

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol.9 No.2 July — December 2023

Research Article

Design and Development of Electric Utility Vehicle 87

Wiroon Monatrakul Chonlada Yodying Somsuk Trisupakitti

Tin Boonmee Jomsup Voranavin and Kantapong Khaeso

The Studies of Method for Setup Boundary Conditions for Vehicle Stability 103

Testing on Tilting Platform using Finite Element Analysis

Jakkree Wichairahad Chayarak Thanee Tikakul and Paween Kriangkasem

The study of temperature effect on %DRC measurement accuracies using 116

a Six-port Reflectometer technique at frequencies 1,1.5 and 2.16 GHz

Saran Tantiwit Mitchai Chongcheawchamnan and Sahapong Somwong

The use of simple and cheap IOT to improve the management system 131

in the evaporative swine house

Somkuan Vaodee and Apichart Artnaseaw

A Study of Optimization Drying for Hemp by Computational Fluid 143

Dynamic Method Under Vacuum Conditions

Chatree Pentamwa Apichart Artnaseaw Kriengkrai Nabudda

and Somkuan Vaodee

Mathematical Modelling for Predicting Electrical Energy Consumption 153

Heat Rejection in a 3-Level Refrigeration Plant for Beverage Manufacturing Industry

Assawin Namsert and Thana Radpukdee



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร

วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี

การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol.9 No.2 July – December 2023

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2566

ISSN 2408-0985

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

กองบรรณาธิการ

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

บรรณาธิการ

ฝ่ายจัดการวารสาร

สำนักงาน

รศ.ดร. รัชพล สันติวรการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

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

Production team Ms.Bhunyisa Chaiyabot

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

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

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

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

ขอบเขตของเนื้อหาที่ตีพิมพ์ในวารสาร ประกอบด้วยบทความที่เกี่ยวข้อง ในประเด็นดังต่อไปนี้

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

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

บทบรรณาธิการ

เรียน ท่านสมาชิกวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
และผู้อ่านทุกท่าน



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (Farm Engineering and Automation Technology Journal: FEAT Journal) ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2566 ฉบับนี้เป็นปีที่ 9 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 6 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

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

รองศาสตราจารย์รัชพล สันติวรการ

บรรณาธิการ

ratchaphon@kku.ac.th

22 ธันวาคม 2566

จริยธรรมของการตีพิมพ์ (Publication Ethics)

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

บทบาทหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผลงานของผู้เขียนต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่นหากมีการนำข้อความใดๆ มาใช้ในผลงานของตนเองรวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความ
3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสาร
4. ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคนต้องเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินการวิจัยจริง
5. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมานำเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง
6. ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ๆ หลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติแล้ว
7. หากมีการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ผู้เขียนจะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองตามแต่กรณีและระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

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

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

บทความวิจัย

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบยานยนต์อเนกประสงค์ไฟฟ้า	87
วิรุณ โมนะตระกูล ชลดา ยอดยิ่ง สมสุข ไตรศุภกิตติ ดิณฑ์ บุญมี จอมทรัพย์ วรรณวิน และ กันตพงษ์ แซ่โล	
การศึกษาวิธีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดสอบเสถียรภาพของยานยนต์บนพื้นเอียงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	103
จักรี วิชัยระหัด ชยารักษ์ ธาณี ดิชะกุล และ ปวิณ เกรียงเกษม	
ผลกระทบของอุณหภูมิในน้ำยางที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด %DRC ด้วย SPR ที่ความถี่ 1, 1.5, 2.16 GHZ	116
ศรัณย์ ดันติวิชช์ มิตรชัย จงเขียวชำนาญ และ สหพงศ์ สมวงศ์	
การใช้ IOT อย่างง่ายและราคาถูกเพื่อปรับปรุงการจัดการในโรงเรือนสุกรขุนระบบปิด	131
สมควร แววดี และ อภิชาติ อัจฉนาเสียว	
การศึกษาความเหมาะสมของการอบแห้งสำหรับพืชัญชงโดยวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้สภาวะสุญญากาศ	143
ชาติรี เป็นตามวา อภิชาติ อัจฉนาเสียว เกรียงไกร นาบุตรดา และ สมควร แววดี	
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนจากการทำงานของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม	153
อัศวิน นามเสวีรัฐ และ ธนา ราษฎร์ภักดิ์	

Research Article

- | | |
|---|---------|
| Design and Development of Electric Utility Vehicle | 87 |
| <i>Wiroon Monatrakul Chonlada Yodying Somsuk Trisupakitti</i> | |
| <i>Tin Boonmee Jomsup Voranavin and Kantapong Khaeso</i> | |
|
The Studies of Method for Setup Boundary Conditions for Vehicle Stability |
103 |
| Testing on Tilting Platform using Finite Element Analysis | |
| <i>Jakkree Wichairahad Chayaruk Thanee Tikakul and Paween Kriangkasem</i> | |
|
The study of temperature effect on %DRC measurement accuracies using a Six-port |
116 |
| Reflectometer technique at frequencies 1,1.5 and 2.16 GHz | |
| <i>Saran Tantiwit Mitchai Chongcheawchamnan and Sahapong Somwong</i> | |
|
The use of simple and cheap IOT to improve the management system |
131 |
| in the evaporative swine house | |
| <i>Somkuan Vaodee and Apichart Artnaseaw</i> | |
|
A Study of Optimization Drying for Hemp by Computational Fluid |
143 |
| Dynamic Method Under Vacuum Conditions | |
| <i>Chatree Pentamwa Apichart Artnaseaw Kriengkrai Nabudda</i> | |
| <i>and Somkuan Vaodee</i> | |
|
Mathematical Modelling for Predicting Electrical Energy Consumption and |
153 |
| Heat Rejection in a 3-Level Refrigeration Plant for Beverage Manufacturing Industry | |
| <i>Assawin Namsert and Thana Radpukdee</i> | |



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบยานยนต์อเนกประสงค์ไฟฟ้า

Design and Development of Electric Utility Vehicle

วิรุณ โมณะตระกูล¹⁾ ชลดดา ยอดยิ่ง^{1)*} สมสุข ไตรศุภกิตติ¹⁾ ดินห์ บุญมี²⁾จอมทรัพย์ วรนาวิน³⁾ และ กันตพงษ์ แซ่ใส²⁾Wiroon Monatrakul¹⁾ Chonlada Yodying^{1)*} Somsuk Trisupakitti¹⁾Tin Boonmee²⁾ Jomsup Voranavin³⁾ and Kantapong Khaeso⁴⁾¹⁾ สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม²⁾ โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย เลขที่ 88 ถนนตรีเพชร แขวงวังบูรพาภิรมย์ เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร³⁾ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา 227 ถ. พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร⁴⁾ ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹⁾ Innovative Technology Machinery Program, Rajabhat Maha Sarakham University²⁾ Suankularb Wittayalai School, No. 88, Tri Petch Road, Wang Burapha Phirom Subdistrict, Phra Nakhon District, Bangkok³⁾ Trim Udom Suksa School, No. 227, Phayathai Road, Pathum Wan Subdistrict, Pathum Wan District, Bangkok⁴⁾ Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University

Received: 18 December 2019

Revised: 26 November 2021

Accepted: 17 May 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างยานพาหนะไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือโครงสร้างที่มีมาตรฐานความปลอดภัย น้ำหนักเบา และชุดต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า จากการออกแบบและสร้างทำให้ได้รถไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบท่อโครงถัก (tube space frame chassis) มีค่าความปลอดภัย (F.O.S) เท่ากับ 5.44 โดยใช้ชุดต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 60 โวลต์ขนาด 3 แรงม้า และแหล่งป้อนกระแสไฟใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 60 แอมป์-ชั่วโมง 5 ลูก ต่อแบบอนุกรม ผลการทดสอบสมรรถนะใช้

งาน สามารถวิ่งได้ระยะทาง 45 km ความเร็วสูงสุด 36 km/h รับน้ำหนักบรรทุกได้ 600 kg และขึ้นเนินได้ 30 องศา ระยะเวลาในการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ 7 ชั่วโมง สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตามความต้องการของชุมชนหรือหน่วยงานที่ต้องการระบบขนส่งสาธารณะขนาดเล็ก

คำสำคัญ: รถไฟฟ้า โครงสร้างแบบท่อโครงถัก ยานพาหนะอเนกประสงค์

Abstract

This research was to design and construct of Utility Electrical Vehicle. These aims of design were safety chassis, light-weight body and driven by electrical engine. Therefore this paper presents the design and construct of chassis made by tube space frame and the factor of safety (F.O.S) was 5.44 calculated by the commercial program in finite element. The driven unit was selected to be 3hp DC-motor 60 volts and the electrical currency was supplied by 5×12 volt 60 Ah battery cell in series. The result shown that the performance of the vehicle: distance 40 km, top speed 38 km/h, loading weight 600 kg (10 persons), 30 degree of uphill slope and recharging time were 7 hours. In addition this chassis modular can be modified for many applications in small – public transportation system all of government and private sectors.

Keywords: Electrical vehicle: Tube space frame chassis: Utility vehicle

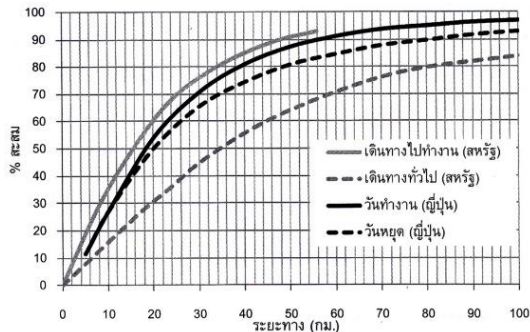
1. บทนำ

ภาวะโลกร้อนอันเป็นผลจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนและก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศในรูปแบบของการเผาไหม้เชื้อเพลิง ส่งผลให้เกิดการกักเก็บความร้อน มาสู่การเพิ่มอุณหภูมิของโลก และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศธรรมชาติ [1] แหล่งที่มาของก๊าซเรือนกระจกของไทย 4 อันดับแรก คือ ภาคพลังงาน (253 ล้านตันคาร์บอนฯ ต่อปี) ซึ่งคิดเป็น 70% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของไทย ตามด้วยภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะนาข้าวและการทำปศุสัตว์ (52 ล้านตันคาร์บอนฯ) ภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการผลิตซีเมนต์ (31 ล้านตันคาร์บอนฯ) และภาคของเสีย (17 ล้านตันคาร์บอนฯ) หลังจากไทยเข้าร่วมความตกลงปารีสว่าด้วยการควบคุมอุณหภูมิของโลกไม่ให้สูงเกิน 2 องศาและการจำกัดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ไทยก็เริ่มดำเนินมาตรการต่าง ๆ ตามพันธสัญญา ซึ่งจากการประเมินเมื่อปี 2562 พบว่าไทยสามารถลดก๊าซเรือนกระจกจากภาคพลังงานและการขนส่งได้ 64.2 ล้านตันคาร์บอนจากปีฐานในปี 2548 หรือลดลง 17.5% จากปริมาณที่ปล่อยในปี 2548 ซึ่งถือว่าบรรลุเป้าหมายในระยะแรก [2]

ในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้ตระหนักถึงปัญหาในเรื่องของการปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental protection) อีกทั้งราคาน้ำมันที่ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ประกอบการหันมาคิดค้นสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อให้รถยนต์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly) จนพัฒนามาเป็นรถยนต์ระบบไฟฟ้า (Electric Vehicle) ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน โดยไม่ใช้เครื่องยนต์สันดาป

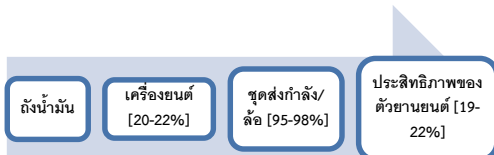
ภายในอีกต่อไป จึงทำให้สามารถแก้ปัญหาในเรื่องของสิ่งแวดล้อม และการปรับตัวของราคาน้ำมันที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ทั้งหมด ซึ่งในประเทศไทยมีการจำหน่ายรถยนต์ระบบไฟฟ้า (EV) หลากหลายแบรนด์ และรถยนต์ระบบไฟฟ้าเป็นนวัตกรรมใหม่ล่าสุด ที่ถูกพัฒนาให้สามารถสร้างประโยชน์และแก้ปัญหาได้ เพียงแต่สิ่งอำนวยความสะดวกในการใช้รถยนต์ระบบไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นยังไม่สามารถรองรับการใช้งานของรถยนต์ระบบไฟฟ้าได้อย่างครอบคลุม เช่น จำนวนสถานีชาร์จไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ราคาของรถยนต์ระบบไฟฟ้าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ระดับเดียวกันที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน และการส่งเสริมของภาครัฐนั้นยังไม่ครอบคลุมสำหรับผู้บริโภคที่ใช้รถยนต์ระบบไฟฟ้าทั้งหมดได้ [3]

ด้วยการเกิดขึ้นของเมืองใหญ่ทั่วโลกในปัจจุบัน จำนวนยานยนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นกลับมีการใช้งานที่กระจุกตัวอยู่ในบริเวณที่จำกัด จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากว่า 70% ของการใช้งานยานยนต์ส่วนบุคคลจำกัดอยู่กับระยะขับที่ไม่เกิน 60 กม. ต่อวัน และสำหรับประเทศในยุโรป การเดินทางมีสัดส่วนมากกว่า 90% ที่มีระยะทางน้อยกว่า 80 กม. ต่อวัน และกว่าครึ่งของการเดินทางจำกัดอยู่ในระยะขับที่เพียง 5 กม. ฉะนั้นเมื่อพิจารณาถึงการใช้งานในเมือง ข้อได้เปรียบของยานยนต์แบบดั้งเดิมต่อยานยนต์ไฟฟ้าในเรื่องระยะทางขับก็ถือได้ว่าคุณค่าลงไป [4]

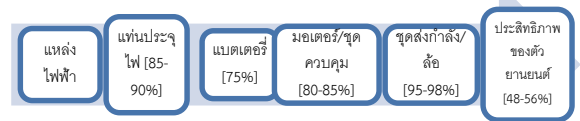


รูปที่ 1 สัดส่วนการใช้งานระยะขี้นยานยนต์ส่วนบุคคลในสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น

จากพัฒนาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่และมอเตอร์ทำให้รถไฟฟ้ามีศักยภาพที่จะขับเคลื่อนได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยพัฒนาการของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ทำให้สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ข้อได้เปรียบในเชิงประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าก็คือ ระบบแบตเตอรี่-มอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบน้ำมัน-เครื่องยนต์แบบสันดาปภายในถึงประมาณ 3 เท่า รถไฟฟ้าขนาดมาตรฐานจะใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.16 กิโลวัตต์-ชม. ต่อ 1 กม. หรือประมาณ 0.50 บาท/กม. ซึ่งต่ำกว่าการใช้น้ำมันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 และตารางที่ 1 [4]



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของยานยนต์สันดาปทั่วไป



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานที่ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์รูปแบบต่าง ๆ

ประเภทรถ	Wh/km
รถยนต์ไฟฟ้าส่วนบุคคลขนาดเล็ก	90
รถยนต์ส่วนบุคคลขนาดเล็ก	130
รถยนต์เนกประสงค์ขนาดเล็ก	150
รถยนต์เนกประสงค์ขนาดใหญ่	200
รถกระบะ	200
รถกอล์ฟ ไฟฟ้า ขนาด 6-4 ที่นั่ง	75
รถมอเตอร์ไซด์	28
รถมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้า	7
รถโดยสารภายใน ขนาด 10 ที่นั่ง	250
รถโดยสารภายใน ขนาด 16 ที่นั่ง (4.5ตัน)	340

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2 [4] แต่เนื่องด้วยจากมีราคาแพงและจำเป็นจะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิต สำหรับประเทศไทยแล้ว แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-น้ำกรดเป็นคำตอบที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในท้องถิ่นที่มีการขนส่งแบบพื้นฐานไม่ซับซ้อนระยะทางไม่มากและต้นทุนการดำเนินการต่ำ สามารถบำรุงรักษาได้ง่าย

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลและองค์ประกอบเชิงยืนยันของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรี พบว่า ราคาเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดในการตัดสินใจ รองลงมาเป็นด้านแนวโน้มของราคาน้ำมัน [5] และยังมีงานวิจัยกล่าวว่าการส่งเสริมการใช้รถประจำทางไฟฟ้ามาใช้ในการขนส่งสาธารณะระหว่างจังหวัดควรมีการผลักดันจากรัฐด้วยนโยบายส่งเสริมและมีการจัดเตรียมสถานีชาร์จไฟระหว่างทางให้เพียงพอ ถึงจะมีความเป็นไปได้ของการใช้รถประจำทางไฟฟ้าสำหรับการขนส่งมวลชนระยะไกล [6] ปัจจุบันมีการพัฒนารถโดยสารไฟฟ้าเกิดขึ้นภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาโครงการพัฒนารถโดยสารประจำทางใช้แล้วขององค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) เป็นรถโดยสารไฟฟ้าเพื่อพัฒนาขีดความสามารถของผู้ประกอบการไทย โดยวิ่งได้ 100 กิโลเมตรต่อการประจุไฟฟ้า และมีความเหมาะสมในการให้บริการเป็นรถโดยสารประจำทางสาธารณะไฟฟ้า มีต้นทุนการพัฒนาต้นแบบประมาณ 7 ล้านบาทต่อคัน และมีการยืดอายุการใช้งานซาการถโดยสารประจำทางที่สิ้นอายุแล้วออกไปอีกอย่างน้อย 15 ปี สถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 72 กิโลวัตต์ มีระยะเวลาในการประจุไฟฟ้ากับต้นแบบรถโดยสารไฟฟ้าจนเต็ม ประมาณ 3 – 4 ชั่วโมง ต้นทุนในการผลิต 300,000 บาทต่อสถานีชาร์จ [8] นอกจากนี้ยังมีรถบัสไฟฟ้า (Electric Bus) ต้นแบบพลังงานไฟฟ้า 100% ความเร็วสูงสุด 120 กิโลเมตร/ชั่วโมง ตัวรถพื้นต่ำขึ้นลงสะดวกสบาย ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเตอรี

260 kw/h ระยะทางการวิ่งประมาณ 250 กิโลเมตร/ต่อการชาร์จ 1 ครั้ง (การชาร์จไฟฟ้าใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง) [8]

ซึ่งปัจจัยโดยรวมเหล่านี้สามารถ นำมาใช้กับชุมชนขนาดกลางถึงเล็กอย่างมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ซึ่งมีพื้นที่ 454 ไร่ ประกอบไปด้วย 8 คณะ 38 อาคาร [9] และมีประชากรหมุนเวียนอย่างหนาแน่นประมาณ 20,000 คนต่อวัน โดยมีรถยนต์และรถจักรยานยนต์เป็นจำนวนมากที่เข้ามาใช้บริการ ทำให้การสัญจรมีความหนาแน่นในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน อาจก่อให้เกิดปัญหาหามลภาวะและอุบัติเหตุตามมา และสภาพถนนเส้นหลักในเขตมหาวิทยาลัยเป็นถนนแอสฟัลต์ติก ระยะทางโดยรวมประมาณ 4 กิโลเมตรเป็นลักษณะกึ่งตาราง โดยเป็นทางสัญจรที่ผ่านโอบล้อมอาคารเรียนและสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งยังไม่มีระบบขนส่งบริการสาธารณะคอยรองรับการดำเนินการสัญจรภายในเขตมหาวิทยาลัยฯ ด้วยองค์ประกอบเหล่านี้ ยานยนต์ไฟฟ้าจะมีบทบาทสำคัญโดยสอดคล้องกับลักษณะและพฤติกรรมของการขนส่งบริการสาธารณะในเขตพื้นที่ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์รูปแบบต่าง ๆ

ประเภทของแบตเตอรี่	ตะกั่ว-น้ำกรด	นิเกิล-เมทัลไฮไดรด์	ลิเทียมไอออน
ความจุพลังงาน Wh/kg	30-40	75-100	110-175
พลังงานต่อปริมาณ Wh/L	54-95	200-300	250-360
กำลังจำเพาะ W/kg	600-800	1000-1500	1500-3000
แรงดันต่อหน่วยย่อย V	2.1	1.2	3.2-3.6
ประสิทธิภาพการประจุไฟ	>80%	70%	>95%
ราคา เหรียญสหรัฐ / กิโลวัตต์ชั่วโมง	35	200-350	400
การคายประจุ	0.3%/วัน	3%/วัน	0.7%/วัน
อายุวัฏจักรใช้งานที่ระดับการคายประจุ 80%	300 - 800	>1000	>2000
เวลาประจุไฟ	8 ชม.	1 ชม.	2-3 ชม.

เพื่อเป็นการตระหนักถึงปัญหาในเรื่องของการปกป้องสิ่งแวดล้อม และแก้ปัญหาในด้านการสัญจรที่มีความหนาแน่นและเร่งด่วนภายในเขตมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาสร้างยานยนต์ไฟฟ้าอเนกประสงค์ต้นแบบ พร้อมทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่อง เก็บข้อมูลพื้นฐานของยานยนต์ต้นแบบ เพื่อการพัฒนาศักยภาพในการพึ่งพาพลังงานสะอาด เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มทางสังคมแต่ยังคงอนุรักษ์ระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ตลอดจนเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำการวิจัยระดับสูงต่อไป

2. วิธีการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 ศึกษาข้อมูลในการออกแบบและพัฒนารถไฟฟ้าเพื่อการขนส่งมวลชน

2.1.2 ออกแบบโครงสร้างพื้นฐานและส่วนประกอบของรถไฟฟ้าและต้นกำลังเพื่อประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นฐาน

2.1.3 ประกอบรถต้นแบบ

2.1.4 ทดสอบและปรับปรุงความแข็งแรงและสมรรถนะในการใช้งาน ได้แก่

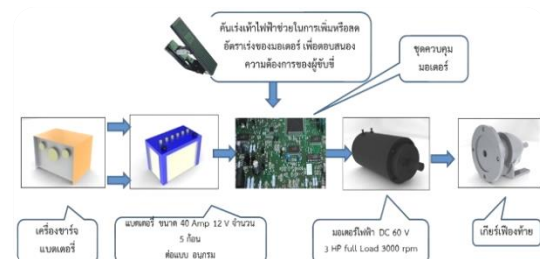
- 1) ความแข็งแรงของโครงสร้าง
- 2) สมรรถนะการใช้งาน
- 3) อัตราสิ้นเปลืองพลังงาน (บาท/กิโลเมตร)

2.1.5. วิเคราะห์และสรุปผล

2.2 กรอบแนวคิดและหลักการ

2.2.1 ระบบขับเคลื่อนและการควบคุม

รถไฟฟ้าในโครงการทำการขับเคลื่อนด้วยล้อหลังโดยการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงส่งกำลังโดยตรงผ่านเกียร์เฟืองท้าย ทำการจัดวางแบตเตอรี่ไว้ตรงจุดกึ่งกลางของตัวโครงสร้างเพื่อการกระจายน้ำหนักที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบอุปกรณ์ขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

ในการเลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสมนั้นต้องมีการคำนวณแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงก่อน โดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักรถและน้ำหนักบรรทุก ระยะทางและความเร็วที่ต้องการ ชุดมอเตอร์ที่เหมาะสมจะเป็นมอเตอร์ขนาด 48 โวลต์ จนถึง 96 โวลต์ กำลังตั้งแต่ 2 กิโลวัตต์ จนถึง 10 กิโลวัตต์ เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ก็จะสูงขึ้นเช่นกัน และจะต้องมีการระบายความร้อนที่ดี เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้วจึงกำหนดขนาดมอเตอร์ตามท้องตลาดที่ใกล้เคียงที่สุด โดยขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1, 2 และ 3 [10]

การคำนวณแรงขับเคลื่อน

$$R_r = K_r W \quad (1)$$

$$R_a = (\rho v^2 A C_d) / 2 \quad (2)$$

$$F = R_t = (R_r + R_a) \quad (3)$$

เมื่อ F แรงขับเคลื่อนตัวรถ
 R_r แรงต้านการขับเคลื่อนจากน้ำหนักรถ
 R_a แรงต้านการขับเคลื่อนทางพลศาสตร์
 W น้ำหนักรถยนต์
 C_d สัมประสิทธิ์แรงดูดอากาศ = 0.29
 K_r สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ = 0.012
 η_t ประสิทธิภาพการส่งกำลัง = 85%
 r รัศมียางรถยนต์
 A พื้นที่หน้าตัดรถยนต์ = 0.8 WH
 H ความสูงของตัวรถ
 ρ ความหนาแน่นของอากาศ = 1.18 kg / m^3
 v อัตราความเร็วรถไฟฟ้า = 13-15 m / sec
 โดยทั้งนี้การคำนวณกำลังของรถไฟฟ้า

เป็นไปตามสมการที่ 4, 5 และ 6 [10]

กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนที่ล้อ

$$P_w = F.v \quad (4)$$

ค่ากำลังพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้า

$$P_m = (100 \times P_w) / \eta_t \quad (5)$$

ค่าแรงบิดของมอเตอร์

$$T_m = (100 \times T_w) / (\eta_t . i_g) \quad (6)$$

ค่าแรงบิดที่ล้อรถ

$$T_w = F.r \quad (7)$$

*โดยที่อัตราทดของเกียร์เฟืองท้ายเทียบกับมอเตอร์
 $i_g = 12.00$

โดยโครงการนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 3 แรงม้า ใช้แรงดัน 60 โวลต์ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ต่อเข้าชุดเฟืองท้ายขับเคลื่อนโดยตรง เมื่อประกอบชุดมอเตอร์เสร็จสมบูรณ์ สามารถทำความเร็วได้ 36 ถึง 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องด้วยเป็นความเร็วที่เหมาะสมกับการสัญจรในเมืองและแหล่งชุมชน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชุดควบคุมและชุดมอเตอร์

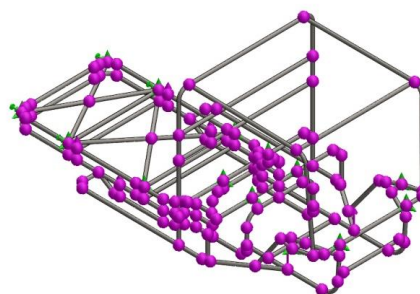
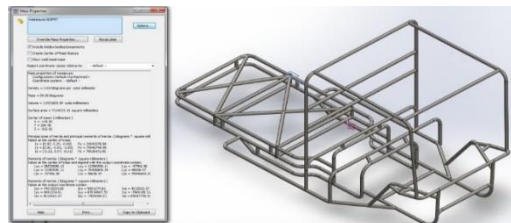
2.2.2 การออกแบบโครงสร้าง และระบบ แบตเตอรี่

วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือ โครงสร้างที่มีมาตรฐานความปลอดภัย น้ำหนักเบา จากการออกแบบและสร้างทำให้ได้รถสามล้อไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบท่อโครงถัก (tube space frame chassis) [11] เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ที่กำลังขับสูง และจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงกระทำในการใช้งานจริงและกระจายแรงภายในโครงสร้างรถ เมื่อโครงสร้างมีความซับซ้อนยากต่อการคำนวณ จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์ทดสอบค่า Stress Displacement Strain และ Factor Of Safety (F.O.S) [12] ค่าที่ได้เหล่านี้จำเป็นในการช่วยตัดสินใจออกแบบโครงแบบอย่างไรถึงจะรับแรงกระทำได้และใช้งานได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความปลอดภัย Factor Of Safety (F.O.S)

ชนิดของแรงที่มากระทำกับชิ้นส่วน	วัสดุที่จะนำมาทำเป็นชิ้นงาน	
	เหล็กเหนียว	เหล็กหล่อ
แรงอยู่นิ่ง	3-4	5-6
แรงเปลี่ยนแปลง	8	10
แรงกระแทกอย่างหนัก	10-15	15-20

ทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีการทดสอบโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์ Solid Works Simulation [13] มีขั้นตอนดังนี้คือ สร้างแบบจำลองรถไฟฟ้า (CAD Model) และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) และกำหนดคุณสมบัติวัสดุในการสร้างรถไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบหาน้ำหนักโครงสร้างรถไฟฟ้า
ด้วยโปรแกรม Solid Work Simulation

โครงสร้างรถไฟฟ้าจะรับภาระน้ำหนักของโครงสร้างและแรงกระทำจากการใช้งานทั้ง ภาระงานสถิตย์ (Static load) และภาระงานพลวัต (Dynamic load) โดยจุดจับยึดของโครงสร้างจะเป็นบริเวณส่งถ่ายแรงของล้อหลังและล้อหน้าเป็นหลักเนื่องจากบริเวณนี้เป็นจุดที่รับแรงกระทำจากท้องถนนส่งถ่ายมายังล้อผ่านเหล็กสปริงแล้วค่อยถึงโครงสร้างหลักเป็นบริเวณที่ไม่มีโมเมนต์กับรถ สำหรับวัสดุที่ใช้คือ Alloy Steel (ss400) ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4 [12]

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ประกอบโครงสร้างรถไฟฟ้า

ชนิดวัสดุ	เหล็กโครงสร้าง
รูปแบบการทดสอบ	linear elastic isotropic
แรงต้านทานการดึง	$6.20122e+008 \text{ N/m}^2$
tensile strength	$7.23826e+008 \text{ N/m}^2$
มอดุลัสของยัง	$2.1e+011 \text{ N/m}^2$
อัตราส่วนปัวซอง	0.28
ความหนาแน่น	7700 kg/m^3
โมดูลัสของแรงเฉือน	$7.9e+020 \text{ N/m}^2$
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	$1.3e-005 \text{ 1/K}$

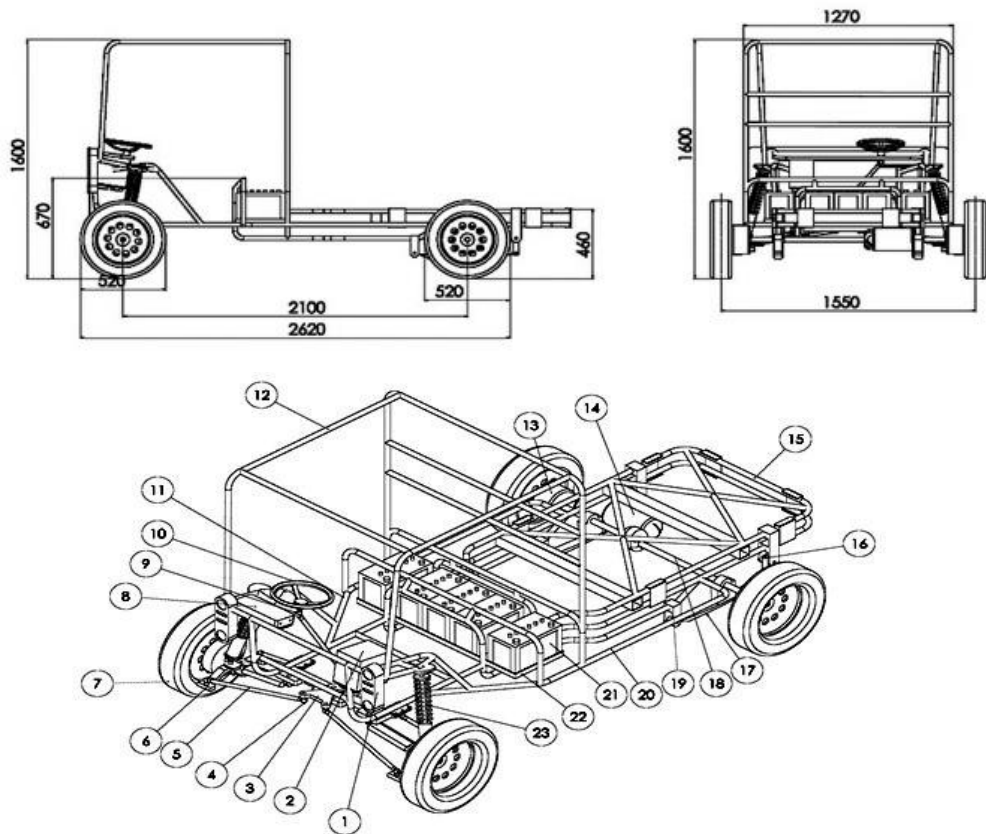
จากคุณสมบัติของแบตเตอรี่ในตารางที่ 2 ทางทีมผู้วิจัยเลือกใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-น้ำกรด ขนาด 12 โวลต์ กระแสตรง 80 แอมป์-ชั่วโมง จำนวนที่ใช้ 5 ลูกในการดำเนินงานเนื่องจากสามารถหาได้ง่าย มีราคาไม่แพง และทำการซ่อมแซมปรับเปลี่ยนได้ง่าย และในการออกแบบระบบประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้เครื่องประจุไฟฟ้าโดยรับไฟ กระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50-60 เฮิรท์ และจ่ายไฟเข้าชุดแบตเตอรี่เป็นระบบกระแสตรง 60 โวลต์ 60 แอมป์-ชั่วโมงในการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 7



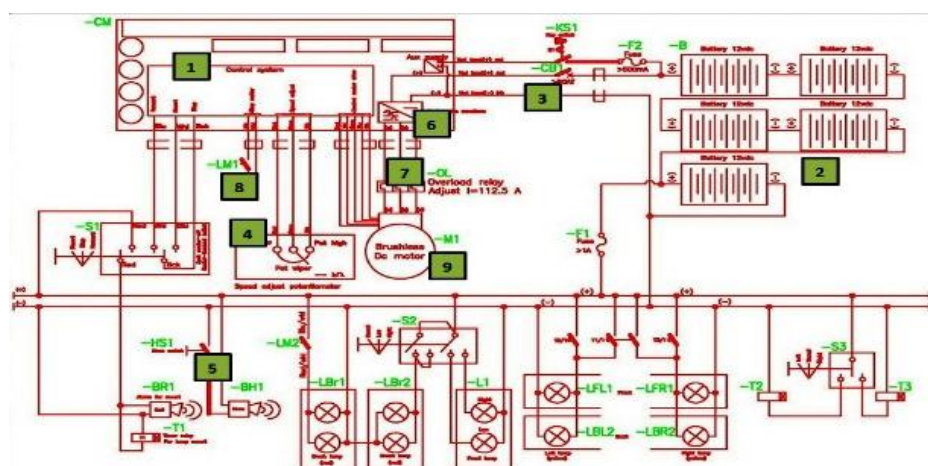
รูปที่ 7 การเลือกใช้แบตเตอรี่และการประกอบติดตั้งเครื่องประจุไฟฟ้า

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 รายละเอียดการออกแบบและสร้างโดยสมบูรณ์ และระบบขับเคลื่อนและการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 8-12

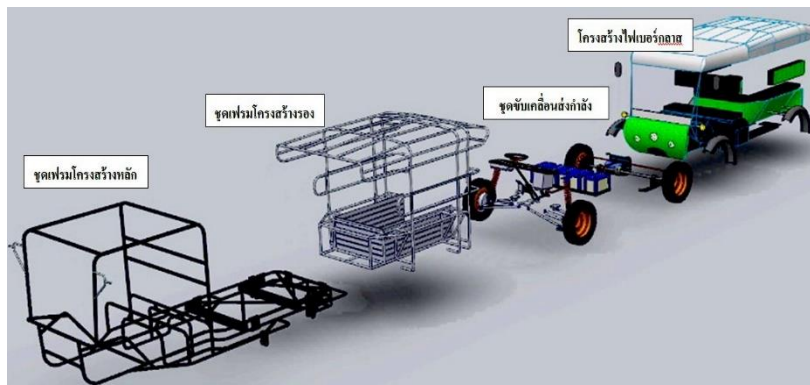


รูปที่ 8 ขนาดมิติโครงสร้างและส่วนประกอบของรถไฟฟ้าในโครงการ



รูปที่ 9 รายละเอียดวงจรควบคุมของรถไฟฟ้าในโครงการ

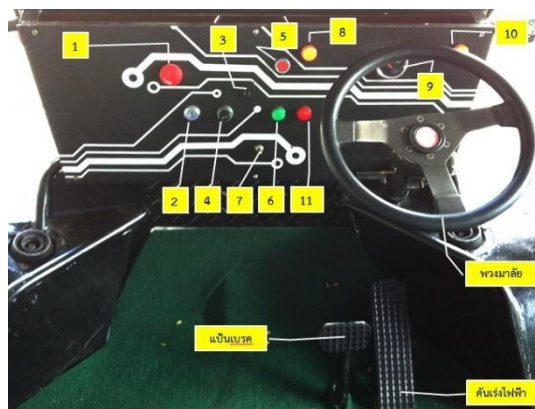
- (1) กล่องควบคุม, (2) แบตเตอรี่, (3) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker), 4) ชูตคั่นแรง,
(5) สวิตช์เบรก, (6) สวิตช์, (7) เมนรีเลย์ และ (8) สวิตช์สัญญาณ



รูปที่ 10 แบบร่างส่วนประกอบหลักของรถไฟฟ้าโดยสมบูรณในโครงการ



รูปที่ 11 รูปแบบรถไฟฟ้าโดยสมบูรณในโครงการ



รูปที่ 12 รถไฟฟ้า – อุปกรณ์ชุดควบคุม

- (1) สวิตช์ปั๊มฉุกเฉิน, (2) สวิตช์กุญแจ, (3) สวิตช์เดินหน้า-ถอยหลัง-เกียร์ว่าง, (4) สวิตช์เปิด-ปิดไฟหน้า, (5) สวิตช์เปิดเสียงแตร, (6) หลอดไฟแสดงการเปิด-ปิดใช้งาน, (7) สวิตช์เปิด-ปิดไฟเลี้ยวซ้ายและขวา, (8) หลอดไฟแสดงการทำงานไฟเลี้ยวซ้าย, (9) เกาต์ค่าแรงดันแบตเตอรี่, (10) หลอดไฟแสดงการทำงานไฟเลี้ยวขวา และ (11) หลอดไฟแสดงการทำงานกดปุ่มฉุกเฉิน

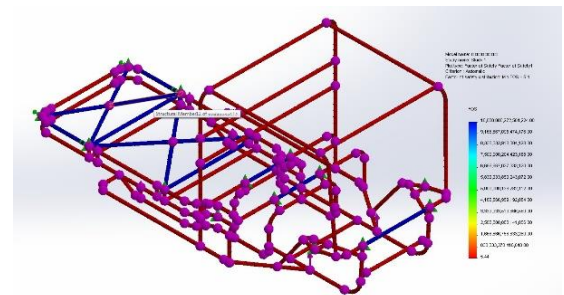
ตามดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยโครงรถ (11,12,15,20) สร้างด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ดัดขึ้นรูปเชื่อมต่อกันประกอบเป็นกล่องรับแรง มีขนาดความยาวจากล้อหน้าถึงล้อหลังเท่ากับ 210 cm มีความกว้างจากคัมล้อหน้าทั้งสองข้างและล้อหลังเท่ากับ 1550 cm เส้นผ่าศูนย์กลางล้อหน้าและล้อหลังมีขนาด 20 นิ้ว (7) มีขนาดความกว้างของยางเท่ากับ 11.7 cm มีระบบเบรกแบบดรัม (13) เหมือนกับที่ใช้ในรถยนต์ มีมอเตอร์ (14) ขนาด 60 โวลต์ ติดตั้งอยู่บนเพลาท้าย (18) ทำการขับเคลื่อนล้อหลังด้วยเพลาท้าย มีแบตเตอรี่ (21) ขนาด 12 โวลต์ จำนวน 5 ลูก อยู่ใต้โครงเก้าอี้คนนั่งขับ (22) ระบบกันสะเทือนล้อหลัง (16,17,19) เป็นแบบแผ่นแหนบเพื่อการรองรับการบรรทุกหนักแบบที่ใช้ในรถยนต์ปิกอัพ ระบบกันสะเทือนล้อหน้า (3,23) เป็นแบบปีกนกชั้นเดียวประกอบใช้คัพและคอยล์สปริง ระบบบังคับเลี้ยวหน้า (4,5,6) ใช้คันชักส่งที่ควบคุมด้วยพวงมาลัย (9) การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (21) เมื่อเปิดสวิตช์ (8) และเหยียบคันเร่ง (15) ซึ่งติดตั้งอยู่บนรถด้านขวา โดยจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมความเร็ว (2) เพื่อทำการป้องกันกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (21) ให้กับมอเตอร์ (14) หมุนส่งกำลังผ่านเพลาท้าย (18) ไปยังล้อหลังทำให้รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า การหยุดรถจะละเท้าจากคันเร่งมาเหยียบเบรก โดยในขณะที่เหยียบเบรกชุดควบคุมจะส่งสัญญาณ ไปตัดการป้องกันกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ (14) เพื่อหยุดการทำงาน

ตามดังแสดงในรูปที่ 9 กล่องควบคุม (1) เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อส่งกำลังไปยังล้อทำให้รถเคลื่อนที่ไปได้ซึ่งกล่องควบคุมจะรับ

กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (2) ผ่านทางเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) (3) และรับสัญญาณควบคุมความเร็วจากชุดคันเร่ง (4) รับสัญญาณตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เมื่อทำการหยุดรถจากสวิตช์เบรก (5) การบังคับทิศทางรถเคลื่อนที่ของรถให้เดินหน้าและถอยหลังจะใช้การสลับขั้วบวก-ขั้วลบของแบตเตอรี่ซึ่งออกจากชุดควบคุมด้วยสวิตช์ (6) และเมอร์ไเลย์ (7) โดยวงจรทั้งหมดจะทำงานต่อเนื่องเมื่อเปิดสวิตช์กุญแจ (8)

3.2 ผลการออกแบบโครงสร้าง และระบบแบตเตอรี่

จากการใช้กระบวนการออกแบบและทดสอบด้วยซอฟต์แวร์ Solid works Simulation ทำให้ได้ โครงสร้างรถไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบา โดยมีน้ำหนักโครงสร้าง 89 กิโลกรัม และมีค่าความปลอดภัย Factor of Safety (F.O.S) มีค่าเท่ากับ 5.44 ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การทดสอบ Factor Of Safety แบบภาวะสถิตย์ ของโครงสร้างรถไฟฟ้า (F.O.S = 5.44)

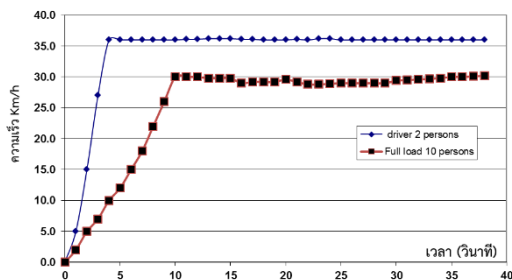
จากการออกแบบระบบไฟฟ้าและแบตเตอรี่เมื่อได้ชนิดและขนาดมอเตอร์ที่ใช้แล้ว ก็ทำการกำหนดเลือกพลังงานจะนำมาใช้ในตัวรถทั้งจ่ายไฟให้มอเตอร์ให้เพียงพอต่อการใช้งานทั้งระบบ และต้องคำนึงถึงระยะเวลาการใช้งานต่อการประจุไฟหนึ่งครั้ง

ว่าจะ ให้พลังงานแก่มอเตอร์นานเพียงใด และ ระยะทางที่ได้ต่อการประจุไฟเต็มหนึ่งครั้ง โดยมีการ ติดตั้งระบบไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 14

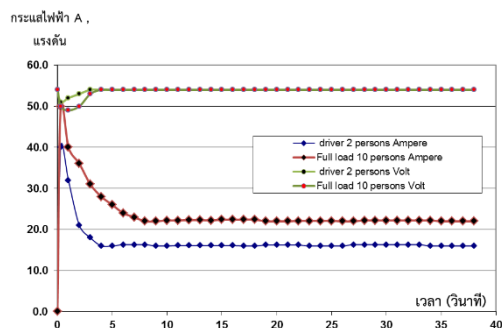


รูปที่ 14 อุปกรณ์ชุดประจุกระแสไฟฟ้า

โดยมีการทดสอบประสิทธิภาพรถไฟฟ้าได้ผล ดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ ตารางที่ 5



รูปที่ 15 ความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 16 การใช้กระแสไฟและค่าแรงดันของรถไฟฟ้า

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพรถไฟฟ้า

หัวข้อทดสอบ	ผลการทดสอบ
1. พิสัยระยะทาง	45 km
2. เวลาวิ่งทั้งหมด	1 ชั่วโมง 40 นาที
3. ความเร็วสูงสุด	30-36 กิโลเมตรต่อ ชั่วโมง
4. อัตราเร่งจากความเร็ว 0 – 36 km/h	5-10 วินาที
5. ระยะเวลารักษาความเร็วสูงสุด	1 ชั่วโมง
6. ความสามารถในการขึ้นเนิน	30 องศา
7. รัศมีวงเลี้ยว	3.2 เมตร
8. ระยะเวลาในการประจุไฟเข้าแบตเตอรี่	7 ชั่วโมง
9. ความแข็งแรงของโครงสร้าง	F.O.S 5.44 (static)
10. น้ำหนักบรรทุก	600 kg
11. การสิ้นเปลือง	0.38 บาท/กิโลเมตร

จากการทดสอบประสิทธิภาพรถไฟฟ้า ในด้านของความเร็ว จากรูปที่ 14 พบว่า การบรรทุกน้ำหนักแบบเต็มคันรถ (Full load) จำนวน 10 ที่นั่งนั้น จะให้ความเร็วสูงสุดของรถอยู่ที่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้เวลา 10 วินาทีในการเคลื่อนที่จาก 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงไปยัง 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่เมื่อลดจำนวนภาระลง เป็น 2 ที่นั่ง จะเห็นได้ว่า ความเร็วสูงสุดของรถสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้เวลาเพียง 5 วินาที ในการเคลื่อนที่จาก 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงไปยัง 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งความเร็วที่ได้มานั้นสอดคล้องกับกำลังการใช้งานพลังงานไฟฟ้า (รูปที่ 15) เนื่องจากช่วงเร่งเครื่องในขั้นตอนแรกนั้นต้องเอาชนะแรงเฉื่อย จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูง แต่เมื่อถึงจุด ๆ หนึ่ง จะใช้กำลังไฟฟ้าที่คงที่

โดยยานยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า ต้นแบบ ได้ทำการสาธิตและทดลองใช้ในพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (รูปที่ 17) ถือเป็นเทคโนโลยีขนส่งทางเลือกสำหรับการใช้งานในพื้นที่ระยะทางไม่มากและมีเส้นทางแน่นอน เป็นการลดมลพิษและการใช้พลังงานฟอสซิลและเกิดการพัฒนาธุรกิจใหม่ในหน่วยงานของรัฐและเอกชน เช่น มหาวิทยาลัย หรือหน่วยงานที่มีสิ่งปลูกสร้างและการวางผังถนนหรือเส้นทางในองค์กรเชื่อมต่อกันในแต่ละอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างเหล่านั้น



รูปที่ 17 ทดสอบสมรรถนะการขับเคลื่อนและนำเสนอสาธิตต่อสาธารณชน

4. สรุป

จากการออกแบบและพัฒนาสร้างยานยนต์ไฟฟ้าอเนกประสงค์ต้นแบบ และได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพขับเคลื่อนเบื้องต้น ทางผู้วิจัยได้รับการตอบรับจากผู้ที่เกี่ยวข้องจากทั้งหน่วยงานของรัฐ และประชาชนได้เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ โดยต้นทุนถ้ามีการ

ผลิตเชิงอุตสาหกรรมอยู่ที่ประมาณ 80,000 บาท ถึง 100,000 บาท ซึ่งจะมีราคาถูกกว่ารถไฟฟ้าทั่วไปตามท้องตลาดอยู่ที่ประมาณ 40 ถึง 50% ในพิกัดเดียวกัน

ความสำเร็จและความคุ้มค่าของงานวิจัยที่ได้รับคือได้ยานยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแข็งแรงและสามารถประยุกต์โครงสร้างเข้ากับประเภทการใช้งานและขนส่งได้อย่างหลากหลายเป็นแนวทางในการพัฒนาการปรับปรุงพฤติกรรมการใช้ยานยนต์ที่ปราศจากมลพิษและลดต้นทุนในการใช้พลังงานฟอสซิลเพื่อลดสภาวะโลกร้อน โดยใช้เพื่อเป็นเทคโนโลยีที่ดีมีคุณภาพเหมาะสมในการใช้งานในพื้นที่ระยะทางไม่มากและมีเส้นทางแน่นอน และเป็นการเผยแพร่ความรู้และองค์ความรู้สู่ภาครัฐและเอกชนและผู้สนใจทั่วไป เพื่อการพัฒนาศักยภาพในการพึ่งพาพลังงานสะอาด เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มทางสังคมแต่ยังคงอนุรักษ์ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ตลอดจนเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำการวิจัยระดับสูงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคามที่ช่วยสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง
 - [1] กฤษฎา เสกตระกูล. ธุรกิจกับการแก้ปัญหาโลกร้อน (ตอนที่ 1). (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก <https://mgonline.com/greeninnovation/detail/9640000056453>.
 - [2] ชัยยศ ยงค์เจริญชัย. โลกร้อน: ไทยจะประกาศลดก๊าซเรือนกระจก 25% ในที่ประชุม COP26 แต่นักสิ่งแวดล้อมว่าน้อยไป. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก <https://www.bbc.com/thai/international-59059419>.
 - [3] ธนดล ชินอรุณมังกร. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการตัดสินใจซื้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลระบบไฟฟ้า (EV). [ปริญญานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชาการตลาด คณะบริหารธุรกิจเพื่อสังคม]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2563.
 - [4] อังศิริ ศรีภคากร. ยานยนต์ไฟฟ้า : พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ; 2554.
 - [5] ดนัยกฤต อินทุทธี. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ BEV. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก . Available: https://arit.rmutto.ac.th/e-book/admin/book_file/100bookfile.pdf.
 - [6] สุชาติ เขียงจิน, ธีรวัช บุญยโสภณ, ชาญชัย ทองประสิทธิ์, ภาวินี บุญยโสภณ, กัลป์กร ไพบูลย์, ทวีศักดิ์ รูปสิงห์ และคณะ. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้รถประจำทางไฟฟ้าสำหรับการขนส่งมวลชนระยะไกล. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2560; 27(4): 855–70.
 - [7] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. รถโดยสารไฟฟ้าต้นแบบ ที่พัฒนาจากรถโดยสารประจำทางใช้แล้วขององค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก [https://www.nstda.or.th/nac/2022/exhibition/prototype-electric-bus/](https://www.nstda.or.th/nac/2022/exhibition/prototype-electric-bus/Pornpimol Kulab)
 - [8] Pornpimol Kulab. รถ巴士ไฟฟ้า (Electric Bus) ผลงานความสำเร็จของทีมวิจัย มทร. อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น x บมจ.ช ทวี. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. <https://www.iphonemod.net/electric-bus-the-success-of-thai-people.html>.

- [9] มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. ที่ตั้งของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 เมษายน 2566]. <https://www.rmu.ac.th/about>.
- [10] วิรุณ โมนะตระกูล วสันต์ เขียวสุวรรณ และ ปรีตกร เหมะรัตน์. การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้าอเนกประสงค์ต้นแบบ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 15-17 ตุลาคม 2557, จังหวัดขอนแก่น; 2557.
- [11] Brendan J Waterman and Adam Wittek. Design and Construction of a Space-frame Chassis. [Final Year Project Thesis, School of Mechanical and Chemical Engineering]. Australia University of Western Australia; 2011.
- [12] ชุมพล ศฤงคารศิริ. การวางแผนและควบคุมการผลิต. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น: กรุงเทพฯ; 2545.
- [13] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, วิโรจน์ ลิ้มตระการ, เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล, และ ยศกร ประทุมวัลย์. การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย SolidWorks Simulation. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.: กรุงเทพมหานคร; 2552.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาวิธีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดสอบเสถียรภาพ ของยานยนต์บนพื้นเอียงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Studies of Method for Setup Boundary Conditions for Vehicle Stability Testing on Tilting Platform using Finite Element Analysis

จักรี วิชัยระหัด* ชยารักษ์ ธาณี ตีชะกุล และ ปวีณ เกียรติเกษม

Jakkree Wichairahad*, Chayaruk Thanee Tikakul and Paween Kiangkasem

โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University,

Mueng, Chaiyaphum, Thailand 36000

Received: 17 May 2021

Revised: 9 December 2021

Accepted: 7 August 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

เสถียรภาพบนพื้นเอียงหรือความสามารถในการทรงตัวบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัย โดยเฉพาะรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร และรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม (รย.15) วิธีการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงสามารถกระทำได้โดยการนำยานยนต์จริงไปทดสอบที่เครื่องทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง เพื่อเป็นการลดความสูญเสียจากการนำยานยนต์จริงไปทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงแล้วไม่ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมก่อนทำการผลิตโครงสร้างจริง บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์หุ้มเอียงที่ทำให้โครงสร้างยานยนต์พลิกคว่ำด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม โดยวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานการกระทำแบบสถิตศาสตร์และสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างจริงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่าย เมื่อวิเคราะห์ด้วยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 ผลปรากฏว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึงร้อยละ 63.63 และปรากฏว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียงร้อยละ 2.42 เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบที่ 2 คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้นายยนต์ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างและเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตรายยนต์ในด้านของการออกแบบและผลิต

คำสำคัญ: เสถียรภาพบนพื้นเอียงของยานยนต์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

Abstract

Vehicle stability or rollover resistance on the tilting platform was an essential component of safety, especially in vehicles that used to transport passengers and agricultural trucks. The method of stability testing on the tilting platform can be performed by taking a real vehicle to the tilting platform tester. In order to reduce the waste when taking real vehicles to the stability test on tilting platform and fail the test. Finite element method was therefore used for analyze structures by computer aided engineering analysis before production of structures. This article presented a method for determining the boundary conditions for rollover angle analysis using computer aided engineering. It was analyzed under the static load assumptions and the linear elastic material properties. The results of the computer aided engineering analyzes were compared with the experimental results of a simple structure. The results showed that the maximum error was 63.63% when analyzing with boundary condition type 1 and the result showed that the maximum error was only 2.42% when adjusting the method for setting the boundary condition to type 2. The researchers hope that this study will be beneficial to automotive users in terms of structural safety and for automotive manufacturers in terms of design and manufacture.

Keywords: Vehicle Stability on Tilting Platform: Finite element analysis: Computer Aided Engineering

1. บทนำ

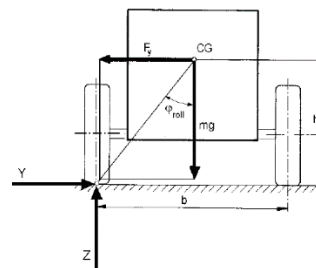
เสถียรภาพบนพื้นเอียง เป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัยในการใช้ยานยนต์ โดยเฉพาะรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร และรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม (รย.15) สำหรับรถโดยสารที่มีความสูงเกิน 3.6 เมตร ในปี พ.ศ. 2555 กรมการขนส่งทางบกได้กำหนดให้ ต้องผ่านการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง และต้องไม่พลิกคว่ำที่มุมต่ำกว่า 30 องศา โดยการทดสอบรถจริง [1] ตามภาพที่ 1 ในขณะที่มาตรฐาน ECE R107 ได้กำหนดให้รถโดยสารทุกประเภทที่มีจำนวนที่นั่งมากกว่า 22 ที่นั่ง ต้องผ่านการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง (รวมน้ำหนักผู้โดยสารและสัมภาระ) และต้องไม่พลิกคว่ำที่มุมต่ำกว่า 28 องศา โดยการทดสอบรถ [2] ซึ่งการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงนั้น ได้มีการใช้นานแล้ว เช่น เครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ M.A.N. Corporation ซึ่งพัฒนาโดย Isermann เมื่อปี ค.ศ. 1970 [3] เครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ The Swedish National Road and Traffic Research Institute ในปี ค.ศ. 1978 [4] หรือเครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ Australian Road Research Board ในปี ค.ศ. 1984 [5] เป็นต้น ส่วนรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรมนั้น ตามมาตรฐาน มอก. 1315-2538 หัวข้อที่ 7 เสถียรภาพบนพื้นเอียง ระบุว่ามุมเอียงเมื่อล้อข้างซ้ายหรือข้างขวาเริ่มไม่สัมผัสพื้นทดสอบ ต้องไม่น้อยกว่า 40 องศา และมุมเอียงทั้ง 2 ค่าจะแตกต่างกันได้ไม่เกิน 5 องศา [6]

การทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงนั้น ตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือ จุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง (center of gravity, CG.) หากยานยนต์มีจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงสูง ก็มีโอกาที่จะเกิดการพลิกคว่ำได้มากกว่ายานยนต์ที่มีจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงต่ำ และค่ามุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (ϕ_{roll}) จะสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ตามภาพที่ 2 [7] ซึ่งค่า ϕ_{roll} หรือ Static Stability Factor (SSF) คำนวณได้จากสมการที่ 1 โดย ϕ_{roll} คือ มุมที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงของยานยนต์ประเภทนั้น ๆ นั้นเอง



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงของกรมการขนส่งทางบกสำหรับทดสอบรถโดยสาร

$$\phi_{roll} = SSF = \frac{b}{2h} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 มุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวอยู่ได้โดยไม่พลิกคว่ำ

การหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงของยานยนต์นั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธี Static wheel payload โดยการชั่งน้ำหนักยานยนต์บนพื้นเอียง ตามภาพที่ 3 แล้วนำน้ำหนักที่ชั่งได้ของแต่ละล้อมาคำนวณตามสมการที่ 2-6 [7]

$$l_1 = \frac{(P_3 + P_4)L_1 + (P_5 + P_6)L_2}{P_{total}} \quad (2)$$

$$t = \left[(P_1 - P_2) \frac{T_1}{2} + (P_3 - P_4) \frac{T_2}{2} + (P_5 - P_6) \frac{T_3}{2} \right] \frac{1}{P_{total}} \quad (3)$$

$$h_0 = r + \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(l_1 - L_1 \frac{F_3 + F_4}{P_{total}} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{H}{L_1} \right) \quad (5)$$

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (6)$$

เมื่อ:

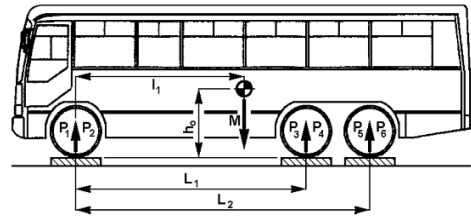
P_1 และ P_2 คือ น้ำหนักที่ล้อหน้าซ้าย ล้อหน้าขวา ตามลำดับ เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

P_3 และ P_4 คือ น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวา ตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สอง เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

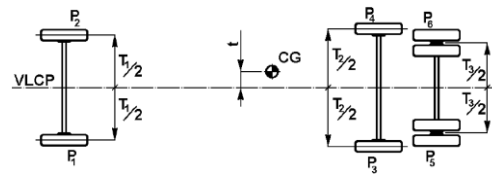
P_5 และ P_6 คือ น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวาตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สาม เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

F_1 และ F_2 คือ น้ำหนักที่ล้อหน้าซ้าย ล้อหน้าขวา ตามลำดับ เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวเอียง (N)

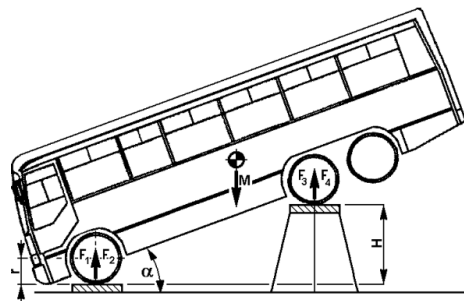
F_3 และ F_4 น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวา ตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สอง เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวเอียง (N)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 วิธีการชั่งน้ำหนักเพื่อหาจุดศูนย์กลาง

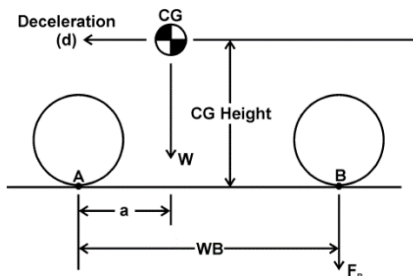
ความโน้มถ่วงด้วยวิธี Static wheel payload

- (ก) มุมมองด้านข้าง แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ
- (ข) มุมมองด้านบน แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ
- (ค) มุมมองด้านข้าง แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวเอียง

2. วิธี Dynamic wheel payload จะหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงได้โดยการวัดค่าแรงปฏิกิริยาที่ล้อยานยนต์ในขณะที่ยานยนต์กำลังเบรก ตามภาพที่ 4 แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 7 และ 8 [8] จะสามารถหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 การหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงด้วยวิธี Dynamic wheel payload (ก) แสดงภาพจำลองอุปกรณ์ทดสอบ (ข) แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง

$$CG. Height = \left(\frac{g}{d}\right) \left(\frac{WB}{W}\right) (W_B - F_B) \quad (7)$$

$$a = WB \left(\frac{W_B}{W}\right) \quad (8)$$

เมื่อ:

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (N/m^2)

d คือ ค่าความหน่วงจากการเบรก (N/m^2)

WB ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำกับเพลาลัง (m)

W คือ น้ำหนักรวมของยานยนต์ขณะหยุดนิ่ง (N)

W_B คือ น้ำหนักรวมของเพลาลังขณะหยุดนิ่ง (N)

F_B คือ น้ำหนักรวมของเพลาลังขณะกำลังเบรกด้วย

ความหน่วง d (N)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงฐาน (Chassis) รถใช้งานเกษตรกรรม [9, 10] ที่ได้วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงฐาน ทั้งแบบจุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งและแบบจุดเชื่อมต่อแบบยืดหยุ่น ซึ่งผลการวิเคราะห์แตกต่างกันมีนัยสำคัญคือการวิเคราะห์แบบจุดเชื่อมต่อแบบยืดหยุ่นจะให้ค่าการเสียรูปของโครงสร้างใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากกว่าแบบจุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็ง เป็นต้น และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของยานยนต์ และได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องเชื่อถือได้ โดยเฉพาะการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างเมื่อเกิดการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE R66 Annex 9 ของสหภาพยุโรป [11] และมาตรฐาน FMVSS220 ของสหรัฐอเมริกา [12] ในส่วนของการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้สำหรับการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงนั้น งานวิจัยของ L. Prochowski et al. (2012) [13] ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถโดยสารขณะขับเลี้ยวโค้งว่าจะสามารถขับด้วยความเร็วเท่าใด

โดยไม่เกิดการพลิกคว่ำ ซึ่งหลักในการพิจารณาว่ารถโดยสารจะพลิกคว่ำหรือไม่ จะสังเกตจากแรงปฏิกิริยาที่ล้อฝั่งที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางความโค้ง ถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์จะถือว่ารถโดยสารเกิดการพลิกคว่ำ ซึ่งในงานวิจัยของ D. Croccolo et al เมื่อปี ค.ศ. 2011 ก็ได้กล่าวเช่นเดียวกัน [14] ค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญสำหรับการพิจารณาว่ายานยนต์เกิดการพลิกคว่ำหรือไม่ คือ lateral-load transfer ratio (LTR) [15] ซึ่งคือค่าเดียวกันกับ Rollover Index [16] แสดงได้ดังสมการที่ 9 เมื่อ F_r คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านขวา F_l คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านซ้าย ซึ่งยานยนต์จะเกิดการพลิกคว่ำเมื่อ LTR หรือ Rollover Index มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือแรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านใดด้านหนึ่งเป็นศูนย์นั่นเอง

$$LTR = \text{Rollover Index} = \frac{F_l - F_r}{F_l + F_r} \quad (9)$$

งานวิจัยที่มีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้สำหรับปัญหาเสถียรภาพของยานยนต์นั้น บางส่วนจะมุ่งเน้นในการหาวิธีการหรืออัลกอริทึมในการวัดค่า LTR แบบเรียลไทม์ [15, 17] และบางส่วนจะมุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพหรือความสามารถในการต้านทานต่อการพลิกคว่ำบนพื้นเอียง [16, 18] ซึ่งล้วนแต่ใช้ซอฟต์แวร์ขั้นสูง

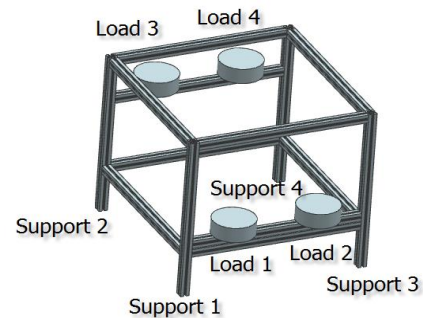
งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจมุ่งเป้าไปที่การหาวิธีการกำหนดค่าขอบเขตในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงและค่ามุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (ϕ_{roll}) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ปัจจุบันการใช้ซอฟต์แวร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

สำหรับปัญหาเสถียรภาพหรือมุมเอียงของยานยนต์จะนิยมใช้ซอฟต์แวร์ขั้นสูงที่ต้องติดตั้งเพิ่มเติมจากซอฟต์แวร์หลัก เช่น LS-DYNA [19, 20] MSC ADAM/Car [18] TruckSim [17] เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งใช้ซอฟต์แวร์หลักพื้นฐานในเชิงพาณิชย์ที่ไม่ได้มีการติดตั้งโมดูลหรือเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ไม่ได้มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม กับผลการทดลองโครงสร้างจริงซึ่งเป็นโครงสร้างอย่างง่าย ผลการศึกษานี้จะทำให้ได้มาซึ่งวิธีการในการกำหนดค่าขอบเขตของคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น รถโดยสาร รถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม สำหรับการออกแบบโครงสร้างยานยนต์ก่อนนำไปผลิตเป็นโครงสร้างจริงสำหรับผู้บริโภคต่อไป โดยคณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้เขี่ยานยนต์ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างและเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตรายานยนต์ในด้านของการออกแบบและผลิต

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาวิธีการกำหนดค่าขอบเขตของการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ได้ทำขึ้นโดยการสร้างโครงสร้างอย่างง่ายขนาด 800 x 800 x 800 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 5 โครงสร้างทำจากวัสดุอลูมิเนียมโปรไฟล์ หน้าตัด 40 x 40 มิลลิเมตร

มีค่ามอดุลัสของยัง 71 จิกะพาสคัล อัตราส่วนของปัวซอง 0.33 และค่าความเค้นคราก 280 เมกะพาสคัล โครงสร้างมี 4 ขา (4 support) แทนล้อของยานยนต์ทั้ง 4 ล้อ คือ support 1 support 2 support 3 และ support 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงทำได้โดยการวางมวลทรงกระบอก (Load) มวล 13 กิโลกรัม มีค่ามอดุลัสของยัง 199 จิกะพาสคัล อัตราส่วนของปัวซอง 0.30 และค่าความเค้นคราก 245 เมกะพาสคัล มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร สูง 75 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น วางสลับตำแหน่ง ดังตารางที่ 1 โดยจุดศูนย์กลางมวลของ Load 1 อยู่สูงจากพื้น 300 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 1 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางมวลของ Load 2 อยู่สูงจากพื้น 300 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 3 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางมวลของ Load 3 อยู่สูงจากพื้น 650 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 2 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร และจุดศูนย์กลางมวลของ Load 4 อยู่สูงจากพื้น 650 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 4 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จากนั้นจึงใช้เครื่องยกแบบไฮดรอลิคค่อย ๆ ยกจนกว่าโครงสร้างอย่างง่ายจะเริ่มพลิกคว่ำโดยสังเกตจากขา Support ด้านที่ถูกยกเริ่มลอยพ้นจากพื้นทั้ง 2 ข้าง แล้วบันทึกค่ามุมองศาที่เกิดการพลิกคว่ำ และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลทรงกระบอก 4 กรณี วิธีการวัดมุมเอียงของโครงสร้างอย่างง่ายทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมแบบเข็มตามภาพที่ 1 จากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม



ภาพที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่าย

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนตำแหน่งของมวลทรงกระบอกทั้ง 4 กรณี

กรณีที่	ตำแหน่งของมวลทรงกระบอก			
	Load 1	Load 2	Load 3	Load 4
1	/	x	/	x
2	/	x	x	/
3	x	/	/	x
4	x	/	x	/

ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานการกระทำแบบสถิตศาสตร์และสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น วิเคราะห์โดยกำหนดให้เอเลเมนต์เป็นแบบคาน 3 มิติ น้ำหนักของมวลกำหนดให้เป็นแบบจุด วิธีการวัดมุมเอียงของโครงสร้างอย่างง่ายในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จะกระทำได้โดยการป้อนค่าน้ำหนักของมวลทรงกระบอกให้ทำมุมเอียงจากแกนตั้งฉากจากพื้น แทนที่ในการตัดสินใจว่าโครงสร้างอย่างง่ายเกิดการพลิกคว่ำจะพิจารณาจากแรงปฏิกิริยาของขา (Support) ฝั่งตรงข้ามกับจุดหมุน หากแรงปฏิกิริยาเริ่มน้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าโครงสร้างอย่างง่ายเริ่มพลิกคว่ำ

เช่น หากจุดหมุนของโครงสร้างอยู่ที่ขา support 1 และ support 2 ก็จะพิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 เป็นต้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ โครงสร้างอย่างง่าย โดยเปลี่ยนตำแหน่งของมวล ทรงกระบอ 4 กรณี ดังภาพที่ 6 ผลการทดลองมุมที่ โครงสร้างเกิดการพลิกคว่ำของแต่ละกรณีแสดงได้ดัง ตารางที่ 2



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 6 การทดสอบการพลิกคว่ำของโครงสร้าง

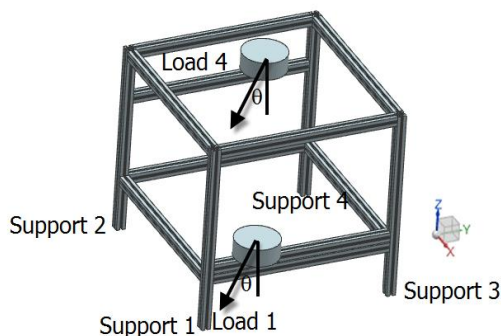
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

(ค) กรณีที่ 3 และ (ง) กรณีที่ 4

ตารางที่ 2 มุมเอียงที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำเมื่อ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบที่ 1

กรณี ที่	ตำแหน่ง ของมวล	มุมเอียงที่ทำให้โครงสร้าง พลิกคว่ำ (องศา)		ค่าความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์ (%)
		ทรง กระบอ	คอมพิวเตอร် ช่วย วิเคราะห์ ทาง วิศวกรรม	
1	load1/ load3	33	54	63.63
2	load1/ load4	43	53	23.25
3	load2/ load3	43	62	44.18
4	load2/ load4	53	62	16.98

ในการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม จะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 คือ ให้ขาทั้งสี่เป็นแบบจุดรองรับอย่างง่าย (Simply support) จุดหมุนเป็นขา support 1 และ support 2 แล้วใส่แรงกระทำในตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 4 กรณีนี โดยให้แรงกระทำจากมวลทรงกระบอกทำมุมเอียงตามภาพที่ 7 พิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 หากแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 มีค่ามากกว่าศูนย์ก็ให้เพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ จนกว่าแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 ทั้งสองขาจะเป็นศูนย์ เช่น ในกรณีที่ 2 ตำแหน่งของมวลทรงกระบอกจะอยู่ที่ load1 และ load4 เมื่อเพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ขา support 3 แรงปฏิกิริยามีค่าเป็นบวก แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าเป็นลบ จึงเพิ่มมุมเอียงไปอีกจนแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 มีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 7 แสดงการใส่ภาระเป็นมุมเอียงเสมือน การทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียง

Applied load 1 and 4 with rollover angle θ

Z-axis reaction force result:
- Support 3 was positive value
- Support 4 was negative value

Increase θ until reaction force of support 3 converse to zero, thus θ = rollover angle

(ก)

Applied load 1 and 4 with rollover angle θ

Z-axis reaction force result:
- Support 3 was positive value
- Support 4 was negative value

Suppress support that has negative reaction force (support 4)

Re-FEA.

Increase θ until reaction force of support 3 converse to zero, thus θ = rollover angle

(ข)

ภาพที่ 8 แผนผังการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 สำหรับตำแหน่งของมวลทรงกระบอกกรณี 2

ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 พบว่ามุมที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดสอบโครงสร้างจริงมาก สาเหตุเนื่องจากเมื่อใส่แรงกระทำเป็นมุมเอียงทำให้แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าลบ แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 ยังมีค่าบวกอยู่ แล้วเพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ

จนกว่าแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 มีค่าเป็นศูนย์นั้น เปรียบเสมือนแรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 ที่มีค่าลบ นั้นได้ดึงโครงสร้างไว้ไม่ให้พลิกคว่ำ จึงทำให้ผลการ จําลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ มุมที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก การทดสอบโครงสร้างจริง ดังนั้นจึงได้มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 2 ตามภาพที่ 8(ข) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกให้กำหนดค่าเงื่อนไขของเขต ตามเดิมคือแบบที่ 1 แล้วพิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 เมื่อทราบค่าแรงปฏิกิริยา ที่ขา support ข้างใดมีค่าเป็นลบก่อน ก็ให้กำหนด ค่าเงื่อนไขขอบเขตใหม่ ขั้นตอนที่ 2 คือการกำหนด ค่าเงื่อนไขขอบเขตใหม่ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ให้ขา support ข้างที่มีแรงปฏิกิริยาเป็นลบก่อนนั้นให้เป็น อิสระ คงเหลือค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบจตุรรองรับอย่าง ง่าย (Simply support) เฉพาะขา support อีกข้างหนึ่ง ที่มีแรงปฏิกิริยาเป็นค่าบวกอยู่เท่านั้น เช่น ในกรณีที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) ตำแหน่งของมวลทรงกระบอก จะอยู่ที่ load1 และ load4 ขั้นตอนแรกจะกำหนดค่า เงื่อนไขของเขตตามเดิมคือแบบที่ 1 เมื่อเพิ่มมุมเอียง ไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ขา support 3 แรงปฏิกิริยามีค่า เป็นบวก แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าเป็นลบ จึงดำเนินการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใหม่ในขั้นตอนที่ 2 คือ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ขา support 4 ที่มีแรง ปฏิกิริยาเป็นลบก่อนให้เป็นอิสระ คงเหลือค่าเงื่อนไข ขอบเขตแบบจตุรรองรับอย่างง่าย (Simply support) เฉพาะขา support 3 แล้วเพิ่มมุมเอียงไปจนกว่าแรง ปฏิกิริยาที่ขา support 3 จะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมุม ดังกล่าวถือว่าเป็นมุมที่ทำให้โครงสร้างเกิดการพลิก

คว่ำ เป็นต้น ผลการจําลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วย วิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อหามุมองศาที่โครงสร้างเริ่ม พลิกคว่ำแสดงในตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับผล จากการทดสอบโครงสร้างจริง พบว่าวิธีการกำหนดค่า เงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 2 เกิดค่าความคลาดเคลื่อน น้อย โดยกรณีที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด เพียงร้อยละ 2.42 และกรณีที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อน น้อยสุดเพียงร้อยละ 1.62 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการ กำหนดค่าของเขตแบบที่ 2 มีความน่าเชื่อถือและ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ บนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น รถโดยสาร รถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม สำหรับการออกแบบ โครงสร้างยานยนต์ก่อนนำไปผลิตเป็นโครงสร้างจริง สำหรับผู้บริโภคต่อไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างยานยนต์ และ ผู้ผลิตรายอื่นในด้านของการออกแบบและผลิต

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาวิธีการกำหนดค่า ขอบเขตในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงและค่า มุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (Φ_{roll}) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พิจารณา ภายใต้อสมมติฐานภาระกระทำแบบสถิตศาสตร์และ สมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น การวิเคราะห์จะ เปรียบเทียบกับผลการทดลองโครงสร้างจริงซึ่งเป็น โครงสร้างอย่างง่ายขนาด 800 x 800 x 800 มิลลิเมตร โครงสร้างทำจากวัสดุอลูมิเนียมโปรไฟล์ หน้าตัด 40 x 40 มิลลิเมตร โครงสร้างมี 4 ขา แทนล้อของยานยนต์

ทั้ง 4 ล้อ โดยทดลองสลับตำแหน่งของมวลทรงกระบอก เป็น 4 กรณี การทดสอบโครงสร้างจริงทำได้โดยใช้ เครื่องยกแบบไฮดรอลิคค่อย ๆ ยกจนกว่าโครงสร้าง อย่างง่ายจะเริ่มพลิกคว่ำ ผลการทดลองพบว่า เมื่อ กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์โดยใช้ คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยวิธีที่ 1 คือ กำหนดให้หาทั้งสี่ของโครงสร้างอย่างง่ายเป็นแบบจุด รองรับอย่างง่าย ทำการใส่ภาระเป็นแรงกระทำในมุม เอียงแล้วสังเกตแรงปฏิกิริยาที่หาทั้งสองข้างของฝั่งที่ ถูกยก หากแรงปฏิกิริยาที่หาข้างหนึ่งมีค่าเป็นบวกแต่ อีกข้างหนึ่งมีค่าเป็นลบ ให้เพิ่มมุมเอียงอีกจนกว่าแรง ปฏิกิริยาของขาด้านที่เป็นบวกจะเป็นศูนย์ และให้ถือว่า มุมดังกล่าวคือมุมที่ทำให้โครงสร้างเริ่มพลิกคว่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโครงสร้างจริงแล้ว พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 4 กรณี มีค่ามากที่สุด ถึงร้อยละ 63.63 และน้อยที่สุดถึงร้อยละ 16.98 จึงได้ ทำการวิเคราะห์ใหม่โดยกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของ การวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทาง วิศวกรรมด้วยวิธีที่ 2 โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนวิธีที่ 1 เมื่อ พบว่าแรงปฏิกิริยาที่หาข้างหนึ่งมีค่าเป็นบวกแต่อีกข้าง หนึ่งมีค่าเป็นลบ ให้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตขั้นตอนที่ 2 คือกำหนดให้หาข้างที่มีแรงปฏิกิริยามีค่าเป็นลบจาก ขั้นตอนแรกให้เป็นอิสระ และกำหนดค่าเงื่อนไข ขอบเขตของอีกสามขาเป็นแบบจุดรองรับอย่างง่าย แล้วสังเกตแรงปฏิกิริยาและให้ถือว่ามุมที่ทำให้แรง ปฏิกิริยาเป็นศูนย์คือมุมที่ทำให้โครงสร้างเริ่มพลิกคว่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโครงสร้างจริงแล้ว

พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 4 กรณี มีค่ามากที่สุด เพียงร้อยละ 2.42 และน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 1.62

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการจัดตั้งคณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและ อุปกรณ์ในการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกาศกรมการขนส่งทางบก. กำหนด เกณฑ์การทรงตัวของรถที่ใช้ในการขนส่ง ผู้โดยสาร. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 129 ตอน พิเศษ 81 ง หน้า 27: กรุงเทพมหานคร; 2555.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Addendum 106: Regulation No. 107 Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction. Revision3: 2011.
- [3] Isermann H. Overturning Limits of Articulated Vehicles with Solid and Liquid Loads. Motor Industry Research Association. 1970; Translation No. 58/70.

- [4] Norstrom O and Nordmark S. Test Procedure for the Evaluation of the Lateral Dynamics of Commercial Vehicle Combination. Automobile Industry. 1978; 23(2): 63-9.
- [5] Mai L and Sweatman P. Articulated Vehicle Stability – Phase II Tilt Test and Computer Model. Australian Road Research Board. 1984; AIR 323-2.
- [6] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2093 (พ.ศ. 2538) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม รถใช้งานเกษตรกรรม รถขนส่งเกษตร. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 103ง. หน้า 63-80; กรุงเทพมหานคร; 2538.
- [7] Transit Office Florida Department of Transportation. Crash and Safety Testing Standard for Paratransit Buses. 2nd ed. Acquired by the State of Florida; 2007.
- [8] Davis M and Marting P. Predicting Vehicle Rollover Propensity. International Truck and Bus Meeting and Exhibition Detroit; 2002 November 18-20; Michigan, United States of America: 2002.
- [9] Wichairahad J, Kaewsarn P, Nisapai W, Tan-Intara-Art S and Chanwiang W. The strength analysis of an agriculture truck chassis using finite element method. Engineering and Applied Science Research. 2016; 43(S2): 267-70.
- [10] Wichairahad J, Nisapai W, Kangkham K, Chanwiang W and Sutthi R. The Strength and Stiffness Analysis of Agricultural Truck Chassis using Finite Element Analysis by Flexible Joint Beam Element. Farm Engineering and Automation Technology. 2019; 5(1): 35-48.
- [11] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Addendum 65: Regulation No. 66 Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure. 1st ed; 2006.
- [12] National Highway Traffic Safety Administration (NHTS. U.S. Department of Transportation. FMVSS220 Standard School Bus Rollover Protection. Washington DC, United States of America: 1991.

- [13] Prochowski L, Zielonka K and Muszynski A. Analysis of the process of double-deck bus rollover at the avoidance of an obstacle having suddenly sprung up. *Journal of KONES*. 2012; 19: 371-80.
- [14] Croccolo D, Agostinis MD and Vincenzi N. Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a case study. *Journal of Mechanical Engineering* 2011; 57(11): 799-809.
- [15] Zhilin J, Jingxuan L, Yanjun H and Amir K. Study on Rollover Index and Stability for a Triaxle Bus. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019; 32: 1-15.
- [16] Zulkipli ZH, Mohd Faudzi SA and Abdul Manap AR. Factors Affecting Bus Rollover. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*. 2019; 3(4): 2-7.
- [17] Shun T, Lang W, Chris S, WenCai Z, Yuan J and YanQin C. An Earlier Predictive Rollover Index Designed for Bus Rollover Detection and Prevention. *Journal of Advanced Transportation*. 2018; 1-10.
- [18] Thanaporn T and Supakit R. Influence of suspension parameters on a tilt angle of passenger bus for the stability test. *Science, Engineering and Health Studies*. 2020; 14(2): 101-108.
- [19] Liang CC and Le GN. Analysis of Bus Rollover Protection under Legislated Standard using LS-DYNA Software Simulation Techniques. *International Journal of Automotive Technology*. 2010; 11(4): 194-506.
- [20] Jiantao B, Guangwei M and Wenjie Z. Rollover crashworthiness analysis and optimization of bus frame for conceptual design. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019; 33(7): 3363-73.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ผลกระทบของอุณหภูมิในน้ำยางที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด %DRC ด้วย SPR ที่ความถี่ 1, 1.5, 2.16 GHZ

The study of temperature effect on %DRC measurement accuracies using a Six-port
Reflectometer technique at frequencies 1,1.5 and 2.16 GHz

ศรัณย์ ดันติวิทย์^{1)*} มิตรชัย จงเขียวชำนาน¹⁾ และ สหพงศ์ สมวงศ์²⁾

Saran Tantiwit^{1)*} Mitchai Chongcheawchamnan¹⁾ and Sahapong Somwong²⁾

¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹⁾ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

²⁾ Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Received: 16 February 2023

Revised: 23 May 2023

Accepted: 25 May 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิในน้ำยางที่ส่งผลต่อกำลังงานไฟฟ้าที่วัดได้ในการวัดปริมาณยางแห้งในน้ำยาง (%DRC) ด้วยอุปกรณ์รีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต (Six-Port Reflectometer ; SPR) ที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจางในช่วง 20-60 %DRC และมีอุณหภูมิในน้ำยางในช่วง 20-45 °C เพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางที่มีผลต่อค่ากำลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก SPR ซึ่งเทคนิคการวัดด้วย SPR ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟแถบกว้าง วงจรหกพอร์ต วงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ปรับค่าได้ และ ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิ งานวิจัยนี้ใช้ค่าความถี่ 3 ค่า คือ 1,1.5 และ 2.16 GHz จำให้ SPR สำหรับวัดค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยาง เนื่องจากเป็นค่าความถี่ที่สามารถแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ได้ ผลการศึกษาสามารถสรุปค่าความเป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังงานไฟฟ้าของ SPR กับค่า %DRC และ ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การ

ตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (CV(%)) ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด จึงเหมาะสำหรับการวัดค่า %DRC ได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงของน้ำยางมากที่สุด ส่วนผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR พบว่าที่ความถี่ 2.16 GHz ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางต่ำสุด

คำสำคัญ: รีเฟลกโตมิเตอร์หกพอร์ต น้ำยางข้นเจือจาง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยาง กำลังงานไฟฟ้า แหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟไวด์แบนด์

Abstract

This research presents the effect of temperature in rubber latex on the measured electrical power. While measuring the dry rubber content in the latex with Six-Port Reflectometer (SPR) at frequencies are 1, 1.5 and 2.16 GHz. This research prepares rubber latex samples from dilute concentrate rubber latexes in the range of 20-60 %DRC and in the temperature range of 20-45 °C. We aim to study the effect of rubber latex temperature cause to reflected power obtained from SPR. The measurement with the SPR technique uses a wide-band microwave oscillator, a six-port circuit, a tunable matching circuit, and a microcontroller for collecting latex temperature. This research uses 3 frequencies value consisting of 1, 1.5 and 2.16 GHz. Those frequencies are transmitted to SPR and measure the %DRC of samples. From the study, we found the linearity between the powers read from SPR and %DRC and the effect of rubber latex temperature on the power read from SPR. With a coefficient of determination (R^2) and coefficient of variation (CV(%)) respectively. From the test results, it was found that at a frequency of 1 GHz, the power value had the most linear relationship with the %DRC value, so it was suitable for measuring the %DRC value as close to the actual %DRC value of latex as possible. As for the effect of latex temperature on the power value read from SPR, it was found that at a frequency of 2.16 GHz, the coefficient of variability of latex was the least. This means it is affected by the lowest latex temperature.

Keywords: Six-port reflectometer (SPR): Dilute concentrate rubber latexes: Dry rubber latex: Electrical power: Wide-band microwave oscillator

1. บทนำ

ยางพาราเป็นสินค้าเกษตรสำคัญของประเทศไทยที่ได้จากการกรีดยางพารา และถูกใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรมด้วยการนำมาแปรรูปเป็นน้ำยางข้น ยางก้อน และยางแผ่น เป็นต้น โดยน้ำยางพาราธรรมชาติจะมีสีขาวเหมือนนํ้านม และประกอบด้วยส่วนที่เป็นยางแห้ง 25 ถึง 45 %DRC ส่วนที่เป็นโปรตีน 1.5% เรซิน 2% คาร์โบไฮเดรต 1% สารอนินทรีย์ 0.5% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำ [1],[2]

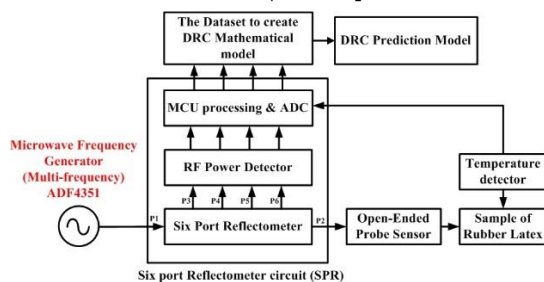
จากองค์ประกอบของน้ำยาง ส่วนที่เป็นตัวกำหนดราคาน้ำยางพารา คือ ปริมาณยางแห้งในน้ำยาง (%DRC) ซึ่งทั่วไปสามารถวัดได้ด้วย 2 วิธี คือ การวัดทางตรง และ การวัดทางอ้อม โดยทั้ง 2 วิธีการมีข้อแตกต่างกัน สำหรับวิธีการวัดทางตรง คือ การชั่งน้ำหนักส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำยางพาราประกอบด้วย เนื้อยางแห้ง และ องค์ประกอบต่าง ๆ ตามองค์ประกอบ ปกติการวัดในเชิงพาณิชย์ จะประมาณน้ำหนักของแข็งในน้ำยางพาราทั้งหมด เป็น %DRC เพราะ องค์ประกอบต่าง ๆ หากนำมาพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ จะน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ DRC ดังนั้นน้ำยางจึงถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนโดยประมาณ คือ น้ำ และ ปริมาณเนื้อยางแห้งสำหรับการวัดทางตรง นอกจากนี้วิธีการวัดตามมาตรฐาน BS ISO 1 2 6 : 2005 Natural rubber latex concentrate: Determination of dry rubber content. และการอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟจัดเป็นวิธีการวัดทางตรงด้วยเช่นกัน [3],[4]

ส่วนวิธีการวัดทางอ้อม คือ การหาปริมาณ DRC โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ DRC กับปริมาณฟลักซ์ของน้ำยางพารา เช่น ความ

ถ่วงจำเพาะ การหักเหแสง [5] คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [6] คุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [7] และอื่น ๆ ซึ่งวิธีการวัดโดยอ้อมนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ใช้พลังงานและเวลาในการวัดน้อยลง และ ขนาดกะทัดรัดพกพาได้สะดวก สำหรับงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการวัดทางอ้อม โดยอาศัยคุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของน้ำยางพารา ในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยอาศัยการวัดพลังงานคลื่นสะท้อนของน้ำยางข้นเจือจางด้วย SPR [8],[9] และน้ำยางข้นเจือจางที่นำมาใช้ทดสอบจะผ่านการเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้มีค่า DRC ที่หลากหลาย

จากการศึกษางานวิจัย เรื่องการหาปริมาณความชื้นในน้ำยาง หากบ่อนคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่ X (X-Band) พบว่าค่าความชื้นเป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยางพารา [10] และจากองค์ประกอบของน้ำยางพาราหากทราบความชื้น หรือปริมาณน้ำในน้ำยางพารา ก็จะสามารถหาส่วนที่เป็นของแข็ง หรือ DRC ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัด %DRC ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิของน้ำยาง อย่างไรก็ตามการสร้างเครื่องมือวัดในย่านความถี่ X นั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานโดยใช้งานได้เฉพาะการสื่อสารทางการทหารและดาวเทียม ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้งานเนื่องจากราคาแพงและยากที่จะผลิต เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมทำให้ทราบว่าหากจ่ายคลื่นไมโครเวฟความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ไปตกกระทบน้ำยางพารา พลังงานคลื่นส่วนมากไปหมุนโมเลกุลของน้ำ หากต่ำกว่า 2 GHz พลังงานคลื่นจะถูกแบ่งออก ส่วนหนึ่งไปหมุนโมเลกุลของน้ำ

และอีกส่วนถูกลดทอนโดยการเหนี่ยวนำของเซิร์ม
น้ำยาง ดังนั้น พฤติกรรมที่แตกต่างกันของการใช้
พลังงานคลื่นไมโครเวฟ จะต่างกันตามความถี่ที่จ่าย
คลื่นไมโครเวฟสู่ตัวอย่างน้ำยาง [11] จากผลงานวิจัย
ที่ได้ศึกษาทำให้ผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบ
จากอุณหภูมิที่มีผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก
เทคนิคการวัด %DRC ด้วย SPR ตามแผนผังระเบียบ
วิธีวิจัยได้แสดงประเด็นที่มุ่งเน้นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

จากรูปที่ 1 ผู้วิจัยอาศัยแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่น
ไมโครเวฟแบบหลายความถี่ (Microwave Frequency
Generator) เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณความถี่ให้วงจร
หกพอร์ต เมื่อจ่ายสัญญาณคลื่นความถี่ให้วงจร
หกพอร์ต แล้วคลื่นดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังโพรบ
ปลายเปิด เพื่อตกกระทบกับตัวอย่างน้ำยาง หลังจาก
ที่คลื่นตกกระทบกับตัวอย่างน้ำยาง จะทำให้โมเลกุล
ของน้ำเกิดการหมุนและสะท้อนค่าพลังงานที่ได้จาก
การหมุนของโมเลกุลน้ำกลับมายังโพรบปลายเปิดอีก
ครั้ง โดยคลื่นสะท้อนนี้จะถูกส่งผ่านไปยังพอร์ต
ตรวจวัดกำลังงานทั้ง 4 ในวงจรหกพอร์ต จากนั้น
พอร์ตตรวจวัดกำลังงานทั้ง 4 จะแปลงสัญญาณคลื่น
สะท้อนเป็นกำลังงานไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยัง
ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ค่า
%DRC ในน้ำยางตัวอย่าง และจากการศึกษางานวิจัย
ที่ผ่านมา ชี้ให้เห็นถึงอุณหภูมิมีผลต่อการหมุนของ

โมเลกุลน้ำต่างกันตามความถี่ของสัญญาณคลื่นที่ไป
ตกกระทบกับน้ำยาง

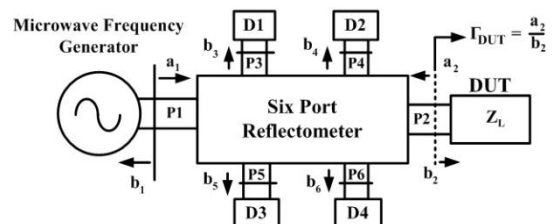
ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้มีการกำหนดช่วง
ความถี่ที่จะใช้ทดสอบขณะวัด %DRC ในช่วง 1-3
GHz จากนั้นนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์เพื่อศึกษา
ความเป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก
SPR กับค่า %DRC และผลกระทบจากอุณหภูมิของ
น้ำยางต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR โดยมี
วัตถุประสงค์ในการนำไปพัฒนาแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์สำหรับหาค่า %DRC ที่มีประสิทธิภาพสูง
บนเทคนิคการวัดด้วย SPR ในอนาคต

2.วิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง หลักการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต
การประยุกต์ใช้วงจรหกพอร์ตในการวัดตัวอย่างน้ำ
ยาง และการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.1 หลักการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต

ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรหกพอร์ตแบบรีเฟลกโตมิเตอร์
[12] โดยองค์ประกอบและหลักการทำงานของวงจร
หกพอร์ตแสดงดังรูปที่ 2



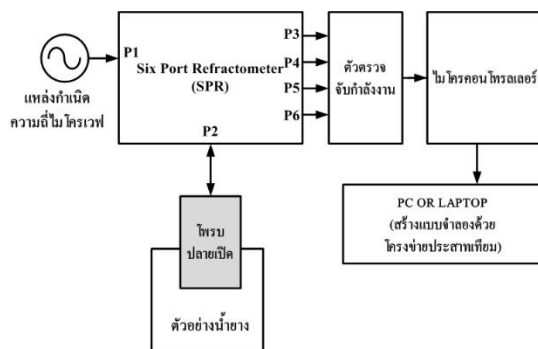
รูปที่ 2 วงจรหกพอร์ต

จากรูปที่ 2 วงจรหกพอร์ตประกอบด้วย
พอร์ตเชื่อมต่อทั้งหมด 6 พอร์ต โดยพอร์ต P1 ของ
วงจรหกพอร์ต จะต่อแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
P1 (GEN) จะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

ให้วงจรถนุรักษ์ เพื่อส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟไปวงจรถนุรักษ์ และ จากวงจรถนุรักษ์ไปยังพอร์ตอุปกรณ์ทดสอบ P2 (DUT) ซึ่งคลื่นส่งผ่านถูกแทนด้วยอักษร a จากนั้นพอร์ต P2 จะให้ค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนกลับมายังวงจรถนุรักษ์ ซึ่งกำลังงานคลื่นสะท้อนกลับถูกแทนด้วยอักษร b โดยพอร์ต P2 ให้ค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนกลับตามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ของอุปกรณ์ทดสอบ หรือ DUT จากวงจรถนุรักษ์ เมื่อได้รับกำลังงานคลื่นสะท้อนแล้วจะส่งผ่านกำลังงานไปสู่พอร์ต P3-P6 โดยทั้ง 4 พอร์ตทำหน้าที่เป็นเอาต์พุตของวงจรถนุรักษ์ที่ให้ค่ากำลังงานสะท้อนในแต่ละพอร์ตต่างกัน ตามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากอุปกรณ์ทดสอบที่ต่ออยู่กับพอร์ต P2 โดยทั้ง 4 พอร์ตนี้จะต่อไปยังตัวตรวจจำลังงาน เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้งานสร้างแบบจำลองต่อไป

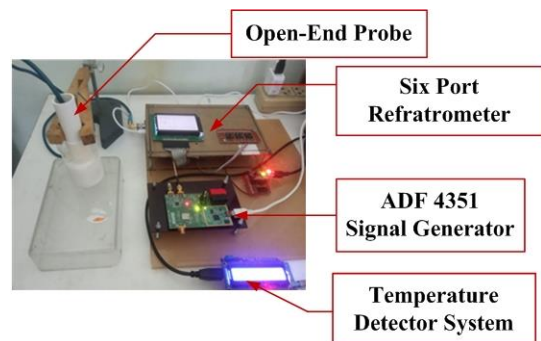
2.2 การประยุกต์ใช้วงจรถนุรักษ์ในการวัดตัวอย่างน้ำยาง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วงจรถนุรักษ์ ในการวัดตัวอย่างน้ำยาง ดังนั้นแผนผังระบบการวัดด้วยวงจรถนุรักษ์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบการวัดน้ำยางด้วยวงจรถนุรักษ์

จากรูปที่ 3 สำหรับงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วงจรถนุรักษ์สำหรับการวัดกำลังงานสะท้อนในน้ำยาง โดยมีการเชื่อมต่อโพรงปลายเปิดที่พอร์ต 2 (P2) สำหรับจุ่มในน้ำยาง โดยแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟจะปล่อยสัญญาณคลื่นมายังพอร์ตที่ 1 (P1) จากนั้นสัญญาณจะเคลื่อนไปพอร์ตที่ 2 (P2) โดยมีโพรงปลายเปิดจุ่มในน้ำยาง จากนั้นเมื่อสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านโพรงปลายเปิดไปตกกระทบกับโมเลกุลน้ำยาง จะทำให้เกิดสัญญาณเกิดการสะท้อนกลับเข้ามายังพอร์ตที่ 2 และส่งผ่านไปยังพอร์ต 3 4 5 6 ทั้ง 4 พอร์ต ซึ่งเป็นค่ากำลังงานคลื่นสะท้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลแข็งหรือน้ำยางสด และจะถูกนำมาแปลงด้วยโดยวงจรรวม ADL5505 เพื่อแปลงกำลังงานคลื่นสะท้อนเป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งการทดสอบการวัดตัวอย่างน้ำยางด้วยวงจรถนุรักษ์ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรถนุรักษ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

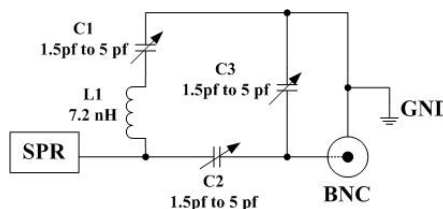
สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เป็นน้ำยางข้นที่มีค่า %DRC 20,25,30,35,40,45,50,55 และ 60 จำนวน 9 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างเหล่านี้ได้จากการนำน้ำยางข้นค่า 60 %DRC มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นด้วยสูตรร้อยละ โดยปริมาตร (%V/V: Volume Percent) [13] ในกระบวนการทดสอบ ผู้วิจัยได้มีการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางให้อยู่ในช่วง 20-45 °C และวัดซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งทีละค่าอุณหภูมิ และ ค่า %DRC หนึ่ง ๆ จากนั้นนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ผล โดยน้ำยางข้นเจือจางที่ใช้เป็นของเหลวที่นำมาบรรจุลงในบีกเกอร์แก้วขนาด 100 ml โดยบรรจุน้ำยางปริมาตร 70 ml เพราะ หากบรรจุมากกว่านี้บีกเกอร์จะเต็มและล้นออกภายนอกภาชนะ ซึ่งมีผลทำให้การทดสอบครั้งต่อไปที่ค่าอุณหภูมิ น้ำยางอื่นมีปริมาตรไม่เท่าเดิม เนื่องจากสูญเสียจากการล้นออกจากแก้ว และสาเหตุที่เลือกใช้บีกเกอร์แก้วเพราะสะดวกในการตวง และไม่สะท้อนคลื่นไมโครเวฟเหมือนบีกเกอร์โลหะ

2.3.1 การเตรียมวงจรหกวอร์ตก่อนการวัด

การเตรียมวงจรหกวอร์ตก่อนการวัด เป็นการทำให้วงจรหกวอร์ตพร้อมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้วัดตัวอย่างน้ำยาง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ แมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกวอร์ต และการทดสอบกำเนิดค่าความถี่

ในส่วนของการแมทซ์อิมพีแดนซ์เป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินการทุกครั้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้จ่ายให้วงจรหกวอร์ตเนื่องจากวงจรหกวอร์ตเดิมถูกออกแบบให้ทำงานที่ 1 GHz [8],[9] และ เพื่อให้สามารถทดสอบได้ในช่วง 1-3 GHz จึงต้องเพิ่มวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างพอร์ต P2 ของวงจรหกวอร์ตกับหัวต่อ BNC ที่ต่อกับ

โพรบปลายเปิด วงจรที่ผู้วิจัยใช้ คือ วงจรแมทซ์โครงข่ายแบบพาดรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์แบบพาด

จากรูปที่ 5 วงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 ตัว และตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว โดยตัวเก็บประจุไฟฟ้า C3 ต่อแบบขนาน ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C2 ต่อแบบอนุกรมและตัวเก็บประจุไฟฟ้า C1 ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและขนานกับหัวต่อ BNC

โดยผลการทดสอบที่ได้จากการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกวอร์ต คือ การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ระหว่างวงจรหกวอร์ตกับโพรบปลายเปิดขณะป้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ต่าง ๆ ตกกระทบตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจาง ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกความถี่ไมโครเวฟสำหรับนำมาเป็นแหล่งกำเนิดให้วงจรหกวอร์ตเพื่อวัดและทดสอบน้ำยางข้นเจือจาง การทดสอบแมทซ์อิมพีแดนซ์ ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการส่งความถี่ไมโครเวฟที่ค่าความถี่ใด ๆ จากแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟผ่านไปยังวงจรหกวอร์ต โดยมักจะพิจารณาจากค่า VSWR โดยในงานวิจัยมักกำหนดให้ค่า $VSWR < 2$ ถึงจะยอมรับได้ว่ามีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานวิจัย และเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบกับผลวัดของเครื่อง

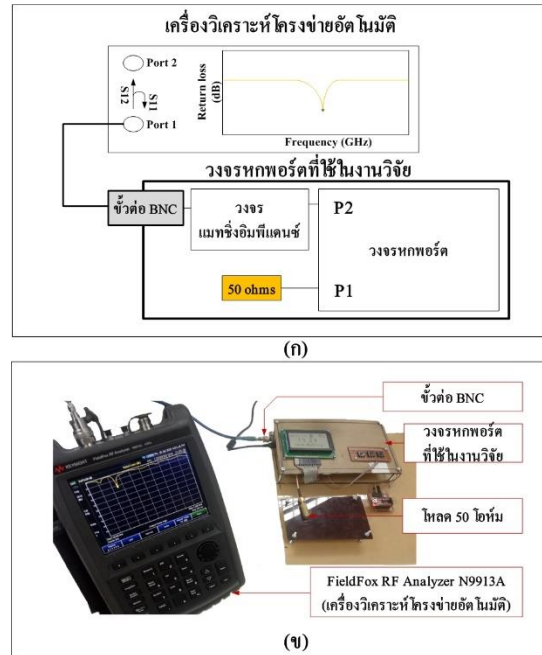
วิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ จึงต้องทำการแปลงจาก VSWR เป็น Return loss (R_L) ตามสมการ

$$R_L = -20 \log_{10} \left[\frac{VSWR-1}{VSWR+1} \right]$$

$$R_L = -20 \log_{10} \left[\frac{1}{3} \right] = 9.542 \text{ dB}$$

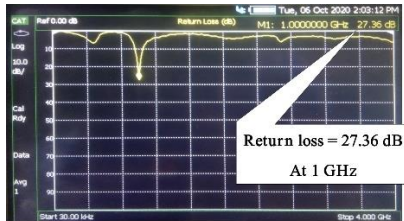
$$R_L \approx 10 \text{ dB}$$

จากสมการหากมีการปรับแมทซ์อิมพีแดนซ์แล้ว ณ ความถี่ไมโครเวฟที่สามารถให้ค่า R_L ที่ได้มากกว่า 10 dB จะถือว่าการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพระหว่างแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ ณ ค่าความถี่นั้นกับวงจรหกร์ เนื่องจากเป็นค่าสูญเสียการอธิบายว่ามีค่ามากกว่าอาจดูผิดปกติ ดังนั้นให้พิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของผลวัดค่าจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ โดยจะวัดค่าออกมาในรูปแบบ S11 โดย $R_L = -S11$ ดังนั้นการสะท้อนกลับที่ยอมรับได้ควรมีค่า $S11 < -10 \text{ dB}$ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดมักแสดงผลด้วยค่า R_L จึงถือว่ามากกว่า 10 dB เป็นการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานวิจัย สังเกตเพิ่มเติมผลวัดค่า R_L จะมีลักษณะลดลงเมื่อมีการสูญเสียน้อย แต่แสดงผลวัดเป็นบวกดังผลวัดดังรูปที่ 7 สำหรับการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกร์ทำได้โดยอาศัยโหลด 50 โอห์ม ต่อเข้ากับขั้ว P1 ของวงจรหกร์ เพื่อแทนค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ และต่อเครื่องวัดสเปกตรัมอนาไลเซอร์เข้ากับขั้ว P2 โดยมีผังการต่อแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรหกร์
(ก) ผังการต่อเพื่อวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์
(ข) การต่อเพื่อทดสอบจริง

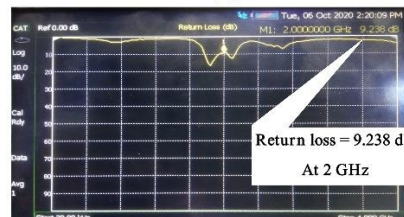
จากรูปที่ 6 ผลการวัดค่าการแมทซ์อิมพีแดนซ์วงจรหกร์แสดงเป็นค่า Return loss (RL) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ใช้ FieldFox RF Analyzer N9913A ในโหมด CAT (CAT/vector network analysis) โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 และ รูปที่ 7 สำหรับการทดสอบผู้วิจัยออกแบบให้ใช้ค่าความถี่เริ่มต้นที่ 1 GHz



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 ผลการวัดแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรพอร์ต ณ ความถี่ต่าง ๆ (ก) 1 GHz (ข) 1.5 GHz (ค) 2 GHz และ (ง) 2.16 GHz

ตารางที่ 1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ หลังการแมทซ์อิมพีแดนซ์

ความถี่ (GHz)	Return loss
1	27.36
1.5	20.78
2	9.24
2.16	31.63

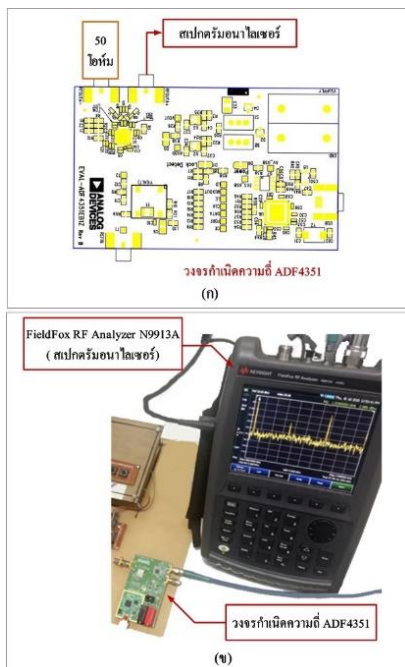
จากตารางที่ 1 และ รูปที่ 7 (ก)-(ง) แสดงผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ โดยประกอบด้วยผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของวงจรพอร์ตเมื่อทำการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1, 1.5, 2 และ 2.16 GHz และจากรูปที่ 7 และตารางที่ 1 ค่า Return loss ที่อ่านได้ คือ ค่า S11 จาก Network analyzer มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ซึ่งการทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการส่งคลื่นไมโครเวฟที่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz โดยต้องการให้กำลังงานคลื่นส่วนใหญ่จากวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 ส่งผ่านไปยังวงจรพอร์ตได้มากที่สุด การกำหนดให้ Return loss ที่ยอมรับได้ต้องไม่ต่ำกว่า 10 dB ที่ความถี่ที่ต้องการทดสอบ หมายถึงการรับประกันว่ากำลังสะท้อนกลับจะมีไม่เกิน 10% ของกำลังงานสูงสุดที่วงจรกำเนิดความถี่นี้สามารถจ่ายให้กับโหลด 50 โอห์ม

จากการแมทซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรพอร์ตพบว่าความถี่ไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้วงจรพอร์ต ประกอบด้วยค่าความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่วงจรพอร์ตสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรพอร์ตกับแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟได้มากกว่า 20dB ซึ่งแสดงว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถเดินทางจากแหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟผ่านวงจรพอร์ตและวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยมีกำลังงานสะท้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำหรือเท่ากับร้อยละ 1 และเป็น การส่งผ่านกำลังงานได้มากถึงร้อยละ 99 ณ ความถี่นั้น

เมื่อปรับแมทซ์อิมพีแดนซ์แล้ว กระบวนการถัดไปทำการปรับความถี่ของโมดูลกำเนิดความถี่แบบหลาย

ความถี่ ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยใช้โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยกำหนดให้ค่ากำลังงานของแต่ละความถี่มีค่าเท่ากับ +5dBm โดยจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าความถี่เท่านั้น ซึ่งทำการปรับได้ โดยอาศัยโปรแกรม ADF435x

สำหรับผลการทดสอบในขั้นตอนนี้ คือ การวัดค่ากำลังงานของความถี่ที่ถูกกำเนิดด้วยเครื่องสเปกตรัมอานาไลเซอร์ โดยติดตามผังการทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟและการต่อทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
(ก) ผังการต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟ
(ข) การต่อทดสอบกำเนิดความถี่ไมโครเวฟจริง

จากรูปที่ 8 เมื่อมีการต่อตามผังการต่อและดำเนินการวัดกำลังงานด้วยสเปกตรัมอานาไลเซอร์ ผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 9



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 กำลังงานของความถี่ (ก) 1 GHz , (ข) 1.5 GHz และ (ค) 2.16 GHz

จากรูปที่ 9 แสดงผลการกำเนิดความถี่ของโมดูล ADF4351 ด้วยการแสดงค่ากำลังงาน ณ ความถี่ที่ต้องการกำเนิด สำหรับผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังงานของแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz

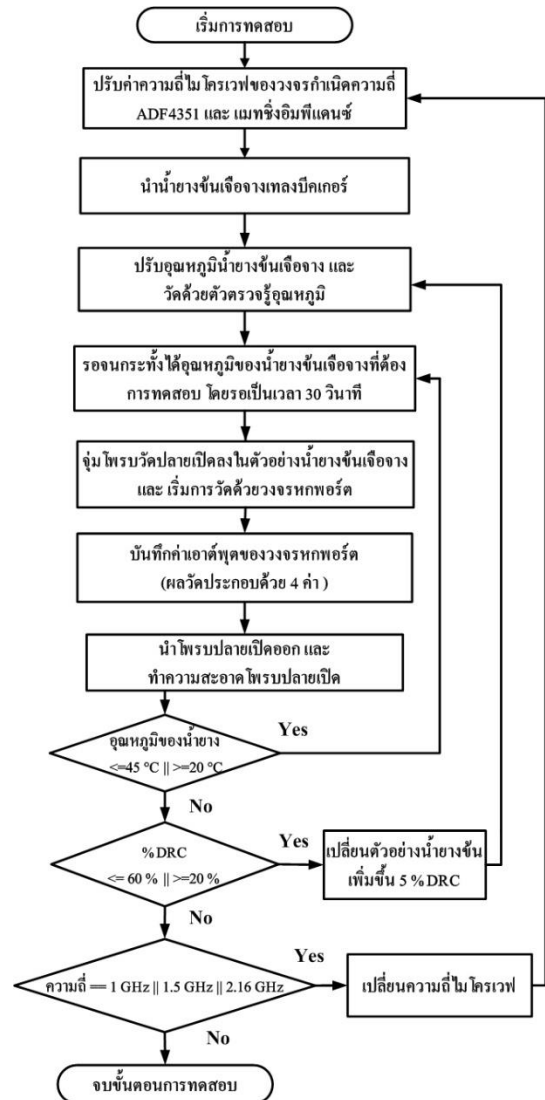
ความถี่ (GHz)	กำลังงาน (dBm)
1	3.344
1.5	4.645
2.16	3.550

จากตารางที่ 2 พบว่าโมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 สามารถกำเนิดความถี่ 1 GHz, 1.5 GHz และ 2.16 GHz ได้ค่าความถี่ตรงตามต้องการ โดยมีการสูญเสียกำลังงานเล็กน้อยจากที่โปรแกรมไว้ +5 dBm นอกจากนี้หากใช้โมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 กำเนิดความถี่ต่ำกว่า 2.2 GHz จะมีความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 และ 3 (กรณีค่าความถี่ 3 เท่าของความถี่ที่ต้องการไม่เกิน 4.4 GHz) จะเกิดขึ้นมาพร้อมกับความถี่ที่ต้องการ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของโมดูลกำเนิดความถี่ ADF4351 ที่ระบุมาจากทางบริษัท Analog devices

2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างน้ำยางด้วย วงจรหกพอร์ต

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวัดและทดสอบการวัดค่ากำลังงานสะท้อนของวงจรหกพอร์ตในตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจากที่ความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ซึ่งกระบวนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 ขั้นแรกของขั้นตอนการวัดและทดสอบเริ่มจากการเปลี่ยนค่าความถี่ไมโครเวฟของวงจรกำเนิดความถี่ ADF4351 โดยในการทดสอบนี้เริ่มจาก 1 GHz, 1.5 GHz และ 2.16 GHz ตามลำดับ



รูปที่ 10 แผนผังขั้นตอนการวัดและทดสอบ

ทุกครั้งที่เปลี่ยนความถี่ จะต้องปรับแมทซ์เพื่อให้เกิดการส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายความถี่ไมโครเวฟ (วงจรกำเนิดความถี่ ADF4351) ไปสู่โพรบได้มากที่สุด สำหรับขั้นตอนการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางชั้นเจลจากที่นำมาใช้ในการวัดด้วยวงจรหกพอร์ต โดยงานวิจัยนี้ทดสอบที่อุณหภูมิ 20 25 30 35 40 และ 45°C

ข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางข้นเจือจางในช่วงค่า 20-60 %DRC ที่แต่ละค่า %DRC จะถูกควบคุมอุณหภูมิของน้ำยางในช่วง 20-45 °C ผู้วิจัยจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และการวัด 1 ครั้งผู้วิจัยได้ชุดข้อมูลประกอบด้วยการวัดข้อมูล 4 รายการดังนี้

- 1) ค่ากำลังงานสะท้อนในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 4 ค่า คือ P3-P6 โดยทั้ง 4 ค่าเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกอ่านด้วยตัวแปรอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 16 บิต ทำให้มีค่าอยู่ในช่วง 0-65535
- 2) ค่า %DRC ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ
- 3) ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำยางข้นเจือจางที่ตรวจจับด้วยตัวตรวจรู้อุณหภูมิ (DS18B20)
- 4) ค่าความถี่ที่ใช้จ่ายให้วงจรพอร์ต

โดยรายการข้อมูลดังกล่าวนี้จะประกอบอยู่ในหนึ่งชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำยางข้นเจือจางด้วยวงจรพอร์ต

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

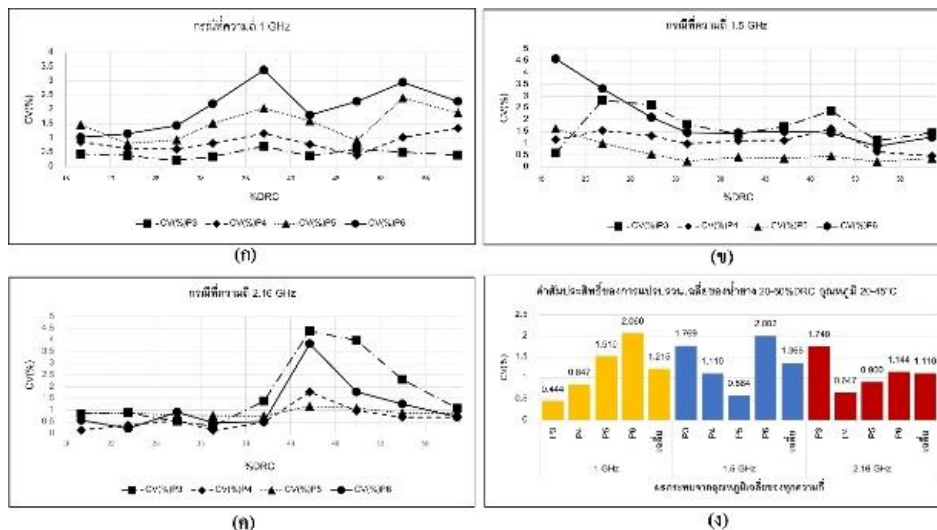
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ 2 ส่วนสำคัญ คือ ความเป็นเชิงเส้นระหว่าง %DRC กับค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR และ ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR โดยสรุปได้ดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานที่อ่านได้จากพอร์ต P5 มีความเป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด โดยมีค่า $R^2 = 0.928$ ซึ่งหมายความว่าที่ความถี่ 1 GHz ผลการวัดค่ากำลังงานของ SPR มีความเป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC ของตัวอย่างน้ำยางที่ใช้ในการทดสอบมากที่สุด

ตารางที่ 3 ความเป็นเชิงเส้นระหว่าง %DRC กับค่ากำลังงานไฟฟ้าของ SPR

ความถี่ (GHz)	พารามิเตอร์	ค่า R2	ค่าผลต่างของเลขดิจิทัล
			16 บิตที่อ่านได้จากพอร์ต เมื่อทดสอบวัดน้ำยาง 20 % และ 60 % DRC
1.000	P3	0.723	686.000
	P4	0.000	1851.000
	P5	0.928	5685.000
	P6	0.901	5334.000
1.500	P3	0.300	1035.000
	P4	0.028	1351.000
	P5	0.134	1182.000
	P6	0.402	3154.000
2.160	P3	0.413	331.000
	P4	0.742	994.000
	P5	0.277	501.000
	P6	0.856	969.000

และจากตารางที่ 3 พบว่าทั้ง 3 ค่าความถี่สามารถหาความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า %DRC ที่นำมาทดสอบได้ 4 ความสัมพันธ์ต่อหนึ่งค่าความถี่ โดยแสดงความเป็นเชิงเส้นของค่ากำลังงานแต่ละพอร์ต กับ %DRC ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และผลการทดสอบพบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่า P5 ให้ค่า R^2 สูงสุด ส่วนความถี่ 1.5 GHz ค่า P6 ให้ค่า R^2 สูงสุด และที่ความถี่ 2.16 GHz ค่า P6 ให้ค่า R^2 สูงสุด และจากการทดสอบพบว่าพอร์ตที่ให้ค่าความเป็นเชิงเส้นสูงสุดเปลี่ยนไปเมื่อทดสอบที่ความถี่ 1.5 GHz ซึ่งเกิดจากวงจรดีเทคเตอร์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง สำหรับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR

จากรูปที่ 11 (ก) – 11 (ค) พบว่าที่ความถี่ 1 GHz อุณหภูมิของน้ำยางที่ค่า %DRC ต่าง ๆ เฉลี่ยทุกค่ามีผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดจากค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางที่มีค่า %DRC เดียวกันขณะทำการวัดทดสอบที่อุณหภูมิต่างกันเป็น 0.444% , 0.847%, 1.510% และ 2.06 % ส่วนที่ความถี่ 1.5 GHz ผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดเป็น 1.769%, 1.110%, 0.584% และ 2.002% และที่ความถี่ 2.16 GHz ผลกระทบต่อกำลังงานพอร์ต P3, P4, P5 และ P6 คิดเป็น 1.749%, 0.647%, 0.900% และ 1.144% เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบค่าผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยาง ผู้วิจัยจึงเฉลี่ยค่ากำลังงานทั้ง 4 พอร์ต ของกรณีความถี่ 1, 1.5 และ 2.16 GHz ให้ค่า CV(%) เป็น 2.06% , 2.00% และ 1.14% ตามลำดับ ดังรูปที่ 11 (ง) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิส่งผลกระทบท่อการวัดที่ความถี่ 2.16 GHz น้อยที่สุด

4.สรุป

จากผลการวัดน้ำยางที่ค่า 20-60 %DRC ในช่วงอุณหภูมิ 20-45°C โดยใช้เทคนิคการวัดด้วย SPR พบว่าที่ความถี่ 1 GHz ค่ากำลังงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า %DRC มากที่สุด หากใช้สมการเส้นตรงในการสร้างแบบจำลองวัด %DRC ที่ค่าความถี่ 1 GHz ให้ผลวัดค่า %DRC ได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงของน้ำยางมากที่สุด รองลงมาคือใช้ความถี่ 2.16 GHz และ 1.5 GHz ตามลำดับ ส่วนผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางที่ส่งผลต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้จาก SPR พบว่าที่ความถี่ 2.16 GHz ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนของน้ำยางน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำยางต่ำสุด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยสามารถสรุปข้อได้เปรียบของความถี่ที่สูง และ ต่ำกว่า 2 GHz ของเทคนิคการวัดด้วย SPR ได้ว่าหากใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz จะให้ค่าความแม่นยำในการทำนายค่า

%DRC มากกว่าความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz นอกจากนี้ที่ความถี่สูงกว่า 2 GHz จะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 2 GHz สำหรับหลักการเลือกความถี่ไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานผู้วิจัย พิจารณาเลือก 2 ค่าความถี่ คือ 1 GHz และ 2.16 GHz มาสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC เนื่องจากที่ความถี่ 1 GHz มีความเป็นเชิงเส้นกับ %DRC มากที่สุด และมีค่าพิสัยสูงสุด ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย %DRC ด้วยสมการเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งหมายถึงค่ากำลังงานที่วัดได้นั้นสามารถทำนายด้วยสมการเส้นตรงได้ใกล้เคียงกับค่า %DRC จริงที่นำมาทดสอบ ประกอบกับค่าพิสัยที่สูงเป็นผลให้สามารถวัดค่า %DRC ได้ละเอียดเมื่อเทียบกับค่าพิสัยที่ต่ำกว่า และที่ความถี่ 2.16 GHz แม้จะมีค่าความเป็นเชิงเส้นและพิสัยที่ต่ำกว่า แต่พบว่ามีความแปรปรวนจากอุณหภูมิของตัวอย่างน้อยกว่าที่นำมาทดสอบต่อค่ากำลังงานที่อ่านได้น้อยกว่า 1 GHz ผู้วิจัยอาศัยข้อดีของทั้ง 2 ความถี่นี้มาสร้างแบบจำลองทำนาย %DRC ด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองด้วยแมชชีนเลิร์นนิง (Machine learning) ต่อไปในอนาคต

ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ดำเนินการทดสอบที่ 3 ค่าความถี่ที่ประกอบด้วย 1, 1.5 และ 2.16 GHz เท่านั้น ไม่รวมค่าความถี่อื่นๆ ที่อยู่ระหว่าง 1-2.16 GHz

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2564 และได้รับการสนับสนุนในส่วนของอาคารสถานที่ และอุปกรณ์ทำการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นอกจากนี้ขอขอบคุณทุนบัณฑิตศึกษา วิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2562 ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยนี้

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Sunheem P. Development of Methodology and Instrument for Measuring Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Techniques. [PhD in Physics]. Songkla: Prince of Songkla University; 2015.
- [2] Peter P W Weiss MSc, PhD, C Chem, FRSC. Natural Rubber Latex Protein Allergy [Internet]. International Children's Medical Research Society; 2010 [cited 2022 Jun 20]. Available from : https://www.mambaby.com/uploads/tx_ddownload/Latex_Report.pdf.

- [3] Tillekeratne LMK, Karunanayake L, Sarath Kumara PH and Weeraman S. A rapid and accurate method for determining the dry rubber content and total solid content of NR latex. *Polymer Testing*. 1988; 8(5): 353-8.
- [4] Hamza ZP, Dilfi KFA, Muralidharan MN and Kurian T. Microwave Oven for the Rapid Determination of Total Solids Content of Natural Rubber Latex. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2018; 57(9): 918-23.
- [5] Zhao Z, Jin X, Zhang L and Yu X. A novel measurement system for dry rubber content in concentrated natural latex based on annular photoelectric sensor. *International Journal of Physical Sciences*. 2010; 5(3): 251-60.
- [6] Kumar RR, Hussain SN and Philip J. Measurement of Dry Rubber Content of Natural Rubber Latex with a Capacitive Transducer. *Journal of Rubber Research*. 2007; 10(1): 17-25.
- [7] Jayanthi T and Sankaranarayanan PE. Measurement of Dry Rubber Content in Latex Using Microwave Technique. *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*. 2005; 5(3): 50-4.
- [8] Somwong S and Chongcheawchamnan M. A Portable System for Rapid Measurement of Dry Rubber Content With Contaminant Detection Feature. *IEEE SENSORS JOURNAL*. 2018; 18(20): 8329-37.
- [9] Julrat S, Chongcheawchamnan M, Khaorapapong T, Patarapiboolchai O, Kririksh M and Robertson ID. Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application. *IEEE SENSORS JOURNAL* 2012; 12(10): 3019-30.
- [10] Ghretli MM, Khalid K, Grozescu IV, Sahri Mohd H and Abbas Z. Dual-Frequency Microwave Moisture Sensor Based on Circular Microstrip Antenna. *IEEE SENSORS JOURNAL* 2007; 7(12): 1749–56.
- [11] Khalid K, Hassan J and Yusef WDW. Dielectric phenomena in hevea rubber latex and its applications. in *Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*; 1997 May 25-30; Seoul, South Korea; 1997.

- [12] Bilik V. SIX-PORT MEASUREMENT TECHNIQUE: PRINCIPLES, IMPACT, APPLICATIONS [Internet]. Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava: Slovakia; 2016 [cited 2022 Jun 20] . Available from: <https://s-team.sk/docs/SixPortTechnique.pdf>.
- [13] Scott Mackenzie D. Determining Concentration by Weight and by Volume - Application to Polymer Quenchants. Technical Report. Madison and Van Buren Aves. P. O. Box 930 Valley Forge: Houghton International Inc: United States of America; 2014.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การใช้ IOT อย่างง่ายและราคาถูกเพื่อปรับปรุงการจัดการในโรงเรือนสุกรขุนระบบปิด

The use of simple and cheap IOT to improve the management system
in the evaporative swine house

สมควร แววดี^{1)*} และ อภิชาติ อาจนาศีว²⁾

Somkuan Vaodee^{1)*} and Apichart Artnaseaw²⁾

¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi.

39 Moo 1, Khlong Luang District, Pathum Thani 12110

² Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

123 Mitrapap Road, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen 40002

Received: 22 February 2023

Revised: 26 June 2023

Accepted: 7 August 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

โรงเรือนสุกรขุนระบบปิดที่สามารถเลี้ยงสุกรขุนได้ 600 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบอาหารและน้ำ ระบบทำความเย็น ระบบไฟกกและระบบเติมส่วนน้ำ พร้อมระบบ IOT ได้ถูกสร้างขึ้น โดยระบบ IOT ใช้การปรับปรุง code จาก open source ใช้บอร์ด ESP 32 ที่มีคุณภาพสูงและเซ็นเซอร์เป็นแบบอุตสาหกรรมเกรด ใช้ Grafana เป็น dashboards ในการแสดงผล เมื่อนำไปเลี้ยงสุกรขุนจริงเป็นเวลา 5 เดือน แล้วทำการทดสอบอัตราการเจริญเติบโต อัตราการแลกน้ำหนัก คุณภาพซากของสุกรขุน และการทำงานของระบบ IOT พบว่า อัตราการ

เจริญเติบโตสูงสุด 1,053 กรัม/ตัว/วัน อัตราการแลกน้ำหนัก 2.55 คุณภาพซากของสุกรขุน A หรือ AA และระบบ IOT ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีราคาต่ำ 20,000 บาท

คำสำคัญ: IOT โรงเรือนสุกรขุนระบบปิด การจัดการฟาร์มสุกร อัตราการแลกน้ำหนัก

Abstract

The evaporative swine house of 600 pigs consisting of; feed and water, cooling, piglet lighting, wastewater filling and IOT system using modified code from open source, high-quality ESP 32 board and industrial grade sensor and Grafana as dashboards for displaying data was built to feed pigs for 5 months. Average daily gain, feed conversion rate, Lenden Speck Quotient of pigs and IOT system operation were performed. The result showed that average daily gain displayed maximum growth rate of 1,053 g/pc/day. Feed conversion rate was 2.55 and Lenden Speck Quotient of pigs were A or AA. IOT system works continuously and low price of 20,000 baht.

Keywords: IOT: Evaporative swine house: Swine house management: Feed conversion rate

*ติดต่อ: somkuan.v@en.rmutt.ac.th, 081-5137169

1. บทนำ

การเลี้ยงสุกรขุนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การเลี้ยงในโรงเรือนปิดและการเลี้ยงในโรงเรือนเปิด ซึ่งมีรูปแบบและข้อดี-ข้อเสียต่างกัน ดังนี้ 1) การเลี้ยงในโรงเรือนเปิดเหมาะกับเกษตรกรรายย่อยทั่วไปที่ต้องการเลี้ยงสุกรจำนวนน้อย มีข้อดี คือ ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำเพราะไม่ได้ใช้เทคโนโลยีอะไร นอกจากค่าโครงสร้างทั่วไปในการทำโรงเรือนเท่านั้น แต่มีข้อเสีย คือ การจัดการในฟาร์มยุ่งยาก ใช้แรงงานมากซึ่งมีผลให้การหาแรงงานทำได้ยากตามไปด้วย และเป็นการเลี้ยงสุกรที่มีประสิทธิภาพต่ำ คุณภาพซากสุกรไม่ดี ส่งผลให้ขายได้ราคาต่ำตามไปด้วย [1–3] 2) การเลี้ยงในโรงเรือนปิด เหมาะกับเกษตรกรรายใหญ่ ที่ต้องการเลี้ยงสุกรจำนวนมากกว่า 500 ตัว มีข้อดี คือ การจัดการในฟาร์มง่ายและเป็นการเลี้ยงสุกรที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสีย คือ เงินลงทุนเริ่มต้นสูงจากอุปกรณ์การเลี้ยงต่าง ๆ เช่น แผงเย็น (cooling pad) และพัดลมระบายอากาศของระบบทำความเย็น รวมไปถึงระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือน นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการจัดการระหว่างเลี้ยงยังมีสูงด้วย [4–6] แต่เนื่องจากปัจจุบันมีการระบาดของโรค African swine fever (ASF) ที่มีผลทำให้สุกรตายไปจำนวนมาก เพราะโรคนี้เป็นเชื้อไวรัสที่มีการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็วเมื่อเชื้อโรคเข้าฟาร์มแล้วต้องทำลายสุกรทั้งหมดในฟาร์มเพื่อป้องกันการกระจายไปสู่พื้นที่อื่นและที่สำคัญโรค ASF ยังไม่มีวัคซีนป้องกัน วิธีการป้องกันไม่ให้เชื้อโรคเข้าสู่ฟาร์มจึงเป็นวิธีการที่ดีที่สุดขณะนี้ [7–9] ซึ่งเชื้อโรคจะเข้าสู่ฟาร์มผ่านช่องทางหลัก คือ 1) สัตว์พาหะต่าง ๆ เช่น แมลงวัน นก หนูและสัตว์เลื้อยคลานอื่น เป็นต้น

และ 2) คนงาน ที่อาจมีการไปสัมผัสเชื้อโรคจากนอกฟาร์มแล้วนำเข้ามาในฟาร์ม ดังนั้นการจัดการในฟาร์มที่ดีเพื่อลดปัจจัยหลัก 2 อย่างข้างต้น ที่สามารถทำได้ง่ายในโรงเรือนปิดจึงจะจัดการป้องกัน ASF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การนำระบบ Internet of Things (IoT) มาใช้ในฟาร์มสุกรเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกัน ASF [10–15] แต่ระบบเหล่านี้มีความซับซ้อนและราคาแพง มีผลให้การใช้ IoT จำกัดเฉพาะในฟาร์มขนาดใหญ่เท่านั้น ส่วนฟาร์มรายย่อยยังไม่มี การนำมาใช้ การลดต้นทุนในการสร้างและพัฒนา ระบบการจัดการด้วย IoT จึงเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาระบบการเลี้ยงสุกรระบบปิด โดยนำ IoT อย่างง่ายและราคาถูกลงมาใช้ในโรงเรือนสุกรขุนแบบปิดขนาด 600 ตัว ซึ่งใช้กับ 4 ระบบหลัก คือ 1) ระบบให้อาหารและน้ำที่ผสมอาหารในถาดเพื่อให้สุกรกินง่าย 2) ระบบทำความเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน 3) ระบบกกสุกร และ 4) ระบบเติมน้ำจากส้วน้ำ แล้วประเมินผล การใช้งานระบบและประสิทธิภาพการเลี้ยงด้วยค่า อัตราการเจริญเติบโตของสุกรขุน (ADG) อัตราการแลกน้ำหนักของสุกร (FCR) และค่าดัชนีความหนาแน่นสันหลังต่อความกว้างของกล้ามเนื้อสันนอก (LSQ)

2. วิธีการวิจัย

2.1 สร้างต้นแบบโรงเรือนพร้อมระบบ IoT

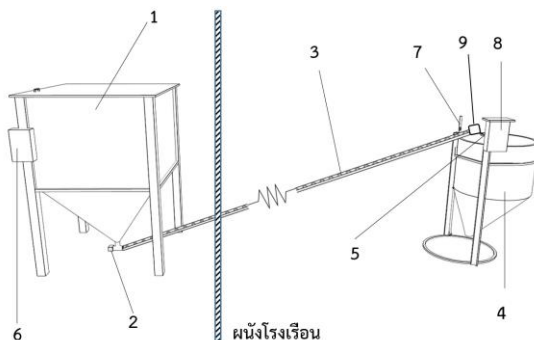
การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการสร้างโรงเรือนตามแบบที่แสดงในรูปที่ 1 ที่ประกอบด้วยคอก 25 ตัว จำนวน 24 คอก ไซโล พัดลม และแผงเย็น

รั้วทึบ สูง 2 เมตร ทำจากเมทอลชีต

ผักตม	คอก 1	คอก 2	คอก 3	คอก 4	คอก 5	คอก 6	คอก 7	คอก 8	คอก 9	คอก 10	คอก 11	คอก 12	แผง	โซลิด
	คอก 13	คอก 14	คอก 15	คอก 16	คอก 17	คอก 18	คอก 19	คอก 20	คอก 21	คอก 22	คอก 23	คอก 24	เข็น	

รูปที่ 1 ผังโรงเรือนแบบปิดขนาด 600 ตัว

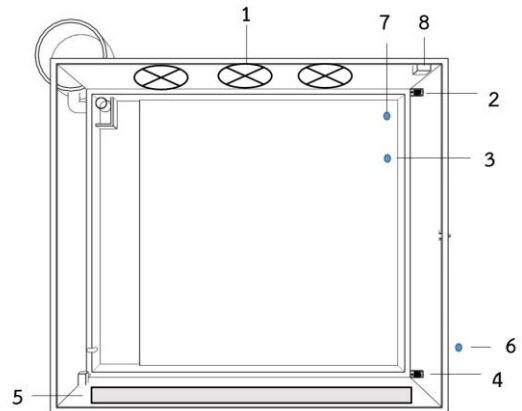
จากนั้นทำการสร้างและติดตั้งระบบให้อาหารและน้ำที่ผสมอาหารในถาดเพื่อให้สุกรกินง่าย ดังรูปที่ 2 ที่ประกอบด้วย ถังโซลิด (1) จุดบ่อนอาหาร (2) ท่อนเกลียวลำเลียงอาหาร (3) ถังอาหารพร้อมถาดรอง (4) เซ็นเซอร์วัดระดับอาหาร (5) อุปกรณ์ควบคุมจุดบ่อนอาหาร (6) โซลินอยวาล์วน้ำ (7) อุปกรณ์ควบคุมการบ่อนอาหารและน้ำพร้อมระบบ IOT ส่วนอาหารและน้ำ (8) มอเตอร์ต้นกำลัง (9)



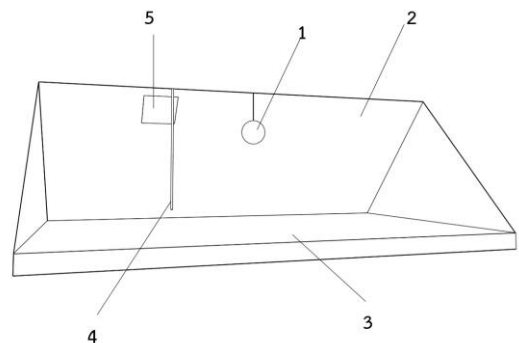
รูปที่ 2 แบบอย่างง่ายของระบบให้อาหารและน้ำที่ผสมอาหารในถาดเพื่อให้สุกรกินง่ายแบบอัตโนมัติ

ระบบทำความเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือน ดังรูปที่ 3 ที่ประกอบด้วย พัดลม (1) อุปกรณ์ควบคุมพัดลม (2) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิสำหรับควบคุมพัดลม (3) อุปกรณ์ควบคุมปั้มน้ำแผงเย็น (4) แผงเย็น (5) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสำหรับควบคุมปั้มน้ำที่ติดตั้งนอกโรงเรือน (6) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสำหรับระบบ IOT (7) อุปกรณ์ควบคุมระบบ IOT (8) ระบบกกสุกร ดังรูปที่ 4

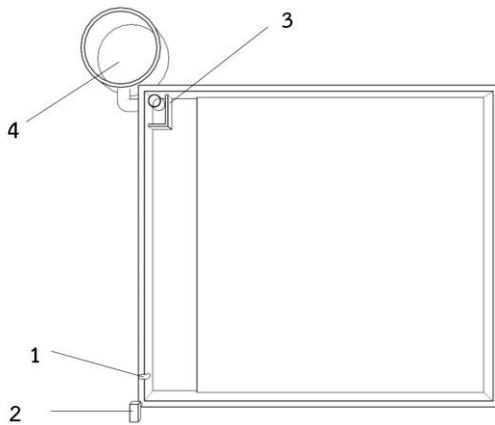
ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้กักได้ ประกอบด้วย หลอดไฟอินฟราเรด (1) กระโจมกกสุกรเคลื่อนที่ (2) ไม้พาเลทรองนอน (3) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (4) กล่องควบคุมอุณหภูมิในกระโจมระบบ IOT (5) และระบบเติมน้ำจากส้วมน้ำ ดังรูปที่ 5 ที่ประกอบด้วย บอลวาล์วที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนเปิด-ปิด (1) อุปกรณ์ควบคุมการเติมน้ำระบบ IOT (2) อุปกรณ์ควบคุมปล่อยน้ำ (3) บ่อรวบรวมน้ำจากส้วมน้ำ (4)



รูปที่ 3 แบบอย่างง่ายของระบบทำความเย็น



รูปที่ 4 แบบอย่างง่ายของระบบกกสุกรแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 5 แบบอย่างง่ายของระบบเติมน้ำจากส้วม
น้ำแบบอัตโนมัติ

หลักการทำงานของต้นแบบโรงเรือนพร้อมระบบ
จัดการอัตโนมัติ มีดังนี้

ระบบให้อาหารและน้ำแบบอัตโนมัติ หน่วยนี้ทำ
ขึ้นมาเพื่อให้สุกรกินง่ายแบบอัตโนมัติ มีการทำงาน
คือ เมื่อเซ็นเซอร์วัดระดับอาหารซึ่งติดตั้งไว้ที่ถังสุดท้าย
ตรวจจับได้ว่า มีอาหารในถังอาหารที่มีถาดให้สุกรกิน
มีระดับต่ำกว่าที่ตั้งไว้

บอร์ดในกล่องควบคุมการป้อนอาหารจะสั่งให้รีเลย์
ไปเปิดการทำงานของมอเตอร์ต้นกำลังเพื่อป้อน
อาหารจากถังไซโลมาที่ถังอาหารที่มีถาดให้สุกรกิน
โดยจะเติมที่ถึงแรกก่อน เมื่ออาหารเต็ม เกลียว
ลำเลียงอาหารจะนำอาหารมาเติมที่ถังที่ 2 และจะ
เป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงถังอาหารสุดท้ายที่
เมื่ออาหารถึงระดับที่ต้องการ บอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ไป
ปิดการทำงานของมอเตอร์ต้นกำลัง โดยระดับอาหาร
สามารถตั้งระยะได้ 10-80 ซม. นอกจากนี้ในกล่อง
ควบคุมจะมีบอร์ดที่ใช้ส่งข้อมูลผ่าน wifi เพื่อส่งข้อมูล
ทุกครั้งที่มีการทำงานของมอเตอร์ต้นกำลังไปที่
โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ เพื่อให้รู้ปริมาณ

อาหารที่สุกรกินในแต่ละวัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญ
ในการติดตามผลการเลี้ยงในแต่ละช่วง ส่วนการ
ควบคุมการให้น้ำไปผสมกับอาหารในถาดทำได้ โดย
การตั้งเวลาที่ Timer ให้โซลินอยวาล์วน้ำเปิดน้ำในช่วง
เวลาทุก 10-60 นาที เพื่อกระตุ้นการกินอาหารของสุกร
โดยสามารถตั้งปริมาณน้ำในแต่ละช่วงเวลาได้ ในช่วง
500 – 2,000 ซีซีต่อครั้งต่อถังอาหาร ระบบทำความ
เย็น หน่วยนี้ทำขึ้นมาเพื่อรักษาอุณหภูมิและระบาย
แก๊สในโรงเรือนโดยมีการทำงาน คือ เมื่อเซ็นเซอร์วัด
อุณหภูมิตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิในโรงเรือนสูงกว่าที่ตั้ง
ไว้ (โดยระดับอุณหภูมิที่ตั้งได้ในช่วง 25-30 °C ขึ้นอยู่
กับช่วงอายุของสุกรที่เลี้ยง) บอร์ดในกล่องควบคุม
อุณหภูมิในโรงเรือนจะสั่งให้ inverter จ่ายความถี่
เต็มที่ 50 เฮิร์ตซ์ ให้พัดลมทำงานเต็มที่ เพื่อให้พัดลม
ทำงานระบายความร้อนและแก๊สที่เกิดขึ้นในโรงเรือน
ออกไป จนอุณหภูมิต่ำลงจนถึงระดับที่ต้องการ บอร์ด
จะสั่งให้ inverter จ่ายความถี่น้อยลง ส่งผลให้พัดลม
หมุนช้าลงเพื่อประหยัดพลังงาน แต่จะไม่ต่ำกว่า 35
เฮิร์ตซ์ เพราะพัดลมต้องทำงานเป็นระดับต่ำสุดเพื่อให้
มีการระบายแก๊สในโรงเรือนด้วย (ความเร็วลมต่ำสุด
0.5 เมตร/วินาที) ส่วนแผงเย็น ระบบจะให้ปั๊มน้ำ
ทำงานเมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนและความชื้นอากาศ
ด้านนอกถึงเกณฑ์ที่ตั้งไว้ กล่าวคือ ปั๊มน้ำจะทำงาน
เมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้และความชื้น
อากาศด้านนอกต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ (ความชื้นอากาศ
ภายนอกไม่เกิน 85%RH) ในขณะอุณหภูมิสูงกว่าค่า
ที่ตั้งไว้ ปั๊มน้ำจะไม่ทำงานตลอดเวลา เพราะความชื้น
ในโรงเรือนจะมากเกินไปซึ่งความชื้นนี้จะมาจากแผง
เย็น แต่จะทำงาน 2 นาที พัก 5 นาที ซึ่งควบคุมด้วย
Timer การทำงานแบบนี้จะทำต่อเนื่องจนกว่าอุณหภูมิ

จะลดลงต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ในโรงเรือนจะมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ พร้อมบอร์ดที่ใช้ส่งข้อมูลผ่าน wifi เพื่อส่งข้อมูลไปที่โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ แบบ real time และสามารถดูย้อนหลังได้ถึง 1 ปี เพื่อให้รู้อุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือนในแต่ละวัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการติดตามผลการเลี้ยงในแต่ละช่วง นอกจากนี้ยังมีระบบการเตือนทาง Line เมื่ออุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือนมากกว่าค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งใช้ค่าดัชนีความเครียดจากความร้อน (Heat stress index) เป็นตัวชี้วัด คือ 165 [16,17] โดยคำนวณจากสมการ

$$\text{ดัชนีความเครียด} = \frac{\text{อุณหภูมิ}(F)}{\text{ความชื้น}(\%RH)} \quad (1)$$

ระบบกกสุกรแบบอัตโนมัติ ระบบนี้ทำขึ้นมาเพื่อรักษาอุณหภูมิในกกสุกรให้คงที่ตามต้องการ โดยมีการทำงาน คือ เมื่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่เป็นแท่งสแตนเลสตรวจจับได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบะใจกกตรงตำแหน่งสุกรนอนบนไม้พาเลทต่ำกว่าที่ตั้งไว้ บอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ไปเปิดการทำงานของหลอดไฟอินฟราเรดเพื่อให้หลอดไฟอินฟราเรดทำงาน จนอุณหภูมิสูงจนถึงระดับที่ต้องการ บอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ไปปิดการทำงานของหลอดไฟอินฟราเรด โดยระดับอุณหภูมิสามารถตั้งระยะได้ 10-50 °C ระบบส่งข้อมูลผ่าน wifi เพื่อส่งข้อมูลไปที่โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ แบบ real time และสามารถดูย้อนหลังได้ถึง 1 ปี

ระบบจัดการส้วมน้ำ ระบบนี้ทำขึ้นมาเพื่อให้การเติมน้ำมีความแม่นยำและระบายน้ำได้สะดวก โดยมีการทำงาน คือ เมื่อต้องการเติมน้ำที่ส้วมน้ำ คนงานจะเปิดสวิทช์ให้ไฟฟ้าจ่ายให้บอลลวาล์วที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนเปิด-ปิด ขนาด ½ นิ้ว – 2 นิ้ว ซึ่งวาล์วจะเปิดน้ำให้เติมน้ำ จนถึงเวลาที่กำหนดไว้ โดยมีค่าในช่วง 1-30

นาที่ อุปกรณ์ Timer relay จะทำการปิดบอลลวาล์วโดยอัตโนมัติ โดยที่ไม่ต้องให้คนงานมาปิด ทำให้ปริมาณน้ำในส้วมน้ำมีค่าตามกำหนด ส่วนการระบายน้ำใช้การยกท่อ PVC ขนาด 4 นิ้วในแนวตั้งขึ้นมา ซึ่งตำแหน่งของท่อ PVC จะอยู่ด้านในคอกสุกร เพื่อลดเวลาเดินออกไปด้านนอกเหมือนระบบอื่น แต่จะทำการยกขึ้นมากดด้านข้างเพื่อกันสุกรเข้าไปทำลายท่อ PVC ซึ่งการจัดการส้วมน้ำต้องทำเป็นประจำทุกวัน การทำระบบนี้ให้ง่ายและแม่นยำจะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานส่วนนี้ได้ ระบบส่งข้อมูลผ่าน wifi เพื่อส่งข้อมูลไปที่โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ แบบ real time และสามารถดูย้อนหลังได้

การประมวลผลทำขึ้นมาเพื่อติดตามปริมาณอาหารที่สุกรกินแต่ละวัน อุณหภูมิกกสุกรในระหว่างการกกสุกร อุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือน ในระหว่างการเลี้ยง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีการเก็บและส่งขึ้นไปเก็บไว้บน Cloud ที่สามารถดูข้อมูลได้ผ่านโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ แบบ real time และนอกจากนี้ยังสามารถดูย้อนหลังได้ถึง 1 ปี รูปแบบนี้ส่งผลต่อการเลี้ยงหลักๆ คือ 1) ข้อมูลที่ได้ไม่มีความคลาดเคลื่อนเหมือนที่ได้จากการใช้คนอ่าน 2) ข้อมูลบันทึกต่อเนื่องที่ส่งผลให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ทันที และตรวจสอบย้อนหลังได้ ทำให้เจ้าของหรือผู้จัดการสามารถดึงข้อมูลต่าง ๆ ที่ผ่านมาได้ตามช่วงเวลาที่ต้องการ โดยเป็นการตรวจสอบการทำงานของพนักงานที่ผ่านมาในแต่ละช่วงเวลาได้ พร้อมกันนี้ระบบยังมีสัญญาณเตือนผ่าน Line เมื่อข้อมูลอาหารมีค่าผิดปกติได้ หรืออุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือนมีค่าเกินค่าที่ตั้งไว้ได้

2.2 การทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้มีดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิ ความชื้น และอัตราเร็วลมในโรงเรือน

อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในโรงเรือน โดยทำการวัดจำนวน 3 จุด พร้อมกัน ตลอดการเลี้ยง 5 เดือน ส่วนอัตราเร็วลมทำการสุ่มวัดเดือนละ 2 ครั้ง เพื่อหาการกระจายตัวและความสม่ำเสมอ โดยอุณหภูมิวัดด้วยเครื่อง CR23X MICROLOGGER หัววัด thermocouple type k ค่าความถูกต้อง $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ความชื้นอากาศวัดด้วยเครื่อง Testo 440 ความละเอียด 0.1 %RH ค่าความถูกต้อง $\pm 2\% \text{RH}$ อัตราเร็วลมวัดด้วยเครื่อง Testo 416 ความละเอียด 0.1 เมตร/วินาที ค่าความถูกต้อง ± 0.2 เมตร/วินาที

2.2.2 การทดสอบอัตราการเจริญเติบโตของสุกร

อัตราการเจริญเติบโตของสุกรขุน คัดจากสุกรทุกตัวทั้งที่มีชีวิตและที่ตายระหว่างการเลี้ยง โดยมีสูตรการคิดคำนวณ คือ

$$\text{อัตราการเจริญเติบโต} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันระหว่างการเลี้ยง 2 ครั้ง}} \quad (2)$$

ตัวอย่างเช่น ซึ่งครั้งแรก 10 ตัว น้ำหนักทั้งหมด 100 กก. เฉลี่ยตัวละ 10 กก. เมื่อวันที่ 1 ม.ค. ซึ่งครั้งที่ 2 วันที่ 31 ม.ค. เหลือ 8 ตัว น้ำหนัก 160 กก. น้ำหนักสุกรที่ตาย 2 ตัว 30 กก. ได้น้ำหนักทั้งหมด 160+30 กก. เฉลี่ยตัวละ 19 กก. ได้ค่า $\text{ADG} = (19-10) / 30 = 0.3$ กก. หรือ 300 กรัม/ตัว/วัน นั่นคือ $\text{ADG} = 300$ กรัม/ตัว/วัน โดยทำการเก็บข้อมูลโดยการสุ่มซึ่งน้ำหนักสุกร 10 ตัว ในแต่ละช่วงเวลาตลอดการเลี้ยง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

2.2.3 การทดสอบอัตราการแลกน้ำหนักของสุกร

อัตราการแลกน้ำหนักของสุกร มีสูตรคำนวณ คือ

$$\text{อัตราการแลกน้ำหนักของสุกร} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่กิน}}{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น}} \quad (3)$$

ตัวอย่างเช่น จากวันที่ 1 ม.ค. ถึงวันที่ 31 ม.ค. กินอาหารไปทั้งหมด 200 กก. จำนวนสุกรเริ่มต้น 10 ตัว น้ำหนักทั้งหมด 100 กก. เฉลี่ยตัวละ 10 กก. เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเหลือสุกร 8 ตัว น้ำหนัก 160 กก. เฉลี่ยตัวละ 20 กก. น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด 60 กก. หรือเฉลี่ย = $20 - 10 = 10$ กก./ตัว น้ำหนักสุกรที่ตาย 2 ตัว น้ำหนักรวม 30 กก. เฉลี่ยตัวละ 15 กก. น้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย = $15 - 10 = 5$ กก./ตัว น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทั้งสุกรมีชีวิตและตาย = $60 + 10 = 70$ กก. ค่า FCR การผลิต = $200/70 = 2.86$ นั่นคืออัตราการแลกน้ำหนักของสุกร = 2.86 โดยทำการเก็บข้อมูลโดยการสุ่มซึ่งน้ำหนักสุกร 10 ตัว ในแต่ละช่วงเวลาตลอดการเลี้ยง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย พร้อมทั้งหาปริมาณอาหารที่สุกรกินเฉลี่ย

2.2.4 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้อาหารของสุกร

ประสิทธิภาพการใช้อาหารของสุกรขุน ใช้ค่าดัชนีความหนาไขมันสันหลังต่อความกว้างของกล้ามเนื้อสันนอก (Lenden Speck Quotient) เป็นตัวชี้วัด ซึ่งนิยมใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการประเมินคุณภาพซากสุกร และใช้อ้างอิงในการกำหนดราคาซากสุกร โดยทั่วไป ส่วนวิธีการประเมินคุณภาพซาก(LSQ) มีดังแสดงในรูปที่ 6

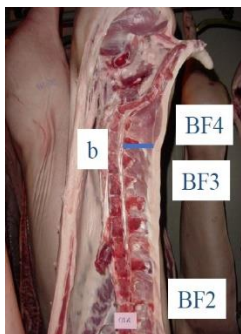
$$LSQ = \frac{BF3+BF4}{2b} \quad (4)$$

BF3 ตรงจุดไขมันสันหลังที่มุมล่างของฐานรูปสามเหลี่ยมของกล้ามเนื้อ Gluteus Medius

BF4 ตรงจุดไขมันสันหลังบางที่สุดของกล้ามเนื้อ Gluteus Medius

b วัดกล้ามเนื้อจากจุดที่มุมล่างของฐานรูปสามเหลี่ยมของกล้ามเนื้อ Gluteus Medius ไปตั้งฉากกับแนวของท่อน้ำไขสันหลัง (75-80 มิลลิเมตร)

รูปที่ 6 ส่วนต่าง ๆ ที่ต้องวัดเพื่อประเมินคุณภาพซาก



รูปที่ 6 ส่วนต่าง ๆ ที่ต้องวัดเพื่อประเมินคุณภาพซาก

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าต่างกันแตกต่างกัน 1-3 °C แตกต่างกันตามอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน มีอุณหภูมิตลอดการเลี้ยง 5 เดือน อยู่ในช่วง 26-34 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สุกรต้องการ จึงประเมินว่าระบบควบคุมทำงานได้ดี ส่วนความชื้นอากาศในโรงเรือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าต่างกันแตกต่างกัน 3-6%RH แตกต่างกันตามความชื้นอากาศภายนอกโรงเรือน ความชื้นอากาศในโรงเรือนตลอดการเลี้ยง 5 เดือน อยู่ในช่วง 62-86 %RH ซึ่งความชื้นสูงสุดที่สุกรต้องการ คือ 80%RH จากการตรวจสอบย้อนหลัง พบว่า ความชื้นที่เกิน

80%RH เกิดขึ้นในช่วงฝนตกที่ความชื้นอากาศภายนอกสูงเกิน 85%RH อยู่แล้ว มีผลให้ความชื้นอากาศในโรงเรือนสูงตามไปด้วย

อัตราเร็วลมในโรงเรือน (อัตราเร็วลมที่ต้องการ คือ 0.5-1.8 เมตร/วินาที แตกต่างกันตามอายุสุกร) ซึ่งอัตราเร็วลมในโรงเรือนทั้ง 3 จุด ต่างกัน 0.4 เมตร/วินาที โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-1.5 เมตร/วินาที ประเมินว่าอยู่ในความเร็วลมที่กำหนด ระบบพัดลมช่วยระบายแก๊สที่เกิดขึ้นในโรงเรือนและระบายความชื้นในโรงเรือน ออกไปอย่างสม่ำเสมอ (แก๊สแอมโมเนียในโรงเรือนวัดได้ 15-36 พีพีเอ็ม) จึงทำให้ผลกระทบของความชื้นอากาศในโรงเรือนมีผลกับสุกรน้อยลงได้

ระบบ IOT ที่มีการเตือนทาง Line เมื่อตรวจความเครียด มีค่าเกิน 165 มีการเตือน 17 ครั้ง ตลอดการเลี้ยง 5 เดือน ดังนี้ 1) เตือนเนื่องจากไฟฟ้าดับ ทำให้อุณหภูมิและความชื้นสูงเกิน จำนวน 4 ครั้ง 2) เตือนเนื่องจากปั๊มน้ำแผงเย็นเสีย ทำให้อุณหภูมิสูงเกิน จำนวน 1 ครั้ง 3) เตือนเนื่องจากฝนตก ทำให้ความชื้นสูงเกิน จำนวน 12 ครั้ง ซึ่งระบบการเตือนทาง Line มีผลทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้รวดเร็ว ไม่เกิน 30 นาที ซึ่งส่งผลให้สุกรเสียหายน้อยลงด้วย

ผลการทดสอบอัตราการเจริญเติบโตของสุกรขุน และอัตราการแลกน้ำหนักของสุกร แสดงในตารางที่ 1 และ 2 อัตราการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 167-1,053 กรัม/ตัว/วัน ซึ่งดีกว่าในโรงเรือนที่ไม่ใช้ IOT ที่มีค่าอยู่ในช่วง 120-840 กรัม/ตัว/วัน ค่า FCR สุดต่ำเท่ากับ 2.55 ซึ่งเป็นค่าที่ดีกว่าเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในคอกปิดที่ได้ข้อมูลการเลี้ยงจากเครือข่ายของบริษัทที่รับซื้อสุกรจากฟาร์ม

แห่งนี้ โดยค่า FCR มาตรฐานสุดท้ายมีค่า 2.77 ค่า FCR ที่แตกต่างกันมากถึง 0.2 เป็นผลมาจากสภาวะอุณหภูมิและความชื้นอากาศในโรงเรือนตลอดการเลี้ยงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและแก้ไขปัญหาได้เร็วดังที่กล่าวมาแล้ว

คุณภาพซากสุกรที่เลี้ยงในโรงเรือนต้นแบบแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ได้ค่า A หรือ AA ซึ่งประเมินว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ถึงดีมาก เป็นผลมาจากระบบป้อนอาหารทำงานได้ดีส่งผลให้สุกรมีอาหารกินตลอดเวลา และช่วงท้ายของการเลี้ยง ระบบ IOT มีการเตือนว่าสุกรกินอาหารเกินเกณฑ์ จึงมีการจำกัดอาหารด้วยเพื่อลดการสะสมไขมันของสุกร

ตารางที่ 1 อัตราการเจริญเติบโตของสุกร

อายุสุกร(วัน)	น้ำหนักสุกร (กก.)	ADG(กรัม/ตัว/วัน)
20	8.1	-
29	9.6	167
42	14.2	354
49	19	686
60	25	545
77	37	706
104	58	778
122	73	833
150	100	964
169	120	1,053

ตารางที่ 2 อัตราการแลกน้ำหนักของสุกร

อายุสุกร (วัน)	น้ำหนักสุกร (กก.)	ปริมาณอาหารสะสมที่ใช้เลี้ยง (กก.)	FCR
20	8.1	0.0	-
29	9.6	1.0	0.67
42	14.2	6.8	1.26
49	19	12.5	1.19
60	25	25.0	2.08
77	37	59.0	2.83
104	58	94.0	1.67
122	73	129.0	2.33
150	100	197.0	2.52
169	120	248.0	2.55

ตารางที่ 3 คุณภาพซากของสุกรขุน

น้ำหนักสุกร (กก.)	b	BF3	BF4	LSQ	คุณภาพซาก
124	61	14	11	0.20	AA
112	61	21	11	0.26	A
132	81	18	11	0.18	AA
119	96	16	11	0.14	AA
121	76	16	21	0.24	A
128	71	21	13	0.24	A
119	71	16	19	0.25	A
117	66	16	13	0.22	A
121	68	10	11	0.15	AA
122	76	11	9	0.13	AA

ระบบ IOT ที่สร้างขึ้น แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1) code ที่เลือกปรับปรุงจาก open source ทั่วไป และ 2) hardware ใช้บอร์ด ESP 32 ที่มีคุณภาพสูงและเซ็นเซอร์เป็นแบบอุตสาหกรรมเกรด เพื่อความทนทานในการใช้งานเพราะในโรงเรียนมีการกัดกร่อนสูง อุปกรณ์และเซ็นเซอร์ทุก ๆ ตัวใช้ของ DFRobot และ 3) dashboards ใช้ Grafana เป็นตัวแสดงผล ซึ่งตัวอย่างข้อมูลที่แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 7 ผลจากการติดตามการใช้งานของระบบ IOT ตลอดการเลี้ยง 5 เดือน พบว่า ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่องมีประสิทธิภาพ ไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เนื่องจากระบบ IOT ที่สร้างขึ้นมีการนำไปใช้งานในโรงเรียนเปิดขนาดเล็กจริง ซึ่งมีการทดสอบและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องมา 2 ปีก่อนหน้านี้แล้ว ส่วนราคาคันทุนแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ระบบอาหาร และน้ำมีราคา 1 แสนบาท (บริษัททั่วไปมีราคา 2.5-3 แสนบาท) ระบบ IOT ทั้ง 4 ระบบ มีราคา 20,000 บาท



รูปที่ 7 ตัวอย่างข้อมูลอาหารที่สุกรกิน
ตรวจเช็คความเครียด อุณหภูมิและความชื้น
ที่ส่งขึ้นไปเก็บไว้บน Cloud

ผู้เลี้ยงสามารถดูข้อมูลได้ผ่านมือถือหรือคอมพิวเตอร์แบบ real time และนอกจากนี้ยังสามารถดูย้อนหลังได้ถึง 1 ปี อัตราการตายของสุกรขุนที่เลี้ยงในโรงเรียนที่ใช้ IOT เท่ากับ 2% น้อยกว่าในโรงเรียนที่ไม่ใช้ IOT ที่มีค่า 5%

4. สรุป

โรงเรียนพร้อมระบบจัดการในโรงเรียนสุกรขุนระบบปิด ที่สามารถเลี้ยงสุกรขุนได้ 600 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบอาหารและน้ำอัตโนมัติ ระบบทำความเย็นอัตโนมัติ ระบบไฟกกอัตโนมัติ และระบบเติมน้ำอัตโนมัติ พร้อมระบบ IOT ได้ถูกสร้างขึ้น เมื่อนำไปเลี้ยงสุกรขุนจริงเป็นเวลา 5 เดือน พบว่า ได้ประสิทธิภาพการเลี้ยงสุกรขุนเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจาก FCR ที่ลดลงจาก 2.77 เป็น 2.55 คุณภาพซากสุกรประเมินว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีถึงดีมาก ลดแรงงานคนจาก 3 คนเหลือ 1 คน คิดเป็นการจ้างคนงานได้ถึง 18,000 บาทต่อเดือน หรือ 216,000 บาทต่อปี น้ำหนักสุกรเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 105 กิโลกรัม เป็น 115 กิโลกรัม คิดเป็นเพิ่มขึ้น 9.5 % พร้อมทั้งได้รูปแบบการเลี้ยงใหม่ที่มีระบบการจัดการอัตโนมัติช่วยให้การเลี้ยงง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ระบบจะมีการแจ้งเตือน เมื่อดัชนีความเครียด มีค่าเกิน 165 ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำหรับ บริษัท อีชีเทค ฟาร์ม จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นอย่างสูง ที่สนับสนุนเงินทุน และสถานที่ในการในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Kitikoon P, Sreta D, Tuanudom R, Amonsin A, Suradhat S, Oraveerakul K, et al. Serological evidence of pig-to-human influenza virus transmission on Thai swine farms. *Veterinary Microbiology*. 2011; 148(2): 413–8.
- [2] Dawangpa A, Lertwatcharasarakul P, Boonsoongnern A, Ratanavanichrojn N, Sanguankiat A, Pinniam N, et al. Multidrug resistance problems targeting piglets and environmental health by *Escherichia coli* in intensive swine farms. *Emerging Contaminants*. 2022; 8: 123–33.
- [3] Varma VS, Parajuli R, Scott E, Canter T, Lim TT, Popp J, et al. Dairy and swine manure management – Challenges and perspectives for sustainable treatment technology. *Science of The Total Environment*. 2021; 778: 146319.
- [4] Górniak W, Popiela E, Szuba-Trznadel A, Konkol D and Korczyński M. Chapter 5 - Smart feed additives for livestock. *Smart Agrochemicals for Sustainable Agriculture*. 2022; 103–38.
- [5] Deng L, Guo S, Zhou M, Liu L, Liu C and Dong S. A silk derived carbon fiber mat modified with Au@Pt urchinlike nanoparticles: A new platform as electrochemical microbial biosensor. *Biosens Bioelectron*. 2010; 25(10): 2189–93.
- [6] Hu Z, Yang Q, Tao Y, Shi L, Tu J and Wang Y. A review of ventilation and cooling systems for large-scale pig farms. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 89: 104372.
- [7] GUO S, LYU X and HU X. Optimal design of culling compensation policy under the African Swine Fever—Based on simulations of typical pig farms in China. *Journal of Integrative Agriculture*. 2022.
- [8] Gallardo C, Fernández- Pinero J and Arias M. African swine fever (ASF) diagnosis, an essential tool in the epidemiological investigation. *Virus Research*. 2019; 271: 197676.
- [9] Sánchez- Vizcaíno JM, Mur L and Martínez-López B. African swine fever (ASF): Five years around Europe. *Vet Microbiology*. 2013; 165(1): 45-50.

- [10] Li Z, Luo C, Teng G and Liu T. Estimation of Pig Weight by Machine Vision: A Review BT - Computer and Computing Technologies in Agriculture VII. 2014: 42–9.
- [11] Von Borell E. The biology of stress and its application to livestock housing and transportation assessment¹. Journal of Animal Science. 2000; Nov 30: 79.
- [12] Hoste R, Suh HK and Kortstee H. Smart farming in pig production and greenhouse horticulture: An inventory in The Netherlands. 2017.1–43.
- [13] Kashiha M, Bahr C, Ott S, Moons CPH, Niewold TA, Ödberg FO, et al. Automatic weight estimation of individual pigs using image analysis. Computers and Electronics in Agriculture. 2014; 107: 38–44.
- [14] Kongsro J. Estimation of pig weight using a Microsoft Kinect prototype imaging system. Computers and Electronics in Agriculture. 2014; 109: 32–5.
- [15] Park Y, Eom G-U, Lee D, Yuk A and Moon J. Chapter 12 - Assessing the impact of the IoT technology– based swine farm environment management system on farm productivity. In: Bochtis D, Achillas C, Banias G, Lampridi MBT-B-E and A, editors. Academic Press; 2021: 207–20.
- [16] Ewing SA, Lay Jr DC and von Borell E. Farm animal well-being : stress physiology, animal behavior, and environmental design. Upper Saddle River (N.J.); Prentice-Hall: 1999.
- [17] Holiday A. Air Flow Visualization in an Office Room. Computers and Electronics in Agriculture. 2015; 4(4): 9–16.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาความเหมาะสมของการอบแห้งสำหรับพืชกัญชง
โดยวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้สภาวะสุญญากาศ

A Study of Optimization Drying for Hemp

by Computational Fluid Dynamic Method Under Vacuum Conditions

ชาตรี เป้นตามวา¹⁾ อภิชาติ อัจฉนาเสียว^{2)*} เกียรติกร นาบุตดา³⁾ และ สมควร แวดดี⁴⁾Chatree Pentamwa¹⁾, Apichart Artnaseaw^{2)*}, Kriengkrai Nabudda³⁾ and Somkuan Vaodee⁴⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

²⁾ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

³⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

199 หมู่ 6 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57000

⁴⁾ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

¹⁾ Program of Innovation Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

123 Mitrapap Road, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen 40002

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

123 Mitrapap Road, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen 40002

³⁾ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

199 Moo 6, Mueang Chiangrai District, Chiangrai, 57000

⁴⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

39 Moo 1, Khlong Luang District, Pathum Thani 12110

Received: 1 March 2023

Revised: 11 May 2023

Accepted: 19 May 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของพืชกัญชงโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ วัสดุและวิธีการของการวิจัยโดยนำวิธีการสุ่มไฮเปอร์คิวบ์แบบลาติน 20 คู่อันดับ มาใช้คำนวณหาค่าความดันในช่วง 10-30 kPa และอุณหภูมิ 40-60 °C จากนั้นนำไปใช้คำนวณหาเส้นทางการไหลของอากาศในห้องอบแห้งเพื่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละชั้นสำหรับพืชกัญชงโดยคุณสมบัติของพืชกัญชงที่ใช้คำนวณมีดังนี้ ความหนาแน่น 611 kg/m³ ค่าการนำความร้อน 140.8 W/m-K ผลลัพธ์ของความดันและอุณหภูมิที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละชั้นสำหรับพืชกัญชงอย่างสม่ำเสมอ คือ แบบจำลองที่ความดัน 12 kPa และมีอุณหภูมิ 57.4 °C บทสรุปของงานวิจัยนี้ของการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) สามารถคำนวณการทำงานของระบบเครื่องอบแห้งสุญญากาศได้โดยที่พัดลมหมุนด้วยความเร็วรอบ 158 rpm และความเร็วที่ใช้การดูดอากาศของปั๊มสุญญากาศ 1.61 m/s

คำสำคัญ: พืชกัญชง การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การสุ่มไฮเปอร์คิวบ์แบบลาติน

Abstract

This research aims to study the optimal drying conditions of hemp plants using a vacuum dryer's computational fluid dynamics (CFD). Material and method by Latin Hypercube Sampling (LHS) methods were used to calculate 20 pairs of pressure and temperature in the range of 10-30 kPa, 40-60 °C, and then calculate the flow of the air in the drying chamber to determine the temperature distribution in each layer for the hemp tray. The properties of the hemp plants used for the calculation were as follows: the density of 611 kg/m³, and the thermal conductivity of 140.8 W/m-K. The result there are pressure and temperature which have uniform temperature distribution for hemp were modeled with a pressure of 12 kPa and a temperature of 57.4 °C. The conclusion of research by using CFD also calculated the operation of the vacuum dryer system, where the fan rotation rate was 158 rpm and the air suction speed of the vacuum pump was 1.61 m/s.

Keywords: Hemp: Vacuum dryer: Computational fluid dynamics: Latin hypercube sampling

*ติดต่อ: aapich@kku.ac.th, 081-266-7120

1. บทนำ

ปัจจุบันกัญชงเป็นพืชที่สามารถปลูกได้ถูกต้องตามกฎหมาย แต่ถ้าต้องการปลูกในเชิงพาณิชย์ต้องมีการแจ้งขออนุญาตในการปลูกกับหน่วยงานที่รับผิดชอบ กัญชงเป็นพืชล้มลุกมีอายุได้แค่เพียงปีเดียว มีลักษณะสำคัญ ดังนี้ ส่วนของรากเป็นระบบรากแก้วมีรากแขนงจำนวนมาก ส่วนของลำต้น พบว่าลำต้นตั้งตรง สีเขียว สูงประมาณ 1-3 m มีลักษณะอวบน้ำเมื่อเป็นต้นกล้า เริ่มมีการสร้างเนื้อไม้เมื่อเจริญได้ 2-3 สัปดาห์ การเจริญเติบโตของต้นจะช้าในช่วง 6 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นจะเพิ่มความสูงอย่างรวดเร็ว จนมีความสูงเฉลี่ยคงที่ คือ ประมาณ 200 cm เนื่องจากมีการออกดอกทำให้พืชล้มลุกหยุดการเจริญเติบโต เปลือกของลำต้นสามารถลอกออกเพื่อใช้ประโยชน์จากเส้นใย โดยเปลือกนอกให้เส้นใยที่ยาว เหนียว แต่ค่อนข้างหยาบ ส่วนเปลือกในที่ดีกับเนื้อไม้ให้เส้นใยที่ละเอียดกว่าแต่สั้นกว่า ส่วนของใบเป็นใบเดี่ยว รูปฝ่ามือ ออกเรียงตรงข้าม ลักษณะของใบแตกออกเป็นแฉก ๆ ประมาณ 5-8 แฉก แต่ละแฉกเป็นรูปยาวรี ปลายและโคนสอบ ส่วนขอบใบทุกแฉกเป็นหยักแบบฟันเลื่อย มีขนาดกว้างประมาณ 0.3-1.5 cm และยาวประมาณ 6-10 cm ลักษณะของใบโดยรวมจะคล้าย ๆ กับใบละหุ่ง ใบผืน และใบมันสำปะหลัง ผิวใบด้านบนเป็นสีเขียวเข้ม ส่วนด้านล่างท้องใบมีสีเทาอ่อนเล็กน้อย มีขนต่อมกระจายทั่วผิวใบด้านบน ส่วนด้านล่างมีขนอ่อนนาบไปกับแผ่นใบ ก้านใบยาวประมาณ 4-15 เซนติเมตร ในก้านหนึ่งจะมีใบเดี่ยว 3-11 ใบ มีกลิ่นเหม็นเขียว ส่วนของดอก มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่ใต้นเดียวกัน และชนิดดอกเพศผู้และเพศเมียแยกกันอยู่

คนละต้น ในประเทศไทยพบว่า กัญชงมีดอกเพศผู้และดอกเพศเมียอยู่ต่างต้นกัน ออกดอกเป็นช่อตามซอกใบและปลายยอด โดยปกติกัญชงจะมีการติดดอกและเมล็ดในช่วง 90-120 วัน ดอกเพศผู้ ช่อดอกเพศผู้เป็นแบบ Panicle ประกอบไปด้วยกลีบเลี้ยง 5 กลีบ แยกกันเป็นอิสระมีสีเขียวอมเหลือง พบเกสรเพศผู้ 5 อัน ระยะเวลาการบานประมาณ 2 เดือน ดอกเพศเมีย เกิดตามซอกใบและปลายยอด ในบริเวณช่อดอกจะอัดตัวกันแน่น ช่อดอกเป็นแบบ Spike ประกอบด้วยกลีบเลี้ยงสีเขียวเข้มห่อหุ้มรังไข่ไว้ ภายในมี Stigma 2 อัน สีน้ำตาลแดง อายุของดอกค่อนข้างสั้นประมาณ 3-4 สัปดาห์ก็จะติดผล ส่วนของเมล็ด เป็นเมล็ดเดี่ยวรูปไข่ป้อมผิวเรียบเป็นมันมีลายประดับสีน้ำตาล เมื่อแห้งมีสีเทา ขนาดประมาณ 3-4 mm มีน้ำหนักเฉลี่ย 8-24 กรัมต่อเมล็ด 1,000 เมล็ด เมล็ดจะออกประมาณ 2-3 สัปดาห์ หลังออกดอก [1]

สารสำคัญในกัญชง คือ Cannabidiol (CBD) ซึ่งการสกัด CBD มีหลายวิธีการในการสกัด เช่น การสกัดด้วยเอทานอล การสกัดด้วย CO₂ การสกัดด้วยน้ำ การสกัดแบบ Carrier Oil Extraction การสกัดแบบ The Rick Simpson Method และการสกัดด้วยอัลตราโซนิก แต่โดยทั่วไปวิธีการสกัดด้วย อัลตราโซนิก เอทานอล และ CO₂ ได้รับการยอมรับว่าเป็นการสกัดที่ดีในปัจจุบัน เพราะมีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งมีความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ดี [2] ซึ่งก่อนเข้ากระบวนการสกัดกัญชงต้องมีการทำแห้งก่อน ปัจจุบันการอบแห้งมี 3 รูปแบบคือ แบบลมร้อน แบบลมเย็น และแบบร่วมลมร้อนกับอินฟราเรด โดยการศึกษาของ [3] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการอบแห้งโดยพบว่าการอบด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดที่สภาวะ

แวดล้อมความดันบรรยากาศทำให้สาร CBD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือ ยังมีอุณหภูมิสูงขึ้นยิ่งทำให้เปอร์เซ็นต์ของสาร CBD เพิ่มขึ้นตามแต่ต้องมีความเหมาะสมต่อการอบแห้ง การศึกษาของ [4],[5] ได้ทำการศึกษการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยพบว่าความดันและอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งซึ่งยังมีความดันลดลงยิ่งทำให้อัตราการอบแห้งได้เร็วขึ้น การวิเคราะห์การอบแห้งด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เปรียบเทียบกับการทดลองสำหรับมันฝรั่งพบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันซึ่งเป็นการศึกษาของ [6] โดยความเร็วของลมร้อนที่ 2.15 m/s อุณหภูมิ 60 °C ความดันไฟฟ้า 125 V จะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดี [7] ได้ทำการศึกษการสรางแผนการทดลองแบบละตินไฮเปอร์คิวบ์ที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม ILS สามารถค้นหาแผนการทดลองที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับทุกมิติ การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของพืชผักงูชงโดยค่าความหนาแน่นเริ่มต้นอยู่ที่ 611 kg/m³ ค่าการนำความร้อนเป็น 140.8 W/m-K [8] ผลจากการสืบค้นที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดทำการอบแห้งกัญชงที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งในสภาวะสุญญากาศเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดี คือ ทำให้วัตถุดิบแห้งเร็วและใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำซึ่งจะเป็นผลดีให้สาร CBD สูญเสียน้อยตามไปด้วย [9],[10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเท่ากับเครื่องอบแห้งสุญญากาศจริง แล้วทำการคำนวณหาอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการ CFD เพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างทั่วถึงทุกชั้น ซึ่งจะทำการสุ่มตัวอย่าง

อุณหภูมิและความดันโดยวิธีการการสุ่มตัวอย่างใช้วิธีไฮเปอร์คิวบ์แบบละตินซึ่งจะได้อุณหภูมิและความดัน 20 คู่อันดับ เพื่อหาเส้นทางการไหลของอากาศในห้องอบภายใต้สภาวะสุญญากาศ

2. วิธีการวิจัย

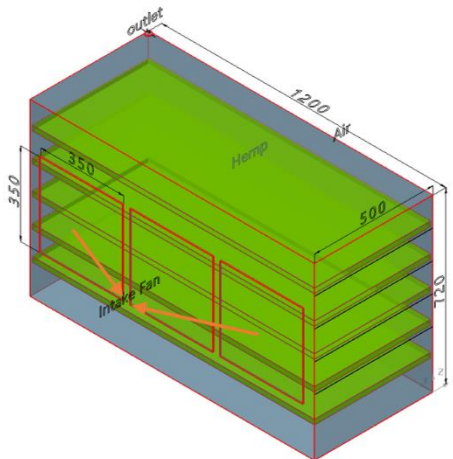
2.1 ขนาดของเครื่องอบสุญญากาศ

ขนาดของห้องอบแห้งสุญญากาศมีขนาดกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 500×1200×720 mm วัสดุทำจากเหล็ก ระบบทำความร้อนเป็นแบบปั๊มความร้อน ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศ

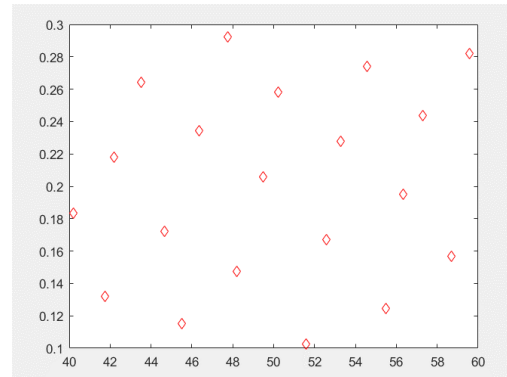
Power Shape (Autodesk Inc., San Rafael, California, USA) คือ โปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองของห้องอบแห้งโดยกำหนดให้มีจำนวนชั้นกัญชงทั้งหมด 5 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนา 30 mm ช่องพัดลมมีขนาด 350×350 mm ท่อลมดูดอากาศจากปั๊มสุญญากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขนาดแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ใน CFD
(หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

2.2 การสูมตัวอย่างไฮเปอร์คิวบแบบลาติน

วิธีไฮเปอร์คิวบแบบละตินเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [7] เพราะความง่ายในการใช้งานและมีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้โดยการทดลองนี้จะเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิธี LHS ด้วย MATLAB (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA) ซึ่งจะกำหนดช่วงย่อยของตัวแปรออกแบบแต่ละตัวเป็น 20 ค่า ช่วงความดันอยู่ที่ 10-30 kPa ความดันในช่วงดังกล่าวยังมีขีดความสามารถของการพาความร้อนในระบบได้และช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 40-60 °C ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิที่ heat pump สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ โดยที่แกนตั้งจะเป็นความดันและแกนนอนจะเป็นอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงผลการสุ่มคู่อันดับใน MATLAB

2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องอบสมุนไพรโดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench (ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA) ซึ่งมีโมดูลของการวิเคราะห์การไหลของของไหลได้โดยที่โมดูลที่นำมาใช้วิเคราะห์การไหลคือ Fluent

โดยที่เงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณมีดังนี้ การไหลของอากาศใช้ viscous model แบบ k-epsilon กำหนดให้ intake-fan เป็นความดันและอุณหภูมิขาเข้า ท่อดูดอากาศกำหนดเป็นความดันขาออก คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของกัญชง กำหนดค่าดังนี้ ความหนาแน่นเป็น 611 kg/m³ ค่าการนำความร้อนเป็น 140.8 W/m-K [11] อุณหภูมิทางออกเป็น 25 °C มีจำนวน elements 61,102 elements และมีจำนวน nodes 69,528 nodes

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

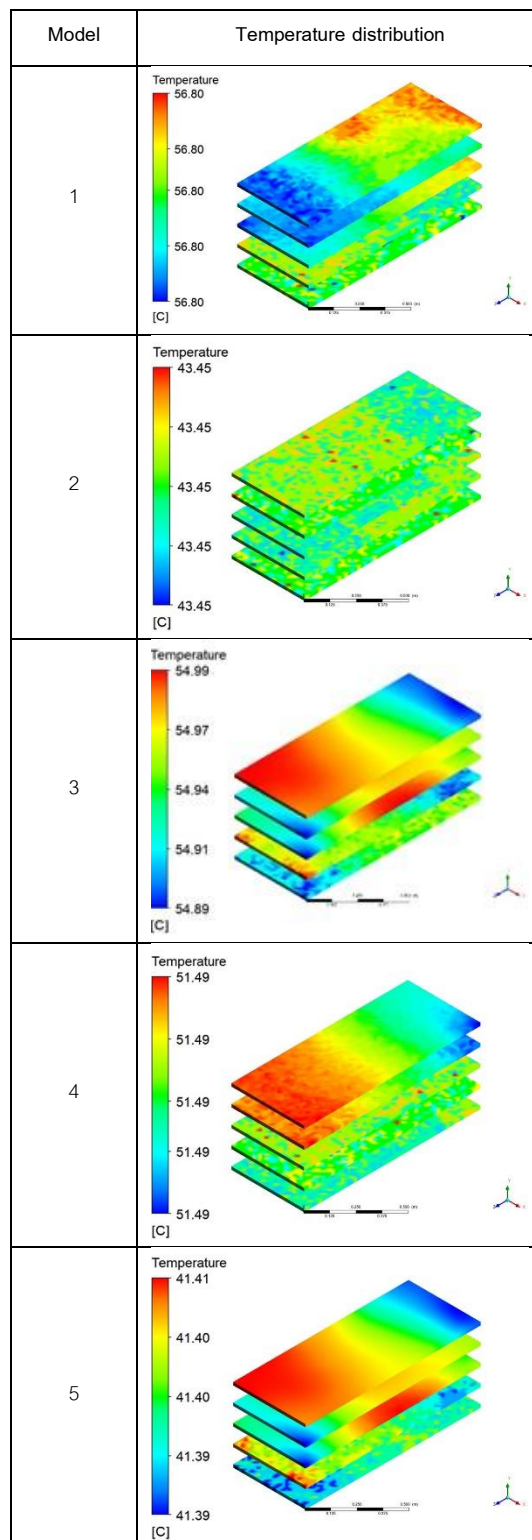
ผลการคำนวณการสัมผัสตัวอย่างของความดันและอุณหภูมิโดยวิธีไฮเปอร์คิวบแบบลาตินจะได้ 20 คู่อันดับ ดังตารางที่ 1

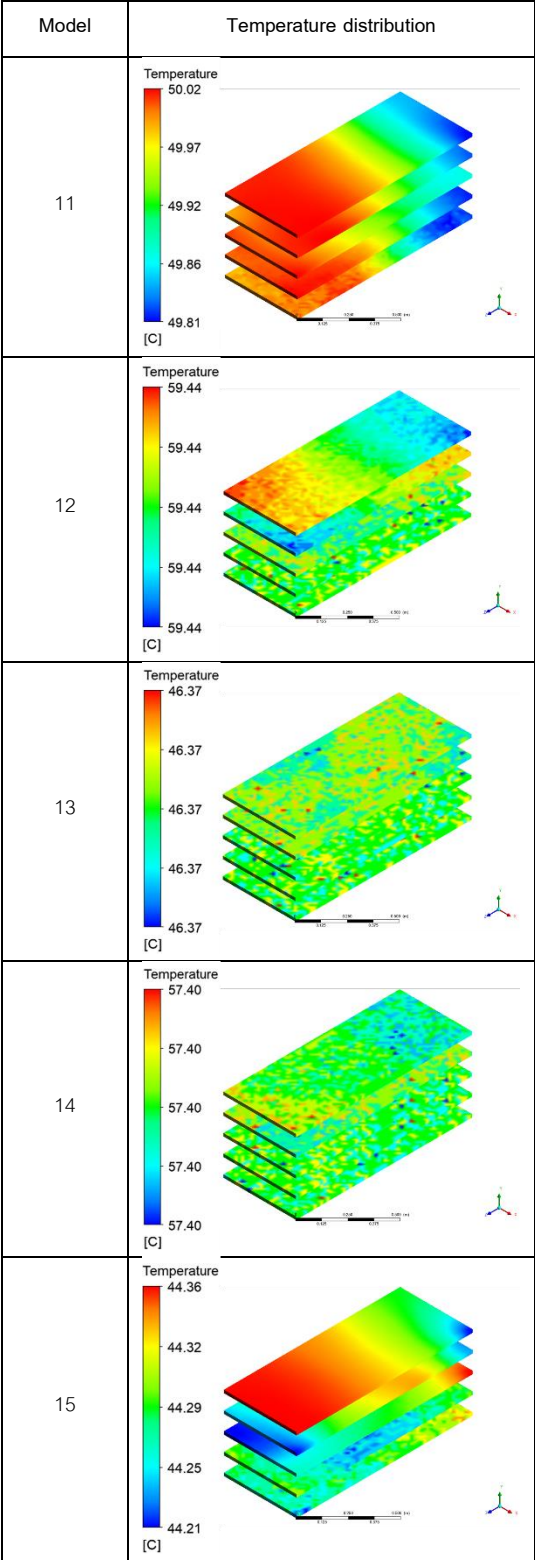
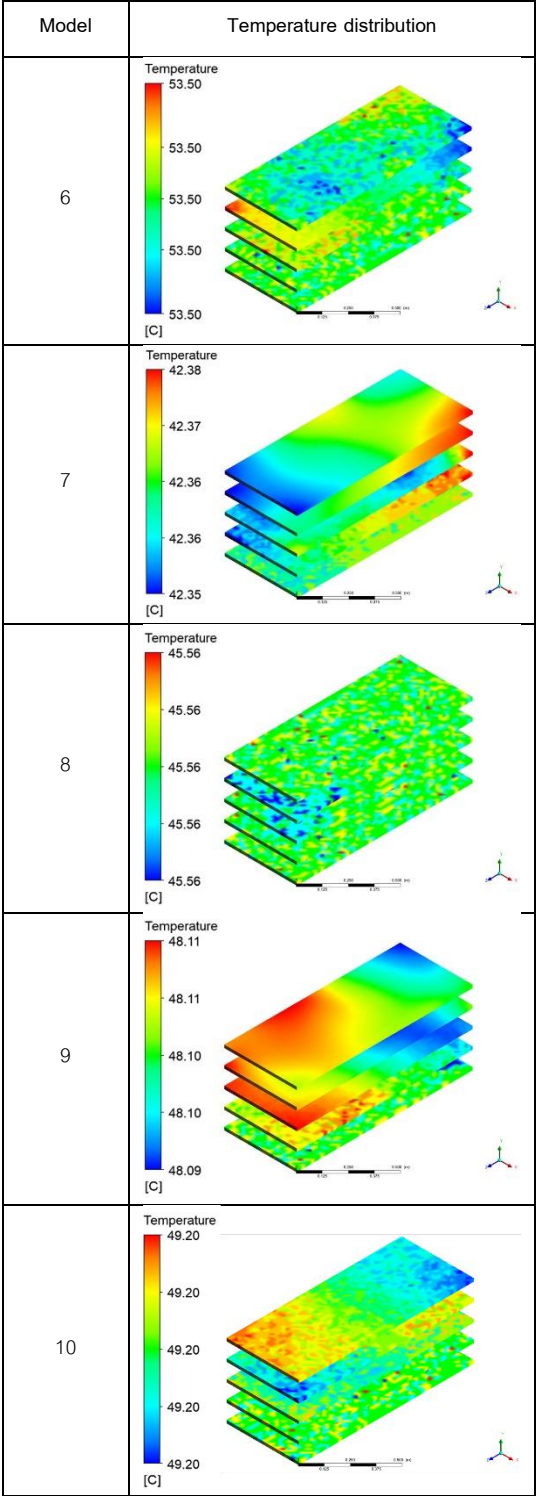
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณ CFD ของเครื่องอบสูญญากาศ

Latin hypercube sampling		
Model	Temperature (°C)	Pressure (kPa)
1	56.80	19
2	43.45	23
3	55.50	26
4	51.49	18
5	41.50	26
6	53.50	22
7	42.50	13
8	45.56	10
9	48.20	15
10	49.20	24
11	50.35	11
12	59.44	24
13	46.37	28
14	57.40	12
15	44.80	17
16	47.50	20
17	52.79	29
18	40.74	19
19	54.39	15
20	58.80	30

การวิเคราะห์ CFD การไหลของอากาศในสภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิและความดัน 20 คู่อันดับ มีการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละชั้นเป็นดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละชั้น





Model	Temperature distribution
16	
17	
18	
19	
20	

จากตารางที่ 2 model ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอุณหภูมิในทุกชั้นจะมี model 2, model 8, model 13, และ model 14 ทำให้พีชกัณขงมีความแห้งแบบทั่วถึงสามารถควบคุมอุณหภูมิในแต่ละชั้นให้มีความสม่ำเสมอซึ่งเมื่อนำอัตราเร็วของการไหลที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD มาใช้คำนวณความเร็วของอุปกรณ์ทางเข้าและทางออกจะได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเร็วของพัดลมและความเร็วลมดูดของปั๊ม

Calculate system process		
Model	Fan velocity (rpm)	Velocity outlet (m/s)
1	40	0.48
2	43	0.64
3	80	0.49
4	248	1.25
5	80	0.49
6	26	0.30
7	69	0.17
8	43	0.36
9	547	1.67
10	137	0.50
11	165	1.07
12	137	0.50
13	413	0.37
14	158	1.61
15	63	0.38
16	82	1.48
17	152	1.82
18	70	0.37
19	214	0.79
20	100	0.76

4. สรุป

ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบกัญชงคือ model 14 ซึ่งมีความดันเป็น 12 kPa และอุณหภูมิเป็น 57.40 °C โดยผลของ CFD พบว่ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทุกชั้นและมีอุณหภูมิสูงที่สุดจากการศึกษาการอบแห้งกัญชงพบว่าอุณหภูมิสูงมีผลทำให้การสกัดสาร CBD สูงขึ้นด้วย [3] โดยคำนวณความเร็วของพัดลมที่ใช้กระจายความร้อนเป็น 158 rpm และปั๊มดูดอากาศเป็น 1.61 m/s ซึ่งเครื่องอบสามารถปรับความเร็วของพัดลมและปั๊มดูดอากาศมีขีดความสามารถปรับค่าตัวแปรเพื่อใช้ทดลองผลของการศึกษานี้สามารถนำผลการคำนวณไปใช้ทดลองอบกัญชงจริงได้โดยจะใช้ model 2, model 8, model 13, และ model 14 ในการทดลองเพื่อวัดสาร CBD ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับภาคีวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Disthai. Cannabis (Internet). [cited 2022 April 3]. Available from: <https://www.disthai.com>.
- [2] Machinery Intelligence Unit. Carrier oil extraction (Internet). [cited 2022 April 4]. Available from: <https://miu.isit.or.th>.
- [3] Chen C, Wongso I, Putnam D, Khir R and Pan Z. Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (Cannabis sativa L.). Industrial Crops and Products. 2021; 172: 114051.
- [4] Ratinun L, Sirithon S, Somnuk T and Apichart A. Heat and Moisture Transfer Equations for a Vacuum Drying. KKU Research Journal. 2016; 16(2): 1-14.
- [5] Sirithon S, Ratinun L, Somnuk T and Apichart A. Drying of Carrots by Using a Vacuum Heat Pump Dryer. KKU Research Journal. 2016; 16(3): 1-11.
- [6] Benfratello S, Capitano C, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G and Sorrentino G. Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. Construction and Building Materials. 2013; 48: 745-54.
- [7] Tanongsak Bootwong and Jaratsri Rungrattanaubol. Construction of the optimal Latin hypercube designs using the iterated local search algorithm. Thai Journal of Operational Research. 2013; 2: 1-11.
- [8] Huang S, Jiao J and Guedes Soares C. Uncertainty analyses on the CFD–FEA co-simulations of ship wave loads and whipping responses. Marine Structures. 2022; 82: 103129.

- [9] Ni L, Chen Z, Mukhopadhyaya P, Zhang X, Wu Q, Yu Q, et al. Numerical simulation on thermal performance of vacuum insulation panels with fiber /powder porous media based on CFD method. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022; 172: 107320.
- [10] Turgut SS, Küçüköner E, Feyissa AH and Karacabey E. A novel drying system – simultaneous use of ohmic heating with convectional air drying: System design and detailed examination using CFD. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021; 72: 102727.
- [11] Benfratello S, Capitano C, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G and Sorrentino G. Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. *Construction and Building Materials*. 2013; 48: 745-54.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายพฤติกรรม
การใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนจากการทำงาน
ของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม
Mathematical Modelling for Predicting Electrical Energy Consumption and Heat
Rejection in a 3-Level Refrigeration Plant for Beverage Manufacturing Industry

อัศวิน นามเสริฐ^{1)*} และ ธนา ราษฎร์ภักดี²⁾Assawin Namsert^{1)*} and Thana Radpukdee²⁾¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University²⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 5 April 2023

Revised: 18 September 2023

Accepted: 4 October 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนสู่อากาศแวดล้อมภายนอกจากการทำงานของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม ประกอบไปด้วยระดับอุณหภูมิ 15, -1 และ -6 องศาเซลเซียส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำสำหรับการทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนของระบบ นำไปสู่การวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาประกอบไปด้วยแบบจำลอง Radial basis function (RBF), Multivariate adaptive regression splines (MARS) และ Kriging จากการศึกษาผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนของระบบ แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น linear splines มีค่า RMSE 2.80% และ 2.77% ตามลำดับ และแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพแย่งที่สุดคือ

RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น cubic splines มีค่า RMSE 41.10% และ 74.17% ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสามารถแทนพฤติกรรมของระบบทำความเย็น ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปสู่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน ช่วยลดต้นทุนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มได้ในอนาคต

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การใช้พลังงานไฟฟ้า การระบายความร้อน ระบบทำความเย็น 3 ระดับ

Abstract

This research investigates the development of mathematical models for predicting the behavior of electrical energy consumption and heat rejection from the operation of a 3-level refrigeration plant in a beverage manufacturing industry. Three temperature levels are 15, -1 and -6 degrees Celsius. The objective is to find accurate models for predicting electrical energy consumption and heat rejection to analyze the optimal operating condition of the cooling system. The mathematical models under this study include Radial Basis Function (RBF), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), and Kriging models. From the study, the RBF model with linear spline kernel functions demonstrates the highest prediction performance, with root mean square errors (RMSE) of 2.80% and 2.77% for electrical energy consumption and heat rejection, respectively. Conversely, the RBF model with cubic spline kernel functions exhibits the lowest prediction performance, with RMSE values of 41.10% and 74.17% for electrical energy consumption and heat rejection, respectively. The accurate mathematical models are utilized to represent the behavior of the cooling system and determine the most suitable values for reducing electrical energy consumption and improving heat rejection efficiency, ultimately aiding in reducing production costs for beverage manufacturing industrial facilities in the future.

Keywords: Mathematical models: Electrical energy consumption: Heat rejection: 3-level refrigeration system

*ติดต่อ: E-mail: assawin.n@kkumail.com

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการในระบบทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ให้ต่ำกว่าอากาศแวดล้อมภายนอก การใช้พลังงานของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ มีอัตราส่วนการใช้พลังงานสูงถึงร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในโรงงาน ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองและต้นทุนการผลิต ในกระบวนการทำความเย็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนไปยังอากาศแวดล้อมภายนอกมีความสำคัญในการนำสารทำความเย็นไปใช้ในส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตเครื่องดื่ม การกำหนดสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นนำไปสู่การปรับสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมและประหยัดพลังงาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนสู่อากาศแวดล้อมภายนอก จากการทำงานของระบบทำความเย็น 3 ระดับอุณหภูมิ ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็น ผลการวิจัยนี้จะช่วยให้ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มสามารถปรับปรุงและพัฒนากระบวนการทำความเย็นให้ มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานมากขึ้น

การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมช่วยให้ผู้ประกอบการตัดสินใจได้ดีขึ้นในการปรับปรุงระบบทำความเย็นและยังช่วยลดความเสี่ยงจากความคลาดเคลื่อนในการทำนายภาระการทำความเย็น งานวิจัยนี้เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันประกอบด้วย Radial

Basis Function (RBF) Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) และ Kriging โดยการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีหลายรูปแบบ เช่น Suwanwang et al. (2022) [1] สร้างและเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Kriging, RBF และ k-nearest neighborhood (KNN) สำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องหีบสัปดาห์น้อย Silage et al. (2022) [2] สร้างแบบจำลอง Kriging หาความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพและมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก Copas and Malley (2008) [3] เปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลการรักษาโรคหัวใจโดยใช้แบบจำลอง regression trees, logistic regression, generalized additive models (GAMs), และ multivariate adaptive regression splines (MARS) เพื่อหาวิธีการทำนายผลการรักษา Song et al. (2019) [4] RBF ถูกใช้เป็นแบบจำลองทดแทนในการประมาณค่าผลลัพธ์จากแบบจำลอง High-fidelity และ Low-fidelity โดยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการคำนวณและเพิ่มความเร็วในการทำงาน โดยมีประสิทธิภาพและความแม่นยำดีกว่าแบบจำลอง Single-fidelity surrogate และแบบจำลองอื่น ในหลายกรณีที่ใช้ RBF เป็นแบบจำลองพื้นฐาน Bagheri et al. (2017) [5] เปรียบเทียบแบบจำลอง Kriging และ RBF ในการสร้าง Surrogate models พบว่า RBF ที่สามารถปรับแต่ง kernel function มีความแม่นยำและรวดเร็วกว่า Kriging

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องทำให้เห็นความสำคัญของการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับปัญหาที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำข้อมูลพารามิเตอร์ภายในระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม เพื่อหาความสัมพันธ์กับการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนของระบบ สำหรับนำไปวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสม เพื่อลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มได้ในอนาคต

2. วิธีการวิจัย

2.1 การศึกษาระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ

ระบบทำความเย็นภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม เป็นระบบทำความเย็นแบบอัดไอ ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น มี 3 สภาวะ คือ ระดับอุณหภูมิที่ 15, -1 และ -6 องศาเซลเซียสใช้ในการรักษาอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ให้ต่ำกว่าอากาศแวดล้อมภายนอก โดยระบบทำความเย็นมีอุปกรณ์ (ภาพที่ 1) ดังนี้ 1. Screw compressor ทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของก๊าซไปอัดไอเพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิให้สูงขึ้น 2. Condenser ลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่มีความดันสูง โดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากไอเป็นของเหลว 3. Receiver tank เก็บสารทำความเย็นในสถานะของเหลวหลังจากผ่าน Condenser

และกระจายสารทำความเย็นเข้าสู่ระบบทำความเย็น 4. Economizer tank รับสารทำความเย็นจาก Receiver tank อุณหภูมิของสารทำความเย็นจะถูกลดลงก่อนที่จะถูกส่งให้ Separator tank ต่อไป 5. Separator tank แยกสารทำความเย็นในส่วนที่เป็นของเหลวเพื่อส่งไปใช้ในส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการใช้ความเย็นในกระบวนการผลิต และส่วนที่เป็นไอจะถูกส่งเข้าสู่ Compressor ตามวัฏจักรของสารทำความเย็นต่อไป โดยประสิทธิภาพในการทำงานของระบบทำความเย็นอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

Coefficient of performance, COP) ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 1 [6,7]

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{W_{net,in}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}c_p\Delta T \quad (2)$$

หรือ

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\Delta h \quad (3)$$

$\dot{Q}_L$ คือ ความสามารถในการทำความเย็น (kW)

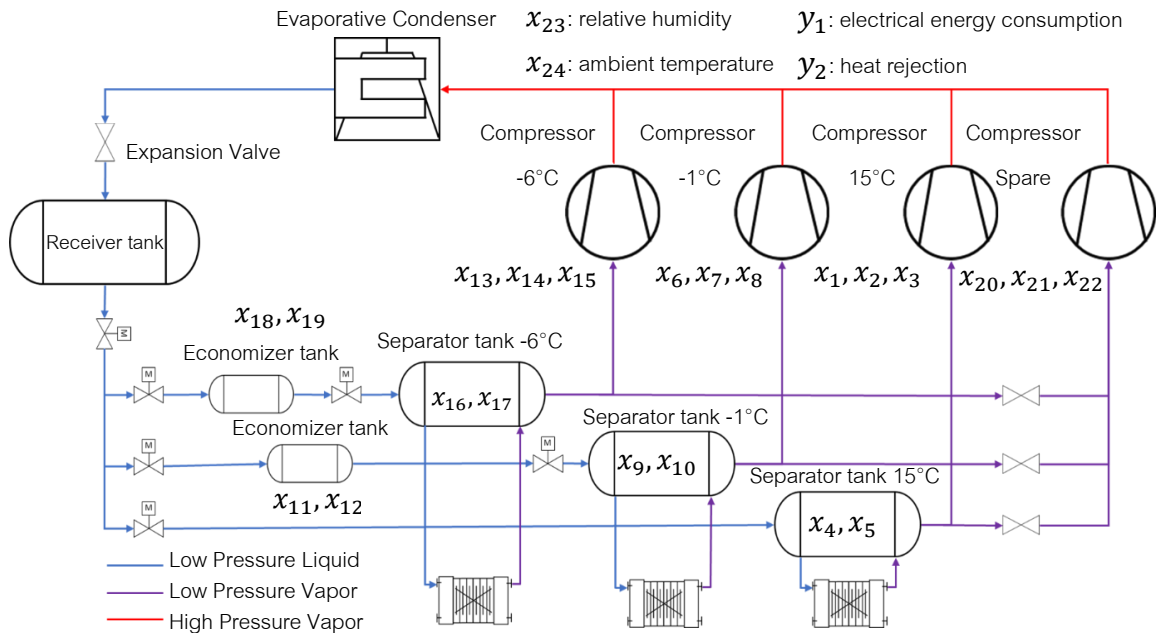
$W_{net,in}$ คือ งานที่ต้องป้อนให้แก่อุปกรณ์ (kW)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น(kg/s)

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำความเย็น (kJ/kg°C)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของสารทำความเย็น (°C)

Δh คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของสารทำความเย็น (kJ/kg)



ภาพที่ 1 ระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ช่วงการทำงาน	หน่วย
x	ตัวแปรต้น		
x_1, x_6, x_{13}, x_{20}	ความดันทางออกของคอมเพรสเซอร์	3.5 – 14.41	bar
x_2, x_7, x_{14}, x_{21}	อุณหภูมิทางออกของคอมเพรสเซอร์	30.4 – 82.52	°C
x_3, x_8, x_{15}, x_{22}	การทำงานของวาล์วคอมเพรสเซอร์	0 – 200	%
x_4, x_9, x_{16}	ความดันภายในถังแยกไอ	2.29 – 7.53	bar
x_5, x_{10}, x_{17}	อุณหภูมิภายในถังแยกไอ	-7.01 – 19.6	°C
x_{11}, x_{18}	ความดันภายในถังประหยัดพลังงาน	3.31 – 12.74	bar
x_{12}, x_{19}	อุณหภูมิภายในถังประหยัดพลังงาน	0 – 35.57	°C
x_{23}	ความชื้นสัมพัทธ์	36.39 – 97.29	%
x_{27}	อุณหภูมิแวดล้อมภายนอก	23.09 – 40.34	°C
y	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์		
y_1	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ	202.19 – 2197.20	kW
y_2	การระบายความร้อนของระบบ	422.60 – 6544.78	kW

2.2 การเก็บข้อมูลและเตรียมข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเก็บข้อมูลภายในระบบทำความเย็นภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม เนื่องจากเป็นระบบอัตโนมัติที่ทำงานตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของระบบอยู่ในสภาพปกติ ผู้วิจัยจึงออกแบบการเก็บข้อมูลโดยติดตั้งอุปกรณ์ PLC (Programmable logic control) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบ Ultrasonic ที่ฝั่งทางออกของคอมเพรสเซอร์ การเก็บข้อมูลการทำงานของระบบทำความเย็น 3 ระดับอุณหภูมิได้ดำเนินการภายในช่วงวันที่ 1 – 30 พฤศจิกายน 2565 พิจารณาจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องทางทฤษฎีอุณหพลศาสตร์และวาล์วคอมเพรสเซอร์ที่เป็นตัวควบคุมปริมาณการอัดไอของสารทำความเย็น โดยตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบและความร้อนที่ถูกนำออกไปยังสภาพแวดล้อม โดยตัวแปรทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 1 ข้อมูลจากฐานข้อมูลทั้งหมด 2707 ชุดถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ประกอบด้วยชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลองและทดสอบแบบจำลอง การคัดเลือกข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองจะทำการคัดเลือก 25% ของชุดข้อมูลสำหรับฝึกด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบ k-mean [8] เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล โดยที่ยังครอบคลุมข้อมูลตัวอย่างอย่างทั่วถึง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการบวนการ k-mean สำหรับสร้างแบบจำลอง 474

ชุดและจากการแบ่งข้อมูลทั้งหมด 812 ชุดเป็นข้อมูลสำหรับทดสอบ

2.3 การสร้างแบบจำลองทดแทน

แบบจำลองทดแทน (Surrogate model) คือแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามในทางวิศวกรรม ในงานวิจัยนี้มีแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาดังนี้ Radial Basis Function, Kriging และ Multivariate Adaptive Regression Splines

Radial Basis Function (RBF) [9–11] เป็นแบบจำลองที่ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานสัมพันธ์เป็นส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง เพื่อประมาณค่าฟังก์ชันของข้อมูลที่สนใจ การประมาณค่าของ RBF สามารถปรับแต่งสมการควบคุม (kernel function) ได้ตามต้องการ ดังนี้

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(\|x - c_i\|) \quad (4)$$

เมื่อ α_i คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันที่ต้องการหาค่า $\|x - c_i\|$ คือ ขนาดของระยะห่างของตัวแปรต้น n คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างทั้งหมดในชุดข้อมูล K คือ สมการควบคุม (kernel function) ซึ่งมีรูปแบบคณิตศาสตร์ต่างๆ ดังนี้

$$\text{Linear spline: } K = \|x - c_i\| \quad (5)$$

$$\text{Cubic spline: } K = \|x - c_i\|^3 \quad (6)$$

Thin plate splines:

$$K = \|x - c_i\|^2 \times \log \|x - c_i\| \quad (7)$$

Gaussian:

$$K = \exp(\varepsilon \times \|x - c_i\|) : \varepsilon = 1 \times 10^{-5} \quad (8)$$

Multiquadric:

$$K = \text{sqrt}(1 + (\varepsilon \times \|x - c_i\|^2)) : \varepsilon = 1 \times 10^{-5} \quad (9)$$

Inverse quadric:

$$K = \frac{1}{\text{sqrt}(1 + (\varepsilon \times \|x - c_i\|^2))} : \varepsilon = 1 \times 10^{-5} \quad (10)$$

Inverse multiquadric:

$$K = \frac{1}{1 + (\varepsilon \times \|x - c_i\|^2)} : \varepsilon = 1 \times 10^{-5} \quad (11)$$

Multivariate adaptive regression splines (MARS) [12] เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองทางสถิติที่ใช้กับข้อมูลหลายตัวแปร MARS จะหาสมการสองส่วนที่เหมาะสมกับข้อมูล โดยตัวแปรอิสระจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ในการเลือกจำนวนตัวแปรและช่วงของตัวแปรจะถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับข้อมูล และสร้างสมการสองส่วนที่เหมาะสมกับข้อมูล ดังนี้

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^k c_i B_i(x) \quad (12)$$

เมื่อ c คือ ค่าสัมประสิทธิ์

$B(x)$ คือ ฟังก์ชันเชิงเส้นแบบเป็นช่วงในตัวแปร x ซึ่งเรียกว่า basis function

k คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างทั้งหมดในชุดข้อมูล

Kriging เป็นอีกหนึ่งวิธีในการสร้างแบบจำลองทดแทนในการสร้างแบบจำลองโดยกำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามด้วยฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (covariance function) เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของฟังก์ชันที่ต้องการประมาณค่า แบบจำลอง Kriging จากชุดเครื่องมือ Design and Analysis of Computer Experiments (DACE) [11,13–15] สามารถเลือกฟังก์ชันสหสัมพันธ์

และพหุนามระดับที่ 0, 1 และ 2 ให้เหมาะสมกับปัญหา การเปรียบเทียบแบบจำลองที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ทำให้สามารถเลือกรูปแบบของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาได้ ดังสมการที่ 13

$$y(x) = F(\beta, x) + z(x) \quad (13)$$

เมื่อ $F(\beta, x)$ คือ ฟังก์ชันพหุนามสำหรับการประมาณค่าวงกว้าง

$z(x)$ คือ ฟังก์ชันกระบวนการสโตแคสติกที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนเกี่ยวข้องที่ไม่เป็นศูนย์ ดังสมการที่ 14

$$\begin{aligned} \text{Cov}[z(w), z(x)] &= \delta^2 R(\theta, w, x) = \\ &= \delta^2 \prod_{i=1}^m \exp(-\theta_i |w_i - x_i|^{p_i}) \end{aligned} \quad (14)$$

โดยที่ $\text{Cov}[z(w), z(x)]$ คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง $z(w)$ และ $z(x)$

δ^2 คือ ความแปรปรวนของกระบวนการ

R คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์สมมาตร

w และ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรอิสระ

θ คือ พารามิเตอร์สหสัมพันธ์

p_i คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมรูปร่างของฟังก์ชันความสัมพันธ์

m คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่างทั้งหมดในชุดข้อมูล

ในชุดเครื่องมือ DACE นิยามฟังก์ชันสหสัมพันธ์ ดังสมการที่ 15 และมีตัวเลือกสำหรับฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2

$$R(\theta, w, x) = \prod_{j=1}^n R_j(\theta, w_j - x_j) \quad (15)$$

ตารางที่ 2 ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ โดยที่ $d_j = w_j - x_j$

ฟังก์ชัน	$R_j(\theta, d_j)$
Exponential	$\exp(-\theta d_j)$
Generalized Exponential	$\exp(-\theta d_j ^{\theta_{n+1}}), 0 < \theta_{n+1} \leq 2$
Gaussian	$\exp(-\theta_j d_j^2)$
Linear	$\max\{0, 1 - \theta_j d_j \}$
Spherical	$1 - 1.5\xi_j + \xi_j^3, \xi_j = \min\{1, \theta_j d_j \}$
Cubic	$1 - 3\xi_j^2 + 2\xi_j^3, \xi_j = \min\{1, \theta_j d_j \}$
Spline	$s(\xi_j) = \begin{cases} 1 - 15\xi_j^2 + 30\xi_j^3 & \text{for } 0 \leq \xi_j \leq 0.2 \\ 1.25(1 - \xi_j)^3 & \text{for } 0.2 < \xi_j < 1 \\ 0 & \text{for } \xi_j \geq 1 \end{cases}$

เมื่อ θ คือพารามิเตอร์สหสัมพันธ์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งสามารถหาได้จากวิธีความควรจะเป็นสูงสุด (maximum likelihood method) และสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพหุนาม β สามารถหาได้จากวิธีกำลังสองน้อยสุด เมื่อทราบค่า β และ θ การทำนายค่าด้วยแบบจำลอง Kriging สามารถหาได้ ดังสมการที่ 16

$$y = \beta + r^T(x)R^{-1}(y - f\beta) \quad (16)$$

2.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทดแทนสามารถใช้ได้หลายวิธี โดยจะใช้ที่ Root Mean Squared Error วัดความคลาดเคลื่อนของค่าทำนายจากแบบจำลองทดแทนและค่าจริง ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เมื่อ %RMSE ไม่เกิน 10% [9]

หากน้อยกว่าจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น ค่า RMSE นิยามดังสมการที่ 17 และ 18

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n_t} (y^i - \hat{y}^i)^2}{n_t}} \quad (17)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \times 100 \quad (18)$$

เมื่อ y^i คือ ค่าจริงของตัวแปรตาม

$\hat{y}^i$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย

n_t คือ จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูล

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นทั้งหมด 13 รูปแบบ ประกอบไปด้วยแบบจำลอง Radial Basis Function 5 รูปแบบ แบบจำลอง Multivariate adaptive regression splines และแบบจำลอง Kriging จากชุดเครื่องมือ DACE จำนวน 7 รูปแบบ ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบจำลองส่วนใหญ่สามารถทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนสู่อากาศแวดล้อมภายนอกของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะได้ โดยมี RMSE อยู่ในช่วง 2.80 – 5.39% และ 2.77 – 5.71% ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (%RMSE)

แบบจำลอง	สมการ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ในระบบ	การระบายความร้อน ของระบบ
RBF	linear spline	2.80%	2.77%
	cubic spline	41.10%	74.17%
	thin plate spline	9.73%	15.66%
	gaussian	5.39%	5.71%
	Multiquadric	3.79%	3.97%
MARS	MARS	3.20%	3.20%
Kriging	cubic	3.21%	3.04%
	exponential	2.93%	3.15%
	generalized exponential	3.08%	3.46%
	gaussian	2.87%	3.11%
	linear	3.21%	3.34%
	spline	3.30%	3.73%
	spherical	3.28%	3.72%

* อักษรตัวหนา ใช้เพื่อบอกค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (%RMSE) ที่ต่ำที่สุด

แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายสูงสุดคือ RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น linear spline ให้ RMSE 2.80% และ 2.77% ตามลำดับ และแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายที่แย่ไม่สามารถยอมรับได้มี RMSE ที่สูง คือ RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น cubic spline มีค่า RMSE 41.10% และ 74.17% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำของแบบจำลองเป็นผลมาจากการพิจารณาสมการควบคุมที่เหมาะสม ลักษณะข้อมูลและปริมาณข้อมูลที่มี การเลือกและปรับสมการควบคุมของแบบจำลอง

ที่เหมาะสมเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อให้ผลการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการทำนายพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและการระบายความร้อนสู่อากาศแวดล้อมภายนอกของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม โดยมีแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด

3 แบบจำลองประกอบไปด้วยแบบจำลอง Radial Basis Function, Multivariate adaptive regression splines และ Kriging แบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบสามารถสร้างความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้เป็นอย่างดี สามารถแทนพฤติกรรมของระบบทำความเย็นได้มี RMSE อยู่ในช่วง 2.80 – 5.39% และ 2.77 – 5.71% ตามลำดับแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายสูงสุดคือ RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น linear spline มี RMSE ต่ำที่สุดอยู่ที่ 2.80% และ 2.77% ตามลำดับและแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายที่แย่ที่สุดไม่สามารถใช้ทำนายได้ คือ RBF ที่มีสมการควบคุมเป็น cubic spline มี RMSE ที่สูงที่สุดอยู่ที่ 41.10% และ 74.17% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียง 3 รูปแบบเท่านั้นซึ่งในอนาคตสามารถปรับเปลี่ยนแบบจำลองและสมการควบคุมให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายมากขึ้น จากการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้สามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นชนิด 3 สภาวะ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ RDI (Research Development and Industrialization Process) ร่วมกับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และบริษัท สิงห์ เบเวอเรจ จำกัด กราบขอบพระคุณ คณาจารย์ ผู้บริหารและพนักงานทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลงบประมาณ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suwanwang T, Bureeet S and Wansasueb K. Applied Surrogate Model: Energy Consumption of a Sugar Milling Machine. KKU Research Journal. 2022; 22(1): 85–96.
- [2] สุปราณี เหล่าขุนคำ และ ธนา ราษฎร์ภักดิ์. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบครึ่งจริงของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของหญ้าเนเปียร์ไซเลจ กากมันสำปะหลัง มูลไก่ และมูลวัว. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. 2022; 8(2): 78–87.

- [3] Copas JB, Malley PF. A comparison of regression trees, logistic regression, generalized additive models, and multivariate adaptive regression splines for predicting AML mortality. *Statistics in Medicine*. 2008; 26(15): 2937–57.
- [4] Song X, Lv L, Sun W and Zhang J. A radial basis function-based multi-fidelity surrogate model: exploring correlation between high-fidelity and low-fidelity models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019; 60(3): 965–81.
- [5] Bagheri S, Konen W and Back T. Comparing Kriging and Radial Basis Function Surrogates. *Work Computer Intelligence*. 2017; 27: 244–59.
- [6] Ibrahim Dincer and Kanoglu Mehmet. REFRIGERATION SYSTEMS and APPLICATIONS. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd., Publication; 2010.
- [7] Phayom W. THERMODYNAMICS. อุดรธานี: [ม.ป.พ.]; 2012.
- [8] Li Y and Wu H. A Clustering Method Based on K-Means Algorithm. *Phys Procedia*. 2012; 25: 1104–9.
- [9] Keane DAIJFDASPAJ. Engineering Design via Surrogate Modelling. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd., Publication; 2008.
- [10] Buhmann MD and Michael JD. Powell's work in approximation theory and optimisation. *Journal of Approximation Theory*. 2019; 238: 3–25.
- [11] สุจินต์ บุรีรัตน์. การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2556.
- [12] Friedman JH. Technical Report No. 110: Fast MARS (Internet). California; 1993. [cited 2023 April 3]. Available from: <http://www.milbo.users.sonic.net/earth/Friedman-FastMars.pdf>
- [13] Lophaven SN, Nielsen HB, Sondergaard J. DACE - A Matlab Kriging Toolbox (Internet). [cited 2023 April 3]. Denmark; 2002. Available from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=F5C25B1AAA74EF3591339F9E4205C235?doi=10.1.1.17.3530&rep=rep1&type=pdf>
- [14] Ostadi M. Surrogate Models for Integrated Reforming Combined Cycle Optimization. Norwegian University of Science and Technology; 2013.
- [15] Ryu JS, Kim MS, Cha KJ, Lee TH and Choi DH. Kriging interpolation methods in geostatistics and DACE model. *KSME International Journal*. 2002; 16(5): 619–32.

ข้อแนะนำในการส่งต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

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

ต้นฉบับบทความ

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

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

โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

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



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

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

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

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

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

Abstract

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

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

*ติดต่อ: E-mail, เบอร์โทรศัพท์, เบอร์โทรสาร

1. บทนำ

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

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

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

1.2 ชนิดตัวอักษร

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

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

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

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

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

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

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความขีดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

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

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินิจย่อหน้าใหม่ ให้พินิจบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินิจบทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพหรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่าง ๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1. การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการ จะต้องเป็นเลขอาราบิก ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวงไว้ขีดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

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

7.2. รูปภาพและตาราง

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

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

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

ตารางที่ 1

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

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

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

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

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนรูป ประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมาก เกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

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

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

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

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่อง เฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาของบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

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

1. การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

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

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

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

2. การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

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

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

3. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

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

4. การอ้างอิงเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

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