของแผ่นที่เจ็ทพุ้งชน

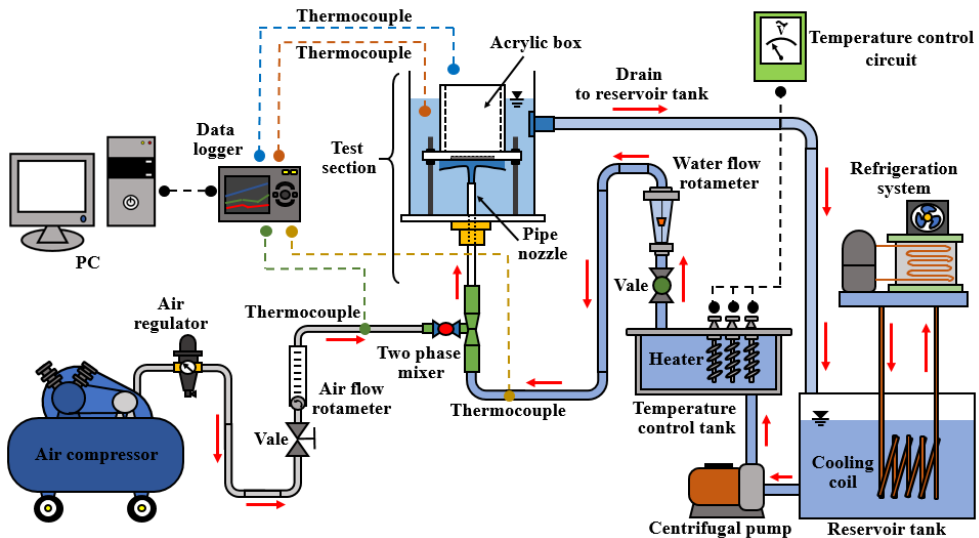
3. วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของพองอากาศที่ปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ้งชนโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ้งชนโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิ

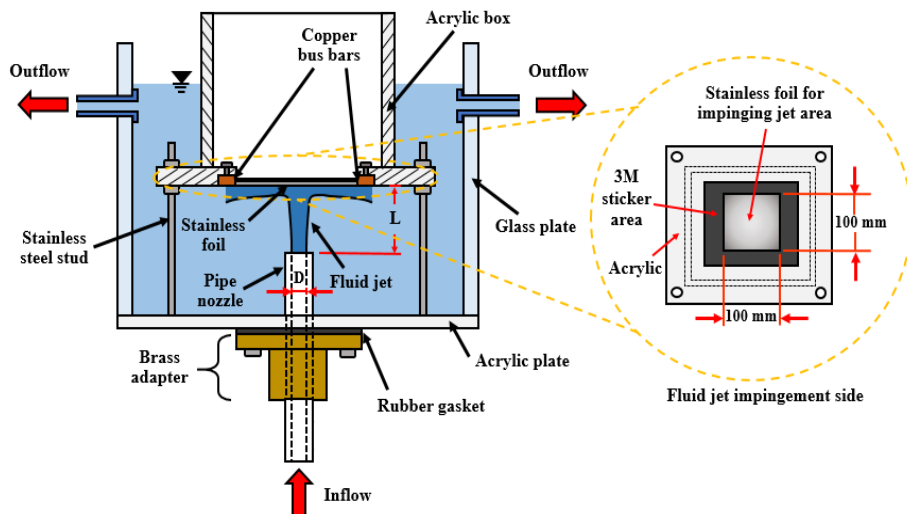
3.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศ

รูปที่ 4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา ลักษณะการไหลของเจ็ทจากปากทางออกของเจ็ทถึง พื้นผิวที่พุ่งชน โดยผนังถังน้ำทำจากแผ่นกระจกใส

ดังแสดงในรูปได้ติดตั้งกล้องความเร็วสูงและหลอดไฟ ให้แสงสว่าง และถ่ายภาพพฤติกรรมของฟองอากาศ ที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทไปจนปะทะพื้นผิว จากด้านข้างของถังน้ำ



รูปที่ 2 รายละเอียดของแผนภาพชุดทดลอง



รูปที่ 3 รายละเอียดของส่วนทดสอบและผนังวัดการถ่ายเทความร้อน

3.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว

รูปที่ 5 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว ดังแสดงในภาพแผ่นสแตนเลสจะถูกขึ้นด้วยแท่งทองแดงทั้งสองด้านบนแผ่นอะคริลิก และใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแท่งทองแดงให้กับแผ่นสแตนเลสเพื่อทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนคงที่ตลอดพื้นผิว โดยบนแผ่นสแตนเลสด้านที่วัดอุณหภูมิจะถูกพันลวดต้านที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี เท่ากับ 0.95 เพื่อใช้ในการถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวและค่าเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว โดยใช้สมการที่ (3) ถึง (8) โดยฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้แก่แผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{input} = \frac{VI}{A} \quad (3)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุงชนพื้นผิว (m^2)

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - (\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{q}_{input}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่แผ่นสแตนเลส (W/m^2)

$\dot{q}_{conv}$ คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)

$\dot{q}_{rad}$ คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)

โดยการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนอันเนื่องมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและ การแผ่รังสีความร้อนจากด้านหลังของแผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\dot{q}_{conv} = h_c (\bar{T}_w - T_{surr}) \quad (5)$$

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - T_{surr}^4) \quad (6)$$

โดยที่ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2.K$) คำนวณจากสมการของกรนีพื้นผิวเรียบที่มีอุณหภูมิคงที่อยู่ในแนวระดับมีค่าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว [17]

ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$)

$\bar{T}_w$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ย

บนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุง

ชน (K)

T_{surr} คือ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (K)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนสามารถคำนวณได้จากสมการ

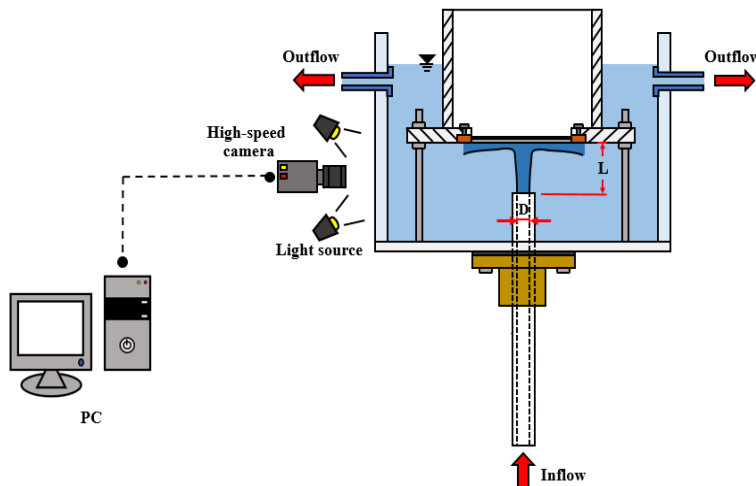
$$h = \frac{\dot{q}_{net}}{T_w - T_{aw}} \quad (7)$$

โดยที่ $\dot{q}_{net}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)
 T_w คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง
 ชนในกรณีที่มีพื้นผิวมีฟลักซ์ความร้อน
 (K)
 T_{aw} คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ท
 พุ่งชนในกรณีที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อน
 หรือไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่น (K)
 สำหรับเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถ
 คำนวณได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k_w} \quad (8)$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 เฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของรูท่อ
 เจ็ท (m)
 k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ
 น้ำ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

ในการทดลองความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ
 ของกล้องอินฟราเรดอยู่ในช่วง $\pm 0.02^\circ\text{C}$ และจาก
 การประเมินหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่า
 เลขนัสเซิลต์โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนพบว่า
 ไม่เกิน 1.5%



รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ท

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ท พุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

รูปที่ 6 แสดงพฤติกรรมการไหลของฟองอากาศที่
 ผสมในลำเจ็ทน้ำ ที่เงื่อนไขสัดส่วนระหว่างอัตราการ
 ไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิง
 ปริมาตรรวมที่ 0.1 ซึ่งมีระยะห่างจากปากทางออก

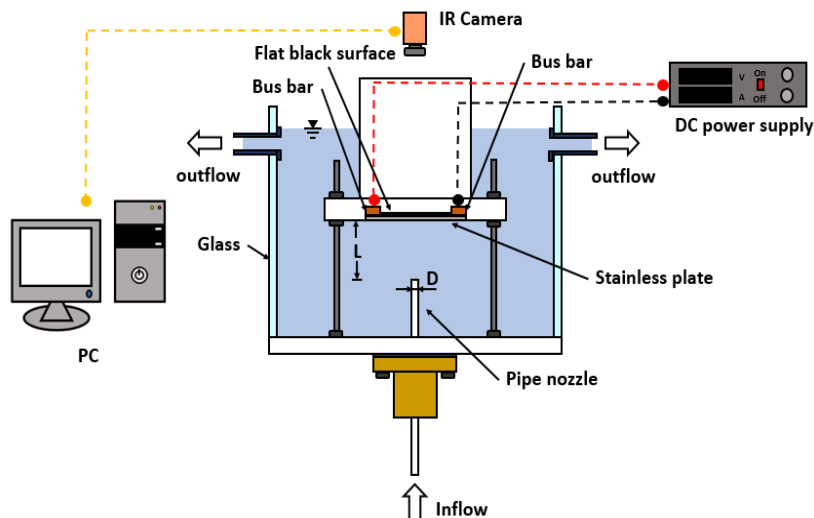
ของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ
 $10D$ ตามลำดับ โดยจะแสดงเวลาที่ $t = t_0 \text{ ms}, t_0 + 75 \text{ ms}$
 และ $t_0 + 150 \text{ ms}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของ
 ฟองอากาศที่ไหลออกจากปากทางออกของเจ็ทจะมี
 ลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กหรือ Bubbly flow
 โดยรูปร่างของฟองอากาศที่พบจะมีรูปร่างกลม และ
 ฟองอากาศแบบไร้รูปร่างผสมปนกัน และมีการชนกัน
 ระหว่างฟองอากาศรวมเป็นก้อนฟองใหญ่

และเมื่อพองขนาดใหญ่นี้เข้าปะทะกับพื้นผิว ทำให้พองอากาศแตกตัวเป็นขนาดพองเล็กอีกครั้ง และมีช่วงเวลาที่พองอากาศขนาดเล็กที่ไม่มีการชนกันปะทะพื้นผิวโดยเมื่อพองอากาศเข้าพุงชนกับพื้นผิวแล้วพองอากาศบางส่วนจะเกิดการแตกตัวอีกรอบและบางส่วนไม่เกิดการแตกตัว โดยต่อมาพองอากาศจะไหลเรียบไปกับพื้นผิวต่อไป

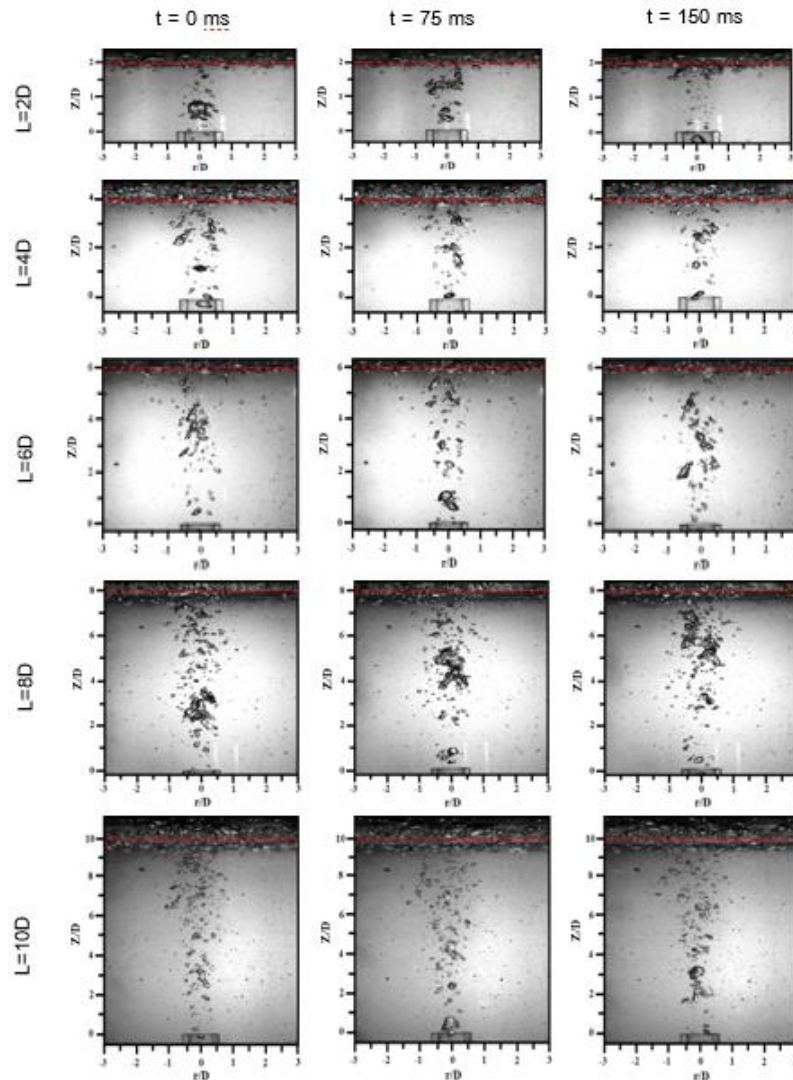
สำหรับผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุงชนพบว่า ที่เงื่อนไขระยะพุงชนต่ำพองอากาศขนาดเล็กในบริเวณแกนกลางของลำเจ็ทจะเกิดการรวมตัวเป็นพองใหญ่ แล้วไหลปะทะพื้นผิว ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะพุงชนพบว่าพองอากาศขนาด

เล็กกระจายตัวในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะไหลปะทะพื้นผิว เนื่องจากผลของความเค้นเฉือนระหว่างลำเจ็ทกับน้ำที่หุ้ดนิ่งรอบลำเจ็ททำให้น้ำด้านของลำเจ็ทขยายตัวออกในแนวรัศมี ส่งผลให้เกิดการรวมของพองอากาศขนาดเล็กกลดลงที่เงื่อนไขระยะพุงชนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่มี $L = 10D$

ในการทดลองเนื่องจากวางแผ่นพุงชนไว้เหนือท่อเจ็ท ดังนั้นจะมีผลของแรงลอยตัวของพองอากาศที่เพิ่มความเร็วในการไหลปะทะพื้นผิว โดยพองอากาศที่มีขนาดเล็กจะมีแรงลอยตัวต่ำกว่าพองอากาศที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 5 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว



รูปที่ 6 ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม เท่ากับ 0.1 โดยมีระยะพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$

4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 7 แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดบนพื้นผิวตามแนวรัศมี สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 โดยมีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$

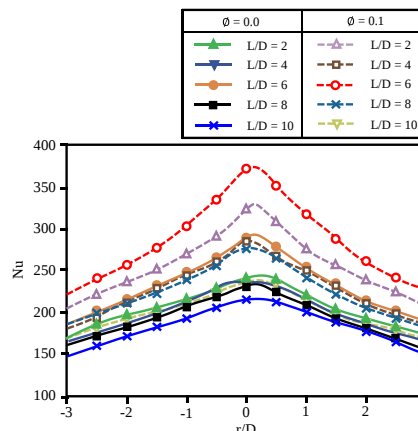
ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่ากรณีที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีแนวโน้มค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดตามแนวรัศมีสูงกว่าในกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 โดยเทียบที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน

รูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ ($Nu_p=0$) โดยเทียบตามแนวแกนรัศมีที่ระยะฟุ้งชนเดียวกัน ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด ที่ระยะฟุ้งชน $L = 2D$ และ $6D$ มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L = 4D, 8D$ และ $10D$ ซึ่งเมื่อคิดเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด และพบว่าที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ มีค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นคิดเป็น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ

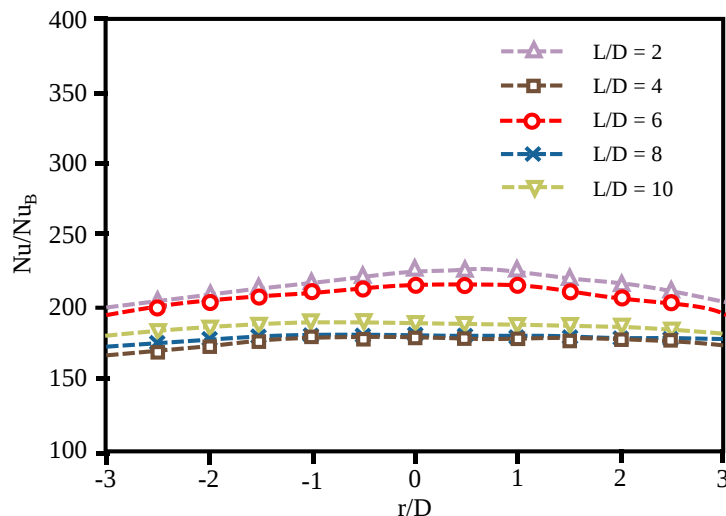
ในกรณีของระยะฟุ้งชน $L = 2D$ การเพิ่มของ Nu เกิดจากโมเมนต์ของเจ็ทที่สูงไหลปะทะพื้นผิว และฟองอากาศเพิ่มความปั่นป่วนในลำเจ็ทก่อนไหลปะทะพื้นผิว และเกิดจากฟองขนาดเล็กที่ไหลรอบวนชั้นขอบเขตบนพื้นผิว และในกรณีของระยะฟุ้งชน $L = 6D$

การเพิ่มของ Nu เกิดจากผลของการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในเจ็ทที่ปะทะพื้นผิวมากกว่ากรณีของระยะฟุ้งชน $L = 4D$ แต่เมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนเป็น $L=8D$ จะทำให้โมเมนต์ในการปะทะพื้นผิวดลดลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มฟองอากาศในลำเจ็ทสามารถช่วยรบกวนชั้นขอบเขตการไหลและเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ทั่วทั้งพื้นผิว

จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 หรือรูปแบบการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับระยะฟุ้งชนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณพื้นผิว โดยจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ทำให้ความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของเจ็ทน้ำผสมอากาศในกรณีที่รอบลำเจ็ทเป็นอากาศ [1]



รูปที่ 7 ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม และระยะฟุ้งชนต่าง ๆ บนพื้นผิวตามแนวรัศมี



รูปที่ 8 อัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับ อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับที่ 0.0 (Nu / Nu_B) บนพื้นผิวตามแนวรัศมี

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเท ความของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่สัดส่วนระหว่าง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีรูปแบบการไหล ที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กหรือ Bubbly flow และที่เงื่อนไขระยะพุ่งชนต่ำ ฟองอากาศขนาดเล็กในบริเวณแกนกลางของลำเจ็ทจะเกิดการรวมตัว เป็นฟองใหญ่ แล้วไหลปะทะพื้นผิว ในขณะที่เมื่อเพิ่ม ระยะพุ่งชนพบว่าฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวใน แนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นก่อนที่ไหลปะทะพื้นผิว ส่งผลให้ เกิดการรวมของฟองอากาศขนาดเล็กกลดลงที่เงื่อนไข ระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณี L = 10D

2. การเติมฟองอากาศในลำเจ็ทน้ำที่เงื่อนไข สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 ที่ระยะ พุ่งชน L = 2D, 4D, 6D, 8D และ 10D สามารถเพิ่ม ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อ เทียบกับกรณีของเจ็ทน้ำพุ่งชน โดยเฉพาะกรณีที่ระยะ พุ่งชน L=2D และ 6D เกิดจากพฤติกรรมของ ฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดการรวมตัวกันเป็นฟอง ขนาดใหญ่แล้วไหลปะทะพื้นผิว

3. การไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศที่ สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 มีส่วน ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน สำหรับระยะพุ่งชนที่ต่าง ๆ ซึ่งฟองอากาศที่ปะทะกับ พื้นผิวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณพื้นผิว

โดยจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ทำให้ความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยหลังปริญญาเอก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yeh LT. Review of heat transfer technologies in electronic equipment. *Journal of Electronic Packaging*. 1995; 117(4): 333-9.
- [2] Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes, *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*. 2001; 24 (2): 122–41.
- [3] Polat S. Heat and mass transfer in impingement drying, *Drying Technology*. 1993; 11(6): 1147–76.
- [4] Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1993; 6(2): 111–34.
- [5] Han B, Goldstein RJ. Jet-impingement heat transfer in gas turbine systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2001; 934(1): 147–61.
- [6] Zuckerman N and Lior N. Jet impingement heat transfer: physics, correlations and numerical modeling. *Advances in Heat Transfer*. 2006; 39: 565–631.
- [7] Barewar SD, Tawri S, Chougule SS. Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*. 2019; 136: 1-10.
- [8] Donoghue DB, Albadawi A, Delauré YMC, Robinson AJ, Murray DB. Bubble impingement and the mechanisms of heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 71: 439-50.
- [9] Donoghue DB, Albadawi A, Delauré YMC, Robinson AJ, Murray DB. Mechanisms of heat transfer for axisymmetric bubble impingement and rebound. *Heat and Mass Transfer*. 2018; 54: 2559-70.
- [10] Choo K, Kim SJ. Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53: 5692-9.

- [11] Fredrich BK, Glaspell AW, Choo K. The effect of volumetric quality on heat transfer and fluid flow characteristics of air-assistant jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 101: 261-6.
- [12] Faghri A, Zhang Y. Two-phase flow and heat transfer. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*. 2006; 853-949.
- [13] Glaspell AW, Rouse VJ, Friedrich BK, Choo K. Heat transfer and hydrodynamics of air assisted free water jet impingement at low nozzle-to-surface distances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 132: 138–42.
- [14] Baghel BK, Sridharan A, Murallidharan JS. Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 164: 120487.
- [15] Alnak CDE, Varol Y, Firat M, Oztop HF, Ozalp C. Experimental and numerical investigation of impinged water jet effects on heated cylinders for convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019; 135: 493–508.
- [16] Aroonrujiphan C, Nuntadusit C. Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet. *Journal of Advance Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 74(1): 68–80.
- [17] Cengel YA, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Natural Convection*. 2015; 533-5.

ข้อแนะนำในการส่งต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

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

ต้นฉบับบทความ

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

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

โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

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

ชื่อบทความภาษาไทย Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

ชื่อบทความภาษาอังกฤษ Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ควรปฏิบัติตามคำแนะนำอย่างเคร่งครัด บทคัดย่อควรมีเพียงย่อหน้าเดียวที่อธิบายถึง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และสรุป ไม่ควรเกิน 300 คำ คำหลักที่เป็นภาษาอังกฤษให้ตัวอักษรคำแรกเป็นตัว พิมพ์ใหญ่ คำในลำดับถัดไปเป็นตัวพิมพ์เล็ก

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

Abstract

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

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

1. บทนำ

บทความนี้แสดงตัวอย่างแนวทางการเตรียมต้นฉบับของคุณเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น และโปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Window ความยาวของต้นฉบับจะต้องไม่เกิน 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) ส่วนหัวข้อย่อยให้เขียนตามตัวอย่าง ดังรายการต่อไปนี้

1. รายการแรกในรายการนี้

2. รายการที่สอง

2.1. รายการย่อย

3. รายการสุดท้าย

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

1. บทนำ

2. วิธีการวิจัย

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

4. สรุป

5. กิตติกรรมประกาศ

6. เอกสารอ้างอิง

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความชิดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

ชื่อผู้แต่งให้พิมพ์ได้ชื่อบทความ จัดชื่อผู้แต่งให้อยู่ชิดทางกรอบซ้าย ใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด ในกรณีมีผู้ทำวิจัยหลายท่านจากหน่วยงานต่างกันให้กำกับด้วยก¹⁾, ²⁾ ไว้หลังชื่อ สำหรับ Corresponding ให้ใส่เครื่องหมาย *กำกับไว้ท้ายชื่อ สถานที่ติดต่อให้พิมพ์ที่อยู่หน่วยงาน รหัสไปรษณีย์ ประเทศ พิมพ์ได้ชื่อผู้แต่งใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด จัดชิดทางกรอบซ้าย

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้น พิมพ์ย่อหน้าใหม่ ให้พิมพ์บทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพิมพ์บทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ หรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและ สมการจะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ขีดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

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

7.2. รูปภาพและตาราง

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

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

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

ตารางที่ 1
ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

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

ตารางที่ 2
ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

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

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็น
คล้ายตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น
เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัย
บางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจ
นำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมี
ความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการ
ตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่ง
บทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุน
สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมี
ความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการ
ตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่ง
บทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแนวคูเวอร์
(Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

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

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของ
บทความ ใช้ระบบตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับ
ของเอกสารที่มีการอ้างถึงในเนื้อหาและหมายเลขที่
อ้างถึงในเนื้อเรื่อนั้นจะต้องตรงกับหมายเลขที่มี
การกำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ตัวเลข
อารบิกในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิง
ในบทความ เช่น [1] หรือ [2-4, 8, 10] หมายถึงอ้างถึง
ลำดับผู้แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดย
เรียงลำดับจากหมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่
สุดท้าย ตามการอ้างอิงการเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่องเฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น

1. การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

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

2. 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 ขจรชีพพันธุ์งาม. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวด้วยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 2553; 18(3): 20-6.

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

3. การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

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

[6] สิริประภา แพงคำแหง. การลดปริมาณสีย้อมผ้าไหมโดยการประยุกต์ใช้หลักการเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดเล็ก. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2553.

4. 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 พัทรี หอวิชิตร์ และ
สุนนา ราชบุรุษภักดี. การจัดการการใช้น้ำ
สำหรับกระบวนการย้อม ในอุตสาหกรรม
ผลิตพรมตามแนวทางเทคโนโลยีสะอาด.
การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่
ที่ 14, 27-29 พฤษภาคม 2558, จังหวัด
เชียงใหม่; 2558.

5. การอ้างอิงเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

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