

FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

Vol.10 No.2 July — December 2024

Research Article

- The Study of Temperature Distribution in Steel Rods Welded by Friction Welding Using Finite Element Method 1

Pakorn Auntaisong

- Coefficient Elasticity Testing Of Flower Buds Protection Plastic Net 11

*Bairin Nithiwatthanaphong Jarupol Suriyawanakul Yaowapa Treekamol
Kiatfa Tangchaichit Supachai Polnumtiang and Phubet Yodruk*

- Cassava Chopper Type Mounted Machine for Small Tractor 20

Kritsana navarat Boonyarid Buarabut Krison Ruaypom and Chanida Bupata

- Study of Chicken Eggshells for The Synthesis of Biomedical Materials in Orthopedic Surgery 30

Kaison Harisaeng and Teerawat Laonapakul

- Application of Mathematical Models and Engineering Economics Analysis for Improving Commercial Rental Area Management Spaces within a Canteen in Khon Kaen University 41

Tana Udomtananan and Komkrit Pitiruek

- Surrogate Assisted Optimization for Parameters Tuning of a Separator in a Tapioca Starch Process 51

Sompoch Charoensuk Thana Radpukdee and Nantiwat Pholdee

- Design of a Discrete Sliding Mode Model Following Controller and Application to a Synchronous Motor Robust Position Control System 68

Phongsak Phakamach Udomvit Chaisakulkiet and Akharakit Chaithanakulwat

- Replacing a Affordable Mitsubishi FX3U-Compatible PLC Control System with Siemens LOGO!: A Case Study of a Bottle Packaging Conveyor System 81

Shutchon Premchaisawatt Narong Boonsaner and Krit Tashoo



Farm Engineering And Automation Technology
Research Group , Khon Kaen University

FEAT JOURNAL

วารสาร
วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยี
การควบคุมอัตโนมัติ

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL



Vol.10 No.2 July – December 2024

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

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. วาอิส	ลีลาภัทร	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร. ธนา	ราชภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. วีระชัย	อาจหาญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร. นิยม	กำลังดี	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. คำธณ	พิทักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. วิภาดา	สนองราชบุรี	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. สิริวิชัย	เดชะเกษราษฎร์	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

นางสาวฉัตรเกล้า มะชะศรี

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

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

จ.ขอนแก่น 40002

กำหนดเผยแพร่

พิมพ์ที่

ISSN

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

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

: 2408 - 0985

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

Editorial Board

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

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

Production team Ms.Chatklaw Machasri

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

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

Printing House Khon Kaen University Printing

ISSN : 2408-0985

จุดมุ่งหมายและขอบเขต

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

ขอบเขตของเนื้อหาที่ตีพิมพ์ในวารสาร ประกอบด้วยบทความที่เกี่ยวข้อง ในประเด็นดังต่อไปนี้

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

จัดทำและเผยแพร่โดย กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (Farm Engineering and Automation Technology: FEAT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002 โทร. 085-559-2669 Email: feat.kku@gmail.com

บทบรรณาธิการ

เรียน ท่านสมาชิกวารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
และผู้อ่านทุกท่าน



วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ (Farm Engineering and Automation Technology Journal: FEAT Journal) ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2567 ฉบับนี้เป็นปีที่ 10 ของกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติให้นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไปได้ทราบ และสามารถเรียนรู้ นำไปต่อยอดความรู้ และแก้ไขปัญหาในการทำงานด้านวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติได้วารสารนี้ มีกำหนดตีพิมพ์ทุก 6 เดือน ปีละ 2 ฉบับ ซึ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่าน ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในฉบับนี้มีบทความวิจัยจำนวน 9 บทความ ซึ่งท่านสามารถติดตามและอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/featkku/index>

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

รองศาสตราจารย์รัชพล สันติวารการ

บรรณาธิการ

ratchaphon@kku.ac.th

24 ธันวาคม 2567

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 และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่นๆ 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. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่างๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

บทความวิจัย

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปกรณ์ อุ๋นไธสง	1
การทดสอบสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม ใบริน นิธิวัฒน์พงษ์ จารุพล สุริยวานากุล ยาวพา ตรีภมม เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต สุกชัย พลน้ำเที่ยง และ ภูเบศร์ ยอดรัก	11
เครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก กฤษณะ นาวารัตน์ บุญฤทธิ์ บั้วระบัติ ไกรสร รวยบ่อม และ ชนิตา บุญตา	20
การศึกษาเปลือกไข่ไก่เพื่อสังเคราะห์วัสดุทางการแพทย์ศัลยกรรมกระดูก ไกรสร หาริแสง และ อธิวัฒน์ เหล่านากุล	30
การประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ ภายในโรงอาหารแห่งหนึ่งใน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ธน อุดมธนานันต์ และ คมกฤษ ปิติฤกษ์	41
Surrogate assisted optimization for parameters tuning of a separator in a tapioca starch process สมโพธิ เจริญสุข ธนา ราชวรภัคดี และ ณัฏฐิวัฒน์ พลดี	51
การออกแบบตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมตชนิดติดตามแบบจำลองแบบไม่ต่อเนื่องและการ ประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์เชิงโรนัสที่คงทน พงษ์ศักดิ์ ฝกามาศ อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ และ อัครกิตติ์ ไชยธนกุลวัฒน์	68
การปรับเปลี่ยนระบบควบคุมอัตโนมัติจากพีแอลซีราคาประหยัดเทียบเคียง Mitsubishi FX3U เป็น Siemens LOGO!: กรณีศึกษาระบบสายพานบรรจุขวด ชัชชล เปรมชัยสวัสดิ์ ณรงค์ บุญเสนอ และ กฤษ ตราวุธ	81

Research Article

The Study of Temperature Distribution in Steel Rods Welded by Friction Welding Using Finite Element Method <i>Pakorn Auntaisong</i>	1
Coefficient elasticity Testing Of Flower Buds Protection Plastic Net <i>Bairin Nithiwatthanaphong Jarupol Suriyawanakul Yaowapa Treekamol Kiatfa Tangchaichit Supachai Polnumtiang and Phubet Yodruk</i>	11
Cassava chopper type mounted machine for small tractor <i>Kritsana navarat Boonyarid Buarabut Krison Ruaypom and Chanida Bupata</i>	20
Study of Chicken Eggshells for the synthesis of Biomedical Materials in Orthopedic Surgery <i>Kaison Harisaeng and Teerawat Laonapakul</i>	30
Application of mathematical models and engineering economics analysis for improving commercial rental area management spaces within a canteen in khonkaen university <i>Tana Udomtananan and Komkrit Pitiruek</i>	41
Surrogate assisted optimization for parameters tuning of a separator in a tapioca starch process <i>Sompoch Charoensuk Thana Radpukdee and Nantiwat Pholdee</i>	51
Design of a Discrete Sliding mode Model Following Controller and Application to a Synchronous Motor Robust Position Control System <i>Phongsak Phakamach Udomvit Chaisakulkiet and Akharakit Chaithanakulwat</i>	68
Replacing a Affordable Mitsubishi FX3U-Compatible PLC Control System with Siemens LOGO!: A Case Study of a Bottle Packaging Conveyor System <i>Shutchon Premchaisawatt Narong Boonsaner and Krit Tashoo</i>	81



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยแรงเสียดทาน
โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Temperature Distribution in Steel Rods Welded by Friction Welding
Using Finite Element Method

ปกรณ อุ่นไสง

Pakorn Auntaisong

*วิทยาลัยธาดูพนม มหาวิทยาลัยนครพนม

*Thatphanom College, Nakhonphanom University

Received: 29 April 2023

Revised: 25 June 2024

Accepted: 1 July 2024

Available online: online 26 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กที่เชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ยาว 100 mm วัดอุณหภูมิห่างจากบริเวณรอยเชื่อม ที่ระยะ 5 mm และ 10 mm ตามลำดับ แล้วเปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีพื้นฐานมาจากเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชนิด 2D Axisymmetric ซอฟต์แวร์ที่ใช้ คือ Abaqus16.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษามี 2 เงื่อนไข และมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 5 ตัวแปร ได้แก่ แรงดันเสียดทาน (bar) เวลาเสียดทาน (sec) แรงดันอัด (bar) เวลาอัด (sec) และความเร็วรอบ (rpm) โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกัน คือ แรงดันเสียดทาน (bar) ในเงื่อนไขที่ 1 คือ 20 bar และเงื่อนไขที่ 2 คือ 30 bar จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและแบบจำลอง เงื่อนไขชุดที่ 1 ระยะ 5 mm อยู่ที่ 0.79% และระยะ 10 mm อยู่ที่ 3.58% และเงื่อนไขชุดที่ 2 ระยะ 5 mm อยู่ที่ 3.4% และระยะ 10 mm อยู่ที่ 5% จากการวิเคราะห์ผล พบว่า การเพิ่มแรงดันเสียดทาน

จาก 20 bar เป็น 30 bar ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยแบบจำลองสามารถอธิบายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกันกับการทดลอง

คำสำคัญ: การกระจายตัวของอุณหภูมิ เชื่อมด้วยแรงเสียดทาน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research studies the temperature distribution around the weld zone of friction-welded steel with a diameter of 15 mm and a length of 100 mm. The temperature was measured at distances of 5 mm and 10 mm from the weld zone and compared with a finite element method based on 2D axisymmetric triangular and quadrilateral thin shell elements. The software used is Abaqus 16.4. The study was conducted under two conditions with five related variables: friction pressure (bar), friction time (sec), upset pressure (bar), upset time (sec), and rotational speed (rpm). The differing variable is the friction pressure, which is 20 bar in Condition 1 and 30 bar in Condition 2. The experimental results showed that the error between the experimental data and the model for Condition 1 was 0.79% at a 5 mm and 3.58% at a 10 mm. For Condition 2, the error was 3.4% at a 5 mm and 5% at a 10 mm. The phenomena is similar for both finite element method and experiment. This implies that the finite element method model can be used predict the temperature distribution in welding process.

Keywords: Temperature distribution: Friction welding: Finite element method

*ติดต่อ: p.auntaisong@gmail.com, 097-338-178

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเชื่อมพัฒนาไปมาก เพราะความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี โดยมีการนำวิธีการเชื่อมในแบบต่างๆมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการในภาคการผลิต การเชื่อมเสียดทานเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่ดีและตอบโจทย์ด้านคุณภาพและความแข็งแรง เพราะรอยเชื่อมที่ได้จะประสานกันตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัด อีกทั้งยังสามารถเชื่อมวัสดุที่ต่างชนิดกันได้ ไม่มีวัสดุช่วยประสาน ไม่มีควันในการเชื่อมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากข้อดีเหล่านี้จึงทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย

เกี่ยวกับงานเชื่อมเสียดทาน เพื่อศึกษาเทคนิควิธีการเชื่อมและศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อม

นอกจากการศึกษาดังวิธีต่างๆ ในเบื้องต้นแล้ว การนำ Software มาช่วยในงานออกแบบและการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมก็เป็นที่ยอมรับและเป็นที่ยอมรับเช่นกัน เช่น R. Ramesh Kumar และคณะ [1] ได้ทำการทดลองเชื่อมเสียดทานด้วยวัสดุสองชนิดแล้ววัดอุณหภูมิ วัดความแข็งแรงระดับจุลภาค และทำการวิเคราะห์โครงสร้างของรอยเชื่อมจากนั้นเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลโดยใช้ โปรแกรม ANSYS R16.2 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องต่อกันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและมี

นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยไฮจิมีน ประเทศเวียดนาม Ho Thi My Nu และคณะ [2] ได้ทำการทดลองเชื่อมไทเทเนียม อัลลอยด์ (Ti6Al4V) เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของรอยเชื่อม แล้วใช้โปรแกรม Abaqus/Standard เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยแบบจำลองเป็นแบบ 2 มิติ เพื่อลดเวลาในการคำนวณ และผลพบว่า แรงเสียดทานในช่วงแรกจะส่งผลต่อการสะสมอุณหภูมิซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกและเกือบคงที่เมื่อเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งผลลัพธ์เชิงตัวเลขสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ Wen ya Li และ Fei fan Wang [3] นักวิจัยชาวจีนได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและความแข็งแรงของรอยเชื่อม ได้แก่ 1.เวลาเสียดทาน 2. แรงดันเสียดทาน 3. เวลาดันอัด 4.แรงดันอัด และ 5.ความเร็วรอบในการเชื่อม เป็นต้น

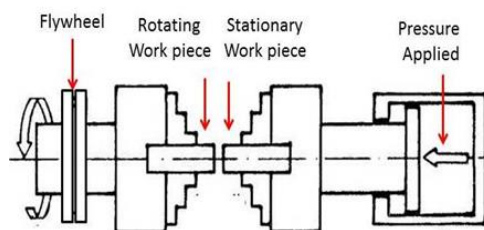
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจการทดลองวัดอุณหภูมิในการเชื่อมเสียดทานเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว แล้วใช้แบบจำลองคำนวณหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิแล้วเทียบผลกับการทดลอง Software ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ Abaqus 16.4

2. เครื่องมือและวิธีการวิจัย

2.1. หลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

การเชื่อมเสียดทาน เกิดจากการนำชิ้นงานสองชิ้นมาหมุนเสียดสีกันจนเกิดความร้อน โดยปลายด้านหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับ Flywheel เพื่อหมุน และอีกปลายด้านหนึ่งจะจับยึดไว้เพื่อให้เคลื่อนที่เข้าหากัน และเมื่อชิ้นงานทั้งสองเสียดสีกันจนเหล็กเริ่มอ่อนตัว

ก็จะเพิ่มแรงดันในแนวแกนที่มากกว่าเดิม (Pressure Applied) ดันอัดชิ้นงานทั้งสองให้ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน [4]

2.2. การวัดอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อม

Eder Paduan Alves และคณะ [5] ได้ทดลองเชื่อมเสียดทาน แล้ววัดอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมโดยเจาะชิ้นงานแล้วใช้ Thermo couple Type-k วัดอุณหภูมิจากจุดศูนย์กลางจนถึงขอบของชิ้นงาน เป็นระยะ 5, 10, 15 และ 20 mm ตามลำดับ ซึ่งการทดลองนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานวิจัยที่ต้องการศึกษานี้ โดยทำการเจาะชิ้นงานที่ไม่ได้หมุนให้มีความลึกประมาณ 3-5 mm และให้มีระยะห่างจากพื้นที่เสียดทาน 5 mm และ 10 mm จากนั้นต่อสายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple Type-k) เข้ากับชิ้นงานเพื่อวัดอุณหภูมิขณะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน

2.3. เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ศึกษาภายใต้ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 5 ตัวแปร ได้แก่ เวลาเสียดทาน (sec) เวลาตันอัด (sec) แรงดันเสียดทาน (bar) แรงดันอัด (bar) และความเร็วยรอบ (rpm)

แรงดันเสียดทาน เป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ เพราะอุณหภูมิในการเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงแรก ซึ่งแรงดันเสียดทานจะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ เพื่อสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงต้องกำหนดเงื่อนไข แรงดันเสียดทานให้แตกต่างกัน คือ 20 และ 30 bar เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Jabbar Hassan และคณะ [6] ที่ได้ทำการทดลองเชื่อมเสียดทาน เหล็ก AISI 316 โดยใช้แรงดันเสียดทานหลายค่า

ตารางที่ 1

เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา

เงื่อนไข	แรงดันเสียดทาน (bar)	เวลาเสียดทาน (sec)	แรงดันอัด (bar)	เวลาตันอัด (sec)	ความเร็วยรอบ (rpm)
1	20	10	60	5	1,300
2	30	10	60	5	1,300

2.4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นปรากฏการณ์ส่งผ่านความร้อนของโลหะจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ การเชื่อมเสียดทานเป็นการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะกึ่งคงที่ของโลหะ (Semi-Infinite solid) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหา

สำหรับโลหะที่มีความยาว โดยปลายด้านหนึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับความร้อนและเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ผิวสัมผัสจะเกิดการนำความร้อนที่ไม่คงที่ (Transient heat conduction) สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ของการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กสามารถอธิบายได้ตามหลักการของการนำความร้อน (Heat Conduction) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation: PDE) ดังแสดงในสมการที่ (1) [7]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (Density)

C คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity)

T คือ อุณหภูมิ (Temperature)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

Q คือ แหล่งความร้อนภายใน (Internal Heat Generation)

T คือ เวลา (time)

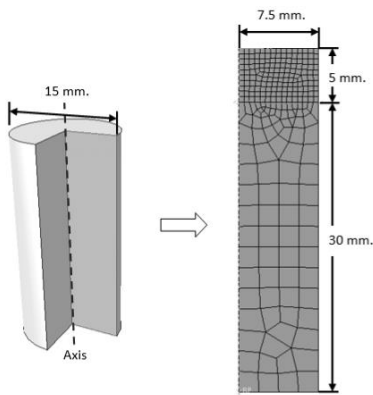
2.5. แบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ได้จำลองให้เป็นแบบ 2 มิติ (2D Axisymmetric) เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานทดลองไม่มีความซับซ้อนและเป็นแบบสมมาตร จึงจำลองชิ้นงานเพียงครึ่งเดียว คือ 7.5 mm จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm เพื่อให้ง่าย

July – December 2024; 10(2) : 1 – 10

ต่อการคำนวณ สำหรับการหาเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง (Element Independent) พบว่า ในส่วนพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและเสียรูป (Plastic Deformation) จะมีเอลิเมนต์เล็กสุดขนาด 0.5 mm เป็นระยะ 5 mm และถัดไปเอลิเมนต์มีจะขนาดใหญ่สุดที่ 2.6 mm ประเภทเอลิเมนต์ (Element Type) เป็นแบบ Quadrilateral ชนิด CHAX4T:A4-node, CGAX4HT:A4-node, CGAX4R:a4-node ซึ่งมีเอลิเมนต์ทั้งหมด 307 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3

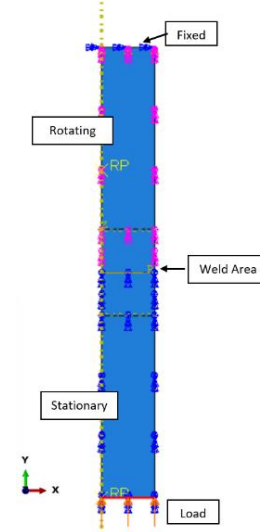
การบันทึกอุณหภูมิ จะกำหนดไว้ที่โนด (Node) ตามระยะที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่ 5 mm และ 10 mm ตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วรอบที่ 1,000 rpm - 1,200 rpm จะส่งผลให้ความร้อนสะสมมากที่สุดของชิ้นงาน เช่นตัวอย่างการทดลองของ Seli H และคณะ [8] ได้บันทึกผลอุณหภูมิที่ Node ซึ่งอยู่ขอบของชิ้นงาน



รูปที่ 3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชิ้นงาน (Boundary condition) ดังนี้ Step1 (Rotating): ยึดชิ้นงาน ($YSYMM, U_2=U_1=U_3=0$) และกำหนดให้

ชิ้นงานดังกล่าวหมุนได้อิสระรอบแกน Y ($VR_2=125.66$) Step 2 (Stationary): กำหนดจุดยึดแกน ($UR_2=UR_3=0$) และให้เคลื่อนที่ในแกน Y ตามโหลดที่กำหนด (Load) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ 0.12% ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบ ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ใช้ในแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li W Y และคณะ [9] ที่ได้ทดลองเชื่อมเหล็กคาร์บอนต่ำด้วยวิธีเสียดทาน และใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้ในแบบจำลอง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 [10]

ตารางที่ 2

อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง

อุณหภูมิ Temperature (°C)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน Friction Coefficient
15	0.4
200	0.577
400	0.777
600	0.577
800	0.4
1,000	0.2
1,200	0.1

ตารางที่ 3

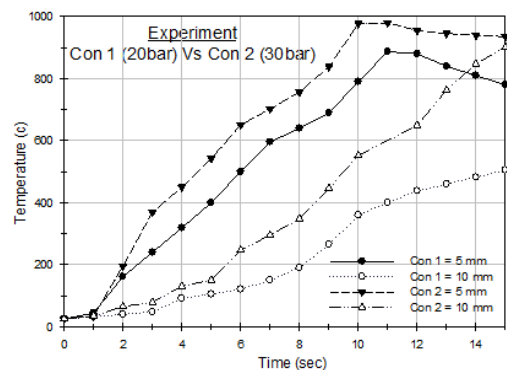
คุณสมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิ Temperature (°C)	ค่าการนำความร้อน Thermal conductivity (W/mK)	ค่าความร้อนจำเพาะ Specific heat (J/kgK)
27	51.6	473
100	51.1	486
200	49.0	520
400	42.7	599
600	35.6	749
800	26.0	950
1,000	5	644
1,200	0.6	661

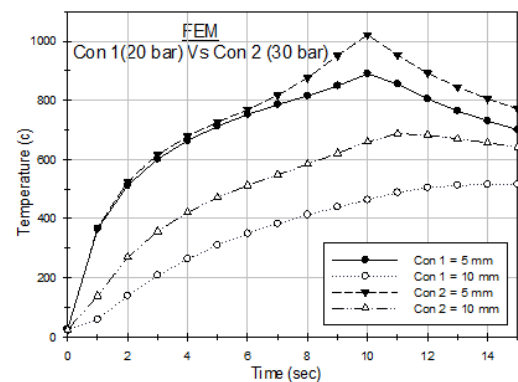
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองวัดอุณหภูมิในรูปที่ 5 พบว่า แรงดันเสียดทานมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิมาก ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการ แรงดันที่มากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิมากขึ้นด้วย จากกราฟทั้งสองเงื่อนไข ในช่วง 1-2 sec พบว่า อุณหภูมิยังไม่พุ่งสูงขึ้นและยังไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการ

เชื่อมต้องสะสมพลังงานความร้อนที่มากพอและเอาชนะแรงเสียดทานอุณหภูมิถึงจะติดตัวสูงขึ้นได้ โดยในช่วง 10-12 sec จะเป็นช่วงที่อุณหภูมิติดตัวขึ้นสูงสุด เนื่องจากแรงดันอัดที่มากกว่าเดิมดันอัดขึ้นงานให้ติดกัน สรุปคือ แรงดัน 30 bar ส่งผลให้อุณหภูมิในการเชื่อมสูงกว่าแรงดัน 20 bar ตลอดทั้งกระบวนการ



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง (เงื่อนไขที่ 1 กับ เงื่อนไขที่ 2)

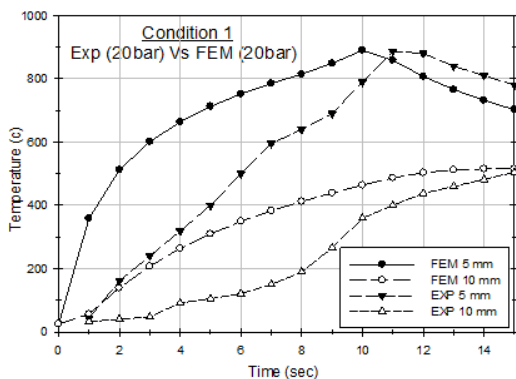


รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบผลแบบจำลอง (เงื่อนไขที่ 1 กับ เงื่อนไขที่ 2)

ผลการคำนวณในแบบจำลองในรูปที่ 6 พบว่าแบบจำลองสามารถคำนวณผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานได้ และแรงดันเสียดทานส่งผลต่อระดับของอุณหภูมิใน

July – December 2024; 10(2) : 1 – 10

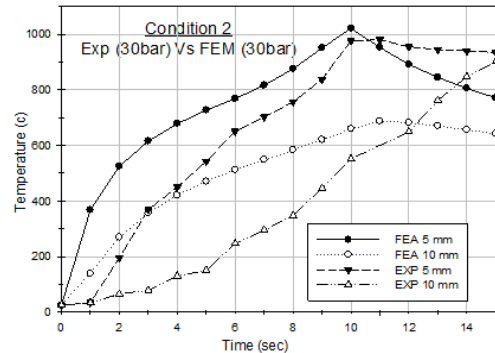
กระบวนการเชื่อม ซึ่งแรงดันเสียดทานยิ่งมาก อุณหภูมิก็มากขึ้นตาม จะเห็นว่าเวลาในช่วง 1-6 sec ในเงื่อนไขที่ 1 และ เงื่อนไขที่ 2 ที่ระยะ 5 mm อุณหภูมิจะยังไม่แตกต่างกันมากนัก แต่หลังจาก วินาทีที่ 6 เป็นต้นไป อุณหภูมิเริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยเฉพาะในเงื่อนไขที่ 2 ที่ระยะ 5 mm อุณหภูมิเริ่มดีดตัวสูงขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนและแรงดันที่มากพอและสูงสุดในวินาทีที่ 10 อุณหภูมิอยู่ที่ 1,060 °C



รูปที่ 7 กราฟเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง (เงื่อนไขที่ 1)

รูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลอง และแบบจำลองของเงื่อนไขชุดที่ 1 พบว่า ในการทดลองจากเหตุผลที่กล่าวไปในตอนต้นว่า ในช่วงแรกที่เวลา 1-2 sec เครื่องเชื่อมต้องสร้างแรงดันและสะสมความร้อนที่มากพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทาน อุณหภูมิจึงจะดีดตัวสูงขึ้น จากกราฟในรูปที่ 7 การเปรียบเทียบผล พบว่า ที่ระยะ 5 mm ที่วินาทีที่ 11 อุณหภูมิมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ การทดลองอุณหภูมิ 887 °C และแบบจำลองอุณหภูมิ 896 °C โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.79 % และที่ระยะ 10 mm วินาทีที่ 15 การทดลองอุณหภูมิ 502 °C และแบบจำลองอุณหภูมิ 520 °C มีค่าความ

คลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.58% โดยมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น



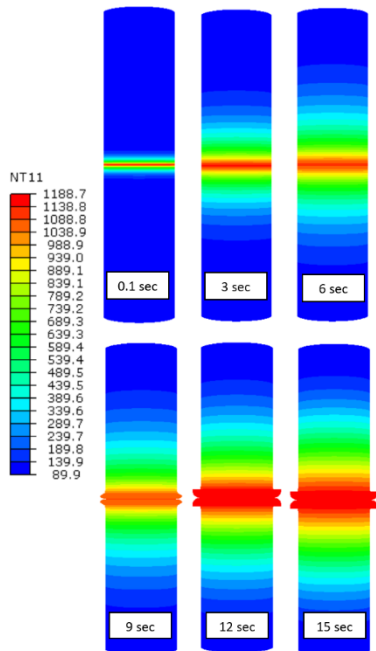
รูปที่ 8 กราฟเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง (เงื่อนไขที่ 2)

รูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลอง และแบบจำลองของเงื่อนไขชุดที่ 2 พบว่า ผลจากการเพิ่มแรงดันเสียดทานส่งผลให้อุณหภูมิในการทดลองและแบบจำลองมีความใกล้เคียงกันมาก ตั้งแต่เริ่มกระบวนการ โดยเฉพาะที่ระยะ 5 mm และใกล้เคียงกันมากที่สุด ในวินาทีที่ 11 การทดลองอุณหภูมิ 1,024 °C และแบบจำลองอุณหภูมิ 1,060 °C โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.4% และที่ระยะ 10 mm วินาทีที่ 12 การทดลองอุณหภูมิ 649 °C และแบบจำลองอุณหภูมิ 682 °C มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 5%

รูปที่ 9 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองภายใต้ตัวแปรแรงดันเสียดทาน โดยแสดงในรูปแบบชั้นแถบสี (Contour) ซึ่งการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะเริ่มตั้งแต่วินาทีแรกที่ขึ้นงานสัมผัสและเสียดสีกันเนื่องจากแรงดันเสียดทานและความเร็วรอบ โดยเฉพาะในวินาทีที่ 9 -10 ขึ้นงานเริ่มมีอุณหภูมิสูง และเริ่มมีการอ่อนตัวจนเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) อีกทั้งยังมี

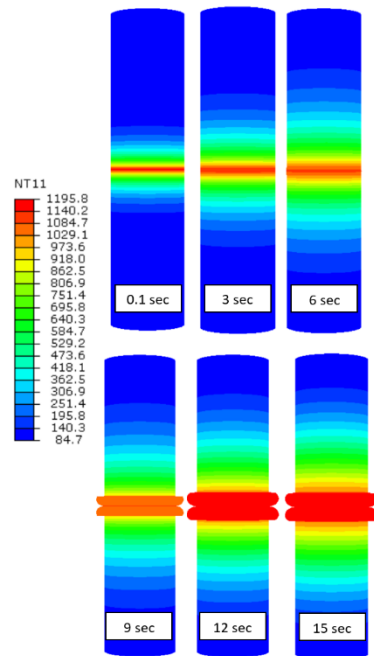
July – December 2024; 10(2) : 1 – 10

การเพิ่มแรงดันในแนวแกนจาก 20 bar เป็น 60 bar เพื่อดันอัดชิ้นงานให้ติดกันและเกิดการเสียรูปมากขึ้น ดังแสดงในรูปภาพ วินาทีที่ 12-15



รูปที่ 9 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง แรงดัน 20 bar

รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเสียรูปของชิ้นงานภายใต้แรงในแนวแกน 30 bar ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิลำบากกันกับเงื่อนไขที่ผ่านมา แต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานที่มีมากกว่าเนื่องจากแรงดันเสียดทานที่มากกว่า ผลจากการเพิ่มแรงดันเสียดทาน ทำให้อุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานสูงขึ้น และการเสียรูปของชิ้นงานก็มากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในวินาทีที่ 12-15 ดังแสดงในรูปที่ 10 และในรูปที่ 11 แสดงชิ้นงานที่เชื่อมเสียดทานเมื่อจบกระบวนการ



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง แรงดัน 30 bar



รูปที่ 11 ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงาน

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลอง ณ ที่ตำแหน่งต่างๆ และสรุปค่าความคาดเคลื่อนของแต่ละเงื่อนไข ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4

สรุปเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง

เงื่อนไข	อุณหภูมิที่ ระยะ 5 mm. (°C)	ความ คาค เคลื่อน (%)	อุณหภูมิที่ ระยะ 10 mm. (°C)	ความ คาค เคลื่อน (%)
Exp.1	887	0.79	502	3.58
FEM.1	896		520	
Exp.2	1,024	3.4	649	5
FEM.2	1,060		682	

4. สรุป

1. แบบจำลอง FEM 2 D ที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์และทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทานได้ และเทียบกับผลการทดลอง โดยให้ค่าความคาคเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Ho Thi My Nu และคณะ [2] กับ Wen ya Li และ Fei fan Wang [3]

2. ตอนเริ่มกระบวนการเชื่อมเสียดทานอุณหภูมิยังไม่ดีตัวสูงขึ้นทันที เนื่องจากเครื่องเชื่อมต้องการแรงดันและการสะสมความร้อนที่มากพอ แต่การทำงานของเครื่องเชื่อมเข้าสู่สภาวะปกติ ผนวกกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ลดลง อุณหภูมิจึงดีตัวสูงขึ้นหลังจากผ่านช่วง 1-2 sec

3. ตัวแปรแรงดันเสียดทานมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเสียรูปของวัสดุจริงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนต้น และสอดคล้องกับตัวอย่างการแสดงผลในคู่มือ Abaqus Example Problem Guide [11] และงานวิจัยของ Medhat Awad El-Hadek และคณะ [12]

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยอาชีวพนม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวก รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramesh Kumar R, et al. Experimental and analytical investigation on friction welding dissimilar joints for aerospace applications. Ain Shams Engineering Journal 2023; 14(2), 1-17.
- [2] Ho Thi My N, et al. A Study on Rotary Friction Welding of Titanium Alloy (Ti6Al4V). Advances in Materials Science and Engineering 2019; 2019(1), 1-9.
- [3] Wen ya L, Fei fan W. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. Materials Science and Engineering A 2011; 528, 5921–5926.
- [4] Friction Welding: Principle, Working, Type, Application, Advantages and Disadvantages [Internet]. [cited 2017 April 6] Available from: URL: <https://www.mech4study.com/2017/04/friction-welding-principle-working-types-application-advantages-and-disadvantages.html>.
- [5] Eder Paduan A, et al. Experimental Thermal Analysis in Rotary Friction Welding of Dissimilar Materials. J

- Aerosp. Technol Manag 2019; 11(e4019): 1-9.
- [6] Jabbar Hassan A, et al. Experimental Investigation of Friction Pressure Influence on the Characterizations of Friction Welding Joint for AISI 316. International Journal of Engineering. IJE TRANSACTIONS C: Aspetcs 2020; 33(12), 2514-2520.
- [7] Xiawei Y, et al. Finite element modelling for temperature, stresses and strains calculation in linear friction welding of TB9 titanium alloy. J m a t e r r e s t e c h n o l 2 0 1 9; 8(5), 4797–4818.
- [8] Seli H, et al. Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel - Al6061 - Alumina. Materials Research 2013; 6(2), 453-467.
- [9] Li W Y, et al. Heat reflux in flash and its effect on joint temperature history during linear friction welding of steel. International Journal of Thermal Sciences 2013; 67 (2), 192-199.
- [10] Kimura M, et al. Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature During Friction Process of Steel Friction Welding. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 2010; 4(3), 401-403.
- [11] ABAQUS Example problem guide, Volume I: Static and dynamic analysis; 2016.
- [12] Medhat Awad El-Hadek. Sequential Transient Numerical Simulation of Inertia Friction Welding Process. Proceedings of IMECE2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition; 2008 Oct 31-Nov 6; Boston, Massachusetts, USA.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม

Coefficient elasticity Testing Of Flower Buds Protection Plastic Net

ไบริน นิธิวัฒน์พงษ์¹⁾ จารุพล สุริยวานากุล^{2)*} เยาวพา ตรีกมอล³⁾ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต⁴⁾ สุภชัย พลน้ำเที่ยง⁵⁾ภูเบศร์ ยอดรัก⁶⁾Bairin Nithiwatthanaphong¹⁾ Jarupol Suriyawanakul^{2)*} Yaowapa Treekamol³⁾ Kiatfa Tangchaichit⁴⁾Supachai Polnumtiang⁵⁾ Phubet Yodruk⁶⁾^{1) 2) 4) 5)} สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น³⁾ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น⁶⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

^{1) 2) 4) 5)} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University³⁾ Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University⁶⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

123 Mitrapap Road, Mueng Khon Kaen Distric, Khon Kaen 40002

Received: 25 July 2024

Revised: 20 September 2024

Accepted: 20 September 2024

Available online: 26 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางกลของตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกไม้ตูม เพื่อหาขอบเขตเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการจำแนกชิ้นงานตาข่ายพลาสติกในกระบวนการผลิต การทดลองใช้เครื่องวัดค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัส ดึงทดสอบตาข่ายพลาสติก 22 ชิ้นที่ผ่านการคัดเลือกโดยคนงาน โดยกำหนดขนาดของตาข่ายพลาสติกทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบ มีเส้นผ่าศูนย์กลางกว้าง 10 mm ยาว 60 mm ความลึกของชิ้นงานด้านกว้างอยู่ใน อุปกรณ์จับยึดด้านละ 2.5 mm ดึงทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 50 mm/min ได้กราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา แรง และระยะดึง ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะดึงพบว่า ความชันส่วนแรกของกราฟคือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงาน และความชันส่วนที่สองคือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของวัสดุซึ่งใช้ผลิตชิ้นงานซึ่งจะไม่พิจารณาส่วนนี้ จากผลทดลองทั้ง 22 การทดลองที่ $\pm 3\sigma$ มีค่าเฉลี่ยคือ 0.08725 N/mm และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 0.02164 N/mm โดยมีขอบเขตบน-ล่างที่ 0.1522 N/mm และ 0.0223 N/mm ตามลำดับ

คำสำคัญ: คุณสมบัติทางกล ตาข่ายพลาสติก การวัดค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัส สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม

Abstract

This research aims to study about mechanical properties testing of flower buds protection plastic net. To establish standards for distinguishing plastic nets in the production process. By using a Texture Analysis machine to conduct tensile tests on 22 pieces of plastic net that have been sorted by workers. Specifying the size of the cylindrical shape plastic net used in the test to have a diameter width of 10 mm and a length of 60 mm. The depth of the wide workpiece is in the JIG on each side by 2.5 mm, doing tensile test at a constant speed of 50 mm/min. Provide a graph of the relationship between time, force, and stroke distance. The graph of force-stroke distance found that the first slope is the coefficient of elasticity of the workpiece, and the second slope is the coefficient of elasticity of the material used to produce the workpiece, which is not considered in this part. From a total of 22 experiments at $\pm 3\sigma$, with a mean value of 0.08725 N/mm and a standard deviation of 0.02164 N/mm, with upper-lower limits of 0.1522 N/mm and 0.0223 N/mm respectively.

Keywords: Mechanical-properties: Plastic net: Texture-Analysis: Coefficient of Elasticity Flower: Buds protection plastic net

*ติดต่อ: jarupol@kku.ac.th, 043-362144

1. บทนำ

ราคาของผลผลิตทางการเกษตรนั้นแปรผันตรงกับสภาพสมบูรณ์ของตัวผลผลิต ดังจะเห็นได้ชัดเจนในผลผลิตทางการเกษตรจำพวกที่มีราคาสูง อาทิ ดอกไม้และผลไม้ เนื่องจากกลีบของดอกไม้และผิวผลไม้หลาย

ชนิดเสียหายได้ง่าย จำพวกดอกไม้บางชนิดหากถูกขายในสภาพที่ดอกบานแล้วจะมีราคาต่ำกว่าดอกตูม การปลุกดอกไม้เพื่อจัดจำหน่ายในปัจจุบันจึงใช้ตาข่ายพลาสติกที่ยืดหดได้ สวมครอบดอกไม้ตั้งแต่กระบวนการแรกของการออกดอก จนกระทั่งดอกไม้

เติบโตและขยายตัวในตาข่ายพลาสติกโดยที่กลีบดอกไม่บานออก คงสภาพเป็นดอกไม้ตูม [1]

สำหรับตาข่ายพลาสติกป้องกันกลีบดอกไม้ที่กล่าวถึงในข้างต้น เป็นตาข่ายพลาสติกที่ผลิตจากวัสดุ Polyethylene (PE) โดยใช้การขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีดพลาสติก (plastic extrusion) และบิดเกลียวจนเส้นพลาสติกประสานเป็นตาข่าย ก่อนตัดแบ่งเป็นชิ้นตามความยาวที่เหมาะสม [2] ซึ่งตาข่ายพลาสติกที่คล้ายกันนี้เริ่มถูกใช้งานในด้านการเกษตรอย่างแพร่หลาย ทั้งการปกป้องผลผลิตจากแมลง ลดการไหลผ่านของแสงอาทิตย์ในเรือนเพาะปลูก อาทิ ในประเทศอิตาลีที่ใช้ตาข่ายพลาสติกชนิด High density polyethylene (HDPE) มากกว่า 5,300 ตัน ในการเพาะปลูก [3] ดังนั้นจึงเริ่มมีการพยายามที่จะศึกษาหากระบวนการทดสอบตาข่ายพลาสติกเหล่านี้เพื่อหาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกล พบว่า มาตรฐานในการทดสอบ อาทิ ISO , DIN , และ ASTM ไม่ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบไว้อย่างแน่นอนสำหรับการทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของตาข่ายพลาสติก [4-5] ทำให้การทดสอบตาข่ายพลาสติกเหล่านี้ จำเป็นต้องอาศัยการพิจารณาจากรูปแบบการใช้งานของผลิตภัณฑ์ตาข่ายพลาสติกนั้นๆ ประกอบ

โดยลักษณะของตาข่ายที่ถูกใช้งานในด้านการเกษตร แบ่งออกเป็นตาข่ายแบบเชื่อม (knitted หรือ knotting) และตาข่ายแบบถัก (woven) สำหรับวิธีการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางกลของตาข่ายที่ถูกใช้งานในด้านการเกษตรซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับ คือ วิธีการทดสอบแรงดึง (tensile test) โดยต้องกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับการทดสอบแรง

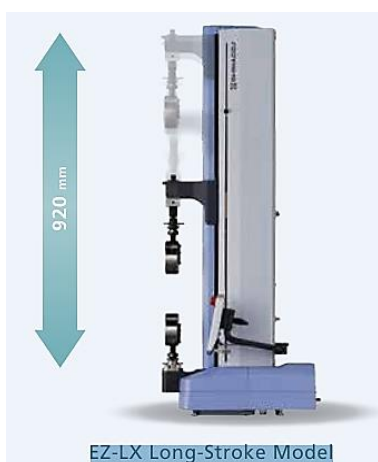
ดึง คือ ความกว้างเฉพาะส่วนของชิ้นทดสอบที่ถูกจับโดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ (clamps หรือ JIG) [3,6] และความเร็วในการดึงทดสอบควรอยู่ในช่วง 50-500 mm/min หรือ 0.83-8.3 mm/s จึงจะไม่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลอง [7]

การทดสอบแรงดึงในทิศทางต่างกันให้ผลลัพธ์ต่างกัน โดยจะขึ้นกับลักษณะการทอของตาข่ายว่าเป็นแนวด้ายยืน (warp) หรือด้ายพุ่ง (weft) สำหรับวัสดุที่ใช้ในการผลิตตาข่ายด้านการเกษตรจะพิจารณาจากการใช้งานเป็นหลัก อาทิ ตาข่ายดักปลาจะนิยมใช้วัสดุสังเคราะห์จำพวก HDPE , PET และ PA เนื่องจากมีความทนทานและไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมต่ำ [8-9] และเนื่องจากวัสดุ Polyethylene (PE) มีค่า Tensile Strength น้อยที่สุด คือ 310-445 MPa จึงมักจะถูกใช้กับงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของตาข่ายมากแต่ต้องการความยืดหยุ่นเป็นหลัก [9]

ในการทำวิจัยเรื่องนี้จะเป็นการนำชิ้นงานที่ทางโรงงานคัดเลือกมาแล้วว่าผ่านมาตรฐานพร้อมสำหรับการจัดจำหน่าย มาทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (coefficient of elasticity) ของผลิตภัณฑ์ตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม จากนั้นอาศัยวิธีการทางสถิติเพื่อหาช่วงขอบเขตบน-ล่างของการแจกแจงการกระจายของข้อมูล นำไปสู่แนวทางการทดสอบผลิตภัณฑ์ของโรงงานเพื่อนำไปทดสอบและทำการปรับใช้เพื่อหาเกณฑ์การทดสอบชิ้นงานที่เหมาะสมต่อไป โดยข้อมูลที่ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิตินั้นจะถือว่าเป็นค่าที่แท้จริง เมื่อมีการทดลองมากกว่า 20 ครั้ง [10]

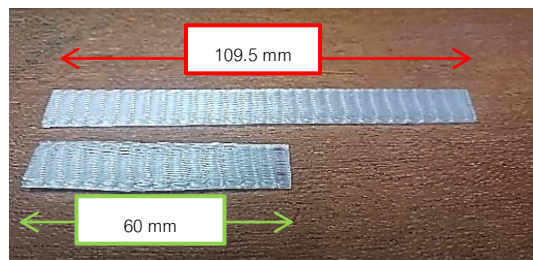
2. วิธีการวิจัย

ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ มาจากเครื่องฉีดพลาสติกชนิด Extruder ของบริษัทแห่งหนึ่งในประเทศเวียดนาม เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น EZ-LX Test ดังรูปที่ 1 โดยเครื่องมี Max. Capacity 5 kN มี Max. Stroke 920 mm มีความเร็วการทดสอบอยู่ในช่วง 0.001-1,000 mm/min ความเร็วสูงสุดการกลับสู่จุดตั้งต้น 1,500 mm/min ค่าความแม่นยำ $\pm 0.5\%$ ที่โหลดเซลล์ขนาด 5 kN



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น EZ-LX Test [11]

2.1. เตรียมชิ้นทดสอบจำนวน 22 ชิ้นที่ถูกคัดเลือกพร้อมจัดจำหน่าย มีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นพลาสติกเฉลี่ย 0.525 mm/เส้น เส้นผ่าศูนย์กลางโดยรวมของชิ้นงานเฉลี่ย 10 mm/เส้น โดยทำการตัดเพื่อลดความยาวของชิ้นงานจากเดิม มีความยาวเฉลี่ย 109.5 mm เหลือความยาวเฉลี่ย 60 mm ดังรูปที่ 2 เพื่อให้ความยาวของชิ้นงานพอดีกับขนาดของ Clamp/JIG ที่ใช้จับยึดชิ้นงานในการทดสอบ



รูปที่ 2 ลักษณะการเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 3 ลักษณะการจับชิ้นงานกับ Clamp/JIG

2.2. นำชิ้นงานใส่ใน Clamp/JIG สำหรับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ จับที่ความลึกของชิ้นงานด้านละ 2.5 mm และทำการจับชิ้นงานในแนวนอน ดังรูปที่ 3

2.3. ตั้งค่าเครื่องทดสอบ Texture Analysis กำหนดความเร็วในการดึงที่ 50 mm/min, วัสดุที่ดึงเป็นพลาสติก และระยะ Stroke สูงสุดที่ 500 mm

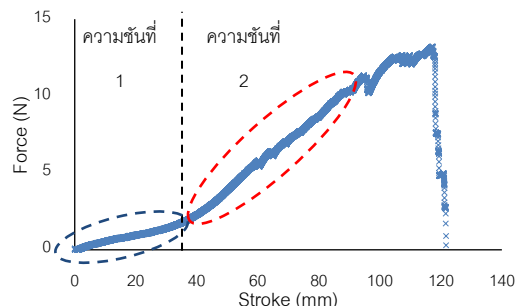
2.4. เริ่มทำการดึงชิ้นทดสอบ ทั้ง 22 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 4 ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา แรง และระยะ Stroke



รูปที่ 4 ลักษณะการดึงขึ้นงาน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1. นำข้อมูลทั้งจาก 22 การทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงและระยะ Stroke พบว่ากราฟมีลักษณะดังรูปที่ 5 คือ มีค่าความชันก่อนการขาดของขึ้นทดสอบสองช่วง ได้แก่ ค่าความชันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยความชันที่ 1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นทางกายภาพของตัวผลิตภัณฑ์ตาข่ายพลาสติกป้องกันกลีบดอกตูมโดยสังเกตจากระยะ Stroke ที่มีค่าอยู่ในช่วง 25-35 mm และค่าความชันที่ 2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัววัสดุซึ่งใช้ผลิตตาข่ายพลาสติกป้องกันกลีบดอกตูม คือ Polyethylene [12] ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์เฉพาะค่าความชันในส่วนแรกเท่านั้น เนื่องจากมีวัตถุประสงค์คือการหาค่าคุณสมบัติทางกลของตัวผลิตภัณฑ์ตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม



รูปที่ 5 ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 2

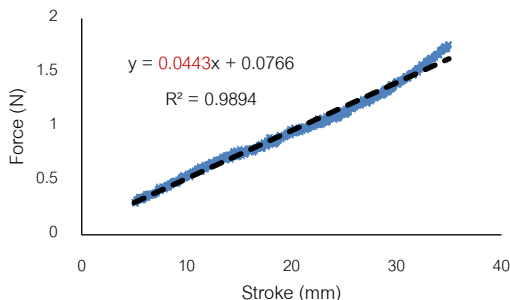
3.2. แยกความชันที่ 1 ออกจากความชันที่ 2 โดยการแบ่งข้อมูลเป็นช่วงย่อยๆ ตามระยะ stroke ได้แก่ 5 – 14 , 15 – 24 , 25 – 34 , 35 – 44 , 45 – 54 และ 55 – 64 mm Stroke ตามลำดับ เพื่อหาความชันในแต่ละช่วงเหล่านี้ โดยใช้วิธีการสร้างกราฟแสดง Trend line หรือใช้สมการที่ 1 ในการหาค่าความชันแต่ละช่วง

$$\text{slope} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta \text{Force}}{\Delta \text{Stroke}} \quad (1)$$

เมื่อ Force คือ แรง หน่วย N
Stroke คือ ระยะ Stoke หน่วย mm

3.3. เปรียบเทียบค่าความชันกับช่วงย่อยอื่นในการทดลองของตัวอย่างเดียวกัน เมื่อพบว่าความชันมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเกิน 0.05 N/mm ถือเป็นการเข้าสู่ช่วงความชันที่ 2

3.4. หาค่าความชันที่ 1 ของแต่ละการทดลองโดยใช้วิธีการสร้างกราฟแสดง Trend line หรือใช้สมการที่ 1 โดยใช้ข้อมูลในช่วง 5 mm Stroke ถึง mm Stroke สุดท้ายก่อนการเปลี่ยนแปลงไปยังความชันที่ 2 ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การหาค่าความชันที่ 1 ของการทดลองที่ 2 โดยใช้ Trend line

จากรูปที่ 6 เป็นการเขียนกราฟเฉพาะช่วงความชันที่ 1 ใช้ Trend line หรือเส้นประสีดำ ในการหาค่าความชัน โดยค่าความชันของการทดลอง คือ สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร x

3.5. นำเข้าสู่กระบวนการทางสถิติเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

โดยจากการทดลองทั้ง 22 ตัวอย่าง ได้ผลเป็นค่าความชันที่ 1 หรือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 1

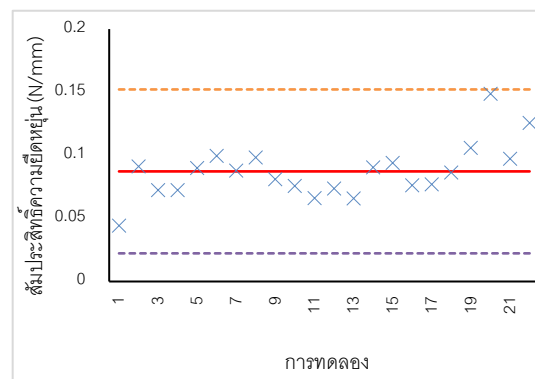
ตารางที่ 1

ค่าความชันที่ 1 ของการทดลองทั้งหมด

การทดลอง	ค่าความชันที่ 1 (N/mm)
1	0.0443
2	0.0911
3	0.0724
4	0.0724
5	0.09
6	0.0995
7	0.088
8	0.0983
9	0.081
10	0.0756
11	0.0661
12	0.0737
13	0.0657
14	0.0903
15	0.094
16	0.0761
17	0.0771
18	0.0863
19	0.1059
20	0.1487
21	0.0973
22	0.1257

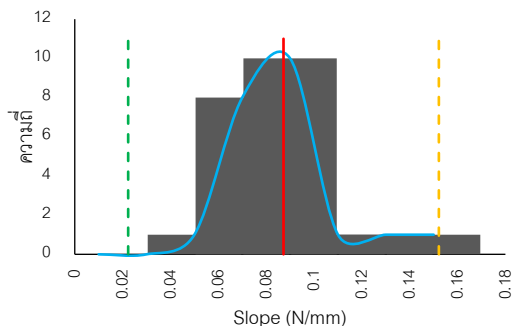
12	0.0737
13	0.0657
14	0.0903
15	0.094
16	0.0761
17	0.0771
18	0.0863
19	0.1059
20	0.1487
21	0.0973
22	0.1257

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 นำมาเขียน Control chart [13] ได้ออกมาดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความชันที่ 1 ของทั้ง 22 การทดลอง

จากรูปที่ 7 คือ Control chart ของทั้ง 22 การทดลอง ที่ขอบเขต $\pm 3\sigma$ ได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงานตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม มีค่า Mean หรือเส้นสีแดง คือ 0.08725 N/mm , ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.02164 N/mm , ค่าขอบเขตบนที่ $+3\sigma$ หรือเส้นประสีเขียว คือ 0.1522 N/mm และค่าขอบเขตล่างที่ -3σ หรือเส้นประสีเหลืองคือ 0.0223 N/mm



รูปที่ 8 Histogram ของทั้ง 22 การทดลอง

จากรูปที่ 8 ซึ่งคือ Histogram ของ 22 การทดลองพบว่า ค่าความชันหรือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงานตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูมที่ได้ มีการกระจายตัวของข้อมูลที่ไม่สมมาตร โดยข้อมูลมีการกระจายตัวชนิดเบ้ซ้าย เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของข้อมูลแบบสมมาตรได้ และจากการทดลองทั้ง 22 การทดลองพบว่า ค่า Max Stroke ของความชันส่วนที่ 1 มีค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

ค่า Max Stroke ของการทดลองทั้งหมด

การทดลอง	Max Stroke (mm)
1	34.99263
2	34.99213
3	34.99263
4	34.993
5	24.99375
6	34.993
7	24.994
8	24.993
9	34.993
10	24.99188
11	34.99275
12	34.992

13	34.99288
14	34.99325
15	24.992
16	34.99263
17	24.99363
18	24.99288
19	24.99375
20	24.99313
21	24.9925
22	24.99213

จากตารางที่ 2 พบว่าค่า Max Stroke ของความชันส่วนที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.99 ± 5.12 mm

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงานตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูมจากตัวอย่าง 22 การทดลอง อยู่ในช่วง 0.06-0.1 N/mm เป็นส่วนมาก โดยอยู่ในช่วง 0.06-0.08 N/mm จำนวน 7 ตัวอย่าง และอยู่ในช่วง 0.08-0.1 N/mm จำนวน 10 ตัวอย่าง กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงานตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูมที่ได้จากการเก็บตัวอย่างเพิ่มเติมหรือถูกนำไปใช้เป็นข้อกำหนดคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ ควรที่จะอยู่ในช่วง 0.06 – 0.1 N/mm ทั้งนี้เนื่องจากขอบเขตที่เลือกอยู่ในช่วง $\pm 3\sigma$ เนื่องจากเป็นข้อกำหนดที่โรงงานส่วนมากเลือกใช้ ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดของเสียเพียง 0.3% เท่านั้น โดยสามารถที่จะลดขอบเขตลงมาแล้วใช้วิธีหาสาเหตุการเกิดของเสียโดยอาศัยหลัก 4M ได้แก่ Man , Material , Method และ Machine เข้าช่วยดัง [14,15] เพื่อหาสาเหตุหลักของการเกิดชิ้นงานเสียที่มีสัดส่วนมากที่สุด แล้วจึงทำการแก้ไขเพื่อลดจำนวนชิ้นงานเสียดังกล่าว

4. สรุป

จากผลการเก็บตัวอย่างทดสอบแรงดึงของตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม 22 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความชันจากส่วนที่ 1 ไปยังส่วนที่ 2 ที่ระยะ Stroke 25 mm 11 การทดลอง และ 35 mm 11 การทดลอง โดยค่าความชันที่ 1 ซึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงานตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.02164 N/mm , มีค่า Mean คือ 0.08725 N/mm ที่ขอบเขต [0.0223 , 0.1522] N/mm หรือ $\pm 3\sigma$ โดยข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวชนิดเบ้ซ้ายค่า Max Stroke ของความชันส่วนที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.99 ± 5.12 mm และสำหรับการนำข้อมูลชุดนี้ไปอ้างอิงในการกำหนดคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ตาข่ายพลาสติกป้องกันดอกตูม ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชิ้นงาน ควรที่จะอยู่ในช่วง [0.06 , 0.1] N/mm โดยสามารถระบุค่าให้แม่นยำมากขึ้นได้ด้วยการเพิ่มตัวอย่างในการทดลอง นำไปสู่การตั้งค่าเครื่องจักรให้สามารถฉีดชิ้นงานที่ได้ค่ามาตรฐานก่อนเริ่มเดินสายการผลิตต่อเนื่อง เพื่อนำไปสู่การตั้งค่าเครื่องจักรให้สามารถฉีดชิ้นงานที่ได้ค่ามาตรฐานก่อนเริ่มเดินสายการผลิตต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท Thien Phuoc Manufacturing and Trading ประเทศเวียดนาม ที่ช่วยสนับสนุนหัวข้อในการวิจัยและชิ้นงานทดสอบ ขอขอบคุณอุทยานวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ช่วยสนับสนุนในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ช่วยสนับสนุนเครื่องมือในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครโฮจิมินห์. เวียดนาม - ผู้ส่งออกดอกไม้. ข่าวเด่นประจำสัปดาห์จากสคต ณ นครโฮจิมินห์. (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ 27 มิถุนายน 2566]. เข้าถึงได้จาก : www.ditp.go.th/contents_attach/148900/148900.pdf
- [2] Castellano S, Scarascia Mugnozza G, Russo G, Briassoulis D, Mistriotis A, Hemming S, et al. Plastic Nets in Agriculture: A General Review of Types and Applications. Appl Eng Agric. 2008; 24(6): 799–808.
- [3] Briassoulis D, Mistriotis A, Eleftherakis D. Mechanical behaviour and properties of agricultural nets—Part I: Testing methods for agricultural nets. Polym Test. 2007 Sep 1; 26(6): 822–32.
- [4] Brussels. Personal communication with CEN/TC 248/WG 3 and ISO/ TC 38/-WG 21 dealing with the European and International Standardisation of twines, ropes and netting, Comite Europeen de Normalisation. 2005.

- [5] Personal communication with ASTM's Committee D35 on Geosynthetics and ASTM's Committee D13 on Textiles. 2005.
- [6] Briassoulis D, Mistriotis A, Eleftherakis D. Mechanical behaviour and properties of agricultural nets. Part II: Analysis of the performance of the main categories of agricultural nets. *Polym Test*. 2007;26(8): 970–84.
- [7] Moe H, Olsen A, Hopperstad OS, Jensen Ø, Fredheim A. Tensile properties for netting materials used in aquaculture net cages. *Aquac Eng*. 2007 Nov 1; 37(3): 252–65.
- [8] Sharif NFH, Mon SZK. A Review on the Strength of Fishing Net; The Effect of Material, Yarn Diameter and Mesh Size. *Prog Eng Appl Technol* [Internet]. 2021;2(1):1030–6.v [cited 2024 Jul 27]. Available from: <https://doi.org/10.30880/peat.2021.02.01.100>
- [9] Fibres. Chapter 3 Recent trends in fishing gear materials. In 2017. p. 39–56.
- [10] Woravith C. editor. Statical Evaluation of analytical data [Internet]. Thailand: Slideshare a scribd company. [cited 2024 Jun 5] Available from: <https://www.slideshare.net/slideshow/statistical-evaluation-of-analytical-data/250973515>
- [11] shimatzu corporation. EZ Test, Compact Tabletop Tester, Universal / Tensile Testing Machine [Internet]. [cited 2024 Jun 5]. Available from: <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/ez-test/>
- [12] AWWA. Engineering Properties of Polyethylene. 2005.
- [13] ธนภฤช ชุ่นแข็ง. การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์; กรุงเทพฯ; 2557.
- [14] สุภาพนันต์ เขียวสังข์, ศุภรัชชัย วรรัตน์. การลดของเสียในกระบวนการผลิตการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติก. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 17-19 ตุลาคม 2555, จังหวัดเพชรบุรี; 2555.
- [15] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. หลักการควบคุมคุณภาพ. 3rd ed. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2551.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

เครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

Cassava chopper type mounted machine for small tractor

กฤษณะ นาวารัตน์^{1*}, บุญฤทธิ์ บัวระบุดี¹, ไกรสร รวยป้อม¹, ชนิดา บุญตา²Kritsana navarat^{1*}, Boonyarid Buarabut¹, Krison Ruaypom¹, Chanida Bupata²¹สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

วิทยาเขตจันทบุรี, จันทบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี¹Department of Mechanical Technology, Faculty of Agro-Industrial Technology, RMUTTO, Chanthaburi²Department of Agricultural Engineering, School of Engineering and Innovation, RMUTTO, Chonburi

Received: 22 August 2024

Revised: 14 September 2024

Accepted: 14 September 2024

Available online: 26 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและสร้างเครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ประกอบด้วย ต้นกำลังจากรถแทรกเตอร์ ชุดถ่ายทอดกำลังไปยังเพลาชับชุดใบมีดและชุดใบมีดสับมันสำปะหลัง ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยন্ত্রรถแทรกเตอร์ที่ 1,000 1,400 และ 1,800 rpm ความเร็วรอบเพลาชับชุดใบมีด 540 และ 800 rpm และจำนวนใบมีด 2 3 และ 4 ใบมีด มุมเฉือนของใบมีด 15 30 และ 45 องศา ที่ความเร็วรอบเครื่องยন্ত্র 1,000 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีดที่ 540 rpm จำนวน 4 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 1,802 kg h⁻¹ และ 800 rpm จำนวน 4 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 2,116 kg h⁻¹ ที่ความเร็วรอบเครื่องยন্ত্র 1,400 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีดที่ 540 rpm จำนวน 2 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 1,925 kg h⁻¹ และ 800 rpm จำนวน 4 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 2,072 kg h⁻¹ ที่ความเร็วรอบเครื่องยন্ত্র 1,800 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีด 540 rpm จำนวน 2 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 1,873 kg h⁻¹ และที่ 800 rpm จำนวน 3 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ 1,946 kg h⁻¹

คำสำคัญ: เครื่องสับ มันสำปะหลัง รถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

Abstract

The objectives of this research are to study and build a small tractor-mounted cassava chopper. The power source from the tractor, the power transfer unit to the drive shaft, the blade unit, and the cassava chopping blade assembly. Tractor engine speeds of 1,000, 1,400, and 1,800 rpm, tests were performed at 540 and 800 rpm blade drive shaft speeds, and 2, 3, and 4 blades, blade shear angles of 15, 30, and 45 degrees at engine speeds of 1,000 rpm. 4 blades at 540 rpm, 4 blades 1,802 kg h⁻¹ and 800 rpm material capacity, 2,116 kg h⁻¹ material capacity at 1,400 rpm, 2 blades at 540 rpm 2 blades, 1,925 kg h⁻¹ and 800 rpm 4 blades, 2,072 kg h⁻¹ material capacity at 1,800 rpm, 2 blades at 540 rpm 1,873 kg h⁻¹ material capacity, and 3 blades at 800 rpm 1,946 kg h⁻¹ material capacity

Keywords: Chopper machine: cassava: small tractor

*ติดต่อ: kritsana_na@rmutto.ac.th, 095-951-9952

1. บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย โดยมีพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศกว่า 10,861,975 ไร่ ครอบคลุม 53 จังหวัด มีเกษตรกรผู้ปลูกถึง 738,153 ครัวเรือน สามารถผลิตหัวมันสดได้ประมาณปีละ 34,068,005 ล้านตัน [1] ในปัจจุบันมีการแบ่งจำหน่ายเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทหัวมันสดและประเภทมันเส้น ราคาจำหน่ายเป็นหัวมันสดราคาจะมีราคาถูกกว่ามันเส้นเนื่องจากการไม่มีการแปรรูป ในส่วนราคามันเส้นจะมีราคาสูงกว่าเนื่องจากการต้องมีการแปรรูป โดยการแปรรูปจากหัวมันสดไปเป็นเส้นมีหลากหลายวิธีการ วิธีแรกจะใช้แรงงานจากเกษตรกรแปรรูปโดยการใช้น้ำคั้นสับ เนื่องจากการใช้แรงงานจากมนุษย์จะมีค่าทำให้ความสามารถในการผลิตลดลง วิธีการแปรรูปอีกรูปแบบ คือ ทางผู้รับซื้อดำเนินการด้วยตัวเองในส่วนนี้เกษตรกรจำหน่ายหัวมันให้กับผู้รับซื้อในราคาที่ถูก

และผู้รับซื้อทำการแปรรูปเอง จากปัญหาที่กล่าวทางผู้วิจัยได้มองความสำคัญของการเพิ่มมูลค่าให้กับมันสำปะหลังที่ใช้ภายในประเทศ ในปัจจุบันการลดขนาดหัวมันสำปะหลังมีหลายวิธี มีการศึกษาและสร้างเครื่องสับมันสำปะหลังแบบไบมิดโยก [2] โดยมีชุดตะแกรงทำความสะอาดและมีชุดไบมิดโยกไปกลับสับหัวมัน ทำงานโดยนำหัวมันเข้าสู่ตะแกรงทำความสะอาด แล้วปล่อยลงพื้นหลังจากนั้นใช้คนเก็บขึ้นใส่ช่องบ่อนของชุดไบมิดสับที่ด้านบนครั้งละ 2 หัว ซึ่งมี 2 ช่องบ่อน สามารถสับหัวมันได้ประมาณ 530 kg h⁻¹ ได้ขึ้นมันตามที่เกษตรกรต้องการ [3] ในส่วนของต้นกำลังมีการนำรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กมาใช้งาน โดยที่งานวิจัยและพัฒนาเครื่องสับไบมิดโยกสำหรับรถแทรกเตอร์ต่ำกว่า 80 แรงม้า ออกแบบให้พ่วงต่อรถแทรกเตอร์แบบ 3 จุด ชุดหัวเกียร์อัตราทด 1.46:1 ถ่ายทอดกำลังจากเพลาถ่ายทอดกำลังรถแทรกเตอร์ส่งกำลังผ่านเฟืองโซ่ไปหมุนเพลาไบมิด

2 ชุดบนล่าง หมุนสวนทางกันโดยเฟลาใบมีดล่าง หมุนด้วยความเร็วประมาณ 500 rpm เฟลาใบมีดบนหมุนด้วยความเร็วประมาณ 850 rpm [4] จากการศึกษาพบว่าเครื่องสับมันสำปะหลังที่ได้มีการใช้งานมีลักษณะการใช้ต้นกำลังจากนอกด้วยเครื่องยนต์ดีเซลสูบทําให้การเคลื่อนย้ายมีความลำบากเนื่องจากมีขนาดใหญ่และหนักและความสามารถในการทำงานน้อย ประกอบกับเกษตรกรทั่วไปมีต้นกำลังจากรถแทรกเตอร์มาใช้เป็นต้นกำลังในการดำเนินการเพาะปลูกมีการใช้งาน รถแทรกเตอร์ขนาดเล็กมากขึ้นเนื่องจากต้นกำลังที่ใช้งานมีขนาดเพียงพอต่อความต้องการและมีราคาไม่สูง จากปัญหาและแนวทางที่กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยจึงเห็นว่าหากมีการพัฒนาเครื่องมือให้เหมาะสมกับต้นกำลังของเกษตรกรที่มีอยู่จะส่งผลดีเนื่องจากการลดต้นทุนด้านต้นกำลังเพื่อใช้ในการลดขนาดมันสำปะหลังและสามารถเพิ่มผลผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและสร้างเครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

2. วิธีการการวิจัย

2.1. ออกแบบและสร้างเครื่องเครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

2.1.1. การหาความยาวสายพานลิ้ม [5] ดังสมการที่ (1)

$$L_p \cong 2c + 1.57 (D_p + d_p) + \frac{D_p - d_p}{4c} \quad (1)$$

ในกรณีของสายพานลิ้มจะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิตซ์แทน หรือในกรณีที่ทราบความยาวพิตซ์แล้วต้องการหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลางก็ทำได้โดยใช้สมการที่ (2)

$$C = P + \sqrt{p^2 - q} \quad (2)$$

โดยที่

$$P = 0.25L_p - 0.393(D_p + d_p) \quad (3)$$

$$q = 0.125(D_p - d_p) \quad (4)$$

ค่ามุมสัมผัสของล้อสายพานตัวเล็กสามารถหาได้จากสูตร สมการที่ (5)

$$\alpha = 180(D_p - d_p)/C \times 60 \quad (5)$$

การหาความยาวของสายพานหาได้จากสูตร คือ สมการที่ (6)

$$L_p \cong 2c + 1.57(D_p - d_p) + (D_p - d_p)2/4C \quad (6)$$

เมื่อ L_p คือ ความยาว Pitch ของสายพาน

C_p คือ Center Distance

D_p คือ Pitch Diameter ของล้อสายพาน

d_p คือ Pitch Diameter ของล้อสายพานตัวเล็ก

2.1.2. อัตราทดรอบ [5]

อัตราทดเป็นอัตราส่วนของความเร็วรอบของพลูเลย์ขับต่อความเร็วของพลูเลย์ตาม สมการที่ (7)

$$I = \frac{N_1}{N_2} \text{ และ } I = \frac{D_1}{D_2} \text{ หรือ } I = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้

I แทน อัตราทด

N_1 แทน ความเร็วรอบของพลูเลย์ขับ

N_2 แทน ความเร็วรอบของพลูเลย์ตาม

D_1 แทน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพลูเลย์ขับ

D_2 แทน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพลูเลย์

2.1.3. เพลาอำนาจกำลัง (Power Take of, PTO)

[6]

เพลาอำนาจกำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องส่งกำลังของรถแทรกเตอร์ เพลาชนิดนี้ได้ถูกออกแบบสร้างเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมือหมุนแรงอื่นๆ อาทิเช่น เครื่องตัดหญ้า เครื่องอัดฟาง มาตรฐานความเร็วรอบของเพลาขับเคลื่อนมีกำหนดโดยที่ใช้กันในปัจจุบัน จำแนกออกได้ 2 ชนิด

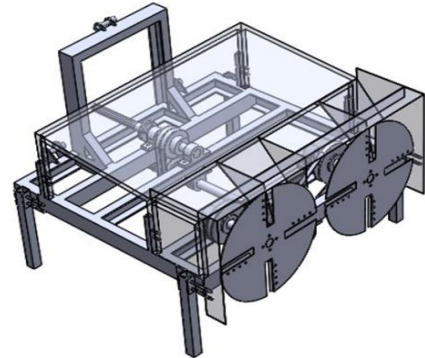
1) ชนิดความเร็ว 540 rpm เพลาอำนาจกำลังชนิดนี้ยังสามารถจำแนกออกตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลาได้เป็น 2 แบบ ด้วยกัน คือ แบบที่ใช้เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 mm และแบบที่ใช้เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm โดยที่เพลาแต่ละขนาดก็จะมีเกาหรือร่องที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 mm จะมีการเจาะร่องไว้ที่เพลา 6 ร่อง ขณะที่เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm จะมีการเจาะร่องไว้ที่เพลาถึง 27 ร่อง

2) ชนิดความเร็วรอบ 1,000 rpm เพลาอำนาจกำลังชนิดนี้สามารถจำแนกออกตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลาได้เป็น 2 แบบ ด้วยเช่นกัน โดยมีขนาดเดียวกันกับเพลาขับเคลื่อนชนิดความเร็ว 540 rpm สำหรับเพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 mm เพลาจะถูกเจาะร่องไว้ 21 ร่อง ขณะที่เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm จะถูกเจาะร่องเพียงแค่ 20 ร่อง

2.1.4. การออกแบบและสร้างเครื่องขับเคลื่อนสำหรับแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ดำเนินการสร้าง ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อดำเนินการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยการทดลองนั้น

อาศัยต้นกำลังจากรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กเชื่อมต่อกับชุดขับเคลื่อนสำหรับขับเคลื่อนด้วยเพลาขับเคลื่อนแบบมีด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างการออกแบบเครื่องขับเคลื่อนสำหรับแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 2 เครื่องขับเคลื่อนสำหรับแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กที่สร้าง



รูปที่ 3 การติดตั้งชุดถ่ายทอดกำลังของเครื่องขับเคลื่อนสำหรับแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

2.1.5. ความสามารถเชิงวัสดุ (material capacity) [7]

นิยามวัดเป็นน้ำหนักของผลผลิตที่เครื่องจักรกลทำงานได้ต่อเวลา เช่น kg h^{-1} ดังสมการที่ (8)

$$mc = \frac{M}{t} \quad (8)$$

เมื่อกำหนดให้

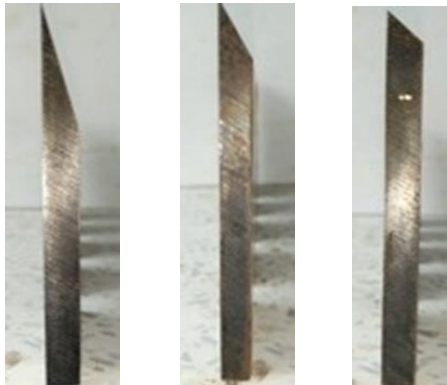
mc แทน ความสามารถเชิงวัสดุ มีหน่วยเป็น kg h^{-1}

M แทน น้ำหนักของน้ำหนักของผลผลิตที่เครื่องจักรกลทำงาน มีหน่วยเป็น kg

t แทน เวลาที่เครื่องจักรทำงาน มีหน่วย เป็น h

2.1.6. ไบโอมัดสับมันส์สำหรับ

ในการทดสอบการสับมันส์สำหรับทำการทดสอบที่มูมไบโอมัดเดือน 15 30 และ 45 องศา เพื่อทดสอบการเดือน ดังรูปที่ 4



15 องศา

30 องศา

45 องศา

รูปที่ 4 แสดงลักษณะของไบโอมัดสับมันส์สำหรับ

ประกอบด้วยมูมไบโอมัด 15 30 และ 45 องศา

2.2. วิธีการทดสอบ

2.2.1. การทดสอบการสับมันส์สำหรับที่มูมไบโอมัดต่างๆ ดังรูปที่ 4 โดยการทดลองทดสอบที่

ความเร็วรอบเพลาลับชุดไบโอมัดที่ใช้ในการสับไบโอมัด 540 และ 800 rpm ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ได้ผลดังตารางที่ 1 และผลการสับมันส์สำหรับหลังจากดังรูปที่ 5



มูม 45 องศา มูม 30 องศา มูม 15 องศา

รูปที่ 5 ผลการสับมันส์สำหรับหลังจากที่มูมไบโอมัด 15 30 และ 45 องศา

ตารางที่ 1

ผลการสับมันส์สำหรับที่มูมไบโอมัดต่าง

มูมไบโอมัด	ผลการสับมันส์สำหรับ
15 องศา	ลักษณะแผ่นสำหรับเป็นแผ่นบางมีความหนาสม่ำเสมอที่ขนาด 0.8 - 1.00 cm และมีส่วนที่แตกเพียงเล็กน้อย
30 องศา	ลักษณะแผ่นสำหรับเป็นแผ่นบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอที่ขนาด 1.00-1.50 cm และเกิดการกะเทาะกับหัวมันส์สำหรับทำให้เกิดการแตกมากกว่าการสับเป็นแผ่นบาง
45 องศา	ลักษณะแผ่นสำหรับเป็นแผ่นบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอโดยประมาณที่ 1.00-1.80 cm และเกิดการกะเทาะกับหัวมันส์สำหรับทำให้เกิดการแตกมากกว่าการสับเป็นแผ่นบางและเกิดการติดระหว่างหัวมันส์สำหรับในช่องว่างไบโอมัดมากกว่ามูม 15, 30 องศา

2.2.2. การทดสอบความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่เหมาะสมสำหรับการสับมันสำปะหลังการทดสอบการถ่ายทอดกำลังโดยกำหนดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3 ระดับเครื่องยนต์รอกเตอร์และเพล่าใบมีด 540 และ 800 rpm ที่มุมใบมีด 15 องศา จากผลการทดสอบในข้อ 2.2.1. ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

2.2.3. การทดสอบสมรรถนะเครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กโดยมีปัจจัยในการทดสอบดังนี้ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000, 1,400, 1,800 rpm ความเร็วรอบเพล่าใบมีด 540 และ 800 rpm จำนวนใบมีด 2, 3, 4 ใบมีด โดยวัดคุณภาพการสับมันสำปะหลังด้วยความหนาของแผ่นมันสำปะหลัง

ตารางที่ 2

ผลการทดสอบที่ความเร็วรอบเพล่าใบมีด 540 rpm

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)	ผลการสับมันสำปะหลัง
1,000	ลักษณะเป็นแผ่นสวยและบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกเล็กน้อยจากการกะแทกของใบมีด
1,400	ลักษณะเป็นแผ่นบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกและขึ้นมันสำปะหลังมีการแตกหักเล็กน้อย
1,800	ลักษณะเป็นแผ่นบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกมากที่สุดและขึ้นของมันสำปะหลังไม่สวยเท่าที่ควร

ตารางที่ 3

ผลการสับมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบเพล่าใบมีด 800 rpm

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)	ผลการสับมันสำปะหลัง
1,000	ลักษณะเป็นแผ่นสวยและบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกเล็กน้อย
1,400	ลักษณะเป็นแผ่นบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกและขึ้นมันสำปะหลังมีการแตกหักเล็กน้อย
1,800	ลักษณะเป็นแผ่นบางมีความหนาสม่ำเสมอและเกิดการกะแทกมันสำปะหลังแตกมากที่สุดและขึ้นของมันสำปะหลังไม่สวย

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดลองเครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กสามารถสับหัวมันสำปะหลัง ดังแสดงผลในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าที่รอบเครื่องยนต์ 1,000 rpm รอบเพล่าใบมีด 540 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,715 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 10.00 mm จำนวนใบมีด 3 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,494 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.80 mm จำนวนใบมีด 4 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,802 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.13 mm รอบเพล่าใบมีด 800 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,703 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 10.07 mm จำนวนใบมีด 3

ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,557 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.87 mm จำนวนใบมีด 4 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $2,116 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 11.47 mm

ที่รอบเครื่องยนต์ $1,400 \text{ rpm}$ รอบเพลาชับชุด ใบมีด 540 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,925 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.87 mm จำนวนใบมีด 3 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,808 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.67 mm จำนวนใบมีด 4

ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,915 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 10.20 mm รอบเพลาชับชุดใบมีด 800 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,781 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 10.20 mm จำนวนใบมีด 3 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,887 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.87 mm จำนวนใบมีด 4 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $2,072 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 7.78 mm

ตารางที่ 4

**ความสามารถเชิงวัสดุของเครื่องสับมัน
สำหรับหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก**

ความเร็ว รอบ เครื่องยนต์ (rpm)	PTO (rpm)	จำนวน ใบมีด (ea)	ความ หนา (mm)	ความ สามารถ เชิงวัสดุ (kg h^{-1})
1,000	540	2	10.00	1,715
		3	9.80	1,494
		4	9.13	1,802
	800	2	10.07	1,703
		3	9.87	1,557
		4	11.47	2,116

1,400	540	2	9.87	1,925
		3	9.67	1,808
		4	10.20	1,915
	800	2	10.20	1,781
		3	9.87	1,887
		4	7.78	2,072
1,800	540	2	9.53	1,873
		3	8.47	1,642
		4	8.60	1,866
	800	2	10.00	1,726
		3	9.13	1,946
		4	8.60	1,866

ที่รอบเครื่องยนต์ $1,800 \text{ rpm}$ รอบเพลาชับชุด ใบมีด 540 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,873 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.53 mm จำนวนใบมีด 3 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,642 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 8.47 mm จำนวนใบมีด 4 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,866 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 8.60 mm รอบเพลาชับชุดใบมีด 800 rpm จำนวนใบมีด 2 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,726 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 10.00 mm จำนวนใบมีด 3 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,946 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 9.13 mm จำนวนใบมีด 4 ใบมีด ได้ค่าความสามารถเชิงวัสดุ $1,866 \text{ kg h}^{-1}$ โดยมีขนาดความหนาเท่ากับ 8.60 mm

ด้านความสมบูรณ์ของแผ่นมันสำหรับ จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบเพลาด้านนั้นจะมีปริมาณมันสำหรับแผ่นเต็มที่ผ่านมาการสับนั้นมีจำนวนมากกว่าที่ความเร็วรอบเพลาส่งในทุกๆ ความเร็ว

รอบเครื่องยนต์ เมื่อเพิ่มความเร็วและจำนวนใบมีด พบว่าจะส่งผลทำให้เกิดการแตกจากแรงตีมากกว่าแรงเฉือนให้เป็นแผ่นจากใบมีดโดยดูจากรูปที่ 6 ใบมีดจำนวน 2 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 540 rpm ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำนั้นจะได้มันส์ปะหลังที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนาเสมอกัน เมื่อเพิ่มความเร็วเครื่องยนต์ทำให้รอบใบมีดสูงขึ้น และมุมเฉือนเดิมไม่สามารถทำการเฉือนได้ โดยจะได้มันส์ปะหลังที่เป็นการถูกขูดมากกว่าตามลักษณะดังรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 11



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

รูปที่ 6 ผลการทดลองที่จำนวน 2 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 540 rpm



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

รูปที่ 7 ผลการทดลองที่จำนวน 3 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 540 rpm



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

รูปที่ 8 ผลการทดลองที่จำนวน 4 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 540 rpm



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

รูปที่ 9 ผลการทดลองที่จำนวน 2 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 800 รอบต่อนาที



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

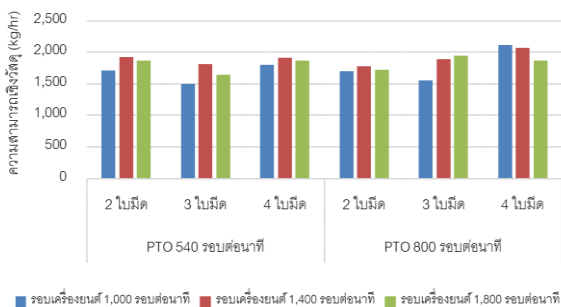
รูปที่ 10 ผลการทดลองที่จำนวน 3 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 800 rpm



1,000 rpm 1,400 rpm 1,800 rpm

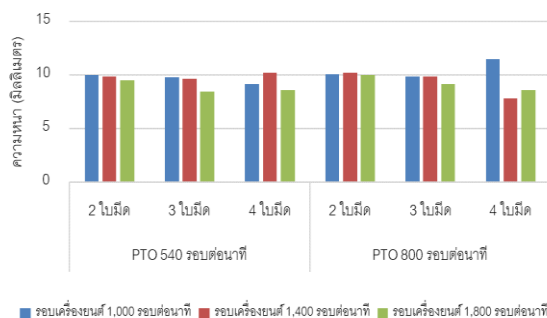
รูปที่ 11 ผลการทดลองที่จำนวน 4 ใบมีด รอบเพลาชับชุดใบมีด 800 rpm

ด้านความเร็วรอบของเพลาชับใบมีดที่ส่งผลต่อความสามารถของเครื่องสับมันส์ปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กดังรูปที่ 12 จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบทำให้ความสามารถเชิงวัสดุเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 rpm พบว่าที่เพลาชับชุดใบมีด 800 rpm ให้ความสามารถสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่เหลือจะเห็นว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 12 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบ
ความสามารถเชิงวัสดุที่ความเร็วรอบต่างๆ

ด้านความหนาของแผ่นมันสำปะหลังจากการทดสอบการสับมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ พบว่าระดับความหนาของแผ่นนั้น มีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 13 จะพบว่าลักษณะของแผ่นมันสำปะหลังนั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10 mm มีความหนาใกล้เคียงกัน



รูปที่ 13 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบความหนา
ของแผ่นมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบต่างๆ

4. สรุป

เครื่องสับมันสำปะหลังแบบติดท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กที่ได้ศึกษาและสร้างนั้น สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้และมีความสามารถที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีดที่ 540 rpm จำนวน 4 ใบมีด

ความสามารถเชิงวัสดุ $1,802 \text{ kg h}^{-1}$ และที่ 800 rpm จำนวน 4 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ $2,116 \text{ kg h}^{-1}$ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,400 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีดที่ 540 rpm จำนวน 2 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ $1,925 \text{ kg h}^{-1}$ และที่ 800 rpm จำนวน 4 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ $2,072 \text{ kg h}^{-1}$ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,800 rpm ที่ความเร็วรอบเพลาชับใบมีด 540 rpm จำนวน 2 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ $1,873 \text{ kg h}^{-1}$ และที่ 800 rpm จำนวน 3 ใบมีด ความสามารถเชิงวัสดุ $1,946 \text{ kg h}^{-1}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การเกษตร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยที่

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มันสำปะหลัง. (สื่อบนออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก <https://www.oae.go.th>
- [2] วิรัตน์ หวังเขื่อนกลาง. เครื่องสับหัวมันสำปะหลังแบบใบมีดโยก. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2547.
- [3] วิรัตน์ หวังเขื่อนกลาง. เครื่องหั่นชิ้นมันเส้น. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 1-4 เมษายน 2556, จังหวัดประจวบคีรีขันธ์; 2556.
- [4] สุภาจิต เสงี่ยมพงศ์, ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์, อานนทน์ สายคำฟู, พงษ์ศักดิ์ ต่ายก้อนทอง, อัศพล เสนานรงค์ และ

- ชนิษฐ์ หว่านณรงค์. เครื่องสับใบอ้อย
สำหรับรถแทรกเตอร์ต่ำกว่า 80 แรงม้า.
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรม
เกษตรแห่งประเทศไทย, 1-4 เมษายน
2556, จังหวัดประจวบคีรีขันธ์; 2556.
- [5] มานพ ต้นตระกูลชัย. ชิ้นส่วนเครื่องกล.
หจก.เอช เอ็นการพิมพ์: กรุงเทพฯ; 2542 .
- [6] ประณต กุลประสูติ. แทรกเตอร์. หจก.พันธ์
พิบูลย์ชัย: กรุงเทพฯ; 2544
- [7] สอนรินทร์ เรืองปรัชญากุล. มปป. มปป.
เอกสารประกอบการสอนวิชาเครื่องจักรกล
เกษตร.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาเปลือกไข่ไก่เพื่อสังเคราะห์วัสดุทางการแพทย์ศัลยกรรมกระดูก

Study of Chicken Eggshells for the synthesis of Biomedical Materials in

Orthopedic Surgery

ไกรสร หาริแสง¹ และ ธีรวัฒน์ เหล่านากุล^{1*}Kaison Harisaeng¹ and Teerawat Laonapakul^{1*}¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering, Khon Kean University

Received: 12 August 2024

Revised: 12 August 2024

Accepted: 6 November 2024

Available online: 26 December 2024

บทคัดย่อ

เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (Tetracalcium phosphate; TTCP) เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่มีศักยภาพสูงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการทางการแพทย์ ในการศึกษาครั้งนี้ เปลือกไข่ไก่เหลือทิ้งจากร้านอาหารถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (200 300 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส) และทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่ ผลการทดลองพบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากมีสีขาวน้ำตาลอ่อน และมีโครงสร้างผลึกเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในรูปแบบแคลไซต์ (Calcite) จากนั้น CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ไก่จะถูกผสมกับไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (Dicalcium Phosphate Dihydrate; DCPD) เพื่อทำการสังเคราะห์ TTCP ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เพื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้ CaCO_3 เกรดการค้า จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM พบว่า TTCP ที่สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นทั้งสองแหล่งมีโครงสร้างผลึกและลักษณะสัณฐานวิทยาไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ไก่สามารถถูก

นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการสังเคราะห์ TTCP สำหรับพัฒนาเป็นโครงสร้างกระดูกเทียม และซีเมนต์กระดูกที่ใช้ในทางการแพทย์ได้

คำสำคัญ: เตตระแคลเซียมฟอสเฟต เปลือกไข่ไก่ แคลเซียมคาร์บอเนต วัสดุทางการแพทย์

Abstract

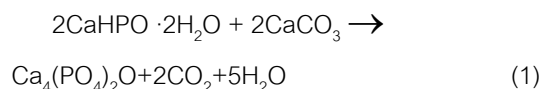
Tetracalcium phosphate (TTCP) is a calcium phosphate compound with considerable potential for medical applications. This study investigated the use of waste chicken eggshells from restaurants as a precursor for TTCP synthesis. The eggshells were subjected to heat treatment at various temperatures (200, 300, 400, 500, and 600 °C) and subsequently analyzed for their crystal structure and morphology. The findings indicated that eggshells heated at 200 °C were most suitable for this purpose, exhibiting a light brownish-white color and containing calcium carbonate (CaCO₃) in the form of calcite. The CaCO₃ derived from eggshells was then combined with dicalcium phosphate dihydrate (DCPD) to synthesize TTCP via a solid-state reaction method. This synthesized TTCP was compared with TTCP produced from commercially available CaCO₃. The results from XRD and SEM analysis revealed that the synthesized TTCP from both sources possessed similar crystal structures and morphologies. This demonstrates that eggshells can serve as a viable alternative material for TTCP synthesis. The potential applications of this synthesized TTCP include the development of artificial bone structures and bone cement for medical use.

Keywords: Tetracalcium phosphate: eggshells: calcium carbonate: medical materials

1. บทนำ

เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (Tetracalcium phosphate; TTCP) เป็นสารประกอบกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตประเภทหนึ่งที่มีความสนใจอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ โดยมีคุณสมบัติใช้งานในการเชื่อมประสานกับเนื้อเยื่อกระดูก และส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์กระดูก TTCP เป็นวัสดุที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นโครงสร้างกระดูกเทียมและซีเมนต์กระดูกที่ใช้ในทางการแพทย์ [1-3] TTCP

สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State reaction) โดยการใช้สารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ผสมกับไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD) ในอัตราส่วน 1:1 โมลาร์ จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ดังแสดงในสมการที่ (1) [4-6]



เปลือกไข่ไก่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากในกระบวนการผลิตอาหารและในครัวเรือน ในปี พ.ศ. 2561 พบว่าการผลิตไข่ไก่ทั่วโลก อยู่ที่ประมาณ 78 ล้านตัน ส่งผลให้เปลือกไข่ประมาณ 8.58 ล้านตัน ซึ่งส่วนใหญ่ถูกทิ้งเป็นขยะ [7] รวมถึงในประเทศไทยมีเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้งประมาณ 90,000 ตันต่อปี [8] เมื่อไม่นานมานี้มีการนำเปลือกไข่ไก่ไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ย อาหารสัตว์ และการปรับสภาพดิน รวมไปถึงถูกพัฒนานำมาประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite; HAp) ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตอีกหนึ่งประเภท [9, 10] ที่นำไปใช้ในทางการแพทย์ศัลยกรรมกระดูกและฟัน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเปลือกไข่ไก่เป็นวัสดุทางชีวภาพที่มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 94% [11-13] จึงทำให้เปลือกไข่ไก่เป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาศึกษา เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ TTCP อีกทั้งในปัจจุบันการค้นคว้าวัสดุทดแทนจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุทางการแพทย์เป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น รวมถึงการใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาเป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์วัสดุใหม่ที่มีมูลค่าเพิ่ม และสามารถลดต้นทุนการผลิต รวมไปถึงการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนตามแนวคิด BCG Model [14] ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

เพื่อเป็นการช่วยลดปัญหาขยะชีวภาพและการนำทรัพยากรที่มีอยู่แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์และมูลค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษา

การสังเคราะห์ TTCP โดยใช้ CaCO_3 ที่ได้จากเปลือกไข่ไก่ที่ถูกทิ้ง โดยทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่ที่เหมาะสมหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน รวมไปถึงศึกษาความแตกต่างในด้านโครงสร้างผลึกของ TTCP ที่สังเคราะห์จาก CaCO_3 ของเปลือกไข่ไก่เปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกรดการค้า

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2.1. การเตรียมและการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต

ในการศึกษานี้ ได้ใช้เปลือกไข่ไก่ที่เหลือทิ้งจากร้านค้าภายในจังหวัดขอนแก่น เปลือกไข่ถูกทำความสะอาดอย่างพิถีพิถันด้วยน้ำประปาเพื่อลดสิ่งปนเปื้อน ต่อจากนั้น เปลือกไข่ถูกแช่ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วน 62.5 กรัมของเปลือกไข่ต่อน้ำสารละลายกรด 1,000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยให้เยื่อเปลือกไข่สามารถแยกตัวออกจากเปลือกได้ง่ายขึ้น [15] หลังจากนั้นทำการแยกเยื่อหุ้มเปลือกไข่ออกจนหมดและล้างด้วยน้ำสะอาดจนหมดกลิ่นกรดอะซิติก เปลือกไข่ที่ทำความสะอาดแล้วถูกผึ่งลมให้แห้ง เนื่องจากเยื่อหุ้มเปลือกไข่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส [16] ในการศึกษานี้ ได้นำเปลือกไข่ไก่หลังการทำทำความสะอาดไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 300 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยควบคุมอัตราการทำความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากนั้นเปลือกไข่

จะถูกนำไปบดด้วยโม่บดยา (Mortar and Pestle) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงลวดขนาด 200 เมช

2.2. การสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟต

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เหมาะสมที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (TTCP) ร่วมกับไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Sigma - Aldrich) ตามสมการที่ 1 และทำการสังเคราะห์เปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกรดการค้า (CaCO_3 , Loba Chemie Pvt. Ltd.) การสังเคราะห์ TTCP ดำเนินการด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) โดยให้ความร้อนที่ 1,500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยควบคุมอัตราการเพิ่มความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และปล่อยให้เย็นตัวนอกเตา หลังจากนั้นนำไปบดด้วยโม่บดยา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงลวดขนาด 200 เมช จากนั้นเก็บตัวอย่างในถุงซิปลและเก็บในโถดูดความชื้น (Desiccator)

2.3. การตรวจสอบคุณลักษณะ

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของวัสดุที่ทำการสังเคราะห์ทำโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสี (X-ray diffractometer, XRD, Brand Analytical model EMPYREAN) โดยมีรังสี $\text{CuK}\alpha$ ที่ 45 kV และ 40 mA ที่อัตราการสแกน $2.4^\circ 2\theta$ ต่อนาที การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, Tescan Model Mira 3) ที่แรงดันไฟฟ้าเร่ง 5 kV และทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Zetasizer Nano (Malvern, England, Model)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่ การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกไข่ไก่หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้เผยให้เห็นสีที่โดดเด่นของเปลือกไข่หลังจากได้รับความร้อน ได้แก่ ก) สีขาวน้ำตาลอ่อน ข) สีน้ำตาลเข้ม ค) สีน้ำตาลดำ ง) สีเทาดำ และ จ) สีดำสนิท ที่อุณหภูมิ 200 300 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

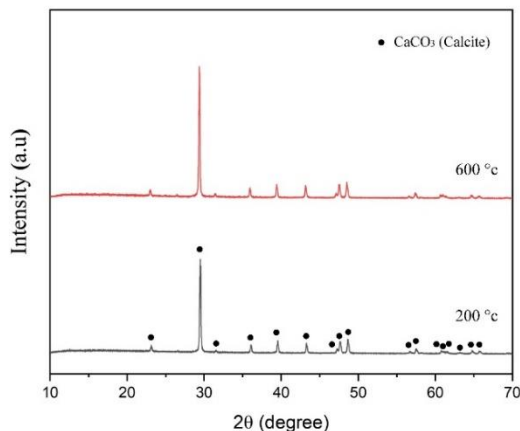


รูปที่ 1 สีของเปลือกไข่ไก่หลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ก) 200 ข) 300 ค) 400 ง) 500 และ จ) 600 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกไข่ไก่หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (รูป ก) สีของเปลือกไข่ยังคงเป็นสีน้ำตาลอ่อนคล้ายกับสีธรรมชาติของเปลือกไข่ไก่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 300 องศาเซลเซียส (รูป ข) และ 400 องศาเซลเซียส (รูป ค) สีของเปลือกไข่เริ่มเข้มขึ้นเป็นสีน้ำตาลดำ แสดงถึงการเริ่มต้นของกระบวนการคาร์บอนไนซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส (รูป ง) สีของเปลือกไข่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ และเมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ 600 องศาเซลเซียส (รูป จ) สีของเปลือกไข่เปลี่ยนเป็นสีดำสนิทและมีกลิ่นของเขม่าควัน การเปลี่ยนแปลงของสีบ่งชี้ได้ว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น เกิดกระบวนการคาร์บอนไนซ์จากการสลายตัวของ

สารอินทรีย์ที่หลงเหลือในเปลือกไข่ แม้ว่าจะมีการกำจัดเชื้อเปลือกไข่ไก่ออกไปแล้ว แต่ยังคงมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สามารถพบในเปลือกไข่ไก่ เช่น ไขมัน และโปรตีน [17] กระบวนการคาร์บอนไนซ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การสูญเสียมวลเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำและสารอินทรีย์ [18] กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส

เปลือกไข่ไก่หลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 300 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีโครงสร้างผลึกไม่แตกต่างกัน เพื่อให้เห็นพิกที่มีความเข้มข้น (Intensity) ที่ชัดเจนขึ้น จึงเลือกอุณหภูมิต่ำที่สุด 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงที่สุด 600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์พบว่าเปลือกไข่ไก่หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกของ CaCO_3 อย่างชัดเจน โดยมีพิกหลักที่ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 29.4° 36.0° 39.4° 43.2° 47.5° 48.5° และ 57.5° ซึ่งไม่แตกต่างกัน ตำแหน่งพิกเหล่านี้ตรงกับตำแหน่งพิกของผลึก CaCO_3 ตามเลขมาตรฐาน ICDD 85-1105 ของ CaCO_3 ประเภทแคลไซต์ (Calcite) และไม่มีพิกของสารประกอบอื่น ๆ เข้ามาผสม โครงสร้างผลึกแคลไซต์ของ CaCO_3 มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี และเป็นที่ยอมรับใช้งานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย [19, 20]

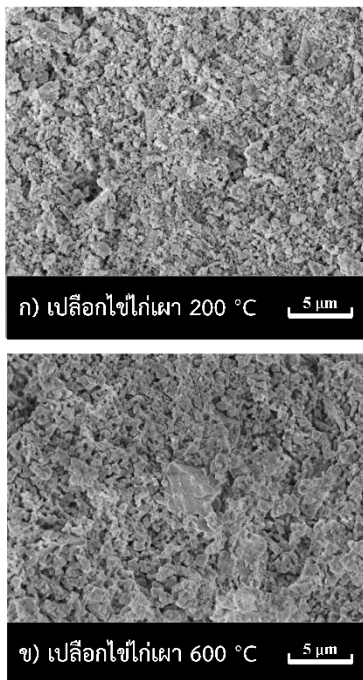


รูปที่ 2 รูปแบบ XRD ของเปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 200 และ 600 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่หลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวละเอียด มีรูพรุนจำนวนมาก ในทางกลับกัน เปลือกไข่ไก่ที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวหยาบขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากการให้ความร้อนเกิดกระบวนการคาร์บอนไนซ์เกิดขึ้น จึงทำให้พื้นผิวมีลักษณะที่หยาบขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ TTCP โดยเปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกรดการค้า เนื่องจากเปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะทางกายภาพภายนอกเป็นสีขาวน้ำตาลอ่อน ซึ่งเป็นสีที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในงานศิลปกรรมกระดุก โดยแตกต่างจากสีของเปลือก

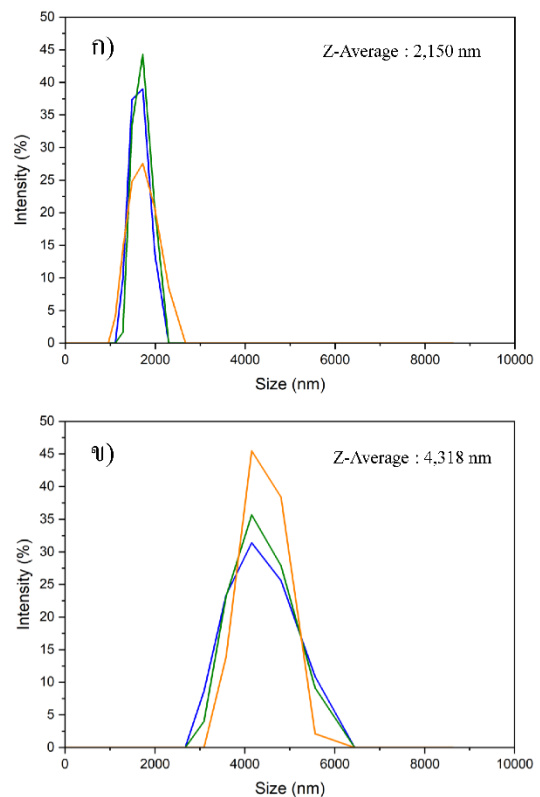
ไขไก่ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่มีสีดำสนิทและมีกลิ่นเหม็นคาวนั้น นอกจากนี้ ยังมีโครงสร้างผลึกเป็น CaCO_3 ในแบบแคลไซต์ ที่สอดคล้องกับ CaCO_3 เกิดการค้ำ ดังนั้น การใช้เปลือกไขไก่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ TTCP



รูปที่ 3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเปลือกไขไก่หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ก) เปลือกไขไก่เผา 200 และ ข) เปลือกไขไก่เผา 600 องศาเซลเซียส

CaCO_3 ที่สังเคราะห์จากเปลือกไขไก่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และบดด้วยโม่บดยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงถูกนำมาวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเพื่อเปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกิดการค้ำ โดยดำเนินการตรวจสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ

CaCO_3 แสดงในรูปที่ 4 ก) และ ข) โดยพบว่าการกระจายของขนาดอนุภาค CaCO_3 เกิดการค้ำ อยู่ในช่วง 955 – 2,670 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Z-Average) 2,150 นาโนเมตร ในขณะที่การกระจายตัวของขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกไขไก่ อยู่ในช่วง 2,670 – 6,440 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Z-Average) 4,318 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า CaCO_3 เกิดการค้ำ

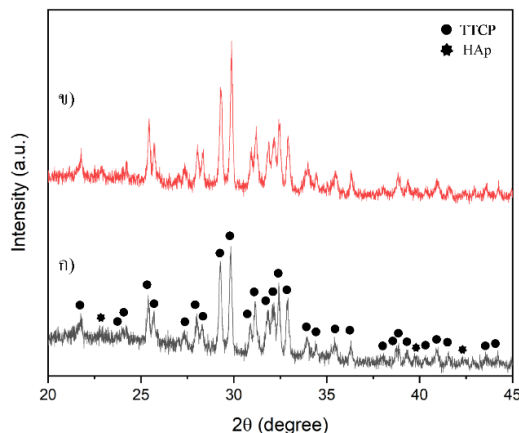


รูปที่ 4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จาก ก) เกิดการค้ำ และ ข) เปลือกไขไก่

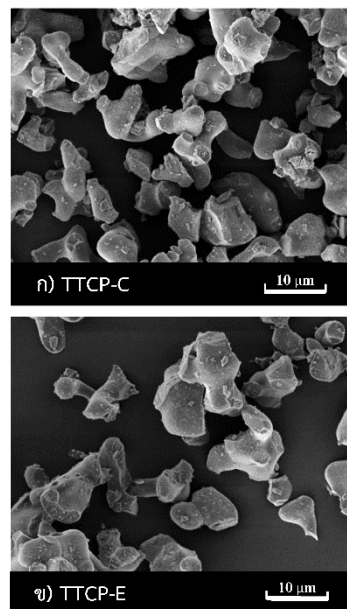
3.2. ผลการสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟต

การสังเคราะห์ TTCP โดยใช้แหล่ง CaCO_3 ที่แตกต่างกัน แบ่งเป็น TTCP-C (จาก CaCO_3 เกิด

การคั่ว) และ TTCP-E (จาก CaCO_3 เปลือกไข่ไก่) ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างทั้งสองชนิดแสดงลักษณะพีคที่คล้ายคลึงกันอย่างชัดเจน พีคหลักของ TTCP ซึ่งระบุได้จากวงกลมสีดำในรูปที่ 5 ปรากฏอยู่ที่ค่า 2θ ประมาณ 25.4° 29.3° 29.8° และ 32.4° ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการเลี้ยวเบนของ TTCP (ICDD NO. 70-1379) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่าง TTCP-C และ TTCP-E ที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างผลึกตรงกับมาตรฐาน TTCP นอกจากนี้ยังพบพีครองที่อาจเกิดจากการมีอยู่ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) (ICDD NO. 9-432) ซึ่งระบุได้จากสัญลักษณ์รูปดาวสีดำในรูปที่ 5 พีคนี้บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของ HAp ในตัวอย่างทั้งสองชนิด แม้ว่าจะใช้แหล่งแคลเซียมคาร์บอเนต และขนาดอนุภาคที่ต่างกัน (รูปที่ 4) การปรากฏของพีค HAp อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการเย็นตัวของ TTCP [21] อย่างไรก็ตาม HAp ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตอีกหนึ่งประเภทที่ใช้งานในทางการแพทย์ ข้อมูลจากการศึกษานี้เป็นข้อมูลสำคัญในการเปรียบเทียบแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนตในการสังเคราะห์ TTCP ดังนั้น การใช้ CaCO_3 จากเปลือกไข่ไก่ (TTCP-E) สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นได้ดีเทียบเท่ากับ CaCO_3 เกรดการค้า (TTCP-C) ในกระบวนการสังเคราะห์ TTCP



รูปที่ 5 ผล XRD ของ TTCP ก) TTCP-C และ TTCP-E



รูปที่ 6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง TTCP จาก ก) TTCP-C ข) TTCP-E

รูปที่ 6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาค TTCP หลังจากการบดด้วยโม่บดยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ผล SEM ของผง TTCP-C (รูป ก) พบว่าอนุภาคมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่

หลากหลาย โดยมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ใ้คงมน พื้นผิวเรียบ และการกระจายขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ในทำนองเดียวกัน TTCP-E (รูป ข) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่คล้ายคลึงกับ TTCP-C โดยทั้งสองตัวอย่างมีรูปร่าง ขนาด และพื้นผิวที่คล้ายกัน การลดขนาดอนุภาคของ TTCP-C และ TTCP-E ส่งผลให้พื้นผิวของอนุภาคมีพื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของ TTCP โดยพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้น สามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ และอัตราการแข็งตัวได้เร็วขึ้น [22]

จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเปลือกไข่ไก่ที่เป็นของเสีย ผลิตเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เป็นสารประกอบ TTCP ที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นโครงสร้างกระดูกเทียมและซีเมนต์กระดูกที่ใช้ในการแพทย์

4. สรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่หลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน และการสังเคราะห์ TTCP ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยใช้สารตั้งต้น CaCO_3 จากเปลือกไข่ไก่เปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกรดการค้า ข้อสรุปของการศึกษานี้มีดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน จากสีขาวน้ำตาลอ่อนที่ 200 องศาเซลเซียส ไปจนถึงสีดำสนิทที่ 600 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่

ยังคงเป็นแคลไซต์ (Calcite) ในทุกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาพบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะพื้นผิวละเอียดและมีรูพรุนจำนวนมาก ในขณะที่เปลือกไข่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 600 องศาเซลเซียสพบว่าพื้นผิวที่หยาบมากขึ้น ดังนั้น เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ TTCP เนื่องจากมีลักษณะสีขาวน้ำตาลอ่อน ซึ่งเป็นสีที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานศัลยกรรมกระดูก นอกจากนี้ ยังมีโครงสร้างผลึก CaCO_3 ในรูปแบบแคลไซต์ที่สอดคล้องกับ CaCO_3 เกรดการค้า

2. การสังเคราะห์ TTCP ได้ทำการสังเคราะห์จาก CaCO_3 ที่ได้จากเปลือกไข่ไก่ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4,318 นาโนเมตร และ CaCO_3 เกรดการค้า ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2,150 นาโนเมตร เป็นสารตั้งต้น จากการศึกษาพบว่า TTCP ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ไม่มีความแตกต่างในด้านโครงสร้างผลึก โดยเป็นไปตามมาตรฐานของ TTCP นอกจากนี้ การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาพบว่า TTCP จาก CaCO_3 เปลือกไข่ไก่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนและพื้นผิวเรียบ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ TTCP ที่สังเคราะห์จาก CaCO_3 เกรดการค้า

3. เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสสามารถสังเคราะห์ CaCO_3 ในรูปแบบแคลไซต์ (Calcite) ที่มีความเสถียรและเหมาะสมต่อการใช้งานในกระบวนการสังเคราะห์ TTCP ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบกับ CaCO_3 เกรด

การคำชี้ให้เห็นว่า TTCP ที่ได้จากทั้งสองแหล่งมีโครงสร้างผลึกและลักษณะฐานวิทยาไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ไก่สามารถเป็นแหล่งวัตถุดิบทดแทนได้ นอกจากนี้ ยังช่วยลดปริมาณขยะชีวภาพและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับคำแนะนำ และสาขาวิศวกรรมอุตสาหการสำหรับการอำนวยความสะดวกในการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Otsuka M, Matsuda Y, Suwa Y, Fox JL, Higuchi WI. A novel skeletal drug delivery system using a self-setting calcium phosphate cement. 5. Drug release behavior from a heterogeneous drug-loaded cement containing an anticancer drug. J Pharm Sci. 1994; 83(11): 1565–8.
- [2] Sugawara A, Fujikawa K, Kusama K, Nishiyama M, Murai S, Takagi S, et al. Histopathologic reaction of a calcium phosphate cement for alveolar ridge augmentation. J Biomed Mater Res. 2002; 61(1): 47–52.
- [3] Ambard AJ, Mueninghoff L. Calcium phosphate cement: Review of mechanical and biological properties. J Prosthodont. 2006; 15(5): 321–8.
- [4] Jeon C, Chun S, Lim S, and Kim S. Synthesis and Characterization of TTCP for Calcium Phosphate Bone Cement, Biomater. Res., vol. 15, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [5] Moseke C, Gbureck U. Tetracalcium phosphate: Synthesis, properties and biomedical applications, Acta Biomater., vol. 6, no. 10, pp. 3815–3823, 2010, doi: 10.1016/j.actbio.2010.04.020.
- [6] Komath M, Varma H.K, Sivakumar R. On the development of an apatitic calcium phosphate bone cement, Bull. Mater. Sci., vol. 23, no. 2, pp. 135–140, 2000, doi: 10.1007/BF02706555.
- [7] Waheed M. et al., Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: A comprehensive review, Trends Food Sci. Technol., vol. 106, no. October, pp. 78–90, 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.10.009.
- [8] Laohavisuti N, Boonchom B, Boonmee W, Chaiseeda K, Seesanong S. Simple recycling of biowaste eggshells to various calcium phosphates for specific industries, Sci. Rep., vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-94643-1.

- [9] Quina M.J, Soares M.A.R, Quinta-Ferreira R. Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 123, pp. 176–186, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.027.
- [10] Lee S.W, Kim S.G, Balázs C, Chae W.S, Lee H.O. Comparative study of hydroxyapatite from eggshells and synthetic hydroxyapatite for bone regeneration, *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol.*, vol. 113, no. 3, pp. 348–355, 2012, doi: 10.1016/j.tripleo.2011.03.033.
- [11] Dwivedi S.P, Sharma S, Mishra R.K. Characterization of waste eggshells and CaCO₃ reinforced AA2014 green metal matrix composites: A green approach in the synthesis of composites, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 17, no. 10, pp. 1383–1393, 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0164-z.
- [12] Murakami F.S, Rodrigues P.O, De Campos C.M.T, Silva M.A.S. Physicochemical study of CaCO₃ from egg shells, *Cienc. e Tecnol. Aliment.*, vol. 27, no. 3, pp. 658–662, 2007, doi: 10.1590/S0101-20612007000300035.
- [13] Siva Rama Krishna D, Siddharthan A, Seshadri S.K, Sampath Kumar T.S. A novel route for synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite from eggshell waste, *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 18, no. 9, pp. 1735–1743, 2007, doi: 10.1007/s10856-007-3069-7.
- [14] Edyvean R.G.J, Apiwatanapiwat W, Vaithanomsat P, Boondaeng A, Janchai P, Sophonthammaphat S. The Bio-Circular Green Economy model in Thailand – A comparative review, *Agric. Nat. Resour.*, vol. 57, no. 1, pp. 51–64, 2023, doi: 10.34044/j.anres.2023.57.1.06.
- [15] Pikul D, Garnjanagoonchorn W, Thanachasai S. The development of eggshell membrane hydrolysate; 2014.
- [16] Liang X, Cong H, Jiang G, Rao R.P, He H, Ramakrishna S. Eggshell membrane: Structure, purification, properties and multifunctional applications, *Food Biosci.*, vol. 60, no. March, p. 104487, 2024, doi: 10.1016/j.fbio.2024.104487.
- [17] Mensah R.A, Salim K, Peszko K, Diop S, Wong T.H, Chau D.Y. The chicken eggshell membrane: a versatile, sustainable, biological material for translational biomedical applications, *Biomed. Mater.*, vol. 18, no. 4, 2023, doi:

- 10.1088/1748-605X/acd316.
- [18] Kristl M, Jurak S, Brus M, Sem V, Kristl J. Evaluation of calcium carbonate in eggshells using thermal analysis, J. Therm. Anal. Calorim., vol. 138, no. 4, pp. 2751–2758, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08678-8.
- [19] Jimoh O.A, Ariffin K.S, Bin Hussin H, Temitope A.E. Synthesis of precipitated calcium carbonate: a review, Carbonates and Evaporites, vol. 33, no. 2, pp. 331–346, 2018, doi: 10.1007/s13146-017-0341-x.
- [20] Maleki Dizaj S, Barzegar-Jalali M, Zarrintan M.H, Adibkia K, Lotfipour F. Calcium carbonate nanoparticles as cancer drug delivery system, Expert Opin. Drug Deliv., vol. 12, no. 10, pp. 1649–1660, 2015, doi: 10.1517/17425247.2015.1049530.
- [21] Guo D, Xu K, Han Y. Influence of cooling modes on purity of solid-state synthesized tetracalcium phosphate, Mater. Sci. Eng. B, vol. 116, no. 2, pp. 175–181, 2005, doi: 10.1016/j.mseb.2004.09.032.
- [22] Ishikawa K, Takagi S, Chow L.C, Suzuki K. Reaction of calcium phosphate cements with different amounts of tetracalcium phosphate and dicalcium phosphate anhydrous, J. Biomed. Mater. Res., vol. 46, no. 4, pp. 504–510, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1097-4636(19990915)46:4<504::AID-JBM8>3.0.CO;2-H.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ ภายในโรงอาหารแห่งหนึ่งใน
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Application of mathematical models and engineering economics analysis for improving
commercial rental area management spaces within a canteen in khonkaen university

ธน อุดมธนานันต์¹⁾ และ คมกฤช ปีติฤกษ์²⁾

Tana Udomtananan¹⁾ and Komkrit Pitiruek²⁾

¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

¹⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.

Received: 5 November 2024

Revised: 25 November 2024

Accepted: 25 November 2024

Available online: 26 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยเฉพาะพื้นที่ศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงขาย) ที่ประสบปัญหาการเลือกประเภทร้านค้าและการจัดวางตำแหน่งร้านค้าที่เหมาะสม การวิจัยเริ่มจากการสำรวจข้อมูลพื้นที่เช่าและประเภทร้านค้า จากนั้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดประเภทร้านค้าและตำแหน่งร้านค้าที่เหมาะสม โดยผลการคัดเลือกให้มีร้านค้าตามจำนวนที่กำหนดและประเภทที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการ สมการทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการจัดวางตำแหน่ง

ร้านค้าด้วยและใช้โปรแกรม LINGO® ในการแก้ปัญหา ซึ่งให้ผลลัพธ์โดยทำให้ร้านค้าที่ถูกกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสม โดยที่รายได้จากค่าเช่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.34

คำสำคัญ: วิเคราะห์พื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ประสิทธิภาพการหารายได้ สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่อย่างเหมาะสมโดยพิจารณาจากรายได้

Abstract

This research focuses on the application of mathematical modeling and engineering economics analysis to improve the management efficiency of commercial rental spaces within Khon Kaen University, specifically in the Food and Services Center 2 (Men's Canteen), which faces challenges in selecting appropriate types of shops and positioning them correctly. The research begins with a survey of the rental space and types of shops available. Mathematical models are then employed to determine suitable shop types and locations. The selection results in a set number of shops that align with the demands of users. Mathematical equations are developed for the positioning of shops, utilizing the LINGO® program to solve the problems, which leads to the allocation of shops in appropriate areas. Consequently, rental income increases from 191,500 baht to 219,200 baht, representing a growth of 12.64 percent.

Keywords: Analysis of commercial rental spaces: engineering economics: income generation efficiency: mathematical equations for optimal space allocation based on revenue.

*ติดต่อ: E-mail: tana.u@kkumail.com , โทรศัพท์ : 097-302-3388

1. บทนำ

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของปัญหาอย่างหลากหลาย เช่น ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นตรงหารูปแบบการเลือกแหล่งซื้อสินค้าปละหลัง สำหรับโรงงานแปรรูปมันเส้นสะอาด จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อให้ต้นทุนการจัดซื้อน้อยที่สุด [1] หรือจะเป็นเรื่องการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรงในการวางแผนจัดเส้นทางการจัดส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015 เพื่อหาระยะทางการ

ขนส่งรวมที่สั้นที่สุด [2] อีกทั้ง มีการได้ประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้นตรงเพื่อหาสัดส่วนวัสดุธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าว โดยมีเป้าหมายการให้ได้ต้นทุนของการผลิตปุ๋ยต่ำที่สุด [3] และผู้วิจัยได้ทำการศึกษา การใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นตรงวิเคราะห์การบริหารรถขนส่งและเส้นทางเดินรถขนส่งสินค้าอันตรายประเภทของเหลว เพื่อหาจำนวนรถขนส่งที่เหมาะสมและระยะทางการจัดส่งที่สั้นที่สุดเพื่อลดต้นทุนในการบริหาร [4]

การบริหารพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์เป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถส่งผลต่อรายได้และความยั่งยืนของธุรกิจ ในมหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) ได้เผชิญกับปัญหาเกี่ยวกับการเลือกประเภทร้านค้าและการจัดวางตำแหน่งร้านค้าที่ไม่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการ ทำให้การใช้พื้นที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังขาดความหลากหลายของประเภทธุรกิจที่จะดึงดูดนักศึกษาและบุคลากร ขณะที่พื้นที่รอบมหาวิทยาลัยมีการขยายตัวของธุรกิจสมัยใหม่ เช่น ห้างสรรพสินค้าและคอมมูนิตีมอลล์ ซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารพื้นที่เช่าและสร้างความยั่งยืนทางธุรกิจ การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น โปรแกรม LINGO® และ Excel Solver® มาใช้วางแผนภายใต้เงื่อนไขที่ซับซ้อน จะช่วยให้การบริหารพื้นที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [5] การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ซึ่งเป็นวิธีที่รู้จักกันดีในชุดเครื่องมือ ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่เรียกว่าการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematic programming) โดยสามารถนำการโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้งานร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจ [6] หรือจะเป็นวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วงเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้เพื่อหาทำเลที่ตั้งที่ดีสำหรับการกระจายจุดเดียว แต่มีพื้นที่บริหารหรือลูกค้าหลายแห่งซึ่งจะใช้เป็นจุดที่ตั้งเป็นข้อมูล 2 รายการ คือ ปริมาณอุปสงค์ของการขนส่ง (Transportation demand) และค่าตำแหน่งพิกัด (Coordinate) ของพื้นที่ต่างๆ โดยทั่วไปจะกำหนดสัญลักษณ์ [7] ซึ่งการบริหาร

พื้นที่เชิงพาณิชย์จำเป็นต้องมีการจัดแบ่งจัดสรรตามลักษณะทรัพยากรกายภาพ ประกอบด้วยพื้นที่ภายนอกอาคาร และพื้นที่ภายในอาคาร ให้ผู้ที่ประสงค์จะดำเนินการเช่า ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้การบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกอาคารสถานที่โดยการออกแบบหรือสร้างพื้นที่ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ [8] ทั้งนี้ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของพุทธานกูร เขียวทอง และคมกฤษ บิตติฤกษ์ [9] กล่าวว่าบทความวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแผนผังและกำหนดตำแหน่งจัดเก็บสินค้าสำหรับคลังสินค้าทางการเกษตรของบริษัทที่เป็นกรณีศึกษา งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาพปัจจุบันของคลังสินค้าพบปัญหาในการจัดการพื้นที่และขาดการระบุตำแหน่งที่เหมาะสม ส่งผลให้มีพื้นที่ไม่เพียงพอและเกิดความล่าช้าในการทำงาน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ออกแบบแผนผังตามทิศทางของคลังสินค้าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดตำแหน่งจัดเก็บที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) เพื่อเพิ่มรายได้จากพื้นที่เช่าและสนับสนุนการพัฒนาธุรกิจอย่างยั่งยืนในอนาคต

1.1. วัตถุประสงค์การวิจัย

การเลือกที่ตั้งธุรกิจเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จของธุรกิจ ตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจเลือกที่ตั้งที่เหมาะสม โดยมีเป้าหมายหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม การวิจัยนี้มี

วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถช่วยวิเคราะห์การจัดสรรพื้นที่ธุรกิจให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการลงทุนการพัฒนาตัวแบบจำลองดังกล่าวจะช่วยให้อุรกิจสามารถตัดสินใจเลือกที่ตั้งที่เหมาะสมกับธุรกิจได้ โดยคำนึงถึงปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เช่น ต้นทุนการดำเนินการรายได้จากการเช่า และการเพิ่มผลกำไรสูงสุด นอกจากนี้ยังช่วยให้การจัดสรรพื้นที่ธุรกิจเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการและเจ้าของพื้นที่ได้ดีขึ้น

2. วิธีการวิจัย

2.1. ศึกษาพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ ภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย)

การบริหารจัดการพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ในศูนย์อาหารของมหาวิทยาลัยเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อรายได้และความพึงพอใจของผู้ใช้บริการงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและสำรวจพื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยเน้นไปที่การวิเคราะห์พื้นที่เช่า ความสามารถในการจัดเก็บรายได้ และการสำรวจประเภทของร้านค้าที่ให้บริการ รวมถึงจำนวนผู้เช่าใช้บริการ เพื่อให้ทราบถึงเกณฑ์ในการแบ่งหมวดหมู่และการบริหารพื้นที่เช่าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจากการศึกษานี้ จะช่วยให้สามารถปรับปรุงและจัดสรรพื้นที่เช่าให้เหมาะสมกับความต้องการของร้านค้าและผู้ให้บริการ รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บรายได้จากการเช่าพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2. การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดจำนวนร้านค้าในแต่ละประเภทของร้านค้า

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดแบบจำลองการกำหนดจำนวนร้านค้าในแต่ละประเภทของร้านค้า เป็นการประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของหลักการรูปแบบการกำหนดประเภทร้านค้า ในการหาผลลัพธ์จากแบบจำลอง โดยการกำหนด ราคาเช่าร้านค้า จำนวนร้านค้า และประเภทร้านค้าตามสมการ ดังนี้

สมการเป้าหมาย :

$$\max = \sum_i \sum_j R_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

สมการเงื่อนไข :

$$\sum_j x_j \leq N \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq T_{max_i} \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} \geq T_{min_i} \quad \forall i \quad (4)$$

$$x_{ij} \in (0,1) \quad \forall i,j \quad (5)$$

อธิบายสมการประเภทร้านค้า ได้ดังนี้

สมการเป้าหมาย (1) สมการวัตถุประสงค์เพื่อต้องการกำไรสูงสุดของร้านค้าแต่ละประเภท

สมการเงื่อนไข (2) จำนวนร้านที่มีอยู่ในพื้นที่ทั้งหมด N

สมการเงื่อนไข (3) จำนวนร้านประเภท i สูงสุดที่มีได้ T_{max_i}

สมการเงื่อนไข (4) จำนวนร้านประเภท i ต่ำสุดควรมี T_{min_i}

สมการเงื่อนไข (5) ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกร้านค้าและเป็น binary

ตารางที่ 1

ดัชนี (Indices)

ดัชนี	ความหมาย
i	ดัชนีของประเภทร้านค้า ($i = 1, 2, 3 \dots, I$)
I	จำนวนประเภทร้านค้าทั้งหมด
j	ดัชนีของลำดับประเภทร้านค้า ($j = 1, 2, 3 \dots, J$)
J	จำนวนของลำดับประเภทร้านค้าทั้งหมด

ตารางที่ 2

พารามิเตอร์ (Parameter)

พารามิเตอร์	ความหมาย
R_{ij}	ค่าเช่าของร้านค้าประเภท i และลำดับ j
N	จำนวนร้านที่อยู่ในพื้นที่ทั้งหมด
$Tmax_i$	จำนวนร้านประเภท i สูงสุดที่มีได้
$Tmin_i$	จำนวนร้านประเภท i ต่ำสุดที่ควรมี

ตารางที่ 3

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ตัวแปรตัดสินใจ	ความหมาย
x_{ij}	ประเภทร้าน i และลำดับ j ที่ถูกเลือก

2.3. การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดตำแหน่งร้านค้า

แบบจำลองการกำหนดตำแหน่งร้านค้า เป็นการประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของหลักการกำหนดตำแหน่งร้านค้า ในการหาผลลัพธ์จากแบบจำลอง โดยวัดผลการวางตำแหน่งร้านค้าจากน้ำหนักความสำคัญของพื้นที่และอัตราค่าเช่าสูงสุดตามสมการ ดังนี้

สมการเป้าหมาย :

$$\max = \sum_i \sum_j G_j R_i x_{ij} \quad (6)$$

สมการเงื่อนไข :

$$\sum_i x_{ij} = 1, j = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$\sum_j x_{ij} = N_i, i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

$$x_{ij} = (0, 1) i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

อธิบายสมการตำแหน่งร้านค้า ได้ดังนี้

สมการเป้าหมาย (6) ลำดับความสำคัญและค่าเช่า

รวมสูงสุด

สมการเงื่อนไข (7) ในพื้นที่ 1 ที่จะมีเพียง 1 ร้านเท่านั้น

สมการเงื่อนไข (8) จำนวนร้าน i ที่อยู่ในพื้นที่จะต้องไม่เกินจำนวนร้านในประเภทนั้น

สมการเงื่อนไข (9) x ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกตำแหน่งและเป็น Binary

ตารางที่ 4

ดัชนี (Indices)

ดัชนี	ความหมาย
i	ดัชนีของร้านค้า ($i = 1, 2, 3 \dots, I$)
j	ดัชนีของตำแหน่งพื้นที่ ($j = 1, 2, 3 \dots, J$)
I	จำนวนร้านค้าทั้งหมด
J	จำนวนพื้นที่ทั้งหมด

ตารางที่ 5

พารามิเตอร์ (Parameter)

พารามิเตอร์	ความหมาย
G_j	เกรด/น้ำหนักของสถานที่ j
R_i	ราคาค่าเช่าของร้านค้า i

ตารางที่ 6

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ตัวแปรตัดสินใจ	ความหมาย
x_{ij}	ร้านค้า i ถูกกำหนดให้อยู่ที่สถานที่ j

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1. ผลจากสมการกำหนดจำนวนร้านค้าในแต่ละ

ประเภทของร้านค้า

พบว่า พื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์เดิมนั้นมีร้านค้าแยกตามประเภทอยู่ที่ 14 ห้อง แบ่งประเภทร้านค้าได้ทั้งหมด 7 ประเภท ตารางที่ 7 แสดงจำนวนร้านค้าและประเภทร้านค้าเดิม

ตารางที่ 7

แสดงจำนวนร้านค้าและประเภทร้านค้าเดิม

ลำดับ	ประเภท	จำนวน ร้านค้าเดิม
1	ก๋วยเตี๋ยว	3
2	ข้าวราดแกง	2
3	อาหารตามสั่ง	1
4	อาหารอีสาน	1
5	อาหารเช้า	2
6	อาหารจานเดียว	4
7	เครื่องดื่ม	1
รวมจำนวนร้านค้า		14

และข้อมูลจำนวนเฉลี่ยผู้ให้บริการร้านค้าของแต่ละประเภท ตามสัดส่วนผู้ให้บริการที่ 6,360 คนต่อวัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้กำหนดจำนวนร้านค้าใหม่ให้สอดคล้องกับประเภทร้านค้า และสัดส่วนความต้องการใช้บริการร้านค้า ให้พอดีกับจำนวนห้องภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงขาย) จากการหาร้อยละของสัดส่วนผู้ให้บริการแต่ละประเภทร้านค้า

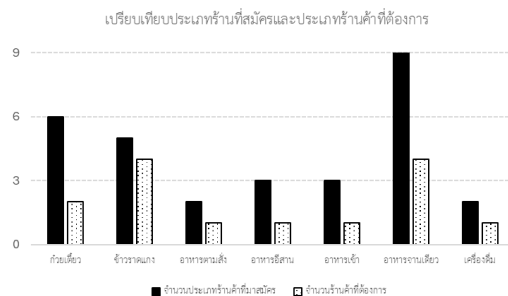
จะได้ของสัดส่วนผู้ให้บริการ และนำค่ามาคูณกับจำนวนพื้นที่ห้องทั้งหมด จะได้ค่าเฉลี่ยจำนวนร้านค้าใหม่ที่ควรมี เพื่อดำเนินการคัดเลือกร้านค้าต่อไป

ตารางที่ 8

แสดงสัดส่วนผู้ให้บริการและจำนวนร้านค้าใหม่แต่ละประเภท

ลำดับ	ประเภท	จำนวน ผู้ให้บริการ (คน/วัน)	สัดส่วน ผู้ให้บริการต่อวัน	ค่าเฉลี่ยจำนวน ร้านที่ควรมีใหม่	จำนวน ร้านค้าใหม่
1	ก๋วยเตี๋ยว	1,060.00	17%	2.33	2
2	ข้าวราดแกง	1,700.00	27%	3.74	4
3	อาหารตามสั่ง	300.00	5%	0.66	1
4	อาหารอีสาน	300.00	5%	0.66	1
5	อาหารเช้า	520.00	8%	1.14	1
6	อาหารจานเดียว	1,620.00	25%	3.57	4
7	เครื่องดื่ม	860.00	14%	1.89	1
รวม		6,360.00	100%		14

ต่อมา จากรูปภาพจะแสดงสัดส่วนของจำนวนผู้สมัครทั้ง 30 ราย ความต้องการพื้นที่เช่า จำนวน 14 ห้อง จะพบว่าจำนวนสมัครแต่ละประเภทร้านค้ามีจำนวนมากกว่าพื้นที่เช่า



รูปที่ 1 กราฟแสดงสัดส่วนความต้องการพื้นที่เช่าของผู้สมัครร้านค้า

ซึ่งจากรูปที่ 1 กราฟดังกล่าว ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการใช้สมการตาม ข้อ 2.2. เพื่อจะได้ร้านค้าที่ได้รับคัดเลือก ดังนี้

ตารางที่ 9

แสดงจำนวนผู้สมัคร ประเภทร้านค้า ราคาเสนอ และร้านค้าที่ถูกเลือก จำนวน 14 ร้านค้า

ลำดับ	ประเภทร้าน	ลำดับร้านค้าตามประเภท	ราคาเสนอ	การตัดสินใจ	ลำดับ	ประเภทร้าน	ลำดับร้านค้าตามประเภท	ราคาเสนอ	การตัดสินใจ
1	ก๋วยเตี๋ยว	1	4,800	0	16	อาหารอีสาน	3	4,800	1
2	ก๋วยเตี๋ยว	2	4,800	1	17	อาหารเช้า	1	4,000	0
3	ก๋วยเตี๋ยว	3	4,800	1	18	อาหารเช้า	2	3,300	0
4	ก๋วยเตี๋ยว	4	4,000	0	19	อาหารเช้า	3	4,800	1
5	ก๋วยเตี๋ยว	5	3,800	0	20	อาหารจานเดียว	1	4,800	1
6	ก๋วยเตี๋ยว	6	3,800	0	21	อาหารจานเดียว	2	4,000	1
7	ข้าวราดแกง	1	4,000	1	22	อาหารจานเดียว	3	3,800	0
8	ข้าวราดแกง	2	4,000	1	23	อาหารจานเดียว	4	3,800	0
9	ข้าวราดแกง	3	4,800	1	24	อาหารจานเดียว	5	4,800	1
10	ข้าวราดแกง	4	3,300	0	25	อาหารจานเดียว	6	4,000	0
11	ข้าวราดแกง	5	4,800	1	26	อาหารจานเดียว	7	4,000	0
12	อาหารตามสั่ง	1	4,800	1	27	อาหารจานเดียว	8	3,300	0
13	อาหารตามสั่ง	2	3,800	0	28	อาหารจานเดียว	9	4,800	1
14	อาหารอีสาน	1	3,800	0	29	เครื่องดื่ม	1	3,300	0
15	อาหารอีสาน	2	4,000	0	30	เครื่องดื่ม	2	4,000	1

จากตารางที่ 9 คือ ตัวแปรตัดสินใจจะเท่ากับ 1 หากร้านค้าที่ไม่ได้รับการคัดเลือกนั้น ตัวแปรการตัดสินใจจะเท่ากับ 0 ทั้งนี้ จะได้ประเภทร้านค้าตรงตามเงื่อนไขตามตารางที่ 8 โดยจะมีประเภทก๋วยเตี๋ยวจำนวน 2 ร้าน ประเภทข้าวราดแกงจำนวน 4 ร้าน ประเภทอาหารตามสั่งจำนวน 1 ร้าน ประเภทอาหารอีสานจำนวน 1 ร้าน ประเภทอาหารเช้าจำนวน 1 ร้าน ประเภทอาหารจานเดียวจำนวน 4 ร้าน และประเภทเครื่องดื่มจำนวน 1 ร้าน รวมทั้งสิ้น 14 ร้าน ตามเงื่อนไขที่กำหนด

3.2. ผลจากสมการกำหนดตำแหน่งร้านค้า

หลังจากที่ประเภทร้านค้าตามที่กำหนดแล้ว ทางผู้วิจัยจะดำเนินการใช้สมการตามข้อ 2.3. เพื่อกำหนดตำแหน่งร้านค้าใหม่ให้เหมาะสมตามพื้นที่เช่า



รูปที่ 2 แสดงแผนผังตำแหน่งร้านค้า ภายในศูนย์

อาหารและบริการ 2 (โรงชาย)

ตารางที่ 10

แสดงการกำหนดระดับความสำคัญ

ห้อง	ระดับความสำคัญ				
	1	2	3	4	5
2101	✓	✓			
2102	✓	✓	✓		
2103	✓	✓			
2104	✓	✓	✓		
2105	✓	✓	✓	✓	
2106	✓	✓	✓	✓	✓
2107	✓	✓	✓	✓	✓
2108	✓	✓	✓	✓	
2109	✓	✓	✓		
2110	✓	✓			
2111	✓	✓			
2112	✓	✓	✓		
2113	✓	✓	✓	✓	
2114	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 10 ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์และสำรวจแผนผังพื้นที่ร้าน 2101 ถึง 2114 ซึ่งวิเคราะห์ระดับความสำคัญจาก

ระดับความสำคัญ 1 ใกล้พื้นที่ที่รอบของร้านค้า ทำให้มีลูกค้าค่อนข้างน้อย

ระดับความสำคัญ 2 ใกล้โต๊ะรับประทานอาหาร ทำให้มีลูกค้าปานกลาง

ระดับความสำคัญ 3 ใกล้ตำแหน่งภาชนะซ้อนซ้อน ทำให้มีลูกค้าค่อนข้างมาก

ระดับความสำคัญ 4 ใกล้พื้นที่เดินส่วนกลางทำให้มีลูกค้าผ่านจำนวนมาก

ระดับความสำคัญ 5 ใกล้ทางเข้าทางออกศูนย์อาหารทำให้มีลูกค้าจำนวนมากที่สุด จากนั้นจึงใช้สมการที่ 2.3. เพื่อกำหนดตำแหน่งร้านค้าใหม่ ได้คำตอบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 11

แสดงการกำหนดตำแหน่งร้านค้าใหม่

การวางแผนร้านค้าเดิม						การวางแผนร้านค้าใหม่					
ลำดับ	เลขที่	ระดับความสำคัญ	รหัสร้าน	ประเภทร้านค้า	ค่าเช่า	ลำดับ	เลขที่	ระดับความสำคัญ	รหัสร้าน	ประเภทร้านค้า	ค่าเช่า
1	2101	2	Nood1	ร้านเนื้อ1	4,800	1	2101	2	Bev	เครื่องดื่ม	4,000
2	2102	3	OneF4	อาหารจานเดียว	4,800	2	2102	3	OneF4	อาหารจานเดียว	4,800
3	2103	2	Nood2	ร้านเนื้อ2	4,800	3	2103	2	Cury2	ข้าวผัดผก2	4,000
4	2104	3	Nood3	ร้านเนื้อ3	4,800	4	2104	3	Isan	อาหารอีสาน	4,800
5	2105	4	OneF1	อาหารจานเดียว	4,800	5	2105	4	Cury3	ข้าวผัดผก3	4,800
6	2106	5	Cury1	ข้าวผัดผก1	4,000	6	2106	5	BF	อาหารเช้า	4,800
7	2107	5	OneF2	อาหารจานเดียว2	4,000	7	2107	5	OneF3	อาหารจานเดียว3	4,800
8	2108	4	BF1	อาหารเช้า1	4,000	8	2108	4	OneF1	อาหารจานเดียว1	4,800
9	2109	3	Cury2	ข้าวผัดผก2	4,000	9	2109	3	Nood2	ร้านเนื้อ2	4,800
10	2110	2	OneF3	อาหารจานเดียว3	3,800	10	2110	2	OneF2	อาหารจานเดียว 2	4,000
11	2111	2	Isan	อาหารอีสาน	3,800	11	2111	2	Cury1	ข้าวผัดผก1	4,000
12	2112	3	OneF4	อาหารจานเดียว4	3,800	12	2112	3	OrderF	อาหารจานเล็ก	4,800
13	2113	4	BF2	อาหารเช้า1	3,300	13	2113	4	Nood1	ร้านเนื้อ1	4,800
14	2114	5	Bev	เครื่องดื่ม	3,300	14	2114	5	Cury4	ข้าวผัดผก4	4,800
รวม					58,000	รวม					64,000

จากตารางที่ 11 นั้นพบว่า จากการที่ได้กำหนดประเภทร้านค้าตามตารางระดับความสำคัญ แล้วนั้นในการวางตำแหน่งร้านค้ามีตัวแปรการตัดสินใจคือระดับความสำคัญของพื้นที่ ระดับสัดส่วนผู้ใช้บริการแต่ละประเภทร้านค้า และราคาค่าเช่า แบบจำลองสามารถได้จัดวางตำแหน่งร้านค้าให้เหมาะสมกับพื้นที่ และสามารถประมาณการรายได้ค่าเช่าเพิ่มขึ้น และสามารถเปรียบเทียบได้จากสมการวัตถุประสงค์

ของสมการ 2.3. โดยต้องการผลรวมสูงสุดของ ระดับความสำคัญ ค่าเช่า และตำแหน่งร้านค้า $(\max z = \sum_i \sum_j G_j R_i x_{ij})$ ประสิทธิภาพในการเพิ่มรายได้ และระดับความสำคัญของตำแหน่งร้านค้าเพิ่มขึ้นจากเดิม ร้อยละ 12.64 และทำให้ร้านค้าจ่ายค่าสูงอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

3.3. มูลค่าปัจจุบัน

และด้วยการคิดมูลค่าเงินปัจจุบันของรายได้จากตารางที่ 5 สามารถเปรียบเทียบได้การวางตำแหน่งร้านค้าเดิม และการวางตำแหน่งร้านค้าใหม่ได้ ดังนี้

สมการมูลค่าปัจจุบัน

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (10)$$

โดยที่

P = ค่าเงินปัจจุบัน

A = รายได้ต่อเดือน

i = อัตราดอกเบี้ยประสิทธิผลรายเดือน

n = จำนวนเดือน

ดอกเบี้ยร้อยละ 7 ต่อปีเรียกเก็บรายเดือน แปลงเป็นร้อยละ $7/12$ (เดือน) = ร้อยละ 0.58 ต่อเดือนเรียกเก็บรายเดือน

ดังนั้น ค่าเทียบเท่าปัจจุบันของการวางตำแหน่งร้านค้าเดิม เท่ากับ

$$P_{\text{เดิม}} = 58,000 \left[\frac{(1 + 0.58\%)^{12} - 1}{0.58\%(1 + 0.58\%)^{12}} \right] = 670,312.97 \text{ บาท}$$

ในขณะที่ค่าเทียบเท่าปัจจุบันของการวางตำแหน่งร้านค้าใหม่ เท่ากับ $P_{\text{ใหม่}} = 739,655.69$ บาท ซึ่งจะเห็นได้ว่า การเลือกร้านค้าใหม่แต่ละประเภทก่อให้เกิดรายได้ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 10.34

4. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้กล่าวถึงปัญหาเกี่ยวกับกำหนดประเภทร้านค้า และการกำหนดตำแหน่งร้านค้าของผู้ประกอบการภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) โดยนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความสามารถในการคัดเลือกประเภทร้านค้าและวางตำแหน่งร้านค้าที่เหมาะสมภายในพื้นที่ศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) การวิเคราะห์พื้นที่เช่าเชิงพาณิชย์ ตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริการพื้นที่เช่า ภายในศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) งานวิจัยนี้เริ่มจากการสำรวจพื้นที่เช่า เช่น ประเภทร้านค้า ค่าเช่า และจำนวนผู้ใช้บริการ จากนั้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดประเภทและจำนวนร้านค้าที่เหมาะสม โดยใช้สมการในโปรแกรม LINGO® ผลการคำนวณระบุว่าควรมีร้านค้า 14 ร้าน แบ่งเป็นร้านก๋วยเตี๋ยว 2 ร้าน ข้าวราดแกง 4 ร้าน อาหารตามสั่ง 1 ร้าน อาหารอีสาน 1 ร้าน อาหารเข้า 1 ร้าน อาหารจานเดียว 4 ร้าน และเครื่องดื่ม 1 ร้าน ซึ่งสอดคล้องกับค่าเช่าที่เหมาะสมนอกจากนี้ การจัดวางตำแหน่งร้านค้าตามระดับความสำคัญและค่าเช่ายังช่วยให้พื้นที่ที่มีความสำคัญสูงได้รับร้านค้าที่มีความต้องการใช้บริการสูง ส่งผลให้รายได้ค่าเช่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.34

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์บริการจัดการทรัพย์สิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลและสถานที่ศูนย์อาหารและบริการ 2 (โรงชาย) ที่เป็นประโยชน์สำหรับการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สวัสดิ์ สารุ และ สุณาริน จันทะ. การหาแบบการเลือกแหล่งซื้อสินค้าสำหรับห้างค้าปลีกใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษาโรงงานแปรรูปมันเส้นสะอาด จังหวัดฉะเชิงเทรา. การประชุมวิชาการชาวยางงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555, 2555.
- [2] เพชรายุทธ แซ่หลี่, วชิระ วิจิตรพงษ์ และ หทัยชนก พวงแย้ม. การจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015. วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. 2560; 10(1): มกราคม 2560-มิถุนายน 2560.
- [3] พิทยุตม์ คงพวง และ สุภาทิพย์ เลิศวิวัฒน์ชัยพร. การประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้นตรงเพื่อหาสัดส่วนวัสดุธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกแก้ว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2561; 7(3).
- [4] จิตติมา วงศ์อินตา, อนิรุทธ์ ชันธสะอาด และ กิตติ เจริญสุข. การบริหารรถขนส่งและเส้นทางเดินรถโดยใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษา รถขนส่งสินค้าอันตรายประเภทของเหลว. วารสารการขนส่งและโลจิสติกส์. 2561; 11(1).

- [5] ศักดิ์สิทธิ์ สุขสุเมธ. สร้างแบบจำลองเพื่อการตัดสินใจ. บ. ชีเอ็ดยูเคชั่น: กรุงเทพมหานคร; 2557.
- [6] จุฑารัตน์ บุญานุรักษ์. การจัดรถโดยสารที่เหมาะสม สำหรับตารางเดินรถ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2553.
- [7] ธนพล ไพลีรัฐสุวรรณ. การประยุกต์ใช้ Center of gravity และ Factor rating ในการเพิ่ม ประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้าหลัก กรณีศึกษาร้านสินไทยของเก่า. เชียงราย: ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง; 2555.
- [8] Santiwong T. Organizational Behavior. Thai Wattanapanich: Bangkok: 1994.
- [9] พุทธางกูร เขียวทอง , คมกฤช ปิติฤกษ์. การออกแบบแผนผังเพื่อกำหนดตำแหน่งจัดเก็บในคลังสินค้าการเกษตร. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. FEAT JOURNAL January - June 2022. 2565: 69 – 77.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

Surrogate assisted optimization for parameters tuning of a separator in a tapioca starch process

Sompoch Charoensuk ¹⁾ Thana Radpukdee ^{1)*} and Nantiwat Pholdee ²⁾¹⁾ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University²⁾ Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 16 September 2024

Revised: 26 November 2024

Accepted: 26 November 2024

Available online: 26 December 2024

Abstract

This study employs a single-objective differential evolution optimizer for surrogate-assisted optimization. A separator plant is modeled using five surrogate approaches for process optimization. The optimization objective is defined as minimizing starch loss relative to the Baume output of starch milk, while adhering to the lower and upper bounds of design parameters, including pulp input, Baume input, and regulated valve flow control. These bounds also support the plant controller's original design parameters. The optimal parameters were implemented and their real and numerical performances compared to validate the proposed method. The results demonstrate that the suitable surrogate model for the separator plant can be identified and that the optimal characteristics can be achieved, providing practical benefits to the process.

Keywords: Tapioca starch washing process: surrogate model

*ติดต่อ: rthana@kku.ac.th

1. INTRODUCTION

Air and water pollution are common consequences of processing agricultural products, particularly in the tapioca starch industry. Wastewater from tapioca starch producers, which often seeps into public canals and rivers, has become a significant contributor to Thailand's pollution problem. During large volume of wastewater treatment, carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4) are released, further harming the environment. Consequently, it is crucial to reduce and regulate the volume of these wastewater and harmful gases to mitigate their impact effectively.

In this instance, light starch milk spills during the process are the primary source of wastewater. One of the main points of significant leakage in the tapioca starch production process is the separator. This study aims to minimize the amount of starch released into wastewater, thereby reducing pollution caused by starch loss and improving production efficiency in the starch industry. The separator process is illustrated in Fig. 1.

In the Signal Control and Data Acquisition (SCADA) system, process data is controllable, observable, and recordable. A mass flow meter, located at position 1, measures the density of starch loss. Position 2 features a control panel for

setting parameters, including starch milk input flow rate and output starch density. At position 3, a proportional valve is installed, equipped with an adaptive PID flow controller. This controller adjusts its gain dynamically in response to changes in the setting input parameters and the target output density.

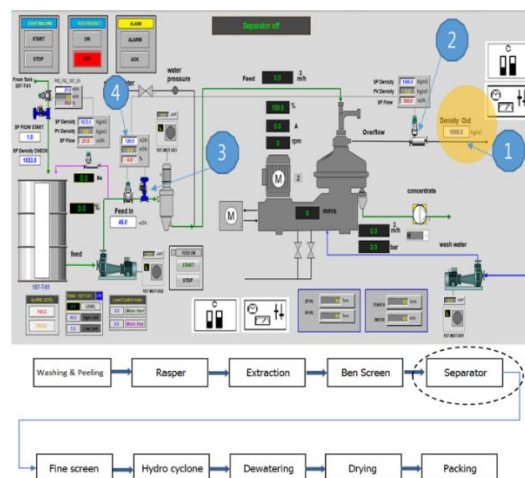


Figure 1 A separator SCADA and the tapioca starch production process

The separation mechanism is highly intricate, making the cost of direct mathematical modeling prohibitively high. To address this, the surrogate technique is employed to assist in the optimization process, enabling the determination of ideal design parameters to reduce starch loss and increase starch density output. This technique is commonly used in research to enhance industrial production efficiency.

Jin, W. et al. (2022) [10], while optimizing a high-temperature reservoir thermal energy storage (HT-RTES) system, developed a machine learning model comprising a Bayesian search algorithm and two deep-layer artificial neural network (ANN) models. This approach, which accounted for operational scenarios and site-specific variables, produced more reliable and efficient energy storage solutions.

Chen, X. et al. (2021) [4] enhanced the operational performance of fluidized catalytic crackers in real-time refinery applications. By estimating the load in real time and reducing the order of the cracker model, they improved the trust region filter optimization process.

Franzoi, R. E. et al. (2021) [5] integrated sequential linear programming techniques, trust region methods, and adaptive sampling strategies into an optimizer to reduce lag time and convergence issues. The performance of the adaptive sampling iteration was evaluated using a surrogate model of the response system.

Surrogate models are particularly vital for modeling extremely nonlinear plants or machines that are prohibitively expensive to simulate. For example, Ali, W. et al. (2018) [2] employed an RBF-thin plate spline to model the mixed refrigerant liquefaction process. Additionally, surrogate models can be applied to adaptive controller tuning of brushless direct current

motors for speed regulation using the response surface approach (Rojas-López, A. G. et al., 2024 [7]).

In numerical simulations for plant modeling, high-order spatio-temporal discretization is often necessary for highly nonlinear models, such as those employed in complex thermo-mechanical structure analysis using the finite element method (FEM), material characterization, tribological contact, significant deformation, or damage scenarios. Bagheri, S. et al. (2021) [3] used RBF meta-modeling for these nonlinear FEM problems, avoiding the need for direct FEM calculations.

In our work, we utilized five popular surrogate models to simulate a real-world plant, aiming to optimize the reference parameters of the PLC controller. A summary of the five surrogate modeling techniques is presented in Section 2. Sections 3 and 4 focus on the problem formulation and the numerical setup. Section 5 provides a comparison of the optimization results and surrogate modeling outcomes for each method. Finally, the conclusions are outlined in Section 6.

2. SURROGATE MODELLING

A separator machine is employed in the starch washing process to enhance starch concentration and purify starch milk. This phase

of the operation is referred to as the concentration stage (see Fig. 3). A nozzle, which uses counter wash water for starch purification, is fed with heavy starch particles that were casted via centrifugal force generated by a series of discs attached to a shaft. Once cleaned, the starch particles are collected and discharged through an outlet pipe. However, the wash water feed pressure can lead to contamination and cause some starch particles to overflow from the top of the separator.

While computationally expensive Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling can be used to simulate the combined gravity-centrifugal and washing phenomena, real-time testing remains impractical. This is true even under conditions where the machine rotates at a constant speed with a fixed wash water flow rate. Surrogate modeling offers a more efficient alternative to state-space or other system identification techniques, as it significantly reduces the computational effort required during the optimization process.

As noted by Wahid Ali et al. (2018) [2], surrogate models transform complex processes into reduced-order models, making them an attractive choice. This study explored a suitable model capable of representing the intricate dynamics of the starch washing process. The following modeling techniques were applied, with

much of the detailed methodology and algorithms drawn from the work of Alexander I. J. Forrester, András Sóbester, and Andy J. Keane (2008) [1]. The following is a synopsis of each technique.

2.1. Through RSM modelling

Given $[X] = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]^T$ is a matrix of design n vector for n sampling points and $[F] = [f_1, \dots, f_n]^T$ represents a function value corresponding to X . The polynomial response surface model (RSM) used to estimate $\hat{f}$ can be expressed as follows:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{c} \quad (1)$$

Where $\mathbf{x}$ is all the polynomial terms of vector of design variable, $\boldsymbol{\beta}$ is the vector of regression coefficients.

The $\boldsymbol{\beta}$ and $\mathbf{c}$ can be found as follows;

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{F} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \quad (3)$$

Where $\mathbf{X}$ is all the polynomial terms of all sampling points.

2.2. Through RBF modelling

The RBF (radial basis function) samples a set of $[X]$ with its function $[F]$. The radial basis function model (RBF) is used to estimate $\hat{f}$ can be expressed as follows

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n C_i K(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) \quad (4)$$

Where K is kernel function. C_i is an interpolant coefficient to be found. By setting the interpolation function $\hat{f}(x_i) = f_j$, Defining the Euclidean distance term $\|x_j - x_i\| = r_{ji}$, the coefficient can be determined. And a matrix form of the RBF construction is

$$[K(\|x_j - x_i\|)]\{C_j\} = \{f_j\} \quad (5)$$

and C_i can be found as

$$\{C_j\} = [K(\|x_j - x_i\|)]^{-1}\{f_j\} \quad (6)$$

The radial basis r_{ji} can be selected from various types, such as Linear spline, Cubic spline, Thin plate spline, Gaussian, Multiquadric, Inverse quadric, Inverse multiquadric, Bump function, or others. It is important to note that the radial basis function matrix is symmetric. To ensure that Equation 6 has a unique solution, the chosen basis function must be non-singular.

2.3. Through KRG modelling

The Kriging (KRG) surrogate model is constructed using a Gaussian correlation function and a polynomial trend model, as outlined by M. Kumar et al. [18]. The KRG prediction function is defined as:

$$\hat{f}(x) = p(x)^T \beta + \psi^T \Psi^{-1} (F - p\beta) \quad (7)$$

where

β represents the regression coefficients,

ψ is the correlation vector between

x and each sample point,

Ψ is the correlation matrix between sample points.

The KRG correlation function is given by:

$$\psi(x_i, x_j) = \exp(- (x_i - x_j)^T \theta (x_i - x_j)) \quad (8)$$

where $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}^T$ are the correlation parameters, estimated by maximum likelihood. In this study, the MATLAB DACE toolbox is used for constructing the Kriging model.

2.4. Through SVR modelling

Support Vector Regression (SVR) is a variant of Support Vector Machine (SVM) that excels in regression tasks due to its strong learning capabilities. In SVR, the term "support vectors" (SV) refers to the data points closest to the regression model's decision boundary, which defines the maximum margin. By utilizing an optimal decision-making surface, SVR effectively separates data points within a specified margin, thereby balancing model complexity and prediction accuracy. This maximum-margin approach also mitigates the risk of overfitting by ensuring that the model generalizes well to unseen data (Hu A et al., 2023 [6]).

In simple terms, as described by Alexander I. J. Forrester et al. (2008) [1], the SVR predictor function can be expressed as:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b \quad (9)$$

Where

$\mathbf{w}$ is weighting factor,

$\phi(\mathbf{x})$ is mapping function that transforms input $\mathbf{x}$ into a higher-dimensional feature space,

b is bias term.

The weight vector $\mathbf{w}$ is found by solving the following optimization problem

$$\min: \frac{1}{2} |\mathbf{w}|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i - \xi_i^*) \quad (10)$$

Subject to:

$$f_i - \hat{f}(\mathbf{x}) \leq \varepsilon + \xi_i$$

$$\hat{f}(\mathbf{x}) - f_i \leq \varepsilon + \xi_i^*$$

where

ξ_i and ξ_i^* are slack variables for data points outside the margin

C is regularization parameter controlling trade-off between margin width and prediction error.

2.5. Through NNB modelling

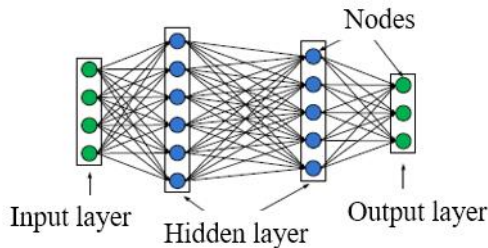


Figure 2 A feed-forward 4-6-5-3 network.

Neural network (NN) modeling comprises interconnected nodes that mimic the behavior of

neurons in living organisms. A feed-forward multilayer network typically includes input, hidden, and output layers, as illustrated in Figure 2.

The NN estimation function at the output layer is represented as:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{Z}\mathbf{w}^{(2)} + \mathbf{b}^{(2)}) \quad (11)$$

where the hidden layer output $\mathbf{Z}$ is defined as:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{g}(\mathbf{x}\mathbf{w}^{(1)} + \mathbf{b}^{(1)}) \quad (12)$$

where

$\mathbf{w}^{(1)}$ and $\mathbf{w}^{(2)}$ are the weight matrices from the input layer to the hidden layer and from the hidden layer to the output layer, respectively,

$\mathbf{b}^{(1)}$ and $\mathbf{b}^{(2)}$ are bias vectors for the hidden and output layers, respectively,

$\mathbf{g}$ and $\mathbf{f}$ are the activation functions for the hidden and output layers.

The weights $\mathbf{w}$ and biases $\mathbf{b}$ in a neural network are optimized through a training process, commonly using backpropagation in conjunction with an optimization algorithm such as gradient descent. During training, the network iteratively adjusts these weights to minimize a cost function, which quantifies the difference between predicted and actual outputs. This adjustment allows the network to learn patterns from the training data and generalize effectively to unseen testing data.

3. PROBLEM FORMULATION

Between the bent screen, which filters starch milk from the extractor, and the fine screen, which further refines the milk before it is sent to the hydro cyclone for purification, lies the separator process used in tapioca starch production (see Fig. 1). As shown in Fig. 3, the primary cause of starch loss during this separator step is the washing process.

At the top of the separator, a feed pump and a proportional flow control valve feed and regulate the starch milk coming from the extractor. Washing water is introduced from below. The dense starch milk is then cleaned, centrifuged, and discharged as concentrated starch milk, which proceeds to the hydro cyclone process. Meanwhile, the light phase discharge is expelled as wastewater, and the medium phase waste is returned to previous washing stages.

According to the company's SCADA system, the annual starch loss attributed to this light phase discharge is approximately 1,000 tons, equivalent to a financial loss of 14 million baht annually. The factory has a production capacity of 220,000 tons of starch per year and consumes around 1,000,000 tons of raw tapioca annually.

To enhance this process, a proportional flow control valve can be employed to regulate the starch milk intake, thereby reducing significant losses. The valve's opening is adjusted based on

preset parameters and feedback signals from a starch density meter positioned in the wastewater drain section. The relationship between specific gravity and starch density data from the case study plant is used to calculate starch loss in the drain wastewater.

To develop a surrogate model for determining the optimal input flow settings, the following design variables were considered:

1. **Pulp Input** (% ml Pulp/ml Starch Milk)
2. **Baume Input** (°Be input) of the starch milk feeding into the separator
3. **Flow Rate Allowance** (Q in $\text{m}^3/\text{hr.}$) from the valve regulator

The plant's SCADA system can be utilized to collect and monitor these design variables, enabling accurate modeling and optimization of the process. Note that the pulp input and Baume input are collected each hour from two buffer tanks before and after the separator process by a worker then fill their wet lab data into the SCADA.

The objective function is designed to simultaneously:

1. **Maximize** the concentration of starch (°Be output) in the discharged starch milk.
2. **Minimize** the starch loss (L_s in grams per liter) in the wastewater, as measured by an additional density meter installed on the wastewater line.

This dual objective ensures an optimized balance between product recovery and waste reduction in the starch production process.

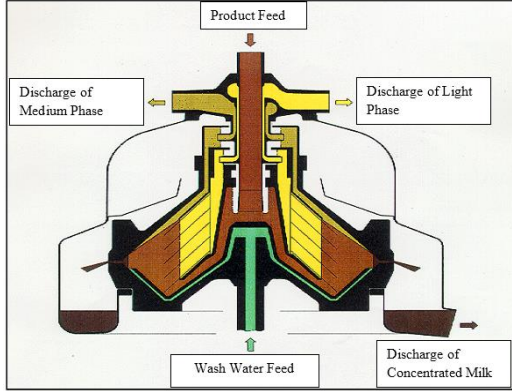


Figure 3 The crossection schematic diagram of a separator

Thus, the objective function can be expressed as follows:

$$\text{Min: } f(X) \frac{Ls}{^{\circ}\text{Be output}} \quad (13)$$

Subject to:

$$0 \leq \text{Pulp input} \leq 3$$

$$3 \leq ^{\circ}\text{Be input} \leq 8$$

$$130 \leq Q_{in} \leq 200$$

Where

$X = [\text{Pulp input}, ^{\circ}\text{Be input}, Q_{in}]^T$ is a vector of the design variables with constrains.

4. SURROGATE-ASSISTED OPTIMIZATION AND NUMERICAL EXPERIMENT SET UP

Surrogate modeling is essential for understanding the system's behavior, especially given the complex mechanisms involved in the washing process of derived starch milk. Despite

the intricate dynamics, the optimization process is simplified by its single objective function and the limited number of design factors.

In this study, the optimizer used was the Single Objective Differential Evolution (SODE). Surrogate models, developed using PRS, RBF, KRG, SVR, and NNB approaches, were employed to approximate the behavior of the nonlinear complex plant, reducing computational effort. Further research is necessary to evaluate which surrogate model provides the most accurate tracking of the training dataset and yields suitable design parameters for the PLC controller.

SODE, as described by Sujin B. (2013) [9], optimizes by iteratively evolving the population vector of design parameters through differentiation, mutation, and selection, ultimately deriving an optimal solution. This approach effectively balances exploration and exploitation in the optimization process.

The SODE procedure is shown below.

SODE algorithm:

Beginning process

Define all design parameters and their initial population with respect to their objective function.

Calculation process

1. If a cost function has met, stop seeking solutions. If the cost function hasn't met go to the

2nd step.

2. Generate population of the design parameters by using mutation and crossover methods.

3. Calculate the objective function of the offspring from the 2nd step.

4. choose population for the next iteration from the prior parent and offspring population.

5. Interchange population position randomly then go to the 1st step.

The operators of the Single Objective Differential Evolution (SODE) algorithm fall into three primary categories:

1. **Crossover:** Combines parent solutions with mutated solutions to create offspring, promoting diversity in the population.

2. **Mutation:** Generates new candidate solutions by perturbing existing ones, enabling exploration of the search space.

3. **Selection:** Chooses the best solutions from the current population and offspring for the next generation, ensuring convergence toward the optimal solution.

The processes of mutation and crossover are mathematically described by the following equations:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{X}_{i1} + F(\mathbf{X}_{i2} - \mathbf{X}_{i3}) \quad (14)$$

Where

$F \in [0,1]$ is a scaling factor.

$\mathbf{u}_i$ is a mutation solution vector.

$\mathbf{X}_{i1}$ is the best so far solution vector.

$\mathbf{X}_{i2}$ and $\mathbf{X}_{i3}$ are random solution vectors in the member of a current population and $\mathbf{X}_{i2} \neq \mathbf{X}_{i3}$.

$$\mathbf{v}_{i,j} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,j}; \text{rand} \leq CR \\ \mathbf{x}_{i,j}; \text{rand} > CR \end{cases} \quad (15)$$

where $CR \in [0,1]$ is a crossover rate and rand is a uniform random number in $[0, 1]$.

Index i refers to the i^{th} solution in the current population, while index j represents the j^{th} element in a solution vector.

In the fourth step of the selection procedure, the design parameters of the parent and offspring solutions ($\mathbf{X}_i$) are compared simultaneously. The next population for the subsequent iteration is selected based on the solutions that provide the best performance according to the objective function. This ensures that the algorithm retains the most optimal solutions while continuing to evolve.

For this study, the following parameters were used in the SODE optimization process:

- Crossover Rate (CR): 0.8
- Scaling Factor (F): 0.5
- Probability of Selecting an Element from the Offspring: 0.7

These parameter settings guided the evolution of the population while balancing exploration and exploitation.

For the numerical experiment, the surrogate

models served as representations of the plant. Below is an illustration of the technique used to develop the plant's meta-model, highlighting the integration of surrogate modeling and optimization to identify the optimal design parameters.

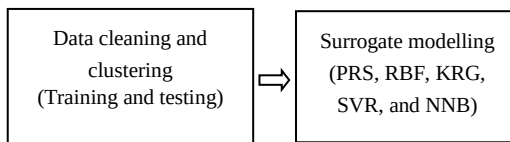


Figure 4 Surrogate modelling procedure

The SCADA system samples data from the separator process every hour, providing continuous monitoring and recording of operational parameters. The separator operates non-stop throughout the day, ensuring a consistent flow of data for analysis and optimization. As stated earlier, the pulp and Baume parameters were sampled manually each hour from buffer tanks at the product infeed line and the discharge starch milk line. These samples were analyzed in a wet lab, and the results were subsequently fed into the SCADA database, while the flow rate was continuously logged by an inline sensor. However, the manual sampling and wet lab analysis may introduce errors, particularly if the sampling interval is reduced to less than one hour, as human

limitations could affect consistency and accuracy.

To mitigate the risk of over-prediction in the surrogate model, a data-cleaning process is performed. Specifically, **K-means clustering** is employed to eliminate redundant or overly similar data points, ensuring a more representative and well-distributed dataset for model training and testing. This step enhances the robustness and accuracy of the surrogate model.

After the data cleaning process, 80% of the dataset was allocated for training, while the remaining 20% was reserved for testing on unobserved data. K-means clustering was utilized to group the training data and ensure a well-distributed dataset, avoiding any clustering bias. The training dataset was then prepared and fed into the modeling algorithms: PRS, RBF, KRG, SVR, and NNB. Each algorithm was configured as follows:

- **PRS (Polynomial Response Surface):** Used a second-order polynomial function to approximate the system's behavior.
- **RBF (Radial Basis Function):** Employed a Gaussian kernel as its basis function to model complex non-linear relationships.
- **KRG (Kriging):** Utilized a linear model with a Gaussian correlation function to capture the global and local trends of the data.

- SVR (Support Vector Regression): Applied a radial basis function (RBF) kernel to predict the response surface accurately.
- NNB (Neural Network Backpropagation): Also utilized an RBF kernel for its activation functions to model non-linear relationships effectively.

Ultimately, these five surrogate models were constructed to facilitate the optimization procedure, leveraging their individual strengths to approximate the behavior of the separator process and identify optimal design parameters.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The SCADA system, as previously mentioned, collected raw data over a period of 31 days, sampling at a rate of one data point per hour, 24 hours a day. K-means clustering (Alexander I. J. Forrester et al., 2008 [1]) was applied to clean the dataset by consolidating repeated value parameters into a single entry. This resulted in a refined dataset shared across all design fields. The dataset was then randomly divided into training (80%) and testing (20%) groups, ensuring that the testing domain was adequately covered by the training domain (as illustrated in Figures 5–8).

Due to a hydro-cyclone process constraint near the separator, the target Baume output ($^{\circ}\text{Be}$ output) was set to approximately 18–19 $^{\circ}\text{Be}$,

with the goal of minimizing starch loss (Ls). Adjustments to the flow rate through the regulated valve revealed an inverse relationship: a lower Baume input resulted in a higher flow rate, and vice versa. An adaptive precision PID controller (outside the scope of this study) regulated this adjustment to reduce starch loss in wastewater.

Although Figure 6 indicates the potential for nearly zero loss at Baume inputs between 3 and 4 $^{\circ}\text{Be}$, this range is not recommended due to the low efficiency of prior starch extraction methods. Additionally, data suggests that at Baume inputs above 4 $^{\circ}\text{Be}$, there is a substantial concentration of nearly zero-loss conditions. Consequently, Baume inputs in the range of 4.5 to 8 $^{\circ}\text{Be}$ were considered. However, inappropriate control of the valve's flow rate could lead to increased losses at higher Baume inputs. Figures 5 and 7 also show that flow inputs of approximately 100 to 200 m^3/hr . yield high Baume outputs (density of the high $^{\circ}\text{Be}$ output point cloud along that range), though it remains unclear if higher pulp inputs lead to greater losses.

To address these relationships, surrogate models were employed to investigate and optimize the process. The meta-modeling approach was used to mitigate initial losses caused by incorrect or transient control parameter settings and to estimate initial

setpoints (X_i) for the PLC controller, avoiding fluctuations due to the plant's nonlinear behavior.

The cleaned dataset (80% for training and 20% for testing) was then utilized to construct surrogate models, including PRS, RBF, KRG, SVR, and NNB. The performance of each model was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE), which quantified the accuracy of the objective function estimations. These results informed the selection of the most effective surrogate model for optimizing the separator process.

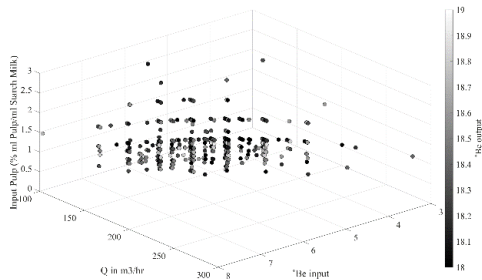


Figure 5 The training ^{22}Be output cleaned data VS its variables

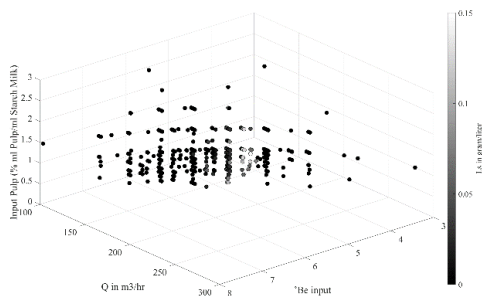


Figure 6 The training Ls cleaned data VS its variables

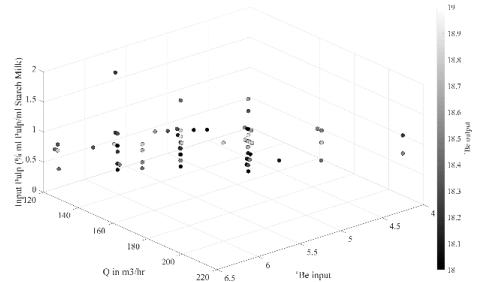


Figure 7 The testing ^{22}Be output cleaned data VS its variables

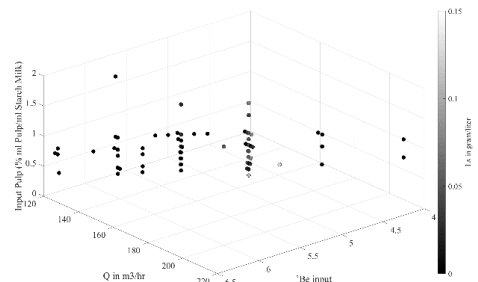


Figure 8 The testing Ls cleaned data VS its variables

The Root Mean Square Error (RMSE) for each surrogate model is displayed in Figure 9. It was observed that the Radial Basis Function (RBF) model exhibited the lowest error in plant estimation, with the Support Vector Regression (SVR) model also achieving comparably low errors. This highlights the strong performance of both models in accurately approximating the plant's behavior.

Although the rankings of the surrogate models were determined (with RBF and SVR ranking first and second, respectively), the final determination of the optimal design variables for each model

requires the application of the Single Objective Differential Evolution (SODE) optimizer. This step ensures that the surrogate models provide the most effective solutions for the separator process optimization, aligning model estimations with real-world performance requirements. The PLC's **supervisory input** was subsequently configured using the optimal design parameters derived from the surrogate models. This ensured that the process control system operated at its most efficient settings, effectively aligning the plant's performance with the optimization objectives.

Table 1 presents the results for the optimal design variables, the estimated objective function values, and the actual objective function values based on the optimal parameters. Among the surrogate models:

- SVR and RBF provided the most accurate estimations, with comparatively low discrepancies between the modeled and actual objective function values.
- KRG produced the highest Baume output ($^{\circ}\text{Be}$ output) according to the actual plant data, showcasing its potential for maximizing starch concentration.
- SVR, ranked second, demonstrated a strong balance between minimizing starch loss and achieving high Baume output, making it a reliable option for practical application.

These findings highlight the strengths of each model and their respective suitability for different aspects of the optimization process.

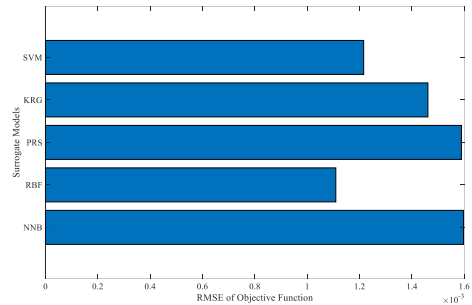


Figure 9 The RMSE of each surrogate model.

In practice, the plant's target Baume value ($^{\circ}\text{Be}$) typically ranges between 18 and 20. Interestingly, the Kriging (KRG) model yielded an unexpected objective function result of -1. Despite this anomaly, when comparing objective function values across surrogate models, the KRG model ultimately provided the most accurate true optimal solution. This outcome highlights the 'blessing and curse of uncertainty' often encountered in surrogate-assisted optimization [8], [11]. Although the KRG model had high RMSE among the surrogate models, it demonstrated the ability to best capture the true function profile of the system. Conversely, the Support Vector Regression (SVR) model achieved the lower RMSE, indicating superior accuracy in estimating plant behavior. The SVR model also produced $^{\circ}\text{Be}$ values and starch loss

metrics closely aligned with those of the KRG model (see Table 1), making it a robust choice for practical applications where precise estimation is critical.

The authors recommend Support Vector Regression (SVR) as the most suitable meta-model overall, given its superior performance in profile tracking and accuracy. Compared to other models:

- The Polynomial Response Surface (PRS) model had a low input flow setpoint that rendered it unsuitable for proper separator operation.
- The Radial Basis Function (RBF) and Neural Network Backpropagation (NNB) models produced ideal $^{\circ}\text{Be}$ inputs that were too small for practical application.
- The numerical calculations in some models yielded negative signs in the objective functions, which can be interpreted as a scenario where the objective function comparison error is effectively zero. However, high RMSE values and impractical flow control settings made PRS and NNB unsuitable.
- Additionally, the low flow rates suggested by these models could prolong the washing process, further reducing operational efficiency.

This work aimed to identify the best design parameters and a surrogate method capable of accurately mimicking the separator's behavior. The SVR model demonstrated minimal objective function errors (as shown in the final column of Table 1) and provided $^{\circ}\text{Be}$ inputs within a practical range of 3–8 $^{\circ}\text{Be}$. Values close to the bounds were avoided, as they were deemed impractical for real-world use.

In comparison to the Kriging (KRG) model, the SVR offered more consistent results with minimal errors and was ultimately chosen as the optimal surrogate method for this study.

By utilizing the SCADA reference values as the optimal settings for the proportional valve controller, the annual light-phase starch waste of approximately 1,000 tons was effectively eliminated. This recovery allowed the starch to be returned to the production process, yielding a financial benefit exceeding 14 million baht per year.

Reducing the discharge of light-phase starch into wastewater not only minimizes waste but also significantly lowers the chemical oxygen demand (COD), which directly impacts the need for extensive wastewater treatment. Additionally, this reduction curtails the production of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4), which are typically generated during the treatment process. The decrease in

wastewater also reduces energy consumption environmental sustainability and the reduction of associated with treatment, further contributing to greenhouse gas emissions.

Table 1

A comparison of the estimated objective function and the real one with respect to the optimal design variables.

Surrogate models	Design variables			Objective functions		f opt	Objective functions Real		f Real
	Pulp (% ml Pulp/ml Starch Milk)	$^{\circ}\text{Be}$ input	Flow control (m^3/hr)	$^{\circ}\text{Be}$ output	loss in g/l		$^{\circ}\text{Be}$ output	loss in g/l	
PRS	3	6.0591	130.0000	17.8988	-0.0269	-0.0015	18.8000	0.2527	0.0134
RBF	3	3.9977	157.0740	18.1928	-0.0119	-0.0007	17.6000	0.1159	0.0066
KRG	2.681	4.8835	176.4254	-3.1029	3.1029	-1.0000	19.0000	0.0180	0.0009
SVR	2.9543	4.7955	173.5075	18.3356	-0.1046	-0.0057	18.8000	0.0328	0.0017
NNB	1.1651	3.3598	151.5323	17.5914	-0.0760	-0.0043	17.3000	0.1413	0.0082

6. CONCLUSIONS

The supervisory parameters of the starch milk separator plant were successfully optimized using surrogate-assisted techniques. Five well-established surrogate models were developed based on SCADA data, with the pulp input, $^{\circ}\text{Be}$ input, and regulated valve flow control selected as the design parameters. The best possible solutions for these parameters were then identified. Using the objective function, which considered starch loss (Ls) and Baume output ($^{\circ}\text{Be}$ output), the Single Objective Differential Evolution (SODE) optimizer was employed. The initial parameters of the separator plant were established based on the optimization results

while accounting for the plant's capabilities and operational constraints.

The comparative analysis demonstrated that the Support Vector Regression (SVR) model provided the best overall performance in modeling and optimizing the separation process. The SVR model not only accurately estimated the separator's functional profile but also delivered an optimal solution that, under real operating conditions, achieved superior results in terms of output and minimized loss.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Fixed-wing aircraft multidisciplinary design optimization (FAMDO) research unit Khon Kaen Univ. and our

family so much for giving numerical solutions and encouragement throughout our entire work.

8. REFERENCES

- [1] Alexander I, Forrester J, András S, Andy J. Keane. Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide, University of Southampton: UK: 2008. John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Ali W, Khan M. S, Qyyum, M. A, Lee M. Surrogate-assisted modeling and optimization of a natural-gas liquefaction plant. Computers and Chemical Engineering 2018; 118 : 132-142.
- [3] Bagheri S, Reinicke U, Anders D, Konen W. Surrogate-assisted optimization for augmentation of finite element techniques. Journal of Computational Science 2021; 54: 101427.
- [4] Chen X, Wu K, Bai A, Masuku C. M, Niederberger J, Liporace, F. S, et al. Real-time refinery optimization with reduced-order fluidized catalytic cracker model and surrogate-based trust region filter method. Computers and Chemical Engineering 2021; 153: 107455.
- [5] Franzoi R. E, Kelly J. D, Menezes B. C, Swartz C. L. E. An adaptive sampling surrogate model building framework for the optimization of reaction systems. Computers and Chemical Engineering 2021; 152: 107371.
- [6] Hu A, Liao H, Guan W, Dong J, Qian X. Support vector machine model based on OTSU segmentation algorithm in diagnosing bronchiectasis with chronic airway infections. J Radiat Res Appl Sci 2023; 16: 100500. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.100500>.
- [7] Rojas-López A. G, Villarreal-Cervantes M. G, Rodríguez-Molina A. Surrogate indirect adaptive controller tuning based on polynomial response surface method and bioinspired optimization: Application to the brushless direct current motor controller. Expert Systems with Applications 2024; 245: 123070.
- [8] Stavros P. Adam, Stamatios-Aggelos N. Alexandropoulos, Panos M. Pardalos, and Michael N. Vrahatis (2019). No Free Lunch Theorem: A Review. Research Gate DOI: 10.1007/978-3-030-12767-1_5.
- [9] Sujin Bureerat. Mechanical System Engineering Optimization 1-2. Khon Kaen University; 2013.
- [10] Wencheng J, Trevor A. A, Christine D, Ghanashyam N, Nicolas S, Travis L. M,

et al. Machine-learning-assisted high-temperature reservoir thermal energy storage optimization, *Renewable Energy* 197 (2022) :384–397.

- [11] Ong Y. S, Zhou Z, Lim D. Curse and blessing of uncertainty in evolutionary algorithm using approximation. In 2006 IEEE international conference on evolutionary computation; 2006 July. IEEE; pp. 2928-2935.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมดชนิดติดตามแบบจำลองแบบไม่ต่อเนื่องและการ
ประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ซิงโครนัสที่คงทน

Design of a Discrete Sliding mode Model Following Controller and
Application to a Synchronous Motor Robust Position Control System

Phongsak Phakamach^{1)*} Udomvit Chaisakulkiet²⁾ and Akharakit Chaithanakulwat³⁾

^{1,2)} Rattanakosin International College of Creative Entrepreneurship,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand

³⁾ Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University, Thailand

Received: 1 August 2024

Revised: 19 December 2024

Accepted: 19 December 2024

Available online: 26 December 2024

Abstract

In this paper, a Synchronous Motor position control system using a Discrete Sliding mode Model Following Control or DSMFC is presented to achieve accurate tracking in the presence of external load disturbances and plant parameter variations. The DSMFC algorithm uses the combination of model following control and sliding mode control to improve the dynamics response for command tracking. A design procedure is developed for determining the control function, the coefficients of the switching plane and the integral control gain. The control function is derived to guarantee the existence of a sliding mode. The chattering phenomenon is significantly reduced adopting the switching gain with the know parameters of the system. A DSP-based synchronous motor position control system using the DSMFC approach is illustrated. Experimental results indicated that DSMFC system performance

with respect to the sensitivity to parameter variations is greatly reduced. Also, its can achieve a rather accurate tracking and is fairly robust to load disturbances.

Keyword: Synchronous Motor: Robust Control: Sliding Mode Control: Model Following Control

* Corresponding author e-mail: pp2552@hotmail.com, phongsak.pha@rmutr.ac.th

1. Introduction

Recently, synchronous motors have been widely used as actuators for motion control and direct-drive applications especially in hostile environments. They have many advantages include higher torque/weight ratio, high torque capability, freedom of brush maintenance, lower rotor moment of inertia, better heat dissipation, long life operation, compact structure and lower weight as compared with DC motors and permanent magnet stator DC commutator motors having same output capacity[1]. The synchronous motor is preferable for certain high performance servo applications such as machine tools, industrial robots and aerospace actuators. The proposed scheme for a synchronous position control system, as shown in Fig. 1, consists of an inner loop for inverter switching and an outer loop for generating the command input. However, The dynamic position control of servo systems with unknown external load disturbances, and plant parameter variations are very complex and highly nonlinear. Moreover, the machine parameters (resistance and inductance) and load characteristics are not exactly known, which may

vary during motor operation or processes with parametric uncertainty, where the conventional linear controller design may not assure satisfactory performances.

Variable Structure Control (VSC) or Sliding Mode Control (SMC) is invariant to system parameter variations and disturbances when the sliding mode occurs. Although the conventional VSC approach has been applied successfully in many applications [2-5], it cannot perform well in servo applications where the system is designed to track a command input. In order to improve tracking performance, the Integral Variable Structure Control or IVSC approach, presented in [6-7], combines an integral controller with the conventional VSC. The IVSC approach can eliminate the steady tracking error due to a step command input. However, IVSC yields the error when the system has to follow a changing command input, e.g., a ramp and sinusoidal inputs. Note that, this kind of input is generally encountered in servo applications. The Modified Integral Variable Structure Control or MIVSC approach, proposed in [8-9], uses a double integral action to solve this problem. Although,

the MIVSC method can give a better tracking performance than the IVSC method does at steady state, its performance during transient period needs to be improved.

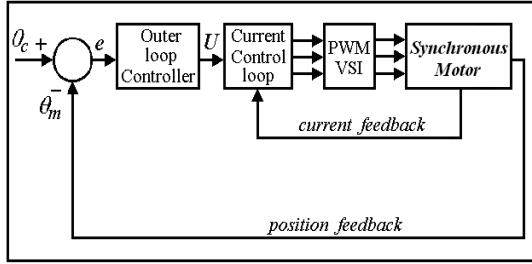


Figure 1 Block diagram of DSMFC synchronous motor position control systems.

The design and implementation of a synchronous motor position control systems using DSMFC approach is described. This approach, which is the extension of MIVSC approach and uses the feedforward path to improve the tracking performance, incorporates a model reference to improve the dynamics response for sinusoidal command tracking. The advantage of this approach is that the error trajectory in the sliding motion can be prescribed by the design. Also, it can achieve a rather accurate servo tracking and is fairly robust to plant parameter variations and external load disturbances. As a results, the tracking performance can be remarkably improved.

2. Design of DSMFC System

The structure of DSMFC system is shown in Fig. 2. It combines the conventional VSC with a double-integral compensator, a feedforward path from the input command, a reference model and a comparator.

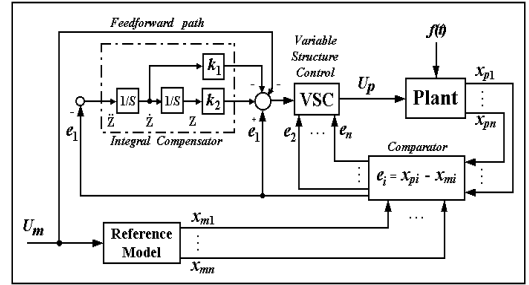


Figure 2 The structure of DSMFC system.

Let the plant be described by the following equation:

$$\dot{x}_{pi} = x_{p(i+1)}; i=1, \dots, n-1, \dot{x}_{pn} = -\sum_{i=1}^n a_{pi} x_{pi} + b_p U_p - f(t) \quad (1)$$

where a_{pi} and b_p are the plant parameters; $f(t)$ are disturbances; U_p is the control input of the plant.

The reference model is represented by

$$\dot{x}_{mi} = x_{m(i+1)}; i=1, \dots, n-1, \dot{x}_{mn} = -\sum_{i=1}^n a_{mi} x_{mi} + b_m U_m \quad (2)$$

where U_m is the input command of the system.

Defining $e_i = x_{pi} - x_{mi}$;($i=1, \dots, n$) and subtracting (2) from (1), the error differential equation is

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= e_{i+1}; i=1, \dots, n-1, \\ \dot{e}_n &= -\sum_{i=1}^n a_{pi} e_i - \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}) x_{mi} + b_m U_m - b_p U_p - f(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Using the SMFC approach [9, 14] to the error dynamics in order to synthesize the control signal, U_p and assuming the asymptotic divergence of the error to zero, the DSMFC system in Fig. 2 can be described as

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= -e_i, \dot{e}_i = e_{i+1}; i=1, \dots, n-1, \\ \dot{e}_n &= -\sum_{i=1}^n a_{pi} e_i - \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}) x_{mi} + b_m U_m - b_p U_p - f(t) \end{aligned} \quad (4)$$

where U_p is the control function.

Consider the discretization of the system given in (4). If the derivative is approximated by the forward difference as [10]

$$\dot{e}_i(t) = \frac{e_i(t+T) - e_i(t)}{T} \quad (5)$$

where T is the sampling interval, then the discretized version of the system (4) can be represented as:

$$\dot{z}(k+1) = \dot{z}(k) - T e_1(k) \quad (5a)$$

$$e_i(k+1) = e_i(k) + T e_{i+1}(k); i=1, \dots, n-1 \quad (5b)$$

$$\dot{e}_n(k+1) = e_n(k) - T \sum_{i=1}^n a_{pi} e_i - T \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}) x_{mi}(k) + T b_m U_m(k) - T b_p U_p(k) - T f(k) \quad (5c)$$

The switching function, σ is given by

$$\begin{aligned} \sigma(k) &= c_1 [e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - r(k)] + \sum_{i=2}^n c_i e_i(k) \quad (6) \\ &; C_i > 0 = \text{constant}, C_n = 1. \end{aligned}$$

In the discrete variable structure control system, the control input is computed at discrete instants and applied to the system during the sampling interval so that an ideal sliding motion

cannot be obtained [11-12]. The conditions ensuring the existence and reachability of a nonideal sliding motion are:

$$\sigma(k) \Delta \sigma(k+1) < 0 \quad (7a)$$

$$|\Delta \sigma(k+1)| < \frac{\xi}{2} \quad (7b)$$

where $\Delta \sigma(k+1) = \sigma(k+1) - \sigma(k)$; $\sigma(k)$ and ξ is a small positive number. The control function can be chosen to guarantee that the inequalities (7) are satisfied, so a sliding mode motion control within the range of ξ will appear or $\sigma(k) < \xi$.

Design of such a system involves (1) the choice of the control function $U_p(k)$ to guarantee the existence of a sliding mode control, (2) the determination of the switching function $\sigma(k)$ and the integral control gain K_i such that the system has the desired properties and (3) the elimination of chattering phenomena of the control input by using the smoothing function.

A. Choice of control function

The control signal can be determined as follows. From (5) and (6) [13], we have

$$\begin{aligned} \Delta \sigma(k+1) &= -T C_1 (K_1 \ddot{z}(k) + K_2 \dot{z}(k)) + T \sum_{i=2}^n c_{i-1} e_i \\ &\quad - \sum_{i=1}^n a_{pi} e_i(k) + \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}) x_{mi}(k) \\ &\quad - T b_m U_m(k) + T b_p U_p(k) - T f(k) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{Let } a_{pi} = a_{pi}^0 + \Delta a_{pi}; i=1, \dots, n$$

$$\text{and } b_p = b_p^0 + \Delta b_p; b_p^0 > 0, \Delta b_p > -b_p^0$$

where a_{pi}^0 and b_p^0 are nominal values;

Δa_{pi} and Δb_p are the associated variations.

Let the control function $U_p(k)$ be decomposed into

$$U_p(k) = U_{eq}(k) + U_s(k) \quad (9)$$

where the so called equivalent control $U_{eq}(k)$ is defined as the solution of (9) under the condition where there is no disturbances and no parameter variations, that is $\Delta\sigma(k+1)=0$, $f(k)=0$, $a_{pi}=a_{pi}^0$, $b_p=b_p^0$ and $U_p(k)=U_{eq}(k)$.

This condition results in

$$U_{eq}(k) = \left\{ -c_1(K_1\ddot{z}(k) + K_2\dot{z}(k)) - \sum_{i=2}^{n-1} c_{i-1}e_i(k) + \sum_{i=1}^{n-1} a_{pi}^0 e_i(k) - \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi})x_{mi}(k) + b_m U_m(k) \right\} / b_p^0 \quad (10)$$

In the sliding motion, $\sigma(k)=0$, one can obtain

$$e_n(k) = \left[-c_1[e_1(k) - K_1\dot{z}(k) - K_2z(k) - r(k)] - \sum_{i=2}^n c_i e_i(k) \right] \quad (11)$$

Substitution of (11) into (10) yields

$$U_{eq}(k) = \left\{ -c_1(K_1\ddot{z}(k) + K_2\dot{z}(k)) - T \sum_{i=2}^{n-1} c_{i-1}e_i(k) + T \sum_{i=1}^{n-1} a_{pi}^0 e_i(k) - T \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi})x_{mi}(k) + b_m U_m(k) + (c_{i-1} - a_{pn}^0)[c_1(e_1(k) - K_1\dot{z}(k) + K_2z(k) - U_m(k)) + \sum_{i=2}^{n-1} c_i e_i(k)] \right\} / b_p^0 \quad (12)$$

The function $U_s(k)$, is employed to eliminate the influence due to Δa_{pi} , Δb_p and $f(k)$ so as to guarantee the existence of a sliding mode control, is constructed as

It is required to guarantee the existence of the sliding mode. This function is constructed as

$$U_s(k) = \varphi_1(e_1(k) - K_1\dot{z}(k) - K_2z(k) - U_m(k)) + T \sum_{i=2}^n \varphi_i e_i(k) + \varphi_{n+1} \cdot \quad (13)$$

Where :

$$\varphi_1 = \begin{cases} \alpha_1 & \text{if } [e_1(k) - K_1\dot{z}(k) - K_2z(k) - U_m(k)]\sigma(k) > 0 \\ \beta_1 & \text{if } [e_1(k) - K_1\dot{z}(k) - K_2z(k) - U_m(k)]\sigma(k) < 0 \end{cases}$$

$$\varphi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } e_i\sigma(k) > 0 \\ \beta_i & \text{if } e_i\sigma(k) < 0 \end{cases}, i = 2, \dots, n \text{ and}$$

$$\varphi_{n+1} = \begin{cases} \alpha_{n+1} & \text{if } \sigma(k) > 0 \\ \beta_{n+1} & \text{if } \sigma(k) < 0 \end{cases}.$$

Substitute (7) and (9) into (6), to obtain

$$\Delta\sigma(k+1)\sigma(k) = T \{ [-\Delta a_{p1} + a_{p1}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_1(c_{n-1} - a_{pn}^0)(1 + \Delta b_p / b_p^0) + b_p \varphi_1] (e_1(k) - K_1\dot{z}(k) - K_2z(k) - U_m(k))\sigma(k) + \sum_{i=2}^{n-1} \{ [-\Delta a_{pi} + a_{pi}^0 \Delta b_p / b_p^0 - c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 + c_i(c_{n-1} - a_{pn}^0)(1 + \Delta b_p / b_p^0) + b_p \varphi_i] e_i(k)\sigma(k) \} + [-\Delta a_{pn} + (c_{n-1} - a_{pn}^0) + b_p \varphi_n] e_n\sigma(k) + [N(k) + b_p \varphi_{n+1}]\sigma(k) \} \quad (14)$$

Where

$$N = -(K_1\dot{z}(k) + K_2z(k))(\Delta a_{p1} - a_{p1}^0 \Delta b_p / b_p^0) + \Delta b_p / b_p^0 [c_1(K_1\dot{z}(k) + K_2z(k)) + \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}^0)x_{mi}(k) + b_m U_m(k)] \Delta b_p / b_p^0 - f(k).$$

In order for (7) to be satisfied, the following conditions must be met,

$$\varphi_i = \begin{cases} \alpha_i & \langle \varphi L_i = \inf[\Delta a_{pi} - a_{pi}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0] \\ & - c_i(c_{n-1} - a_{pn}^0)(1 + \Delta b_p / b_p^0) / b_p \\ \beta_i & \rangle \varphi U_i = \sup[\Delta a_{pi} - a_{pi}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 \\ & - c_i(c_{n-1} - a_{pn}^0)(1 + \Delta b_p / b_p^0) / b_p \end{cases} \quad (15a)$$

where $i=1, \dots, n-1$, $c_0 = 0$

$$\varphi_n = \begin{cases} \alpha_n & \langle \varphi L_i = \inf[\Delta a_{pn} + a_{pn}^0 - c_{n-1}] / b_p \\ \beta_n & \rangle \varphi U_i = \sup[\Delta a_{pn} + a_{pn}^0 - c_{n-1}] / b_p \end{cases} \quad (15b)$$

$$\text{and } \varphi_{n+1} = \begin{cases} \alpha_{n+1} & \langle \varphi L_{(n+1)} = \inf[-N(k)] / b_p \\ \beta_{n+1} & \rangle \varphi U_{(n+1)} = \sup[-N(k)] / b_p \end{cases} \quad (15c)$$

For satisfying (7), if the sampling interval T is enough small, one can be obtain:

$$L_1 \langle \varphi_1 \rangle M_1, \quad L_i \langle \varphi_i \rangle M_i \quad ; i = 2, \dots, n-1 \quad (16a)$$

$$L_n \langle \varphi_n \rangle M_n, \quad L_{n+1} \langle \varphi_{n+1} \rangle M_{n+1} \quad (16b)$$

where:

$$\begin{aligned} M_1 &= \inf \left[\Delta a_{p1} - a_{p1}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 - c_1 (c_{n-1} - a_{pn}^0) (1 + \Delta b_p / b_p^0) \right. \\ &\quad \left. + \gamma_1 / T [e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - U_m(k)] / b_p \right] \\ L_1 &= \sup \left[\Delta a_{p1} - a_{p1}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 - c_1 (c_{n-1} - a_{pn}^0) (1 + \Delta b_p / b_p^0) \right. \\ &\quad \left. - \gamma_1 / T [e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - U_m(k)] / b_p \right] \\ M_i &= \inf \left[\Delta a_{pi} - a_{pi}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 - c_i (c_{n-1} - a_{pn}^0) (1 + \Delta b_p / b_p^0) \right. \\ &\quad \left. + \gamma_i / T [x_i(k)] / b_p \right] \\ L_i &= \sup \left[\Delta a_{pi} - a_{pi}^0 \Delta b_p / b_p^0 + c_{i-1} \Delta b_p / b_p^0 - c_i (c_{n-1} - a_{pn}^0) (1 + \Delta b_p / b_p^0) \right. \\ &\quad \left. - \gamma_i / T [x_i(k)] / b_p \right] \\ M_n &= \inf \left[\Delta a_{pn} - a_{pn}^0 - c_{n-1} + \gamma_n / T [e_n(k)] / b_p \right] \\ L_n &= \sup \left[\Delta a_{pn} - a_{pn}^0 - c_{n-1} - \gamma_n / T [e_n(k)] / b_p \right] \\ M_{n+1} &= \inf [N(k) + \gamma_{n+1} / T] / b_p \quad \text{and} \\ L_{n+1} &= \sup [N(k) - \gamma_{n+1} / T] / b_p \end{aligned}$$

in which $\gamma_i \quad ; i=1, \dots, n+1$, are positive constants and

$$\gamma_1 + \dots + \gamma_{n+1} < \xi / 2.$$

From (15) and (16), if the T is enough small, one can obtain the bound of α_i and β_i as :

$$L_i < \alpha_i < \varphi L_i \quad \varphi U_i < \beta_i < M_i \quad , i = 1, \dots, n+1. \quad (17)$$

If $\varphi_i, i=1, \dots, n+1$, are chosen as $\varphi_i < \alpha_i < -\beta_i$

finally, the control can be represented as

$$\begin{aligned} U_p &= \left\{ -c_1 (K_1 \dot{z}(k) + K_2 z(k)) - \sum_{i=2}^{n-1} c_{i-1} e_i(k) + \sum_{i=1}^{n-1} a_{pi}^0 e_i(k) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}^0) x_{mi}(k) + b_m U_m(k) + (c_{n-1} - a_{pn}^0) \right. \\ &\quad \left. [c_1 (e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - U_m(k)) + \sum_{i=2}^{n-1} c_i e_i(k)] \right\} / b_p^0 \\ &\quad + (\varphi_1 |e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - U_m(k)| + \sum_{i=2}^n \varphi_i |e_i(k)| \\ &\quad + \varphi_{n+1}) \text{sign}(\sigma(k)). \end{aligned} \quad (18)$$

From (17), the upper and low bounds of the φ_i , can be obtain

$$\hat{L}_i < \hat{\varphi}_i < \hat{M}_i \quad , i=1, \dots, n+1 \quad (19)$$

Where $\hat{M}_i = -\max(|\varphi L_i|, |\varphi U_i|)$ and $\hat{L}_i = -\max(|L_i|, |M_i|)$

B. Determination of switching plane and integral control gain

In the above subsection it has been proved that if the solution of the ideal sliding motion is asymptotically stable, it will close to the solution of the non-ideal sliding within the range of ξ . Thus one can choose the switching plane and integral control gain of the basis of the ideal sliding motion. While in the ideal sliding motion, the system can described by (4) can be reduced to [14-15]:

$$\dot{z}(k+1) = \dot{z}(k) - T e_1(k) \quad (20a)$$

$$e_i(k+1) = e_i(k) + T e_{i+1}(k) \quad ; i=1, \dots, n-2 \quad (20b)$$

$$\dot{e}_n(k+1) = e_{n-1}(k) - T [C_1 K_1 \dot{z}(k) - C_2 K_2 z(k)] - \sum_{i=1}^n a_{pi} e_i(k) \quad (20c)$$

The characteristic equation when the system is on the sliding surface can be shown as

$$H(s) = \frac{E_1(z)}{U_m(z)} = \frac{\left(\frac{z-1}{T}\right)^2 c_1}{\left(\frac{z-1}{T}\right)^n + c_{n-1} \left(\frac{z-1}{T}\right)^{n-1} + \dots + c_1 K_1 \left(\frac{z-1}{T}\right) + c_1 K_2}. \quad (21)$$

The characteristic equation of the system (21) is

$$\left(\frac{z-1}{T}\right)^n + c_{n-1} \left(\frac{z-1}{T}\right)^{n-1} + \dots + c_1 K_1 \left(\frac{z-1}{T}\right) + c_1 K_2 = 0 \quad (22)$$

Since this characteristic equation is independent of the plant parameter, the DSMFC approach is robust to plant parameter variations. Further, one can choose the coefficients of the switching function and the integral control gain by the pole assignment technique such that this sliding motion has desirable properties [13]. Let $z-1/T = \eta$. Then (22) can be rewritten as

$$\eta^n + C_{n-1}\eta^{n-1} + \dots + C_1K_1\eta + C_2K_2 = 0 \quad (23)$$

The transient response of the system can be determined by suitably selecting the poles of the transfer function (21).

$$\text{Let } \eta^n + \alpha_1\eta^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1}\eta + \alpha_n = 0 \quad (24)$$

be the desired characteristic equation (closed-loop poles), the coefficient C_1, C_2 and K_1, K_2 can be obtained by

$$C_{n-1} = \alpha_1, C_1 = \alpha_{n-2}, K_1 = \alpha_{n-1}/C_1 \text{ and } K_2 = \alpha_n/C_1.$$

C. Chattering Considerations

Normally, the sign function $\text{sign}(\sigma)$ given by (18), will give rise to chattering in the control signal. In order to reduce the chattering, the sign function can be replaced by the continuous function [13], given by

$$M_\delta(\sigma) = \frac{\sigma(k)}{|\sigma(k)| + \delta_0 + \delta_1|\dot{z}(k)|} \quad (25)$$

where $\delta = \delta_0 + \delta_1|\dot{z}(k)|$; δ_0 and δ_1 are positive constants.

3. Dynamics modeling of synchronous motor

The synchronous motor considered is a 3-phase permanent magnet synchronous motor with sinusoidal back electromotive force (EMF) as shown in Fig. 3. The stator windings are identical, displaced by 120 degrees and sinusoidally distributed. The voltage equation for the stator windings can be expressed as

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \omega_r k_e \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (26)$$

where

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} is the applied stator voltage;

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} is the applied stator currents;

R_s is the resistance of each stator winding;

L_s is the inductance of the stator winding;

ω_r is the electrical motor angular velocity;

θ_r is the electrical rotor angular

displacement and

k_e is the voltage constant.

The electromagnetic torque can be expressed as

$$T_e = k_t \left[i_{as} \sin(\theta_r) + i_{bs} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cs} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (27)$$

where k_t is the current constant and

P is number of pole.

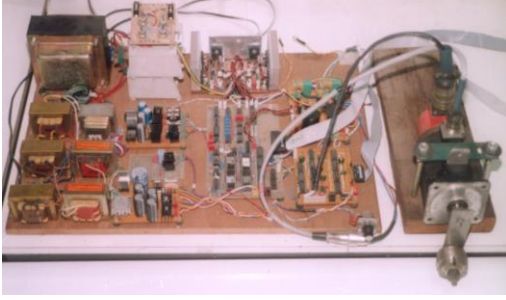


Figure 6 The synchronous motor with DSMFC.

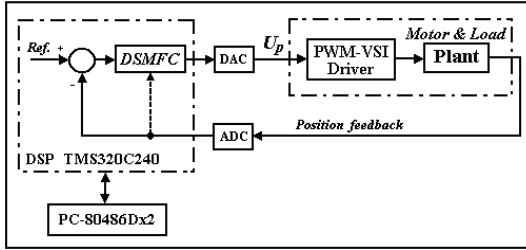


Figure 7 The DSMFC for the synchronous motor system.

The simplified dynamic model of the synchronous motor for position control can be described as

$$\dot{x}_{p1} = x_{p2}, \quad \dot{x}_{p2} = x_{p3}, \quad \dot{x}_{p3} = -a_{p1}x_{p1} - a_{p2}x_{p2} - a_{p3}x_{p3} + b_p U_p - f(t) \quad (29)$$

$$\text{where } a_{p1} = 0, a_{p2} = \frac{(R_s + g_I k_A) B_m + \frac{3}{4} P k_t k_e}{L_s J_m},$$

$$a_{p3} = \frac{(R_s + g_I k_A)}{L_s} + \frac{B_m}{J_m}, \quad b_p = \frac{(\frac{3}{2} g_I k_A k_t)}{L_s J_m} \text{ and}$$

$$f(t) = \frac{(R_s + g_I k_A)}{J_m L_s} T_L + \frac{1}{J_m} \dot{T}_L \text{ and where}$$

$x_{p1} = \theta_m$ is the mechanical angular angle of the rotor;

$U_m = \theta_c$ is desired position and

U_p is the control input of the plant.

The reference model is chosen as

$$\dot{x}_{m1} = x_{m2}, \quad \dot{x}_{m2} = x_{m3}, \quad \dot{x}_{m3} = -a_{m1}x_{m1} - a_{m2}x_{m2} - a_{m3}x_{m3} + b_m U_m. \quad (30)$$

Defining $e_i = x_{pi} - x_{mi}$;($i=1,2,3$), the DSMFC system can be represented as

$$\dot{z}(k+1) = \dot{z}(k) - T e_1(k) \quad (31a)$$

$$e_2(k+1) = e_2(k) + T e_3(k) \quad ; i=1, \dots, n-1 \quad (31b)$$

$$e_3(k+1) = e_3(k) - T \sum_{i=1}^n a_{pi} e_i(k) - T \sum_{i=1}^n (a_{mi} - a_{pi}) x_{mi}(k) + T b_m U_m(k) - T b_p U_p(k) - T f(k) \quad (31c)$$

Following the design procedure we have the control law to implement as

$$U_p(k) = \left\{ c_1 (K_1 \dot{z}(k) + K_2 z(k)) + a_{p1}^0 e_1(k) + a_{p2}^0 e_2(k) - [(a_{m1} - a_{p1}^0) x_{m1}(k) + (a_{m2} - a_{p2}^0) x_{m2}(k) + (a_{m3} - a_{p3}^0) x_{m3}(k) + b_m U_m] \right. \\ \left. + (c_2 - a_{p3}^0) [c_1 (e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - r(k)) + c_2 e_2(k)] / b^0 + (\Psi_1 |e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - r(k)| + \Psi_2 |e_2(k)| + \Psi_3 |e_3(k)| + \Psi_4) M_\delta(\sigma) \right\} \quad (32)$$

The switching function, $\sigma(k)$ from (6), is given by

$$\sigma(k) = c_1 (e_1(k) - K_1 \dot{z}(k) - K_2 z(k) - r(k)) + c_2 e_2(k) + e_3(k) \quad (33)$$

Table 1.

Parameter of the synchronous motor

Parameter	Value	Dimension
P	4	<i>pole</i>
R_s	0.8	Ω
L_s	0.005	H
K_A	6	<i>dimensionless</i>
g_I	4.5	<i>dimensionless</i>
B_m	0.000	$N\cdot m/s$
J_m	0.00016	$Kg\cdot m^2$
K_e	0.178	$V\cdot s/rad$
K_t	0.182	$N\cdot m/A$

Table 2.

Parameters of the DSMFC controller

Parameter	Value
λ_1, λ_2	$-20.14 \pm 32.78i$
λ_3, λ_4	-32.58, -18.95
C_1, C_2	1,895.48, 125.27
K_1, K_2	42.38, 84.63
φ_1, φ_2	-1, -0.1
φ_3, φ_4	-0.0005, -0.001
a_{m1}, a_{m2}	15,000, 1,320
a_{m3}, b_m	52, 15,000
a_{p2}^0, a_{p3}^0	13,725.26, 2,684
b_p^0	63,426.97
δ_0, δ_1	1, 150

5. Experimental results and discussion

The experimental results of the dynamic response are plotted in Fig. 8 and Fig. 9. In order to evaluate the tracking performance of the DSMFC approach for both steady and transient periods, a sinusoidal command is first introduced for certain period of time before it is changed abruptly to a constant value. In addition the results are compared with those obtained from MIVSC and IVSC approaches under the same testing conditions. It is clear from the figures that the DSMFC can follow the command input extremely well during steady state as well as transient periods. That is, it converges very fast to zero but the other give rise to steady state errors. Although MIVSC seems to track well during the steady state of the sinusoidal command input, it gives a noticeable overshoot

an tracking error during the input change. Among them, IVSC performs poorly, it gives a substantially sustained tracking error. Furthermore, experimental results demonstrate that the developed DSMFC scheme has a much better performance related to reduction in steady state error, faster settling time, smaller overshoot in the position response and much better disturbance rejection capabilities.

6. Conclusions

In this paper, the DSMFC approach is explained and presented. It exhibits good feature of the conventional IVSC and MIVSC controller, such as better performance to reduction in steady state error, faster settling time, smaller overshoot in the position response, robustness in the face of model error and parameter variations. The application of DSMFC to the synchronous motor position control system has illustrated that the DSMFC method can improve the tracking performance by 72% and 86% when compared to the MIVSC and IVSC approaches, respectively.

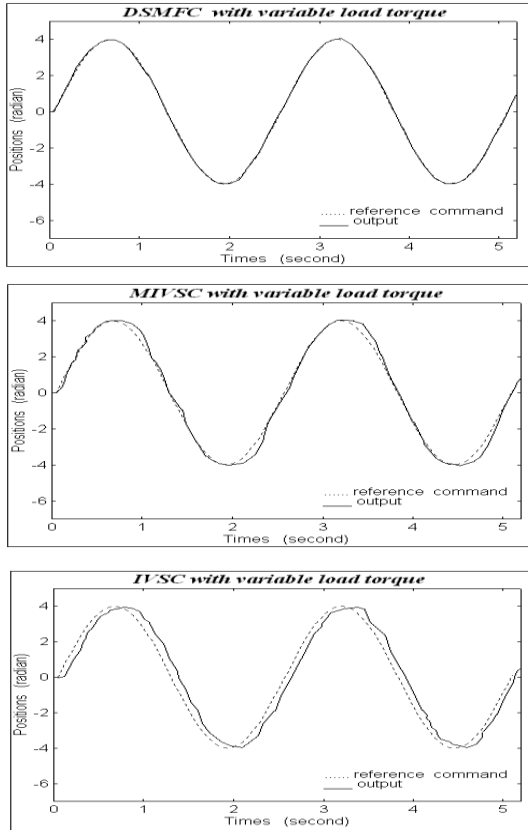


Figure 8 Comparison of ramp position tracking

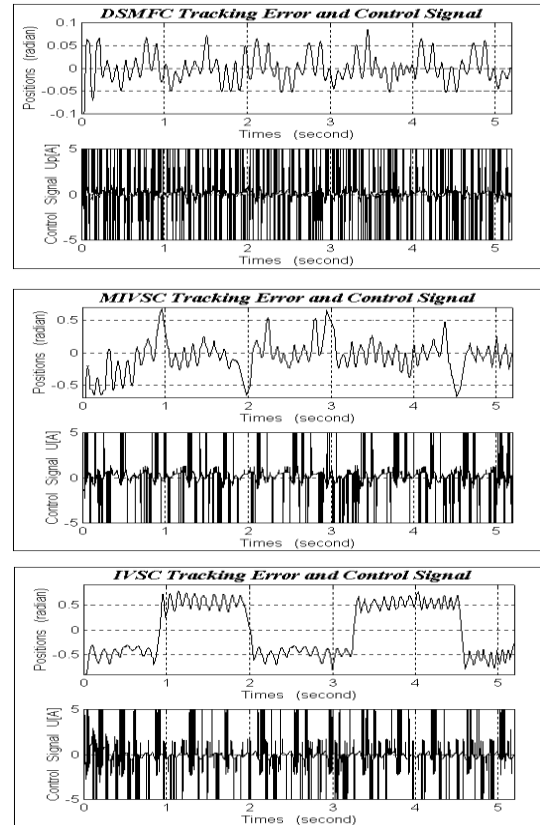


Figure 9 Comparison of position tracking errors and control signal.

7. Acknowledgements

Authors of the paper would like to acknowledge the support of Rattanakosin International College of Creative Entrepreneurship, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand.

8. References

- [1] Dote Y, Kinoshita S. Brushless Servomotors Fundamental and Applications. Clarendon Press Oxford: 1990.
- [2] Utkin VI, Guldner J, Shi J. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. Taylor & Francis: London; 1999.

- [3] John HY, Weibing G, James CH. Variable Structure Control. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 1993; 40(1): 1-22.
- [4] Komurcugil H, Biricik S, Bayhan S, Zhang Z. Sliding Mode Control: Overview of Its Applications in Power Converters. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2021; 15(1): 40-49.
- [5] Wu L, Liu J, Vazquez S, Mazumder S.K. Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2022; 9(3): 392-406.
- [6] Chern TL, Wong J. DSP-Based Integral Variable Structure Control for DC Motor Servo Drivers. IEE Proc. Control Theory Applications. 1995; 142(5): 444-50.
- [7] Chern TL, Chang J. DSP-Based Induction Motor Drivers Using Integral Variable Structure Model Following Control Approach. IEEE International Electric Machine and Drives Conference Record. 1997; 20: 9.1-9.3.
- [8] Nungam S, Daungkua P. Modified Integral Variable Structure Control for Brushless DC Servomotor. 21st Electrical Engineering Conference, Thailand. Nov. 1998; 138-41.
- [9] Worapongpat N, Phakamach P, Chaisakulkiet U. A Flexible Arm Manipulator Control System Using Modified Discrete Sliding mode Model Following Controller with Sinusoidal Command Input. UTK Journal. 2020; 14(1): 14-22.
- [10] Philips CI, Nagle HT. Digital Control System Analysis and Design. Pearson; 4th edition, International Edition: 2014.
- [11] Joseph E. Comparison of Sliding Mode and Proportional Integral Control for Brushless DC Motor. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2016; 5(8): 372-378.
- [12] Dursun EH, Durdu A. Speed Control of a DC Motor with Variable Load Using Sliding Mode Control. International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2016; 8(30): 219-226.
- [13] Phakamach P. A Variable Structure Control Based on Fuzzy Logic Algorithm with an Integral Compensation for a DC Servomotor Drives. The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong. 2007.

- [14] Phakamach P. Development of a Discrete Sliding mode Model Following Control for an Automatic Voltage Regulator Control Systems. International Congress on Natural Sciences and Engineering (ICNSE'2014), Kyoto, Japan. 2014.
- [15] Phakamach P, Chaisakulkiet U, Wachirawongpaisarn S. Robust Tracking Control Scheme for a Ship Maneuvering with Uncertain Dynamics Using Modified Fuzzy Logic Variable Structure Controller Approach. Farm Engineering and Automation Technology Journal. 2022; 9(1): 27-38.



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การปรับเปลี่ยนระบบควบคุมอัตโนมัติจากพีแอลซีราคาประหยัดเทียบเคียง Mitsubishi FX3U เป็น Siemens LOGO!: กรณีศึกษาระบบสายพานบรรจุขวด
Replacing a Affordable Mitsubishi FX3U-Compatible PLC Control System with Siemens LOGO!: A Case Study of a Bottle Packaging Conveyor System

ชัชชล เปรมชัยสวัสดิ์¹⁾ ณรงค์ บุญเสนอ¹⁾ กฤช ตราชู¹⁾Shutchon Premchaisawatt¹⁾ Narong Boonsaner¹⁾ and Krit Tashoo¹⁾¹⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น¹⁾ Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Education,
Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

Received: 1 December 2024

Revised: 22 December 2024

Accepted: 22 December 2024

Available online: 26 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการปรับเปลี่ยนระบบควบคุมอัตโนมัติในกระบวนการบรรจุน้ำจากโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) ราคาประหยัด LE3U-48MR6AD2DA ที่เทียบเคียง Mitsubishi FX3U ไปเป็น Siemens LOGO! โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ความสามารถ และความคุ้มค่าระหว่างระบบควบคุมทั้งสองแบบ การศึกษาเริ่มจากการเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบเดิม วิเคราะห์ขั้นตอนการทำงาน และออกแบบแผนภูมิสถานะใหม่ สำหรับ Siemens LOGO! ผู้วิจัยต้องใช้โมดูลขยาย DM16 24R 8DI/8RO เพื่อรองรับจำนวนอินพุตและเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้พัฒนาส่วนต่อประสานผู้ใช้ (HMI) โดยใช้ SK-102QS-G เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมและติดตามระบบผลการศึกษพบว่า Siemens LOGO! มีความสามารถในการขยายระบบ การเชื่อมต่อ และการใช้งานที่ยืดหยุ่นกว่า PLC ราคาประหยัด แต่มีข้อเสียคือมีราคาที่สูงกว่าและใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบนานขึ้น ข้อดีที่สำคัญของ Siemens LOGO! คือ การออกแบบที่

กระทัดรัด การติดตั้งง่าย รองรับการสื่อสารผ่าน Ethernet และมีซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า Siemens LOGO! เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติขนาดเล็กถึงกลาง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่ต้องการความยืดหยุ่นและง่ายต่อการพัฒนา อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ควรคำนึงถึงความต้องการเฉพาะของแต่ละระบบ บงบประมาณ และความซับซ้อนของกระบวนการควบคุม

คำสำคัญ: การเขียนโปรแกรมระบบอัตโนมัติ แผนภูมิสถานะเครื่องจักร LOGO! พีแอลซี

Abstract

This research aims to study the adaptation of an automatic control system for water packaging processes from an affordable Mitsubishi FX3U-Compatible PLC (LE3U-48MR6AD2DA) to a Siemens LOGO! system. The primary objectives were to compare the performance, capabilities, and cost-effectiveness of both control systems. The study began by collecting input and output data from the original system, analyzing its operational steps, and designing a new state diagram. For the Siemens LOGO! implementation, the researchers utilized a DM16 24R 8DI/8RO expansion module to accommodate the increased input and output requirements. Additionally, they developed a Human-Machine Interface (HMI) using an SK-102QS-G to enhance system control and monitoring capabilities. The research findings revealed that the Siemens LOGO! offered superior system expansion, connectivity, and operational flexibility compared to the low-cost PLC. However, this came with some trade-offs, including a higher purchase price and longer system initialization time. The key advantages of the Siemens LOGO! included its compact design, easy installation, Ethernet communication support, and user-friendly software. The research demonstrates that Siemens LOGO! presents an attractive option for small to medium-sized automatic control systems, particularly in industries requiring flexibility and ease of development. Nevertheless, system selection should carefully consider specific system requirements, budget constraints, and the complexity of the control process.

Keywords: Automation system programming: State machine diagram: LOGO!: PLC:

*ติดต่อ: shutchon.pr@rmuti.ac.th

1. บทนำ

การพัฒนาทางประวัติศาสตร์: PLC ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในช่วงปลายทศวรรษ 1960 เพื่อแทนที่ระบบ

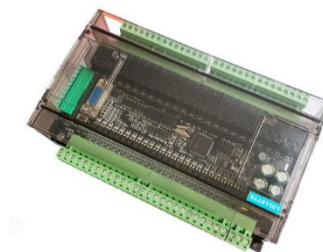
ควบคุมแบบรีเลย์ ซึ่งให้ความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือมากขึ้นสำหรับการควบคุมอัตโนมัติในอุตสาหกรรมจีน และประเทศไทย [1] ตามลำดับ

การใช้งาน: PLC ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม [2] เช่น การผลิต การแปรรูปอาหาร และการควบคุมการเคลื่อนไหว สิ่งพวกนี้มีความสำคัญต่อการควบคุมสภาพแวดล้อม การทดสอบอัตโนมัติ และการทำงานของเครื่องจักร PLC สมัยใหม่รองรับภาษาการเขียนโปรแกรมหลายภาษา รวมถึง ladder logic ซึ่งเป็นภาษาที่โดดเด่นที่สุดสำหรับการควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีพีเจอาร์ขั้นสูงเช่นการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์และการบูรณาการกับระบบควบคุมอุตสาหกรรมอื่นๆ การพัฒนาของ PLC มีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับความก้าวหน้าใน Industry 4.0 [3] ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการผลิตอัจฉริยะและการควบคุมอัตโนมัติในอุตสาหกรรม [4] รวมถึงการใช้ IoT, AI และการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอุตสาหกรรม [5] การศึกษาล่าสุดเน้นถึงความสำคัญของ PLC ในการพัฒนาความยั่งยืนในอุตสาหกรรม และช่วยให้อุตสาหกรรมเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในตลาดและบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนผ่านการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ

ในประเทศไทยได้มีการใช้ PLC อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็น Mitsubishi, Siemens หรือ Omron ที่มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง เช่น [6] ทำสมาร์ตฟาร์มด้วย PLC [7] การใช้อุตสาหกรรมเลี้ยงกุ้ง [8] การใช้ในการควบคุมการถึงนมในอุตสาหกรรมการผลิตนม [9] ใช้ควบคุมเครื่องบรรจุหนังปลากะพงปูลงรส หรือแม้แต่ในงานวิจัยด้านอื่น ปัจจุบันมีงานวิจัยนำ PLC มาใช้ในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติหลากหลายงาน [10] ใช้ PLC ในการ

ควบคุมหุ่นยนต์จับชิ้นงาน [11] ใช้ PLC ควบคุมการอัดก้อนวัสดุเพาะเห็ดฟาง หรือ [12] จะเป็นงานวิจัยที่แนะนำแนวทางในการเขียนโปรแกรม PLC เพื่อให้พัฒนาโปรแกรมได้ง่ายขึ้น ซึ่งมักจะเป็น PLC ราคาประหยัด

แม้กระทั่งโรงงานขนาดเล็กก็มักจะใช้ PLC ในการควบคุมเครื่องจักร [13] เช่น ระบบรอกน้ำ เครื่องตัดหรือบดเป็นต้น ซึ่งงานเหล่านี้มักจะใช้ PLC ที่มีราคาประหยัดและเป็นของเทียบเคียง (compatible) เช่น PLC ของ Lollette เช่น เทียบเท่า Mitsubishi FX3U [14] ดังรูปที่ 1 ซึ่งยังเป็นเทคโนโลยีเก่า ทำให้มีข้อจำกัดในการพัฒนาระบบ เช่น ระบบการสั่งการและแสดงผลผ่าน HMI ที่ทำได้ยากผ่าน ModbusRTU [15] และอีกปัจจัยคือความเสถียรและความน่าเชื่อถือที่เป็นรองบริษัทใหญ่



รูปที่ 1 Lollette PLC ที่เทียบเคียง Mitsubishi FX3U

โดยปัจจุบันบริษัท Siemens ได้ออก PLC รุ่น LOGO! [16] มาเพื่อใช้กับระบบควบคุมอัตโนมัติขนาดเล็ก ซึ่งมีราคาประหยัดกว่าตระกูล S7-1200 อยู่มาก อีกทั้งค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ก็ถูกกว่าตระกูล TIA Portal เช่นกัน ทำให้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือการทำงานวิจัย มีงานวิจัยหลากหลายที่ทำการทดลองกับ LOGO! เพื่อสนับสนุนศักยภาพของ LOGO! เช่น ทำการเปรียบเทียบการใช้ LOGO! กับ

industrial timer [17] พบว่า สามารถใช้แทน industrial timer ได้หลากหลายชนิด ด้วยการเขียนควบคุมที่ง่ายกว่า [18] โรงบำบัดน้ำ แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ LOGO! ในการควบคุมเครื่องสูบน้ำในระบบชลประทานอัจฉริยะ โดยแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถจัดการการกระจายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [19] LOGO! ยังถูกใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบทำความร้อน การระบายอากาศ และปรับอากาศ (HVAC) ซึ่งการออกแบบแบบมอดูลาร์ช่วยให้สามารถรวมเข้ากับส่วนประกอบการควบคุมอื่นๆ เพื่อให้ได้การควบคุมอากาศที่มีประสิทธิภาพด้านการจัดการพลังงาน [20] ใช้ Siemens LOGO! เพื่อทำให้ระบบสายพานลำเลียงขนาดเล็กเป็นอัตโนมัติ โดย PLC รับผิดชอบในการตรวจสอบเงื่อนไขการเริ่มต้นและหยุดการทำงาน รวมถึงการตรวจจับข้อผิดพลาดภายในระบบ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ล้วนใช้ LOGO! ในเป็นระบบควบคุม

2. Siemens LOGO!

ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 ในบรรดา ระบบ PLC ต่างๆ ซีรีส์ Siemens LOGO! ได้รับความนิยม เนื่องจากการออกแบบที่กะทัดรัด อินเทอร์เฟซที่ใช้งานง่าย และความคุ้มค่า จากเดิมที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานอัตโนมัติขนาดเล็ก ซีรีส์ LOGO! ได้ขยายความสามารถเพื่อตอบสนองความต้องการที่หลากหลายในอุตสาหกรรม รวมถึงการบูรณาการ IoT และการเชื่อมต่อกับคลาวด์ [16] Siemens ได้เปิดตัว LOGO! ในปี 1996 เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานง่ายแต่มีเสถียรภาพสำหรับโครงการอัตโนมัติขนาดเล็ก การ

ออกแบบดั้งเดิมมีเป้าหมายเพื่อแทนที่ระบบรีเลย์และตัวจับเวลาทั่วไป และมีฟังก์ชันการทำงานของลอจิกที่ตั้งโปรแกรมได้ ผ่านโปรแกรม LOGO! Soft Comfort ด้วยการใช้เวลาในการเรียนรู้ระยะสั้น [21] PLCs รุ่นแรกของ LOGO! มีฟังก์ชันลอจิกพื้นฐานและจอแสดงผลในตัวสำหรับการตั้งค่าและการตรวจสอบ [13] รุ่นต่อมาได้เห็นความอัปเดตอย่างต่อเนื่อง เช่น LOGO! 6 (2004): เพิ่มความจุหน่วยความจำและการสื่อสาร Ethernet ในตัว [21] ใน LOGO! 8 (2014): มีเริ่มใส่ความสามารถของเว็บเซิร์ฟเวอร์และตัวเลือกเครือข่ายที่ขยายออกไป รวมถึงการทำงานรวมเข้ากับ Siemens TIA Portal [3] ในปี 2020: ได้ทำการรองรับแอปพลิเคชัน IoT ผ่านการเชื่อมต่อกับคลาวด์และโปรโตคอล MQTT สอดคล้องกับมาตรฐาน Industry 4.0 [16] ในรุ่น 8.4

โดยสามารถสรุปข้อดีของ Siemens LOGO! เป็นข้อๆ ได้ดังนี้ :

1. ขนาดกะทัดรัด Siemens LOGO! มีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2 ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย เหมาะสำหรับงานระบบควบคุมในอาคารหรืองานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
2. การติดตั้งง่าย ออกแบบให้ใช้งานง่ายด้วยระบบ Plug-and-Play พร้อมหน้าจอสถิติแสดงผล (HMI) ในตัว
3. โปรแกรมได้หลากหลาย รองรับการเขียนโปรแกรมสำหรับการควบคุมหลากหลายประเภท เช่น ระบบแสงสว่าง การควบคุมมอเตอร์ และระบบจัดการพลังงาน

4. ซอฟต์แวร์ LOGO! Soft Comfort มีโปรแกรมออกแบบการควบคุมที่ใช้งานง่ายผ่านฟังก์ชันลาก-วาง (Drag-and-Drop)
5. รองรับการสื่อสาร มีฟังก์ชันรองรับการสื่อสารผ่าน Ethernet และเชื่อมต่อกับระบบอื่นได้ เช่น Modbus
6. การประหยัดพลังงาน LOGO! ถูกออกแบบให้ใช้พลังงานต่ำ เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความคุ้มค่า
7. ความยืดหยุ่นสูง มีตัวเลือกโมดูลเสริม เช่น โมดูลขยาย I/O และโมดูลสื่อสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ดังรูปที่ 2
8. ราคาประหยัด LOGO! เป็นโซลูชัน PLC ที่มีราคาคุ้มค่าเมื่อเทียบกับระบบควบคุมอัตโนมัติขนาดใหญ่
9. เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น ระบบมีความเป็นมิตรต่อผู้ใช้งานใหม่ สามารถเรียนรู้การโปรแกรมและใช้งานได้อย่างรวดเร็ว
10. รองรับการทำงานระยะไกล รองรับการควบคุมและตรวจสอบระบบจากระยะไกลผ่านอุปกรณ์สมาร์ท เช่น มือถือหรือคอมพิวเตอร์.

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงอยากจะนำเสนอขั้นตอนการปรับเปลี่ยนจากระบบกรอกน้ำเดิมที่ใช้ PLC ที่เทียบเท่ากับ FX3U เปลี่ยนเป็น Siemens LOGO! เพื่อปรับปรุงให้ระบบมีความทันสมัยมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงอยากจะเสนอแนวทางการปรับเปลี่ยนจากระบบเดิมที่ใช้ PLC ราคาประหยัดเป็น Siemens LOGO! พร้อมทั้งการเชื่อมต่อผ่าน HMI โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระบบกรอกน้ำจากเดิมใช้ PLC ราคาประหยัดมาเป็น LOGO! และสรุปผลเปรียบเทียบข้อดี

และข้อเสียในเกณฑ์ด้านราคา ด้านเทคโนโลยี และด้านความสามารถในการขยายระบบ



รูปที่ 2 Siemens LOGO! ต่อส่วนขยายเพื่อเพิ่มความสามารถ

3. ระบบบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง

เป็นชุดสาธิตการบรรจุน้ำลงในขวด 50 ml. และปิดฝาขวด โดยเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียงขับเคลื่อนด้วย มอเตอร์ AC และบรรจุน้ำด้วยกระบอกลม ที่เดิมควบคุมด้วย Lollette LE3U-48MR6AD2DA ดังรูปที่ 3 โดยมีอุปกรณ์อินพุตดังตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ระบบบรรจุน้ำที่ควบคุมด้วย PLC

ตารางที่ 1

อุปกรณ์อินพุตในระบบ

ลำดับ	อุปกรณ์
1	ปุ่ม stop (bt_stop)
2	ปุ่ม start (bt_start)
3	ปุ่ม reset (bt_reset)
4	สวิตช์ Emergency (bt_emg)
5	เซนเซอร์กันขวด (sn_1)
6	เซนเซอร์จับขวด (sn_2)
7	เซนเซอร์หมุนฝา (sn_3)
8	เซนเซอร์ปลายสายพาน (sn_4)

ตารางที่ 2

อุปกรณ์เอาต์พุตในระบบ

ลำดับ	อุปกรณ์
1	สายพาน (mt_conv)
2	ที่กันขวด (bottle_stopper)
3	ที่จับขวด (bottle_holder)
4	ที่กรอกน้ำ (bottle_filler)
5	ที่หมุนปิดฝา (bottle_closecap)
6	หลอดสีแดง (สถานะหยุดทำงาน) (pl_red)
7	หลอดสีเหลือง (สถานะรีเซ็ต) (pl_yellow)
8	หลอดสีเขียว (สถานะทำงาน) (pl_green)

4. แนวทางการปรับเปลี่ยน

เนื่องจากเป็นพีแอลซีคนละบริษัทและใช้ซอฟต์แวร์ในการเขียนโปรแกรมไม่เหมือนกัน ทางผู้ทำวิจัยได้เสนอแนวทางการปรับเปลี่ยนดังนี้:

- เก็บข้อมูลของ I/O ทั้งหมด เพื่อนำไปเลือกอุปกรณ์เพื่อขยายของ LOGO
- ศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร
- จากขั้นตอนที่ได้ นำไปเขียนแผนภูมิสถานะเครื่องจักร
- นำมาเขียนโปรแกรมควบคุม
- ทดสอบระบบ
- พัฒนาส่วนเสริม HMI
- ทดสอบทั้งหมด

5. ผลของการปรับเปลี่ยน

จากตารางที่แสดงอินพุตเอาต์พุต พบว่ามีอินพุตจำนวน 8 ตัวและเอาต์พุตจำนวน 9 ตัวซึ่งเป็นดิจิทัลทั้งหมด ทำให้การใช้ LOGO! เพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับได้ เนื่องจากมี 8 ดิจิตอลอินพุต และ 4 ดิจิตอลเอาต์พุต ทำให้ต้องต่อโมดูลเสริมเพื่อเพิ่มจำนวนเอาต์พุต ในที่นี้ใช้ LOGO! DM16 24R 8DI/8RO ที่เพิ่มอินพุตและเอาต์พุตอีกอย่างละ 8 ทำให้รวมเป็น 16 อินพุตและ 12 เอาต์พุต แต่พวกสวิตช์ (ยกเว้น Emergency switch) และไฟแสดงสถานะ จะถูกปรับให้ไปอยู่ใน HMI และใช้ Memory Flag แทน ทำให้เหลืออินพุตที่จะใช้เท่ากับ 4 และเอาต์พุตเท่ากับ 10 ซึ่งเพียงพอกับระบบ

ระบบมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้:

เริ่มต้นเครื่อง เมื่อไฟสีน้ำเงินติด กดปุ่ม start สายพานจะทำงาน ถ้าเซนเซอร์กันขวดตรวจจับเจอขวด ขวดจะถูกกั้นไว้ 5 วินาที เพื่อสร้างระยะห่างระหว่างแต่ละขวด ถ้าเซนเซอร์จับขวดตรวจจับเจอขวด ขวดจะถูกจับไว้และจะปล่อยน้ำจำนวน 40 ml ภายใน 3 วินาที หลังจากนั้นจะปล่อยไปตามสายพาน

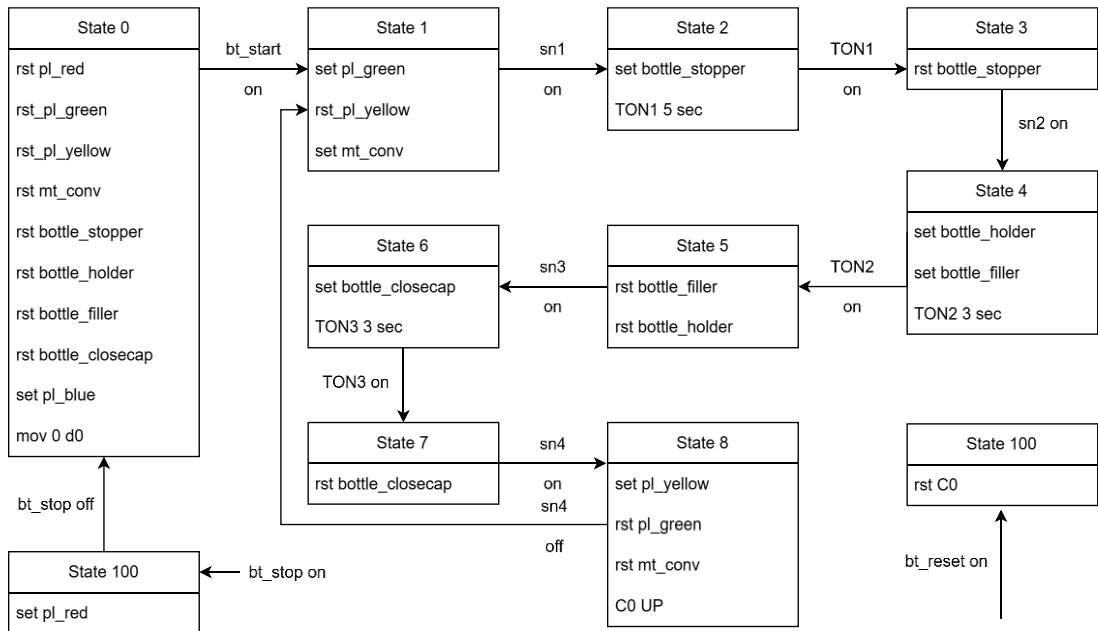
ต่อไป ถ้าเซนเซอร์ปลายสายพานตรวจจับเจอขวด จะนับจำนวนขวดหนึ่ง ระบบจะหยุดรอจนขวดออกถึงจะทำงานต่อ ถ้ากดปุ่ม stop ระบบจะหยุดทำงานและกลับเข้าสู่สถานะเริ่มต้น ยกเว้นการนับที่ยังคงเดิม ถ้ากดปุ่ม reset จะทำการรีเซ็ตการนับเป็นค่าเป็นศูนย์

ขั้นตอนการแปลงขั้นตอนการทำงานเป็นแผนภูมิสถานะ: ผู้ทดลองได้ทำการออกแบบแผนภูมิสถานะตามการนำเสนอของ [12] ได้ผลของการออกแบบดังลักษณะในรูปที่ 4

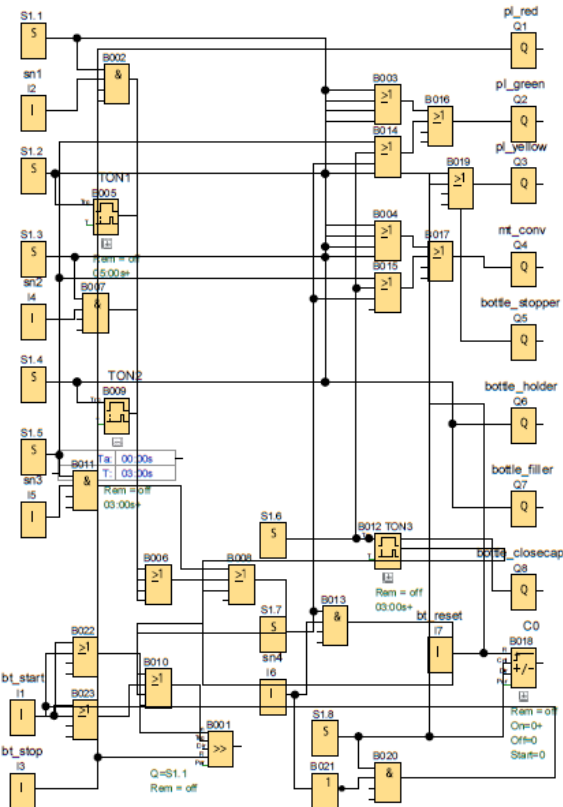
ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุม: จากแผนภูมิสถานะนำมาเขียนโปรแกรมผ่าน LOGO! comfort โดยไม่สามารถเขียนได้ตรงๆ อย่างในงานวิจัย [12] เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านซอฟต์แวร์ที่ไม่สามารถใช้หน้าสัมผัสตัวเดียวกันซ้ำกันได้ จึงมีความยุ่งยากในการเขียน ต้องใช้หลักการในการออกแบบแผนภูมิสถานะแบบใหม่ซึ่งองค์ความรู้ทางผู้วิจัยจะนำเสนอในโอกาสต่อไป แต่สรุปหลักการได้ว่าแต่ละสถานะต้องต่อกับหน้าสัมผัสที่เป็น coil ทำให้ไม่สามารถใช้ set หรือ rst ได้ และการเปลี่ยนสถานะใช้การ shift registers แทน if condition แต่ข้อดีคือ GUI ที่มีความง่าย และสามารถจัดอุปกรณ์ลงบน canvas ได้ตามต้องการ ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5

ทดสอบระบบ: หลังจากเขียนโปรแกรมสำเร็จได้ทำการทดสอบการทำงานของระบบ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีผลการทำงานเหมือนกับการใช้ PLC ราคาประหยัดทุกประการเนื่องจากอุปกรณ์ทางกลยังเป็นชุดเดิมต่างกันเพียงชุดควบคุมอัตโนมัติ

พัฒนาส่วนเสริม HMI: LOGO! มีความสะดวกในการต่อ HMI ได้ง่ายกว่า PLC ราคาประหยัดด้วย Modbus TCP/IP ทำการเชื่อมต่อผ่านสาย Ethernet ต่างจาก PLC ราคาประหยัดมักจะใช้ Modbus RTU ซึ่งเชื่อมต่อโดยสายไฟสองเส้น โดยที่ในทดลองนี้ใช้ HMI ของ SK-102QS-G ซึ่งมีความสามารถในการใช้งาน Modbus TCP/IP เช่นกัน การเปลี่ยนอินพุตและเอาต์พุตที่จะอยู่บน HMI มาเป็นเมมโมรี (M) และดูตารางอินพุต (I) เอาต์พุต (Q) ที่เหลือแทนด้วย Modbus address ตามรูปที่ 6 ถ้าจะใช้ตัวที่ 0 ต้องลบ address ด้วย 1 เช่น Q0 จะมี address ที่ 8192 (8193 - 1) จากนั้นแทน address ของส่วนต่างในโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย SKTOOL จะได้หน้าต่างการควบคุมดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถขยายการนำเสนอข้อมูลได้ในอนาคต เช่น runtime, net runtime หรือ OEE ที่จะมีส่วนในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 4 แผนภูมิสถานะของระบบบรรจุน้ำ



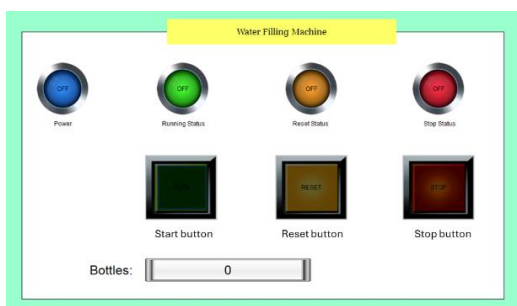
รูปที่ 5 โปรแกรม Function Block ของ LOGO ที่ได้จากแผนภูมิสถานะ

ตารางที่ 3
ผลเปรียบเทียบระหว่าง PLC ราคาประหยัด (Lollette LE3U) กับ LOGO!

หัวข้อ	PLC ราคาประหยัด	Siemens LOGO!
ราคา	มีราคาประหยัดมาก เริ่มต้นที่ 1,000 บาท	มีราคาประหยัด เริ่มต้นที่ 3,000 บาท
คุณสมบัติ	มีคุณสมบัติหลักๆ เช่น การควบคุมอินพุต/เอาต์พุต, การตั้งเวลา, การนับ	มีคุณสมบัติหลักๆ เช่น การควบคุมอินพุต/เอาต์พุต, การตั้งเวลาที่ยืดหยุ่น, การนับ, การควบคุมมอเตอร์
ความสามารถในการเชื่อมต่อ	มีความสามารถในการเชื่อมต่อผ่าน RS-232/RS-485	มีความสามารถในการเชื่อมต่อผ่าน Ethernet เป็นหลัก
Modbus	RTU	TCP/IP
ซอฟต์แวร์	ใช้ซอฟต์แวร์เก่าไม่มีการอัปเดต และต้องใช้เวลาในการเรียนรู้	มีการอัปเดตซอฟต์แวร์ ใช้การเรียนรู้การทำงานที่เร็วกว่า
ภาษาโปรแกรมมิ่ง	มีภาษาโปรแกรมมิ่งแบบ Ladder Diagram (LD) เป็นหลัก	มีภาษาโปรแกรมมิ่งแบบ Function Block Diagram (FBD) เป็นหลัก
ความสามารถในการขยาย	ขยายไม่ได้	สามารถขยายได้
ความสามารถในการรองรับอุปกรณ์เสริม	ส่วนใหญ่ไม่มีอุปกรณ์เสริม	รองรับอุปกรณ์เสริม เช่น I/O, GSM Module, IoT, Power Supply
ความทนทาน	ใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมปกติ	ใช้งานได้ดีในอุตสาหกรรมทั่วไป
เป็นมิตรกับผู้พัฒนา	เอกสารคู่มือมักไม่ละเอียด	เอกสารคู่มือและชุมชนผู้ใช้ที่กว้างขวาง

Address Type	Range	Mapped Modbus Address	Direction	Unit
I	1 - 24	Discrete Input (DI) 1 - 24	R	bit
Q	1 - 20	Coil 8193 - 8212	R/W	bit
M	1 - 64	Coil 8257 - 8320	R/W	bit
V	0.0 - 850.7	Coil 1 - 6808	R/W	bit
AI	1 - 8	Input Register (IR) 1 - 8	R	word
VW	0 - 850	Holding Register (HR) 1 - 425	R/W	word
AQ	1 - 8	Holding Register (HR) 513 - 520	R/W	word
AM	1 - 64	Holding Register (HR) 529 - 592	R/W	word

รูปที่ 6 ตาราง Modbus address ของ LOGO



รูปที่ 7 GUI ที่ออกแบบบน HMI

ทำการทดสอบระบบทั้งหมด: จากการทดสอบพบว่าระบบที่เพิ่มส่วนของ HMI เข้าไปทำงานได้ผลลัพธ์เช่นเดิม แต่อาจจะมีข้อเสียในขั้นตอนการเตรียมระบบที่ต้องใช้เวลามากกว่า เนื่องจาก HMI ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบและเชื่อมต่อกับ LOGO! ยาวนานเกือบสามนาที โดยที่ระบบเดิมใช้ตู้คอนโทรลใช้เวลาเริ่มต้นได้ภายใน 10 วินาที เมื่อทำการเปลี่ยนเอา LOGO! มาใช้แทน PLC ราคาประหยัด ทำให้พบข้อเปรียบเทียบดังตารางที่ 3 ที่ทางผู้วิจัยคิดว่าเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจในการเลือกเพื่อนำมาใช้ในระบบแต่ละระบบ โดยสรุปคือ LOGO! ยังมีราคาสูงกว่า PLC ราคาประหยัด แต่แลกมากับความยืดหยุ่นในการขยายระบบ และมีความเป็นมิตรกับผู้พัฒนา

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับเปลี่ยนระบบควบคุมการบรรจุน้ำจาก PLC ราคาประหยัดไปเป็น Siemens LOGO! เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทันสมัยของระบบ โดยมีสาระสำคัญดังนี้ การปรับเปลี่ยนระบบมีขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต การศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร การสร้างแผนภูมิสถานะ การเขียนโปรแกรมควบคุม การทดสอบระบบ และการพัฒนาส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้ (HMI) ผลการศึกษาพบว่า Siemens LOGO! มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับ PLC ราคาประหยัด ได้แก่ มีความยืดหยุ่นในการขยายระบบสูงกว่า มีซอฟต์แวร์ที่ทันสมัยและง่ายต่อการใช้งาน รองรับการเชื่อมต่อ Ethernet และ Modbus TCP/IP มีอุปกรณ์เสริมที่หลากหลาย และเป็นมิตรต่อผู้พัฒนามากขึ้น อย่างไรก็ตาม Siemens LOGO! มีราคาสูงกว่า PLC ราคาประหยัดประมาณ 3 เท่า และมีระยะเวลาเริ่มต้นระบบที่นานกว่า ข้อสรุปสำคัญคือ การเปลี่ยนมาใช้ Siemens LOGO! ให้ประโยชน์ในด้านความยืดหยุ่นและความทันสมัยของระบบ เมื่อเทียบกับ Lollette LE3U แม้จะมีต้นทุนที่สูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมสำหรับโครงการที่ต้องการระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพและสามารถขยายได้ในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Segovia VR, Theorin A. History of Control History of PLC and DCS. University of Lund. 2012; 44:45.
- [2] Yao KC, Lin CL, Pan CH. Industrial Sustainable Development: The

- Development Trend of Programmable Logic Controller Technology. Sustainability. 2024. doi:10.3390/su16146230. [8]
- [3] Sehr MA, Lohstroh M, Weber M, Ugalde I, Witte M, Neidig J, Hoeme S, Niknami M, Lee EA. Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0. IEEE Trans Ind Inform. 2021;17:3523-3533. [9]
- [4] Nan W. Research on the Development Trend of Industrial Automation Control Technology. 2020. [10]
- [5] Tabassum M, Perumal S, Mohanan S, Suresh P, Cheriyan S, Hassan W. IoT, IR 4.0, and AI Technology Usability and Future Trend Demands. 2021. [11]
- [6] Mahamad K, Khamtree S, Chuvanich S. Implementation of Smart Farm System for Schizophyllum commune Production. J Adv Dev Eng Sci. 2023 Aug;12(33):56-74.
- [7] Thanasin K, Singkhleewon N, Khambun A, Putthala S, Pankang T. Prototype System PLC Machine in Shrimp Farming Industrial: ระบบต้นแบบเครื่อง PLC ในอุตสาหกรรมบ่อเลี้ยงกุ้ง. AdvSciJ [Internet]. 2023 Aug. 8 [cited 2024 Dec. 4];23(2):R156-R174. Available from: <https://li02.tci-thaijo.org/index.php/adscij/article/view/523>
- Srichat A. Development of the automatic pouring raw milk storage tank machine. FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL. 2020 Jun.;6(1):21-28.
- สุขแก้ว อ, บุญรอด ว. การออกแบบเครื่องบรรจุหนังปลากระพงปรุงรสโดยใช้ระบบนิวเมติกส์. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. 2019 ก.ย.;9(2):49-60.
- Srutram P. Robot Arm Picked Up the Material From the Automatic Sorting Machine with Conveyor Belt. FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL. 2018 Jan.;4(1):19-27.
- Vengsungnle P, Srisorn W, Chaibundit K, Jongpluempiti J. Development of A Semi-Automatic Straw Mushroom Substrate Briquetting Machine. FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL. 2021 Jun. ;7(1):10-20. Available from: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/2289873>

- [12] Premchaisawatt S, Boonsaner N, Tashoo K, Laoha C, Buarapha P. Programming Guidelines for Sequential Automation Tasks in Low-Cost Systems. FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL. 2024 Jun.;10(1). Available from: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/249275>
- [13] Schubert H, Thiele C. Programmable Logic Controllers: A Focus on Small-Scale Automation. Industrial Automation Journal. 2017;29(4):45–56
- [14] Lerdwongpaisan A. Automated tyre sorting system using Mitsubishi FX3U PLC controller. In: Proceedings of the 2013 Conference. 2013. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:196125687>
- [15] Millinger D, Nossal R. The Industrial Communication Technology Handbook. Zurawski, Ed. Boca Raton, FL: CRC; 2005.
- [16] Siemens AG. LOGO! as the Smart Mini Controller for Industry 4.0. White Paper. Siemens AG; 2020.
- [17] MURSHALIN M, et al. Efficient Control and Automation: Exploring Siemens LOGO PLC and PLC-Based Industrial Timer Controllers. Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST), 2024, 8.2: 34-43. DOI: <https://doi.org/10.38177/ajast.2024.8204>
- [18] Haider Z, Shah M, Qureshi, A. Water Pump Control using Siemens LOGO! in Smart Irrigation Systems. Environmental Control Engineering, 2021; 32(5): 106-112
- [19] Sato, T, Inoue Y. HVAC System Control with Siemens LOGO! PLC. Automation and Control Technology, 2019; 29(8): 77-83
- [20] Sato H, Tanaka T, Kato Y. Design and Implementation of a Conveyor System with Siemens LOGO! PLC. Journal of Automation Engineering, 2019; 24(6): 312-318.
- [21] Siemens AG. LOGO! Manual for LOGO! 8.3. Siemens Documentation Portal [Internet]. 2023 [cited 2024 Nov 21]. Available from: <https://support.industry.siemens.com>

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

ชื่อบทความภาษาไทย Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)
ชื่อบทความภาษาอังกฤษ Cordia New (ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 14 จุด)

ระบุเฉพาะชื่อ-นามสกุลผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 14 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาไทย (ขนาด 12 จุด)

ระบุหน่วยงานที่สังกัด ผู้เขียน ภาษาอังกฤษ (ขนาด 12 จุด)

Received:

Revised:

Accepted:

Available online:

บทคัดย่อ

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

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

Abstract

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

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

*ติดต่อ: E-mail, เบอร์โทรศัพท์, เบอร์โทรสาร

1. บทนำ

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

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

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

1.2 ชนิดตัวอักษร

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

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

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

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

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

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

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความขีดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

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

4. บทคัดย่อ

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

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพินัยย่อหน้าใหม่ ให้พินัยบทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4 โดยไม่ต้องใส่หมายเลขหน้าเวลาพินัยบทความ

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพหรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ 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 , ... พินัยหมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความ จะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

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 x 10 ⁴
		CV	3.3 x 10 ⁴
R2	D2	ILIT	6.0 x 10 ⁴

ตารางที่ 2

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

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

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอแนะที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนรูป ประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมาก เกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver Style) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

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

11.1. การอ้างอิงในเนื้อหา

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

11.2. ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่อง เฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาของบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

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

[2] จำรูญ ตันติพิศาลกุล. การออกแบบชิ้นส่วน เครื่องจักรกล 1. เม็ดทรายพรี้นต้ง: 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>

