



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครราชสีมา

Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2564

www.engineer.rmutt.ac.th/journal

Print : ISSN 2730-2148

Online : ISSN 2697-4339

การจำลองความเร็วและความดันในกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ

Velocity and Pressure Simulation of Plant Air Purifier

1

- นำพร ปัญญาใหญ่ จิระพล กลิ่นบุญ ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย และ กิฬาร คำแดง

การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง

13

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

- จตุพงศ์ ครอบธำนิษฐ์ และ สมเจตน์ พันธ์พันธ์

การสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ

23

Programming For The Game 180 IQ

- สุภาพร พงษ์จันทร์ตา และ วิเชษฐ์ สิงห์โต

กำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก

33

Flexural Strength and Chloride Penetration Resistance of Reinforced Concrete Beam with Steel

Fiber after Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying

Fiber after Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying

- ทวีชัย สำราญวานิช และ สีน่า ปริก

ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่าน แอปพลิเคชันไลน์

43

Prepaid Electric Energy Consumption System via Online Top-Up System and a Notification Through

LINE Application

- สุรินทร์ แกรงงาม ณัฐฐ์ ตั้งปรีชาพานิชย์ ธีระพล เหมือนขาว สุทธิ กับทองดี

กัณฑ์เอนก คุ้มแก้ว และ ประวี ภู่อินทร์

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการทดสอบถึงความดันในถังเก็บอากาศตามมาตรฐานมอก. 1252-2537

53

Automatic Control System for Pressure Tank Testing According to Tis 1252-2537

- สุภัคชัย ไชยวิเศษสกุล มนุศักดิ์ จานทอง มานพ แยมแพง นพพร เปรมใจ ศิริชัย เทพา

และ พิพัฒน์ ปราโมทย์

หุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันด้วยเลเซอร์วัดระยะ

63

Cartesian Robot for Measuring the Diameter of a Pressure Tank Using a Laser Distance Meter

- ณัฐชยา อินทร์บุญญ มนุศักดิ์ จานทอง มานพ แยมแพง นพพร เปรมใจ ศิริชัย เทพา

และ พิพัฒน์ ปราโมทย์

วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

75

Method to Control the Output Power of SRG at Low Speed with Appropriate Excitation Angles using

Artificial Neural Network

- ไพโรจน์ ทองประศรี และ พิริยะ สาธาก

การจำลองความเร็วและความดันในกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ Velocity and Pressure Simulation of Plant Air Purifier โดย : นำพร ปัญญาใหญ่ จิระพล กลิ่นบุญ ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ และ ทิพาพร คำแดง	1
การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene โดย : จตุพงศ์ ครองธานีรัตน์ และ สมเจตน์ พชรพันธ์	13
การสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ Programming For The Game 180 IQ โดย : สุภาพร ฟองจันทร์ตา และ วิเชษฐ์ สิงห์โต	23
กำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็ก ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง Flexural Strength and Chloride Penetration Resistance of Reinforced Concrete Beam with Steel Fiber after Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying โดย : ทวีชัย สาราวานิช และ ลีน่า ปรัก	33
ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ Prepaid Electric Energy Consumption System via Online Top-Up System and a Notification Through LINE Application โดย : สุรินทร์ แหวมงาม ณิชฐ์ ตั้งปรีชาพาณิชย์ ชีระพล เหมือนขาว สุทธิ ทับทองดี กัญจน์เอก พุ่มแก้ว และ ประวี ภู่อินทร์	43
ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการทดสอบถึงความดันในถังเก็บอากาศตามมาตรฐานมอก. 1252-2537 Automatic Control System for Pressure Tank Testing According to Tis 1252-2537 โดย : สุภัคชัย ไชยวิเศษสกุล มนุศักดิ์ จานทอง มานพ แยมแพง นพพร เปรมใจ ศิริชัย เทพา และ พิพัฒน์ ปราโมทย์	53
หุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางถังความดันด้วยเลเซอร์วัดระยะ Cartesian Robot for Measuring the Diameter of a Pressure Tank Using a Laser Distance Meter โดย : ณิชฐา อินทร์ชูชัย มนุศักดิ์ จานทอง มานพ แยมแพง นพพร เปรมใจ ศิริชัย เทพา และ พิพัฒน์ ปราโมทย์	63
วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียม Method to Control the Output Power of SRG at Low Speed with Appropriate Excitation Angles using Artificial Neural Network โดย : ไพโรจน์ ทองประศรี และ พิริยะ สารเอก	75



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ์	คณะกรรมการบริหาร มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.กัณวรี พูลปราชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี	52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จักรี ศรีนันทมิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุนันดา เนียมกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์	33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกษ สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนวิทย์ สุนันทพจน์



Journal of Engineering, RMUTT

Editorial Board Members

Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Vice President of Academic Affairs

Dean, Faculty of Engineering

Editorial Board

Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop	Thai-Journal Citation Index (TCI)
Assoc.Prof.Dr.Sutee Auksonkitt	School of Aviation Eastern Asia University
Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra	Faculty of Science Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Mungcharoen	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Narong Buabthong	Faculty of Engineering Thammasat University
Asst.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Pathomthat Chiradeja	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Dr.Chadchawarn Surussavadee	52/14 Phaholyothin 45 Rd., Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900
Asst.Prof.Dr.Sivakorn Angthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Jakkree Srinonchat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Somsak Kanthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Thammasak Rojviroon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Chavalit Sangswasd	33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม ถึง เดือน ธันวาคม ปีพุทธศักราช 2564 จำนวนบทความตีพิมพ์ 8 บทความ โดยในฉบับนี้มีเนื้อหาทั้งทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมวัสดุ และวิศวกรรมเกษตร ซึ่งวารสารยังคงมุ่งมั่นที่จะเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่สาธารณชนอย่างเสมอมา

และสืบเนื่องจาก ประกาศ ก.พ.อ เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2564 ที่กำหนดให้ “ผลงานทางวิชาการต้องได้รับการเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ โดยวารสารวิชาการนั้นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (peer reviewer) ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 คน” ด้วยเหตุดังกล่าว กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี จึงได้ดำเนินการเพิ่มจำนวนผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความจากเดิม 2 คน เป็น 3 คน โดยจะเริ่มตั้งแต่ฉบับการตีพิมพ์ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เป็นต้นไป

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการเผยแพร่ผลงานวิจัยต่างๆ เสมอมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกๆ ท่านจะมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปราศจากโรคภัยต่างๆ และยังคงติดตามการเผยแพร่ผลงานของวารสารฯ ต่อไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิศากร สมสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.พศุขยน นินทนาวงศา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มานพ แยมแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กายรัฐ เจริญราษฎร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ผศ.ดร.ณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ผศ.ดร.วัลลภ กิตติสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

Peer Reviews

Asst.Prof.Dr.Bunyong Rungroungdouyboon	Faculty of Engineering Thammasat University
Asst.Prof.Dr.Pradya Prempraneerach	Faculty of Engineering Thammasat University
Assoc.Prof.Dr.Jaturoung Lungapin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Narongchai Ojaroen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Nisakorn Somsuk	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Boonyang Plangklang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Prusayon Nintanavongsa	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manop Yamfang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Kairat Jaroenrat	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Asst.Prof.Dr.Natdanai Tantawiroon	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Asst.Prof.Dr.Wanlop Kitisatorn	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Kawin Sonthipermpon	Faculty of Engineering, Naresuan University
Assoc.Prof.Dr.Nattapong Damrongwiriyanupap	Faculty of Engineering Phayao University

การจำลองความเร็วและความดันในกระถางต้นไม้พอกอากาศ

นำพร ปัญญาใหญ่¹ จิระพล กลิ่นบุญ² ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย¹ และ ทิพาพร คำแดง^{1*}

numpon@mju.ac.th¹, jirapol.kli@rmutr.ac.th², thanasit@mju.ac.th¹, tipapon@mju.ac.th^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 23-Mar-2021
Revised : 29-Jun-2021
Accepted : 17-Aug-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองความเร็วและความดันอากาศในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีสมบัติของวัสดุปลูกแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของวัสดุปลูกที่ทำหน้าที่กรองอากาศมี 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm ชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และพัดลมที่ใช้ดูดอากาศแตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 4 นิ้ว อัตราการไหลที่ 37.5 50 และ 75 CFM ขนาด 6 นิ้ว อัตราการไหลที่ 85 113.33 และ 170 CFM และขนาด 8 นิ้ว อัตราการไหลที่ 170.5 227.33 และ 341 CFM ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของความดันและความเร็วที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ค่าความดันและความเร็วแปรผันตามขนาดพัดลม โดยพัดลมขนาด 8 นิ้ว ค่าความดันต่างสูงสุดคือ 96,885.293 Pa และความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศ คือ 6.228 m/s ความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่ใช้วัสดุปลูก คือ 9.829 m/s และการเปรียบเทียบผลของสมบัติวัสดุต่อความดันและความเร็ว ที่อัตราการไหลเท่ากัน พบว่า วัสดุปลูกที่มีความดันและใช้ความเร็วพัดลมสูงที่สุดคือ ชนิดที่ 2 รองลงมาคือ ชนิดที่ 3 และ ชนิดที่ 1 ตามลำดับ และความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกสูงที่สุดคือ ชนิดที่ 1 รองลงมาคือ ชนิดที่ 3 และ ชนิดที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้เพื่อกรองฝุ่นขนาดเล็กในอากาศขนาด 2.5 ไมครอน วัสดุปลูกที่เหมาะสมที่สุดคือ ชนิดที่ 3

คำสำคัญ: ความดันต่าง ความเร็วอากาศ วัสดุปลูก เครื่องพอกอากาศ ต้นไม้

Velocity and Pressure Simulation of Plant Air Purifier

Numpon Panyoyai¹, Jirapol Klinbun², Thanasit Wongsiriamnuay¹ and Tipapon Khamdaeng^{1*}
numpon@mju.ac.th¹, jirapol.kli@rmutr.ac.th², thanasit@mju.ac.th¹, tipapon@mju.ac.th^{1*}

^{1*} Division of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Received	: 23-Mar-2021
Revised	: 29-Jun-2021
Accepted	: 17-Aug-2021

Abstract

The objective of this research is to simulate the air velocity and pressure in plant air purifier with different filter materials. Three types of the filter material properties are as follows; type 1 porosity of 0.35 and pore size of 5 μm , type 2 porosity of 0.35 and pore size of 2.5 μm , and type 3 porosity of 0.7 and pore size of 2.5 μm . The different fan sizes are used as follows; 4" with volume flow rate of 37.5, 50 and 75 CFM, 6" with volume flow rate of 85, 113.33 and 170 CFM, and 8" with volume flow rate of 170.5, 227.33 and 341 CFM, respectively. The results of pressure difference and velocity obtained from the computer program simulation are found that the pressure difference and velocity increase with fan size. The fan size of 8" provides the maximum pressure difference of 96,885.293 Pa, the maximum fan speed of 6.228 m/s and the maximum outlet air speed of the material pot of 9.829 m/s. From the results of filter materials affected on the pressure drop and velocity, it is found that, at the same volume flow rate, type 2 provides the maximum pressure drop and fan speed followed by type 3 and type 1, respectively. The type 1 provides the maximum outlet air speed of the material pot followed by type 3 and type 2, respectively. Therefore, for the purpose of micro air filter of 2.5 micron, the proper filter material is type 3.

Keywords: Pressure drop, Air velocity, Porous media, Air purifier, Plant

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การเจริญเติบโตของเมืองและอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการปลดปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพร่างกาย การอยู่ในพื้นที่ในอาคารหรือในห้องจะช่วยลดการสัมผัสกับมลภาวะหรือแสงแดด ซึ่งโดยส่วนมากประมาณ 80-90% [1] คนมักจะใช้ชีวิตและทำงานในสภาพแวดล้อมในร่ม แต่อย่างไรก็ตาม การอยู่ในสภาพแวดล้อมในร่มทำให้ไม่มีพื้นที่ใกล้ชิดธรรมชาติ อีกทั้งหากอยู่ในพื้นที่ปิดที่มีการไหลเวียนหรือระบายอากาศที่ไม่เหมาะสมและมีคุณภาพอากาศไม่ดีเนื่องจากสิ่งสังเคราะห์ต่าง ๆ เช่น หมึกพิมพ์ พลาสติก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาเคลือบผิว เป็นต้น ก็จะทำให้เกิดมลภาวะส่งผลเสียต่อสุขภาพร่างกายได้เช่นกัน เช่น เกิดอาการปวดหัว คัดน้ำ คัดจมูก เป็นผื่น และภูมิแพ้ได้ [2] ดังนั้นคุณภาพของสภาพแวดล้อมในร่มจึงส่งผลต่อสุขภาพและประสิทธิภาพในการทำงานโดยตรงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

เครื่องฟอกอากาศ (Air purifier หรือ Air cleaner) เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่กำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในอากาศ เช่น เชื้อรา ไวรัส แบคทีเรีย รวมถึงกลิ่นไม่พึงประสงค์อย่าง กลิ่นควันบุหรี่ กลิ่นอับที่อยู่ภายในบ้านให้หายไป โดยหลักการทำงานของเครื่องจะเป็นการดูดอากาศเหล่านี้เข้าไปในเครื่องผ่านตัวกรองเพื่อดักจับสิ่งแปลกปลอม แล้วปล่อยอากาศบริสุทธิ์ออกมาแทน และปัจจุบันเครื่องฟอกอากาศได้มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของแต่ละคนที่ต้องเผชิญกับมลภาวะและอากาศที่เป็นพิษมากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันเทคโนโลยีก็ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างเครื่องฟอกอากาศและวัสดุกรองอากาศแบบต่าง ๆ มากมาย

การเลือกใช้แผ่นกรองอากาศมีผลต่อค่าความดันต่าง ความเร็ว และการใช้พลังงานของพัดลม การใช้แผ่นกรองอากาศในระบบปรับอากาศมักจะมีควมต้านทานเกิดขึ้นในระบบ เมื่อแผ่นกรองมีสิ่งสกปรกมาอุดตัน ความดันลดของแผ่นกรองและความดันรวมของพัดลมจะสูงขึ้น อัตราการไหลอากาศจะลดลงเนื่องจากค่าความดันต่างลดลง หากต้องการอัตราการไหลอากาศ

เท่าเดิม จะต้องใช้ความเร็วพัดลมที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้พัดลมใช้พลังงานมากขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานของระบบได้ [3, 4]

วัสดุพูนถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การประยุกต์ใช้ในทางความร้อน เซลล์เชื้อเพลิง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และการปรับอากาศหรือฟอกอากาศภายในอาคาร เป็นต้น พฤติกรรมของของไหลและการถ่ายเทความร้อนสามารถวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) [5, 6] แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลและเทคนิคทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยออกแบบ [7] และวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านวัสดุพูน [3] ค่าความดันต่างเป็นปัญหาสำคัญในการควบคุมการไหลและความร้อน ค่าความดันต่างที่เกิดขึ้นแตกต่างกันเป็นผลมาจากตัวแปรโครงสร้างของวัสดุพูน ขนาดรูพูน พื้นที่ผิว และความพูน [8] ซึ่งเทคนิคทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของวัสดุพูนได้แบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยใช้สมการความต่อเนื่อง และกฎการไหล เช่น ดาร์ซี นาเวียร์-สโตกส์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความพูน เช่น ค่าการซึมผ่านได้ เพื่อศึกษาพลศาสตร์การไหลของของไหลในวัสดุพูน [9, 10] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการศึกษาวัสดุพูนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองอนุภาคขนาดเล็กในช่วง PM2.5 โดยขนาดรูพูนที่จำลองอยู่ในช่วง 0.2-2 μm [11] โดยที่มาตรฐาน ISO ได้นิยามว่า PM2.5 คืออนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.3-2.5 μm [12]

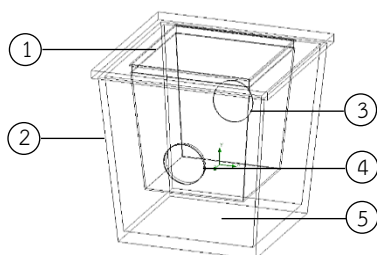
กระถางต้นไม้ฟอกอากาศ (Plant air purifier) เป็นการออกแบบเครื่องฟอกอากาศให้มีฟังก์ชันในการปลูกต้นไม้ขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมในร่มได้ เพื่อช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงาน เพิ่มพื้นที่สีเขียว สร้างอากาศบริสุทธิ์ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นของตกแต่งได้ [1, 2] ได้มีการศึกษาถึงศักยภาพของระบบพืชฟอกอากาศในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กและสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศพบว่าระบบพืชฟอกอากาศสามารถทำให้ความเข้มข้น

ของฟอร์มมาตีไฮด์ลดลงอยู่ในช่วง 23-37% [13] ซึ่งมีอัตราการกำจัดฟอร์มมาตีไฮด์ที่สูงกว่าเครื่องฟอกอากาศทางกลทั่วไปที่ขายตามท้องตลาด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ โดยได้ศึกษาค่าความเร็วและความดันอากาศในกระถางต้นไม้ฟอกอากาศที่มีสมบัติของวัสดุปลูกที่ทำหน้าที่กรองฝุ่นซึ่งมีขนาดรูพรุนของวัสดุพรุนขนาดเล็กสุด 2.5 ไมครอน และอัตราการไหลของพัดลมที่แตกต่างกัน และจำลองสภาพความเร็วและความดันอากาศโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการไหลอากาศผ่านวัสดุพรุนและประมวลผลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ตัวแปรของสมบัติของวัสดุปลูกและอัตราการไหลของพัดลมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างกระถางต้นไม้ฟอกอากาศต้นแบบ

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การออกแบบกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ



รูปที่ 1 แบบจำลองกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ

แบบจำลองกระถางต้นไม้ฟอกอากาศในรูปที่ 1 ประกอบด้วย (1) กระถางส่วนใน เป็นช่องใส่วัสดุปลูกที่ทำหน้าที่กรองอากาศ (2) กระถางส่วนนอก (3) ช่องลมออกจากกระถางส่วนใน (4) ช่องลมออกจากกระถางส่วนนอก เป็นช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศ และ (5) ช่องทางการไหลอากาศในกระถาง

กระถางส่วนในซึ่งเป็นช่องใส่วัสดุปลูกที่ทำหน้าที่กรองอากาศ มีขนาด 30×30 cm สูง 30 cm ความหนา 0.25 cm มุมลาดเอียง 5° เจาะรูด้านข้างกระถางที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ขนาด 4" เพื่อเป็นช่องลมออกจากกระถางส่วนใน โดยกำหนดให้มีขนาดเท่ากับพัดลมดูดอากาศขนาดเล็กสุด ส่วนกระถางส่วนนอก มีขนาด 40×40 cm สูง 40 cm ความหนา 1.25 cm

มุมลาดเอียง 5° เช่นกัน ด้านข้างกระถางมีการเจาะรูที่ตำแหน่งกึ่งกลางเพื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4" 6" และ 8" ตามลำดับ โดยออกแบบตามขนาดและคุณลักษณะเฉพาะของพัดลมดูดอากาศที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งที่ขนาด 4" มีอัตราการไหลที่ 37.5 50 และ 75 CFM ขนาด 6" มีอัตราการไหลที่ 85 113.33 และ 170 CFM และขนาด 8" มีอัตราการไหลที่ 170.5 227.33 และ 341 CFM ตามลำดับ โดยเมื่อประกอบกระถางส่วนในและส่วนนอกเข้าด้วยกัน ช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศของกระถางส่วนนอกจะวางอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกับช่องลมออกจากกระถางส่วนใน

2.2 จำลองสภาพความเร็วและความดัน

เพื่อศึกษาผลของวัสดุปลูก ขนาดพัดลม และอัตราการไหลอากาศ ที่มีต่อความเร็วและความดันอากาศในกระถางต้นไม้ฟอกอากาศ ผู้วิจัยจึงได้จำลองสภาพความเร็วและความดันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Solidworks Flow Simulation v2019 (Dassault Systèmes SolidWorks Corp., USA) ที่เงื่อนไขต่าง ๆ โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเงื่อนไขการจำลองสภาพในแบบจำลองเชิงตัวเลข วิธีการเชิงตัวเลข และการคำนวณตัวแปรที่ได้จากการจำลองสภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 สมการควบคุม

สมการควบคุมที่ใช้ในแบบจำลองประกอบด้วยสมการของความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ [14]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} = \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

โดยที่ u และ v คือ ความเร็ว (m/s) ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ (Ns/m^2) ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3) และ p คือ ความดัน (Pa) ในกรณีที่มีการไหลของอากาศผ่านวัสดุพรุนจะมีการพิจารณากฎของดาร์ซีร่วมกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ด้วย

2.2.2 ค่าการซึมผ่านได้

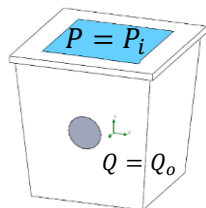
ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (k) สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับขนาดของรูพรุน

$$k = \frac{32\mu}{\varepsilon\rho D^2} \quad (4)$$

โดยที่ ε คือ ความพรุนของวัสดุพรุน และ D คือ ขนาดรูพรุน (m)

2.2.3 เงื่อนไขในการจำลองสภาพ

ในการจำลองสภาพการไหลของอากาศในกระถาง จะกำหนดให้ประเภทการไหลเป็นแบบทั้งราบเรียบและปั่นป่วน เงื่อนไขเป็นผนังเรียบและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลอง ความดันเท่ากับ 101.325 kPa กำหนดเงื่อนไขขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 คือ 1) ความดันขาเข้า (P_i) ทางด้านบนของกระถาง เท่ากับ 101.325 kPa และ 2) อัตราการไหลขาออก (Q_o) ทางช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศ ขนาด 4" มีอัตราการไหลที่ 37.5 50 และ 75 CFM ขนาด 6" มีอัตราการไหลที่ 85 113.33 และ 170 CFM และขนาด 8" มีอัตราการไหลที่ 170.5 227.33 และ 341 CFM ตามลำดับ และกำหนดวัสดุปลูกเป็นวัสดุพรุนที่มีสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm ชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm โดยความพรุนและขนาดรูพรุนที่เลือก พิจารณาจากช่วงความพรุนและขนาดรูพรุนของวัสดุปลูกที่สามารถใช้ในการปลูกต้นไม้แบบไร้ดิน ได้แก่ กลุ่มอนินทรีย์สาร เช่น หิน กรวด ทราย เพอร์ไลต์ เม็ดดินเผา เป็นต้น และกลุ่มวัสดุสังเคราะห์ เช่น เม็ดโฟม แผ่นฟองน้ำ เป็นต้น [15, 16]

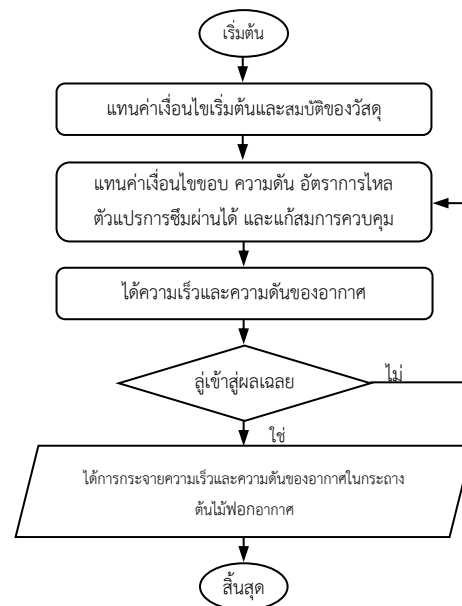


รูปที่ 2 เงื่อนไขขอบของแบบจำลอง

2.2.4 วิธีการเชิงตัวเลข

วิธีการเชิงตัวเลขสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3

เริ่มการจำลองสภาพโดยการใส่ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและสมบัติของวัสดุที่เป็นขอบเขตของการจำลองสภาพ จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบที่ขอบเขตของของไหล โดยการไหลของอากาศ กำหนดให้มีความดันขาเข้าและอัตราการไหลขาออก ที่ตำแหน่งทางด้านบนของกระถางและที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศ ตามลำดับ เลือกสมการสำหรับคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ และแก้สมการควบคุมซึ่งประกอบด้วยสมการของความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ ในกรณีที่มีการไหลของอากาศผ่านวัสดุพรุน เพื่อหาความเร็วและความดันของอากาศในกระถางต้นไม้พอกอากาศ



รูปที่ 3 วิธีการเชิงตัวเลข

2.3 การคำนวณตัวแปร

ตัวแปรที่คำนวณคือ ค่าความดันต่างของแบบจำลองกระถางต้นไม้พอกอากาศ (ΔP_{total})

$$\Delta P_{total} = P_i - P_o \quad (5)$$

โดยที่ P_i คือ ความดันขาเข้าทางด้านบนของกระถาง (Pa) และ P_o คือ ความดันขาออกทางช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศ (Pa)

คำนวณค่าความดันสถิตของวัสดุปลูกที่เป็นวัสดุพรุน (ΔP) จากสมการ

$$\Delta P = P_i - P_{o,m} \quad (6)$$

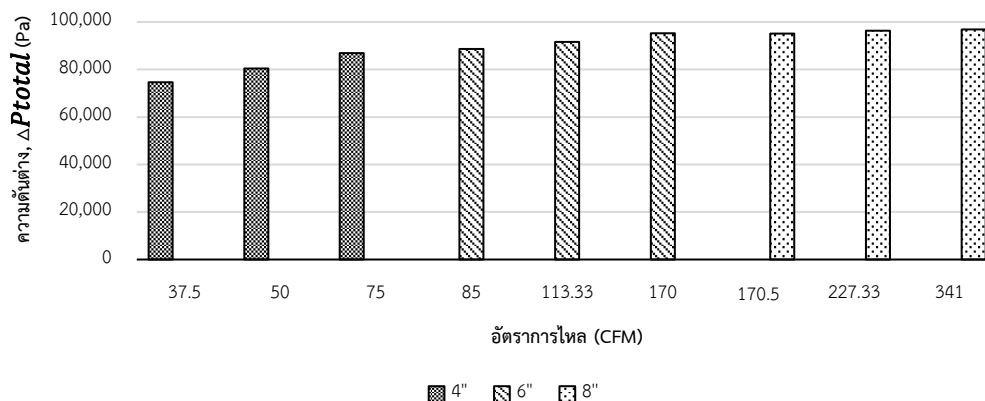
โดยที่ $P_{o,m}$ คือ ความดันขาออก ที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่อยู่วัสดุปลูก (Pa)

นอกจากนี้ จากกราฟความเร็วที่แปรกับพิกัดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง จะได้ค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศและความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่อยู่วัสดุปลูก

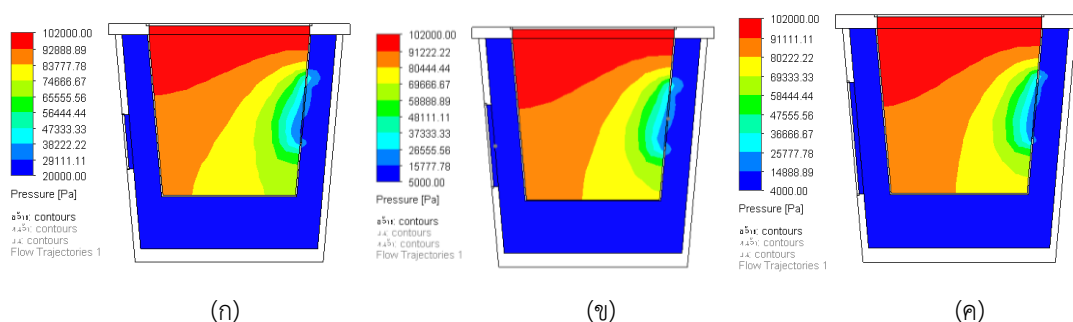
3. ผลและการวิจารณ์ผล

3.1 ผลของอัตราการไหลต่อความดัน

รูปที่ 4 แสดงค่าความดันต่างของกระถางต้นไม้พ็อกอากาศที่ขนาดพัดลม 4" 6" และ 8" ที่อัตราการไหลต่าง ๆ โดยกำหนดวัสดุปลูกเป็นชนิดเดียวกัน จากผลการจำลองสภาพพบว่า อัตราการไหลของพัดลมแปรผันตรงกับค่าความดันต่าง เมื่อขนาดพัดลมเพิ่มขึ้น อัตราการไหลสูงขึ้น เป็นผลทำให้ค่าความดันต่างเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ [10, 17] ค่าความดันต่างสูงสุดเท่ากับ 96,885.29 Pa ที่ขนาดพัดลม 8" อัตราการไหล 341 CFM และค่าความดันต่างต่ำสุดเท่ากับ 74,619.01 Pa ที่ขนาดพัดลม 4" อัตราการไหล 37.5 CFM



รูปที่ 4 ค่าความดันต่างของกระถางต้นไม้พ็อกอากาศที่ขนาดพัดลม 4" 6" และ 8" ที่อัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 5 การกระจายความดันของกระถางต้นไม้พ็อกอากาศที่มีขนาดพัดลม (ก) 4" (ข) 6" และ (ค) 8" ที่อัตราการไหลต่ำสุดของแต่ละขนาดพัดลมเท่ากับ 37.5 85 และ 170.5 CFM ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงการกระจายความดันของกระถางต้นไม้พ็อกอากาศที่มีขนาดพัดลม 4" 6" และ 8" (ที่อัตราการไหลต่ำสุดของแต่ละขนาดพัดลมเท่ากับ 37.5 85 และ 170.5 CFM) ตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น พบว่าความดันขาออกทางช่องติดตั้งพัดลม

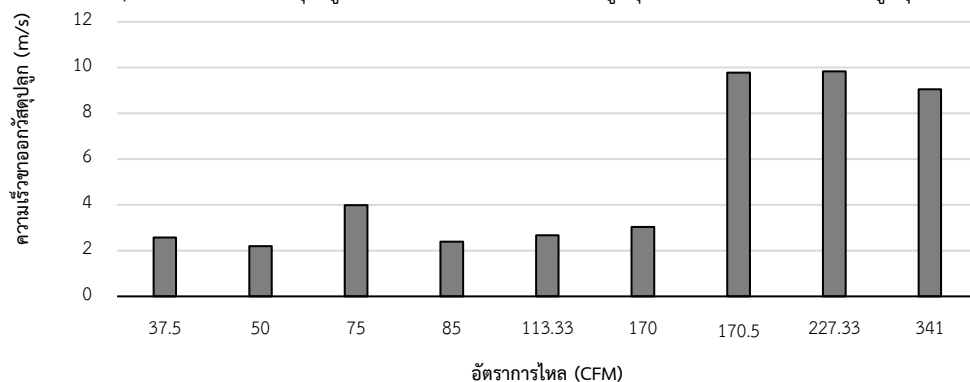
ดูดอากาศจะลดลง ส่วนความดันขาเข้าทางด้านบนของกระถางมีค่าคงที่เนื่องจากถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขขอบ ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความดันต่างเพิ่มขึ้น ความดันในวัสดุปลูกจะค่อย ๆ ลดลงจากตำแหน่งด้านบนของกระถาง ลงมาที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วน

ใน และความดันภายในช่องทางการไหลอากาศใน
กระถางจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นตาม
ขนาดของพัดลม

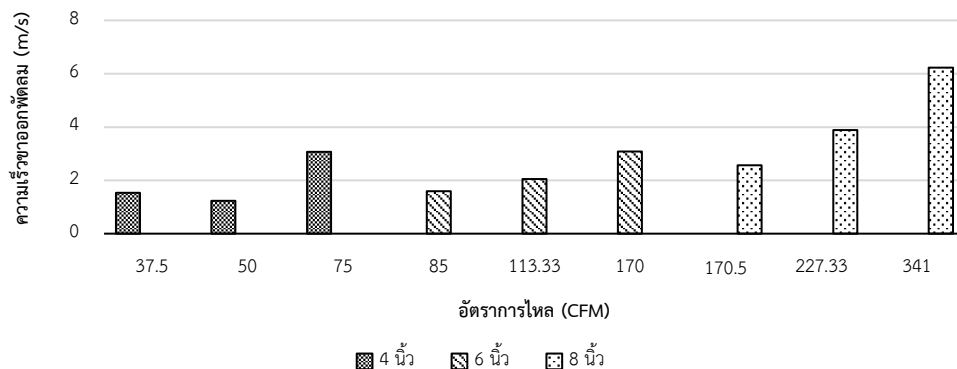
3.2 ผลของอัตราการไหลต่อความเร็ว

รูปที่ 6 และ 7 แสดงค่าความเร็วสูงสุดที่
ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่ใส่วัสดุปลูก
และความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูด
อากาศขนาด 4" 6" และ 8" ตามลำดับ โดยพิจารณาที่
อัตราการไหลต่าง ๆ และกำหนดวัสดุปลูกเป็นชนิด

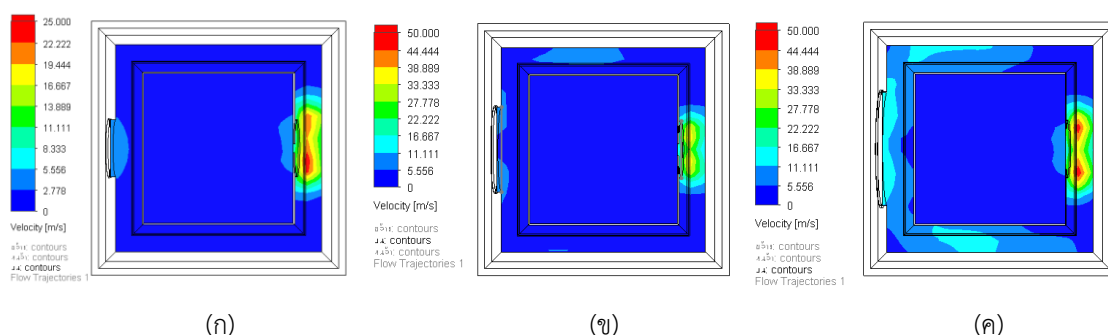
เดียวกัน จากผลการจำลองสภาพพบว่า อัตราการไหล
ของพัดลมแต่ละขนาด จะแปรผันตรงกับความเร็วของ
พัดลม (รูปที่ 7) สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้
[8, 10] กล่าวคือ ที่อัตราการไหลสูงสุดของพัดลมแต่ละ
ขนาด ความเร็วจะมีค่าสูงสุด ที่ขนาดพัดลม 4" อัตรา
การไหลสูงสุด 75 CFM มีความเร็วสูงสุด 3.06 m/s
ขนาดพัดลม 6" อัตราการไหลสูงสุด 170 CFM มี
ความเร็วสูงสุด 3.08 m/s และขนาดพัดลม 8" อัตรา
การไหลสูงสุด 341 CFM มีความเร็วสูงสุด 6.23 m/s



รูปที่ 6 ค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่ใส่วัสดุปลูกที่อัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 7 ค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 4" 6" และ 8" ที่อัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 8 การกระจายความเร็วในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีขนาดพัดลม (ก) 4" (ข) 6" และ (ค) 8" ที่อัตราการไหล
สูงสุดของแต่ละขนาดพัดลมเท่ากับ 75 170 และ 341 CFM ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบขนาดพัดลมที่ต่างกัน พบว่าขนาดพัดลม 8" มีความเร็วของพัดลมสูงที่สุด และขนาดพัดลม 4" และ 6" มีความเร็วของพัดลมใกล้เคียงกัน แต่พัดลมขนาด 6" มีอัตราการไหลมากกว่า ดังนั้นหากต้องการอัตราการไหลที่สูงและใช้ความเร็วพัดลมต่ำ ควรเลือกพัดลมขนาด 6"

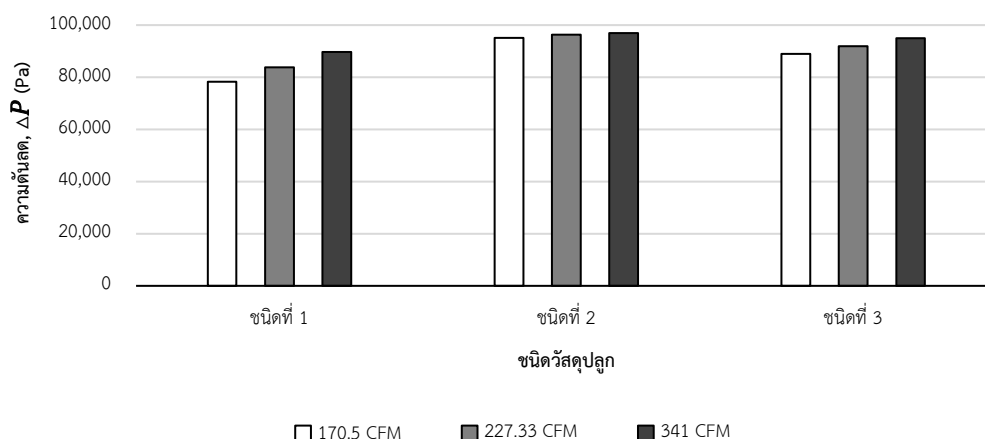
ความสัมพันธ์ของการกระจายความเร็วในกระถางต้นไม้พอกอากาศกับกราฟในรูปที่ 6 และ 7 ที่ขนาดพัดลม 4" 6" และ 8" ที่อัตราการไหลสูงสุดของแต่ละขนาดพัดลมเท่ากับ 75 170 และ 341 CFM ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8

จากรูปที่ 8 พบว่า ความเร็วขาออกจากกระถางส่วนในที่สูงที่สุดที่ขนาดพัดลม 8" รองลงมาคือ 4" และ 6" (9.06 3.98 และ 3.04 m/s) ตามลำดับ และความเร็วภายในช่องทางการไหลอากาศในกระถางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามขนาดของพัดลม

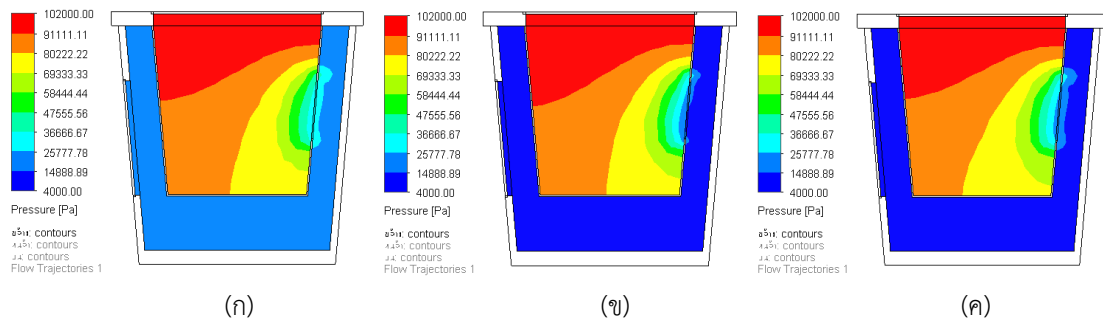
3.3 ผลของวัสดุปลูกต่อความดัน

รูปที่ 9 แสดงค่าความดันลดในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm ชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm โดยกำหนดให้

ขนาดพัดลมเท่ากัน พิจารณาที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับคือ 170.5 227.33 และ 341 CFM จากผลการจำลองสภาพพบว่า การใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความดันลดสูงขึ้น และชนิดของวัสดุปลูกมีผลต่อค่าความดันลด โดยพิจารณาที่อัตราการไหลต่ำสุดที่ 170.5 CFM สามารถเรียงลำดับค่าความดันลดจากน้อยไปมากได้ดังนี้ วัสดุปลูกชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm มีค่าความดันลดเท่ากับ 78,263.17 Pa รองลงมาคือ วัสดุปลูกชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm มีค่าความดันลดเท่ากับ 88,997.78 Pa และวัสดุปลูกชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm มีค่าความดันลดเท่ากับ 95,134.02 Pa ขนาดรูพรุนและความพรุนมีผลต่อค่าความดันลดและค่าการซึมผ่านได้ [9, 18, 19] โดยที่ขนาดรูพรุนใหญ่และความพรุนสูงจะส่งผลทำให้ค่าความดันลดมีค่าลดลงและค่าการซึมผ่านได้มีค่าสูงขึ้น ความดันลดของวัสดุปลูกชนิดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากวัสดุมีความพรุนต่ำแต่ขนาดรูพรุนใหญ่ ขณะที่วัสดุปลูกชนิดที่ 3 มีความพรุนสูงแต่ขนาดรูพรุนเล็ก แสดงให้เห็นถึงตัวแปรของขนาดรูพรุนมีผลต่อค่าความดันลดมากกว่าความพรุน ส่วนวัสดุปลูกชนิดที่ 2 มีความพรุนต่ำและขนาดรูพรุนเล็ก จึงทำให้มีค่าความดันลดสูงที่สุด



รูปที่ 9 ค่าความดันลดในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด ที่ขนาดพัดลม 8" อัตราการไหล 170.5 227.33 และ 341 CFM

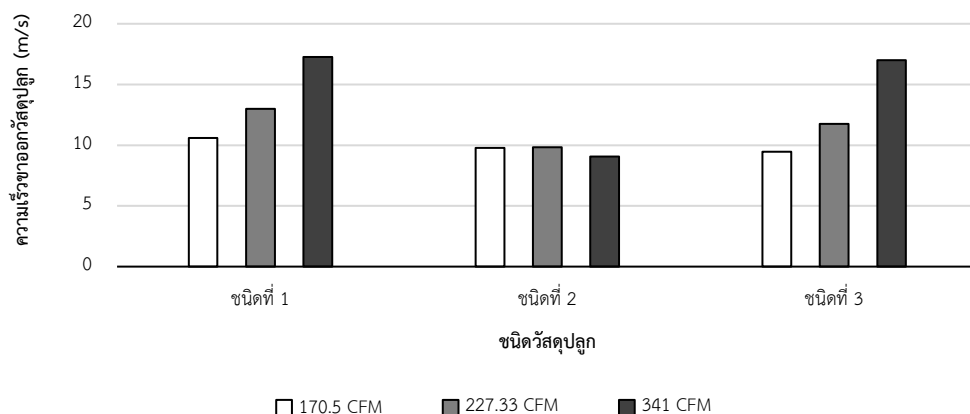


รูปที่ 10 การกระจายความดันของกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด (ก) ชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm (ข) ชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และ (ค) ชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm ที่ขนาดพัดลม 8" อัตราการไหลต่ำสุดเท่ากับ 170.5 CFM

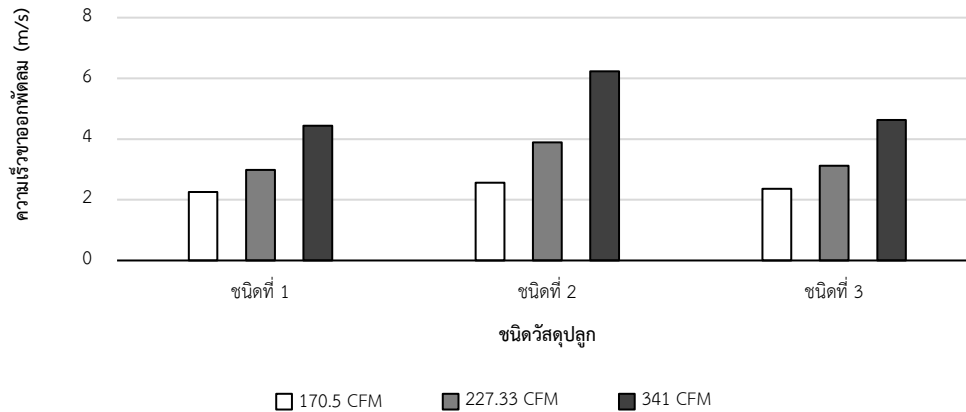
รูปที่ 10 แสดงการกระจายความดันของกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด ที่อัตราการไหลต่ำสุดเท่ากับ 170.5 CFM พบว่าความดันในวัสดุปลูกจะค่อย ๆ ลดลงจากตำแหน่งด้านบนของกระถาง ลงมาที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่มีวัสดุปลูก ซึ่งวัสดุปลูกชนิดที่ 1 ทำให้เกิดค่าความดันขาออกจากกระถางส่วนในสูงที่สุดเป็นผลทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันขาเข้าและขาออกจากวัสดุปลูกมีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุปลูกอีก 2 ชนิด วัสดุปลูกชนิดที่ 1 จึงมีค่าความดันลดน้อยที่สุด

3.4 ผลของวัสดุปลูกต่อความเร็ว

รูปที่ 11 และ 12 แสดงค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในและความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 8" ของกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด (ชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm ชนิดที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm) พิจารณาที่อัตราการไหลของพัดลมแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 170.5 227.33 และ 341 CFM



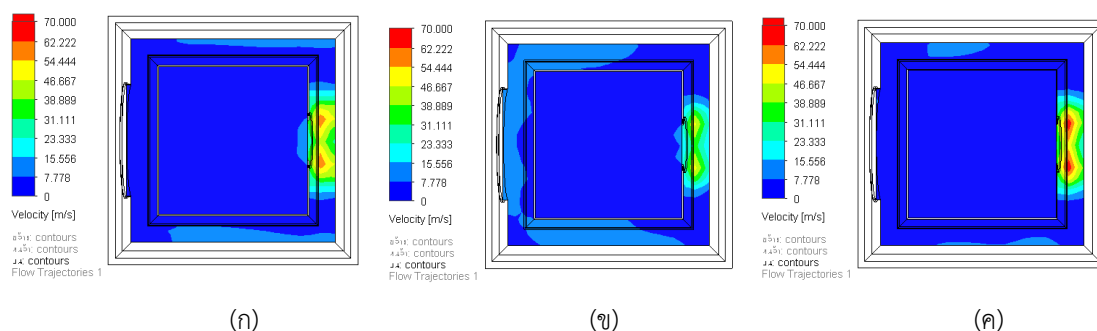
รูปที่ 11 ค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องลมออกจากกระถางส่วนในที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด ที่ขนาดพัดลม 8" อัตราการไหล 170.5 227.33 และ 341 CFM



รูปที่ 12 ค่าความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งช่องติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 8" ที่อัตราการไหล 170.5 227.33 และ 341 CFM ของกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด

จากผลการจำลองสภาพพบว่า อัตราการไหลของพัดลมแปรผันตรงกับความเร็วพัดลม และชนิดของวัสดุปลูกมีผลต่อค่าความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกและความเร็วพัดลม ขนาดรูพรุนและความพรุนมีผลต่อค่าความเร็วและค่าการซึมผ่านได้ [8] โดยที่ขนาดรูพรุนใหญ่และความพรุนสูงจะส่งผลทำให้ความเร็วผ่านวัสดุปลูกมีค่าสูงขึ้นและค่าการซึมผ่านได้มีค่าสูงขึ้น โดยพิจารณาที่อัตราการไหลที่เท่ากันที่ 341 CFM วัสดุปลูกชนิดที่ 2 จะใช้ความเร็วพัดลมสูงสุดที่ 6.23 m/s และมีความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกต่ำสุดที่ 9.06 m/s รองลงมาคือวัสดุปลูกชนิดที่ 3 มีความเร็วพัดลมเท่ากับ

4.63 m/s และความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกเท่ากับ 16.99 m/s และวัสดุปลูกชนิดที่ 1 มีความเร็วพัดลมเท่ากับ 4.44 m/s และความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกเท่ากับ 17.26 m/s วัสดุที่มีความต้านทานต่ำกว่าสามารถใช้ความเร็วพัดลมต่ำกว่าและใช้กำลังงานพัดลมลดลงเพื่อให้ได้อัตราการไหลเท่ากับวัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่า [17] ดังนั้นวัสดุปลูกชนิดที่ 1 ทำให้สามารถใช้ความเร็วพัดลมต่ำสุดเพื่อให้ได้อัตราการไหลที่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสมบัติของวัสดุที่มีความพรุนต่ำแต่ขนาดรูพรุนใหญ่ สอดคล้องกับผลของค่าความดันลดที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 13 การกระจายความเร็วในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด (ก) ชั้นที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm (ข) ชั้นที่ 2 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 2.5 μm และ (ค) ชั้นที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm ที่ขนาดพัดลม 8" อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 341 CFM

รูปที่ 13 แสดงการกระจายความเร็วในกระถางต้นไม้พอกอากาศที่มีวัสดุปลูกแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟในรูปที่ 11 และ 12 โดย

พิจารณาที่อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 341 CFM ของขนาดพัดลม 8" จากรูปที่ 13 พบว่า ความเร็วขาออกจากกระถางส่วนในที่มีวัสดุปลูกมีค่าสูงสุดที่วัสดุปลูก

ชนิดที่ 1 รองลงมาคือชนิดที่ 3 และ 2 ตามลำดับ ในทางกลับกัน ความเร็วภายในช่องทางการไหลอากาศ ในกระถางและความเร็วพัดลมจะมีค่าลดลง

งานวิจัยนี้สามารถทราบผลของอัตราการไหล ที่พัดลมดูดอากาศขนาดต่าง ๆ และสมบัติวัสดุปลูก ที่มีต่อความเร็วและความดันอากาศในกระถางต้นไม้พอกอากาศ แต่เนื่องจากแบบจำลองยังไม่มีเปรียบเทียบ กับผลการทดสอบจริง และแบบจำลองยังสามารถ พัฒนาให้มีความใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงได้ ดังนั้น ผลจากการจำลองจึงอาจใช้เป็นแนวทางในการ เลือกใช้ขนาดพัดลมและอัตราการไหล และสมบัติวัสดุ ปลูกที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกระถางต้นไม้พอก อากาศ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของ ความชื้นของวัสดุปลูกและความสัมพันธ์ของความพรุน และปริมาณน้ำที่ใช้ที่มีผลต่อความเร็วและความดัน อากาศในกระถางต้นไม้พอกอากาศ การถ่ายเทมวล และปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโต ของต้นไม้งานวิจัยต่อไปควรนำตัวแปรเหล่านี้มา พิจารณาร่วมด้วย รวมถึงการสร้างและทดสอบจริงเพื่อ ยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองและความสามารถในการ นำไปใช้ได้จริง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลที่พัด ลมดูดอากาศขนาดต่าง ๆ และสมบัติวัสดุปลูก ที่มีต่อ ความเร็วและความดันอากาศในกระถางต้นไม้พอก อากาศ ได้สร้างแบบจำลองการไหลอากาศผ่านวัสดุ พรุนและจำลองสภาพความเร็วและความดันอากาศโดย ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้พบว่าค่าความดันต่าง และความเร็วแปรผันตามอัตราการไหลของพัดลมขนาด ต่าง ๆ โดยที่พัดลมขนาด 6" มีค่าความดันต่างและอัตราการ ไหลที่สูงกว่าพัดลมขนาด 4" และใช้ความเร็วพัดลมที่ต่ำ กว่าพัดลมขนาด 8" วัสดุปลูกชนิดที่ 1 ความพรุน 0.35 ขนาดรูพรุน 5 μm มีค่าความดันลดน้อยที่สุด และมี ความเร็วขาออกจากวัสดุปลูกสูงที่สุดโดยใช้ความเร็ว พัดลมต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใช้กรองฝุ่น ขนาดเล็กในอากาศขนาด 2.5 ไมครอน วัสดุที่เหมาะสม ที่สุดคือ ชนิดที่ 3 ความพรุน 0.7 ขนาดรูพรุน 2.5 μm

เนื่องจากมีขนาดกรองที่เหมาะสมกว่าวัสดุปลูกชนิดที่ 1 และมีค่าความดันลดน้อย มีความเร็วขาออกจากวัสดุ ปลูกสูง และใช้ความเร็วพัดลมต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุปลูกชนิดที่ 2

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะ วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนาย ชัชวาลย์ จัปใจนาย สำหรับการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhu Z, Jin H. The analysis and design of small air purifier. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 2019;562(1):012046:1-4.
- [2] Plasencia AC. Design of a nature-based air urifier [master's thesis]. Delft, Netherland: Delft University of Technology;2020.
- [3] Feng Z, Long Z, Chen Q. Assessment of various CFD models for predicting airflow and pressure drop through pleated filter system. Building and Environment. 2014;75:132-41.
- [4] Nassif N. The impact of air filter pressure drop on the performance of typical air-conditioning systems. Building Simulation. 2012;5:345-50.
- [5] Intagun W, Khamdaeng T, Prom-Ngarm P, Panyoyai N. Effect of core puncture diameter on bio-char kiln efficiency. International Journal of Biotechnology and Bioengineering. 2018;12(11):435-9.

- [6] Panyoyai N, Petchaihan L, Wongsiriamnuay T, Hiransatitporn B, Khamdaeng T. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types. *Maharakham International Journal of Engineering Technology*. 2019;5(2):59-64.
- [7] Tawonwan T. A study of two-dimensional modeling of behavior of air flow through the cylinder by computational fluid dynamics technique (CFD). *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)*. 2017;12(1):38-50. (in Thai)
- [8] Gómez-Martín A, Orihuela MP, Becerra JA, Martínez-Fernández J, Ramírez-Rico J. Permeability and mechanical integrity of porous biomorphic SiC ceramics for application as hot-gas filters. *Materials and Design*. 2016;107:450-60.
- [9] Raffray AR, Pulsifer J, Tillack MS. Modeling flow and heat transfer through porous media for high heat flux applications. La Jolla, CA: the University of California Energy Institute's (UCEI), 2000.
- [10] Soloveva OV, Solovev SA, Khusainov RR, Shubina AS, Antipin AV. Numerical simulation of gas flow in porous structures of various geometries. *J Phys: Conf Ser* 2019;1210 012134:1-7.
- [11] Sbrizzai F, Faraldi P, Soldati A. Appraisal of three dimensional numerical simulation for sub-micron particle deposition in a micro-porous ceramic filter. *Chemical Engineering Science*. 2005;60:6551-63.
- [12] ISO 16890-1:2016(en), Air filters for general ventilation–Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM).
- [13] Velzeboer I, Blom MJ, Duyzer JH. Effects of plant systems on air quality. Petten, Netherlands: TNO, 2019.
- [14] Techaampai P. Computational fluid dynamics by finite element and finite volume methods. 2 ed. Bangkok: Chula Press; 2013.
- [15] Asawa GL. Irrigation and water resources engineering. New Dehli: New Age International (P) Ltd.; 2008.
- [16] Gunashekar S, Pillai KM, Church BC, Abu-Zahra NH. Liquid flow in polyurethane foams for filtration applications: a study on their characterization and permeability estimation. *Journal of Porous Materials*. 2015;22:749-59.
- [17] Eiland R, Fernandes J, Gebrehiwot B, Vallejo M, Agonafer D, Mulay V, editors. Air filter effects on data center supply fan power. 13th IEEE ITherm Conference; 2012; San Diego, USA.
- [18] Mancin S, Zilio C, Cavallini A, Rossetto L. Pressure drop during air flow in aluminum foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53:3121–30.
- [19] Zhang W, Deng S, Wang Y, Lin Z. Modeling the surface filtration pressure drop of PTFE HEPA filter media for low load applications. *Building and Environment*. 2020;177(11):106905:1-9.

การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

จตุพงศ์ ครองธำนิทร์¹ และ สมเจตน์ พชรพันธ์^{1*}

fengsjpc@ku.ac.th

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Received : 24-Aug-2021
Revised : 1-Nov-2021
Accepted : 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ ที่มีต่อความแข็งแรงการยึดเกาะ (Bond strength) ระหว่างพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้น (Substrate material) และวัสดุซ้อนทับ (Overmolded material) โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดของวัสดุซ้อนทับ (Overmolded temperature) อุณหภูมิของวัสดุพื้น (Substrate temperature) และแรงดันคงค้าง (Holding pressure) ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และแรงกระแทก (Impact strength) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะสัมผัส (Contact distance) และลักษณะของพื้นผิวสัมผัส (Surface pattern) ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) จากผลการทดสอบพบว่า ความแข็งแรงการยึดเกาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ความแข็งแรงการยึดเกาะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนพบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) ที่บริเวณหน้าสัมผัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉากและร่องแนวขนานกับทิศทางการรับแรงให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ดีกว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบเรียบ

คำสำคัญ: สมบัติการยึดเกาะ กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ปัจจัยในกระบวนการผลิต

An Investigation into Bond Strength of Injection Overmolded Polypropylene

Jatuphong Krongthanin¹ and Somjate Patcharaphun^{1*}

fengsjpc@ku.ac.th

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 1-Nov-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

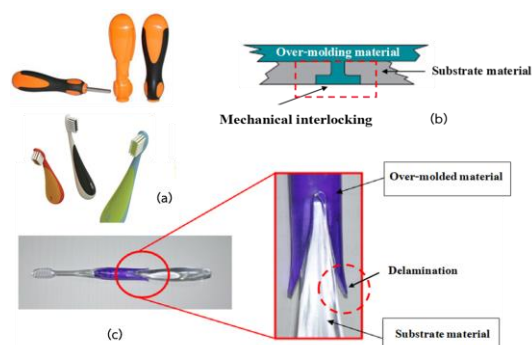
Abstract

The aim of this research was to investigate the influence of injection overmolding parameters on the bond strength between substrate and overmolded polypropylene. The injection overmolded temperature, substrate temperature, and holding pressure on the tensile and impact strengths of injection overmolded part were studied in details. In addition, the effects of contact distance and surface pattern on the lap shear strength were also main interest. The experimental results indicated that the bond strength particularly increased with increasing substrate temperature, while less significant effect was found with increasing overmolded temperature. It can be seen that the shear strength tended to decrease with the increase of contact distance. This was associated with the decrease of intermolecular diffusion at the interface as increase in flow distance. Furthermore, the significant improvement of shear strength was found by using the perpendicular and parallel groove patterns on the substrate surface.

Keywords: Bond strength, Injection overmolding process, Processing parameters

1. บทนำ

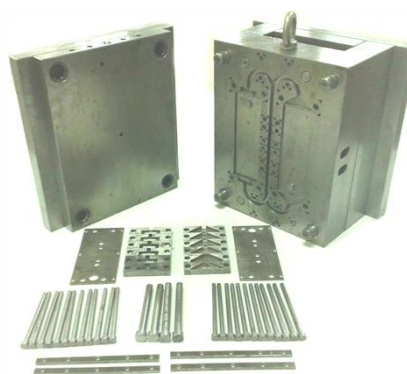
กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติก เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ [1] นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด (Multi-components) ยังสามารถใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุพอลิเมอร์หลายชนิดในชิ้นงานเดียวโดยไม่ต้องประกอบชิ้นงานแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน [2] ดังแสดงในรูปที่ 1a ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ เช่น การออกแบบแม่พิมพ์ (Mold design) สมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ (Compatibility) รวมถึงปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป [3] ปัญหาที่พบบ่อยในภาคอุตสาหกรรมของการฉีดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ คือ การหลุดลอก (Delamination) ซึ่งปัญหาดังกล่าวทางโรงงานผู้ประกอบการส่วนใหญ่นิยมแก้ปัญหาโดยการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์ไหลส่วนหนึ่งของวัสดุซ้อนทับให้ไหลทะลุไปยังอีกด้านของวัสดุพื้น เพื่อให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นการยึดเกาะแบบเชิงกล (Mechanical interlocking) ดังแสดงในรูปที่ 1b แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณหรือทิศทางอื่นที่ห่างจากตำแหน่งของการยึดเกาะแบบเชิงกลก็ยังคงเกิดปัญหาการหลุดลอกของวัสดุซ้อนทับ ดังแสดงในรูปที่ 1c ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดของวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิของวัสดุพื้น และแรงดันคงค้าง รวมถึงอิทธิพลของระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อสมบัติการยึดเกาะ (Bond strength) ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับโดยได้ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) แรงกระแทก (Impact strength) และแรงเฉือน (Shear strength) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ต่อไป



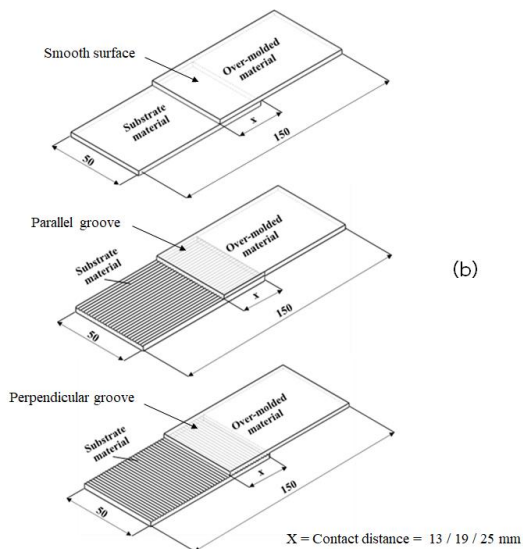
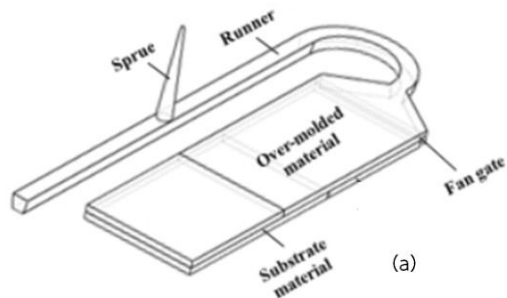
รูปที่ 1 (a) ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ (b) การยึดเกาะกันแบบทางกล และ (c) การหลุดลอกของวัสดุซ้อนทับออกจากวัสดุพื้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรด NK1100 จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) สำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 500-320C และได้ทำการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสำหรับการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (ตามมาตรฐาน ASTM D638) และสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบ IZOD (ตามมาตรฐาน ASTM D256) และสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM D3163 รูปที่ 3a และ b แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์



รูปที่ 2 แม่พิมพ์ฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3 (a) ลักษณะชิ้นงานโอเวอร์โมลด์สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก (b) ลักษณะชิ้นงานโอเวอร์โมลด์สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสต่างๆ กัน

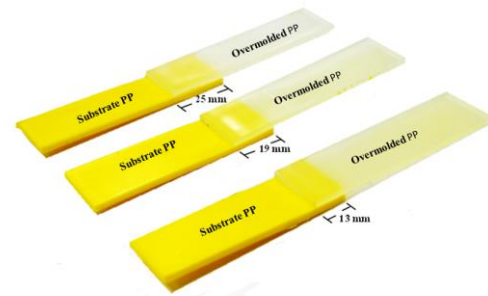
ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพื้น) และแรงดันคงค้าง ในขณะที่ระยะสัมผัสและลักษณะของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุพื้นและชิ้นงานโอเวอร์โมลด์

Processing Conditions	Substrate specimen	Over-molded specimen
Injection pressure (bar)	900	900
Injection speed (ccm/sec)	10	5
Holding pressure (bar)	800	800
Cooling time (sec)	20	60
Clamping force (KN)	300	300
Melt temperature ($^{\circ}\text{C}$)	230	220/230/240
Mold temperature ($^{\circ}\text{C}$)	30	30/60/90
Contact area (mm^2)	-	325/475/625

ตารางที่ 2 ระยะสัมผัสและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

Surface pattern	Contact distance (mm)
Smooth	13/19/25
Perpendicular groove	13/19/25
Parallel groove	13/19/25



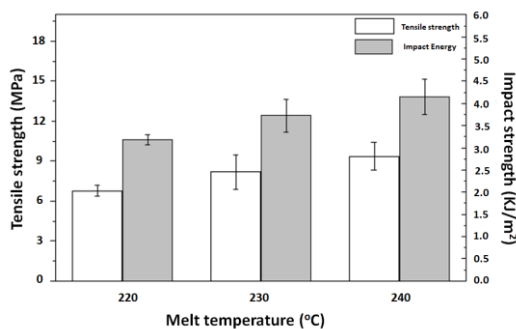
รูปที่ 4 ชิ้นงานโอเวอร์โมลด์สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนที่ระยะสัมผัสต่างๆ กัน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

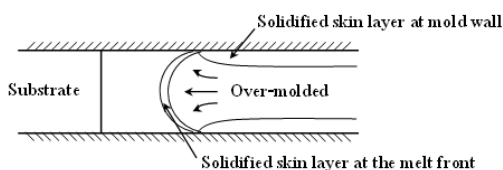
3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์หรือวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และใช้แรงดันคงค้างที่ 900 bar ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเพิ่มขึ้นจาก 220°C

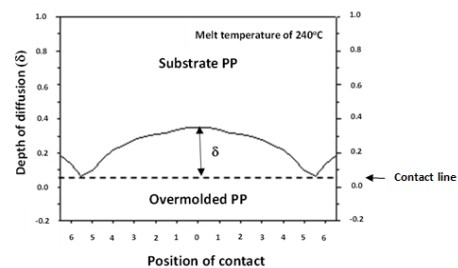
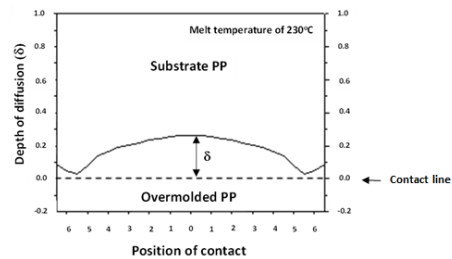
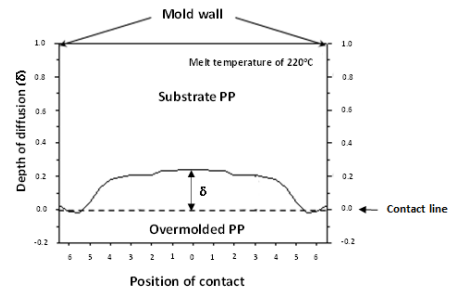
ถึง 240°C ส่งผลให้ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลายของวัสดุพื้นและยึดเกาะกับวัสดุชั้นที่เป็นเนื้อเดียวกัน รวมถึง ความหนาที่ลดลงของชั้นผิวที่เย็นตัวที่บริเวณด้านหน้า (Solidified skin layer at the melt front) ซึ่งเกิดจากการไหลแบบ Fountain flow จึงทำให้บริเวณ หน้าสัมผัสของวัสดุชั้น (Bond interface) มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้หากพิจารณาระยะความลึกการหลอมละลาย (Depth of diffusion, δ) หรือ ปริมาณ การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) บริเวณ หน้าสัมผัส (Contact line) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย (Optical microscopy) ร่วมกับ โปรแกรม Image J พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้น ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายตลอดแนวสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุชั้นมากขึ้น จึงทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุชั้นที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก



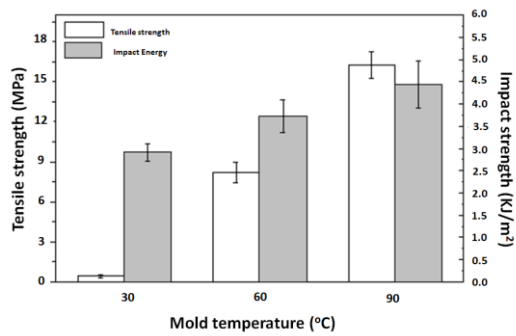
รูปที่ 6 ชั้นผิวที่เย็นตัวที่บริเวณด้านหน้าซึ่งเกิดจากการไหลแบบ Fountain flow



รูปที่ 7 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นต่างๆ กัน

3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

หากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์หรืออุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างวัสดุชั้นกับวัสดุพื้น โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุชั้นเท่ากับ 230°C และแรงดันคงค้าง 900 bar ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุชั้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลง ทำให้เวลาในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างผิวสัมผัสมากขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิวัสดุพื้นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาของชั้นผิวที่เย็นตัวลดลงเนื่องจากความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีการถ่ายเทไปยังแม่พิมพ์ได้น้อยลง จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุชั้นมากขึ้น

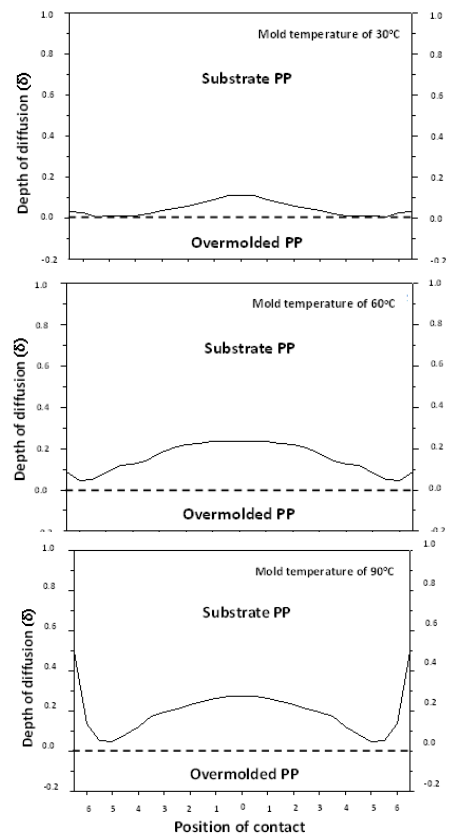


รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

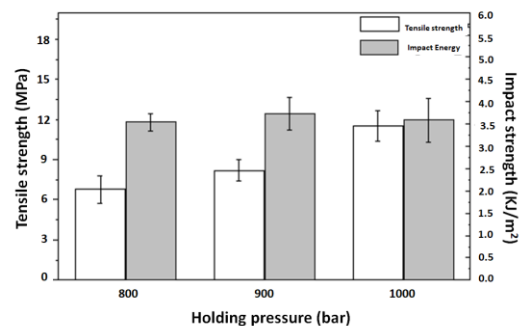
นอกจากนี้หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุพื้นที่มีต่อระยะความลึกการหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้น ส่งผลให้ระยะความลึกการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ช้าลง จึงทำให้หน้าสัมผัสของวัสดุซ้อนทับมีเวลาในการแพร่ข้ามมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุพื้น 90°C พบว่าระยะการหลอมละลายบริเวณของผนังชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนเฉือน (Shear heating) ระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวที่เย็นตัวและชั้นแกนกลาง ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของวัสดุซ้อนทับที่ผนังมีค่าที่ลดลง ดังนั้นจึงมีการแพร่ข้ามที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น

รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของการเพิ่มแรงดันค้ำที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ 230°C และอุณหภูมิวัสดุพื้น 60°C ผลที่ได้พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้มีสาเหตุจาก การเพิ่มแรงดันค้ำส่งผลให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณหน้าสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการแพร่ข้ามระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มากขึ้น ดังนั้นสมบัติการยึดเกาะจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงภาพถ่ายบริเวณหน้าสัมผัส พบว่าเมื่อแรงดันค้ำเพิ่มสูงขึ้น ความลึกของการหลอมละลายหรือปริมาณการแพร่ข้ามของวัสดุซ้อนทับ มีแนวโน้มที่

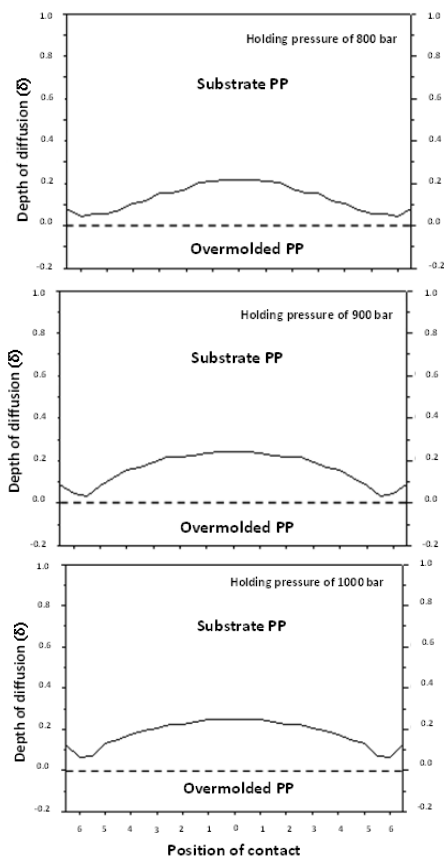
ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงดันค้ำ ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของวัสดุซ้อนทับ และอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความลึกของการหลอมละลายมีการเปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 9 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน



รูปที่ 10 อิทธิพลของแรงดันค้ำที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกระแทก

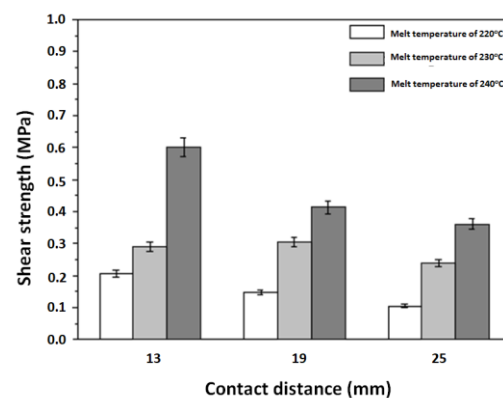


รูปที่ 11 ระยะความลึกของการหลอมละลายที่บริเวณหน้าสัมผัสเมื่อใช้แรงดันคงค้างต่างๆ กัน

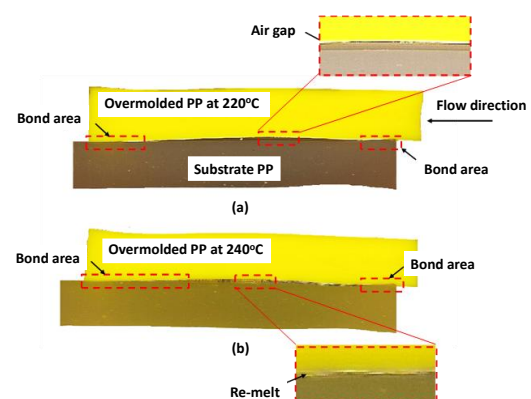
3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัส ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของวัสดุที่เป็นชิ้นงาน PP แบบผิวเรียบที่อุณหภูมิ 30 °C ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการหลอมละลายของวัสดุพื้น (Re-melt) ดังแสดงใน 13b ในขณะที่รูป 13a แสดงการเกิดช่องว่างอากาศ (Air gap) จากการฉีดวัสดุซ้อนทับที่ อุณหภูมิ 220°C ทั้งนี้มีสาเหตุจากการหดตัวที่ต่างกันในแต่ละด้านของวัสดุซ้อนทับ กล่าวคือ วัสดุซ้อนทับด้านที่ติดผนังของแม่พิมพ์มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงเกิดเป็นชั้นผิวที่แข็งตัว (Solidified skin layer) ซึ่งมีความหนามากกว่า ในขณะที่วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการ

ถ่ายเทความร้อนที่ต่ำมาก ดังนั้นเมื่อชั้นแกนกลางของวัสดุซ้อนทับเริ่มเย็นตัว จึงทำให้วัสดุซ้อนทับด้านที่สัมผัสกับวัสดุพื้นมีการหดตัวมากกว่าด้านที่สัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ เกิดเป็นช่องว่างอากาศขนาดเล็กบริเวณหน้าสัมผัส ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าที่ลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัสพบว่า ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มมีการเย็นตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณด้านหน้าการไหล ส่งผลให้อัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลมีแนวโน้มลดลง



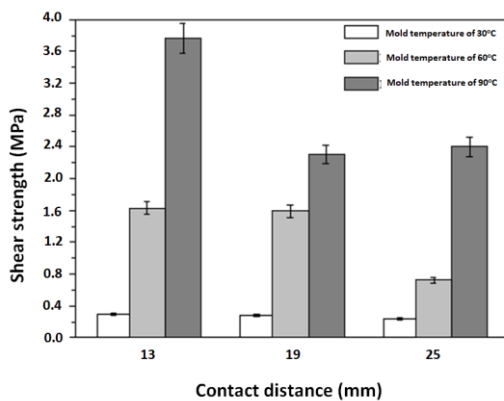
รูปที่ 12 อิทธิพลของอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือนในกรณีวัสดุพื้นแบบผิวเรียบ



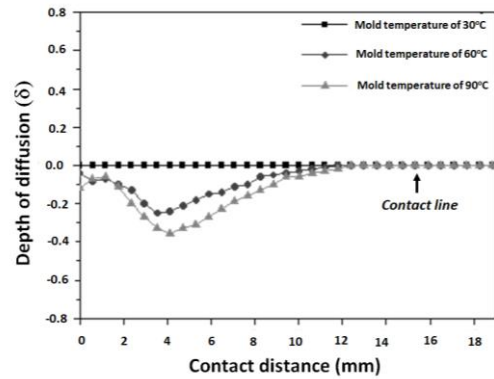
รูปที่ 13 ภาพตัดตามแนวยาวของชิ้นงาน PP ที่ผ่านกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ที่อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ (a) 220°C และ (b) 240°C

3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์หรือวัสดุพื้นและระยะสัมผัส ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยใช้วัสดุพื้นแบบแผ่นเรียบ และอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับเท่ากับ 230°C พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ลดลง จึงส่งผลให้วัสดุซ้อนทับมีความลึกและระยะการหลอมละลายที่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15 และหากพิจารณาอิทธิพลของระยะสัมผัสที่มากขึ้น พบว่า ในกรณีของอุณหภูมิวัสดุพื้น 30°C สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิของวัสดุพื้นเท่ากับ 60°C และ 90°C พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่ลดลงรวมถึงระยะการหลอมละลายที่เริ่มมีค่าไม่แตกต่างกันที่ระยะทางการไหลประมาณ 12 mm (ดังแสดงในรูปที่ 15)



รูปที่ 14 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือนในกรณีวัสดุพื้นแบบผิวเรียบ

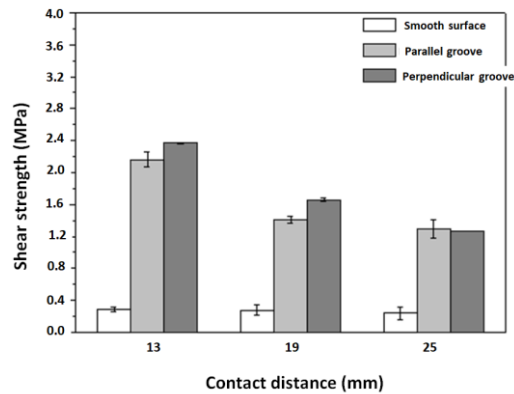


รูปที่ 15 ความลึกและระยะทางการหลอมละลายของวัสดุพื้น เมื่อทำการฉีดที่ระยะสัมผัสเท่ากับ 19 mm

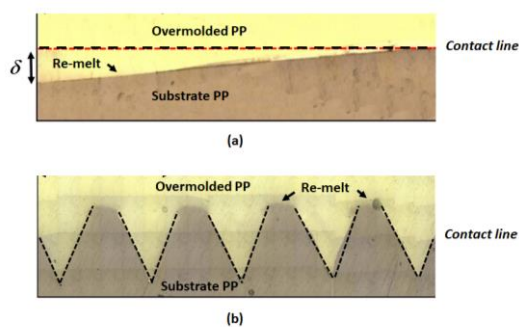
3.5 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือน

รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนเมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิว (Surface pattern) ต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและอุณหภูมิวัสดุพื้นเท่ากับ 230°C และ 30°C ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าเมื่อใช้วัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิวแบบร่องขนาน (Parallel groove) และร่องแนวตั้งฉาก (Perpendicular groove) กับทิศทางการไหล ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุพื้นที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวแบบร่องทั้ง 2 แบบ มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) มากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสแบบแผ่นเรียบ ดังแสดงรูปที่ 17 จึงทำให้วัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้นมีพื้นที่ในการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุพื้นที่มีผิวแบบร่องแนวตั้งฉากให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนมากกว่าที่มีผิวแบบร่องขนานที่ระยะสัมผัส 13 และ 19 mm (ดังแสดงในรูปที่ 16) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุพื้นที่มีผิวสัมผัสแบบร่องแนวตั้งฉากเกิดการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlock) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะสัมผัสเพิ่มมากขึ้น (ที่ระยะสัมผัส 25 mm) พบว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะจากวัสดุพื้นที่มีพื้นผิวแบบร่องขนานและร่องแนวตั้งฉากมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวแบบร่องแนวตั้งฉาก ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ส่งผลให้ความเร็วในการไหลของวัสดุซ้อนทับเริ่มลดลง

เมื่อระยะทางในการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุซ้อนทับมีความหนาของชั้นผิวที่แข็งตัวบริเวณด้านหน้าการไหลมากกว่าพื้นผิวแบบร่องขนาน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ลดลง



รูปที่ 16 อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวและระยะสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน



รูปที่ 17 ภาพตัดตามแนวยาวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุซ้อนทับและวัสดุพื้น (a) แบบแผ่นเรียบ และ (b) แบบแผ่นร่องแนวตั้งฉาก

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการฉีดแบบโอเวอร์โมลด์ที่ มีต่อสมบัติการยึดเกาะซึ่งได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง แรงกระแทก และแรงเฉือนของพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยปัจจัยในกระบวนการฉีดที่ได้ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น และแรงดันคงค้าง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุพื้นส่งผลให้สมบัติความต้านทาน

ต่อแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ ในขณะที่การเพิ่มแรงดันคงค้างไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะมากนัก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับ อุณหภูมิวัสดุพื้น ระยะทางและลักษณะของพื้นผิวสัมผัส พบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฉีดวัสดุซ้อนทับและอุณหภูมิวัสดุพื้น ในขณะที่การเพิ่มระยะสัมผัส ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลง และหากพิจารณาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่มีต่อความต้านทานต่อแรงเฉือน พบว่าผิวชิ้นงานแบบแผ่นร่องแนวขนานและแบบแผ่นร่องแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลให้สมบัติการยึดเกาะที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับผิวชิ้นงานแบบแผ่นเรียบ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าในระยะทางการไหลที่เท่ากัน รวมถึงการยึดเกาะทางกลที่เกิดขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Osswald T.A, Polymer Processing: Fundamentals, Hanhser Publishers, Munich, 1998.
- [2] Rothe J. Special injection molding methods, Kunststoffe Plast Europe, 1997, 87(11):1564-81.
- [3] Costalas E, Krauss H. Optimized bonding of composites in over-injection. Kunststoffe Plast Europe. 1995;85(11):1887-91.

การสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ

สุภาพร พองจันทร์ตา^{1*} และ วิเชษฐ์ สิงห์โต¹

supaporn_fon@g.cmru.ac.th^{1*}, wichet_sin@g.cmru.ac.th¹

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

Received : 24-Aug-2021
Revised : 15-Nov-2021
Accepted : 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ ที่สามารถสุ่มโจทย์พร้อมเฉลยวิธีการคำนวณตามโจทย์ที่ได้จากการสุ่ม และเพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ โดยโปรแกรมเกมนี้ แบ่งเป็น 3 กรณี ได้แก่ 1) การสุ่มโจทย์จำนวน 4 ตัว และคำตอบ 2 หลัก 2) การสุ่มโจทย์จำนวน 5 ตัว และคำตอบ 2 หลัก และ 3) การสุ่มโจทย์จำนวน 5 ตัว และคำตอบ 3 หลัก ที่สามารถใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ การบวก การลบ การคูณ การหาร การยกกำลัง การถอดราก แคลคูลูเรียด และ ผลรวม (summation) ผู้เล่นเกมสามารถเลือกระดับ ความยากง่ายได้ทั้งหมด 12 ระดับ โดยเลือกเล่นได้ ทั้งระบบปฏิบัติการบนคอมพิวเตอร์ และระบบปฏิบัติการบนสมาร์ตโฟน (smartphone) จากผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานโปรแกรมเกม 180 IQ จำนวน 624 คน ประกอบด้วย ครูผู้สอนวิชาคณิตศาสตร์และ นักเรียนที่กำลังศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดใกล้เคียง พบว่า ผู้ใช้งานโปรแกรมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ : โปรแกรมเกม 180 IQ ความรู้สึกรู้สึกเชิงจำนวน สมการคำตอบ

Programming For The Game 180 IQ

Supaporn Fongchanta^{1*} and Wichet Singto¹

supaporn_fon@cmru.ac.th^{1*}, wichet_sin@cmru.ac.th¹

¹Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 15-Nov-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

Abstract

The purposes of this research were construct the game 180 IQ programme which can be able to randomize problems and this solutions and study the user's satisfaction of the game 180 IQ programme. There are 3 cases of this programme, that are 1) Random 4 digits problem and 2 digits solution. 2) Random 5 digits problem and 2 digits solution and 3) Random 5 digits problem and 3 digits solution. The operations that can be used to computer are addition, subtraction, multiplication, division, power, n-root, factorial and summation. The 180 IQ program has 12 levels and it can run on both computer and smartphone. The user's satisfaction survey was applied to 624 people including Mathematics teachers and students in Chiang Mai and nearly provinces. The average point of the satisfaction is 4.12 which is the good level.

Keywords: 180 IQ Program, Number Sense, Solution Equation

1. บทนำ

เกมคณิตศาสตร์ นอกจากจะเล่นเพื่อความสนุกสนานเพลิดเพลินแล้ว ยังมีประโยชน์ในด้านการฝึกความคิด การตัดสินใจแก้ปัญหา การใช้ไหวพริบในการวางแผน และฝึกทักษะการคิดทางคณิตศาสตร์ [1] เกม 180 IQ เป็นอีกเกมหนึ่ง ที่ช่วยพัฒนาทักษะการคิดทางคณิตศาสตร์ ทั้งยังเสริมสร้างสมาธิให้กับผู้เล่นอีกด้วย [2] ซึ่งในปัจจุบัน ได้มีการส่งเสริมให้มีการจัดการแข่งขันเกม 180 IQ หลายแห่ง (บางแห่งใช้ชื่อว่า เกมคิดเลขเร็ว) เช่น งานศิลปหัตถกรรมนักเรียน งานวันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ ฯลฯ โดยมีกติกา คือ เมื่อสุ่มโจทย์จากเลขโดด 4 หรือ 5 ตัว และผลลัพธ์ 2 หลัก หรือ 3 หลัก และการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ได้แก่ การบวก การลบ การคูณ การหาร การยกกำลัง การถอดราก แฟคทอเรียล และ ผลรวม (summation) โดยผู้เล่นสามารถใช้เลขโดดแต่ละตัวได้เพียงครั้งเดียว เพื่อสร้างสมการคำตอบให้มีผลลัพธ์ตรงกับที่โจทย์กำหนดให้

ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ได้เล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาทักษะการคิดของนักเรียนโดยใช้เกม ซึ่งทางภาควิชาคณิตศาสตร์ ได้ร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดการแข่งขันเกม 180 IQ ขึ้นทุกปี โดยเริ่มจัดครั้งแรกในปี พ.ศ. 2557 และได้รับตอบรับจากผู้สนใจเป็นอย่างดี และล่าสุดเมื่อปี พ.ศ. 2562 (ก่อนสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรค โควิด-19) มีนักเรียนผู้สนใจเข้าร่วมการแข่งขันทั้งหมด 219 คน จาก 66 โรงเรียน โดยในการแข่งขันเกม 180 IQ ทุก ๆ ปีที่ผ่านมา ผู้ดำเนินการจัดกิจกรรมได้ใช้ โปรแกรม Geometer's Sketchpad (GSP) ในการสร้างโจทย์ [3] ซึ่งบางโจทย์ไม่ตรงกับกติกาการเล่น เช่น มีเลข 0 มากกว่าหนึ่งตัว หรือตัวเลขโดดอื่น (ที่ไม่ใช่เลขศูนย์) มากกว่าสองตัว จึงทำให้ กรรมการต้องเปลี่ยนโจทย์ใหม่ทำให้เสียเวลาในการแข่งขัน และทั้งโจทย์ที่ได้จากการสุ่มโดยโปรแกรมดังกล่าว บางข้อก็ไม่สามารถสร้างสมการให้ได้คำตอบตรงกับที่โจทย์กำหนดได้ จึงทำให้ผู้เข้าแข่งขันขาดความเชื่อมั่น ในการสร้างสมการคำตอบ

ปี 2560 ชนินาถและ สุภาพร [4] ได้สร้างโปรแกรมแบบเฉลยเกม 24 ที่พัฒนามาจากโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งเกม 24 เป็นเกมคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะการเล่นคล้ายเกม 180 IQ แต่ความซับซ้อนน้อยกว่าเช่น การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่มีเพียง 4 การดำเนินการได้แก่ การบวก การลบ การคูณ และการหาร และผลลัพธ์ของสมการที่ได้ต้องเท่ากับ 24 ผู้วิจัยจึงอยากพัฒนาและต่อยอดเกม 24 จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและพบว่า ปัจจุบันมีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือไลบรารีคณิตศาสตร์ขั้นสูงสำหรับภาษาจาวาสคริปต์ที่ชื่อว่า Math.JS ที่สามารถพัฒนาให้ตรงตามกติกาเกม 180 IQ ได้ อีกทั้งผู้วิจัยยังได้ทำการสำรวจ application ต่าง ๆ บนระบบปฏิบัติการ IOS และ Android บนสมาร์ตโฟนเกี่ยวกับเกมที่มีลักษณะการเล่นคล้ายกับ เกม 180 IQ ก็ยังไม่พบ application ลักษณะดังกล่าว จึงสนใจที่จะสร้างนวัตกรรม โปรแกรมเกม 180 IQ ที่สามารถใช้ได้บนระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และ สมาร์ตโฟน โดยโปรแกรมหาดังกล่าวจะสามารถสร้างโจทย์ พร้อมเฉลยวิธีการในการคำนวณ (การสร้างสมการคำตอบ) เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อ ครู นักเรียน หรือสถานศึกษา รวมถึงผู้ที่มีความสนใจสามารถนำโปรแกรมเกม 180 IQ นี้ไปใช้และพัฒนาทักษะความสามารถทางการคิดคำนวณต่อไป

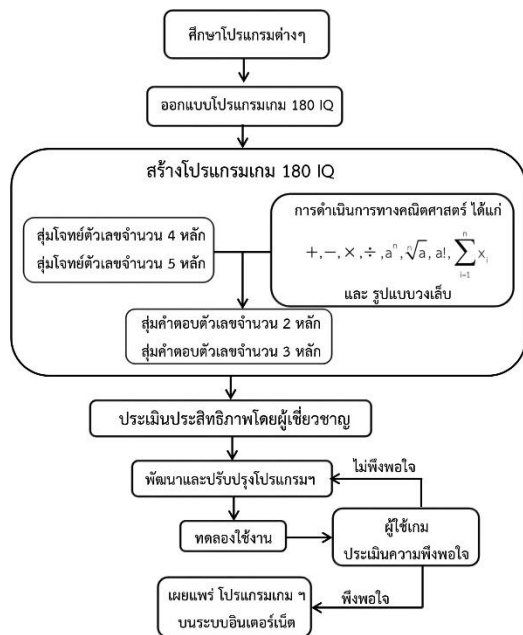
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ ที่สามารถสร้างโจทย์พร้อมเฉลยวิธีการคำนวณตามโจทย์ที่กำหนดให้

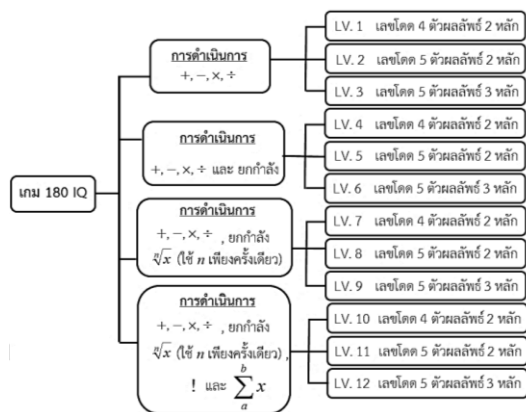
2.2 เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ ที่สามารถสุ่มโจทย์พร้อมเฉลยวิธีการคำนวณตามโจทย์ที่ได้จากการสุ่ม และเพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานไว้ดังนี้



รูปที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัย
โดยเกม 180 IQ แบ่งความยากเป็น 12 ระดับ ดังนี้

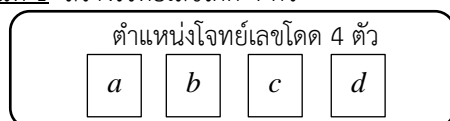


รูปที่ 2 ระดับความยากของเกม 180 IQ

3.1 การสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ มี

ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 สร้างโจทย์เลขโดด 4 ตัว



รูปที่ 3 การพิจารณาโจทย์เลขโดด 4 ตัว

โดยกำหนดเงื่อนไขคือ

ตำแหน่ง a สามารถปรากฏเลข 0 – 9

ตำแหน่ง b สามารถปรากฏเลข 1 – 9

ตำแหน่ง c สามารถปรากฏเลข 1 – 9 และไม่ซ้ำกับเลข
ในตำแหน่ง b

ตำแหน่ง d สามารถปรากฏเลข 1 – 9 และไม่ซ้ำกับเลข
ในตำแหน่ง b และ c

ดังนั้นรูปแบบโจทย์สามารถแยกกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1	a	b	c	d						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		2	3	4	5	6	7	8	9	1
		3	4	5	6	7	8	9	1	2
		4	5	6	7	8	9	1	2	3
		5	6	7	8	9	1	2	3	4
		6	7	8	9	1	2	3	4	5
		7	8	9	1	2	3	4	5	6
		8	9	1	2	3	4	5	6	7
		9	1	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 4 การพิจารณาตำแหน่ง $a=0$ และ $b \neq c \neq d$

จากรูปที่ 4 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด 63 กรณี

กรณี 2

a	b	c	d					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	3	4	5	6	7	8	9	2
	4	5	6	7	8	9	2	3
	5	6	7	8	9	2	3	4
	6	7	8	9	2	3	4	5
	7	8	9	2	3	4	5	6
	8	9	2	3	4	5	6	7
	9	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 5 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a \neq 0$ และ $a \neq b \neq c \neq d$

จากรูปที่ 5 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด
 $48 \times 9 = 432$ กรณี

กรณีที่ 3

a	b	c	d						
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	3	4	5	6	7	8	9	2
	1	4	5	6	7	8	9	2	3
	1	5	6	7	8	9	2	3	4
	1	6	7	8	9	2	3	4	5
	1	7	8	9	2	3	4	5	6
	1	8	9	2	3	4	5	6	7
	1	9	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 6 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = b$ แต่ $b \neq c \neq d$

จากรูปที่ 6 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$56 \times 9 = 504 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 4

a	b	c	d						
1	2	1	3	4	5	6	7	8	9
	3	1	4	5	6	7	8	9	2
	4	1	5	6	7	8	9	2	3
	5	1	6	7	8	9	2	3	4
	6	1	7	8	9	2	3	4	5
	7	1	8	9	2	3	4	5	6
	8	1	9	2	3	4	5	6	7
	9	1	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 7 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = c$ แต่ $b \neq c \neq d$

จากรูปที่ 7 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$56 \times 9 = 504 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 5

a	b	c							d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
	3	4	5	6	7	8	9	2	1
	4	5	6	7	8	9	2	3	1
	5	6	7	8	9	2	3	4	1
	6	7	8	9	2	3	4	5	1
	7	8	9	2	3	4	5	6	1
	8	9	2	3	4	5	6	7	1
	9	2	3	4	5	6	7	8	1

รูปที่ 8 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = d$ แต่ $b \neq c \neq d$

จากรูปที่ 8 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

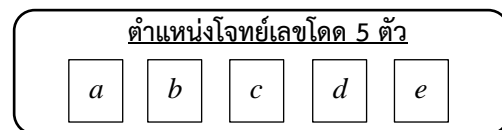
$$56 \times 9 = 504 \text{ กรณี}$$

ดังนั้น รูปแบบโจทย์เลขโดด 4 ตัวสามารถสร้างได้ทั้งหมด 2,007 กรณี

ขั้นที่ 2 พิจารณาวงเล็บของการดำเนินการ ของสมการเลขโดด 4 ตัว มีทั้งหมด 5 รูปแบบไม่ซ้ำกันดังนี้ กำหนดให้ \square คือ การดำเนินการทางคณิตศาสตร์

1. $((a \square b) \square c) \square d$
2. $(a \square (b \square c)) \square d$
3. $a \square ((b \square c) \square d)$
4. $a \square (b \square (c \square d))$
5. $(a \square b) \square (c \square d)$

ขั้นที่ 3 สร้างโจทย์เลขโดด 5 ตัว



รูปที่ 9 การพิจารณาโจทย์เลขโดด 5 ตัว

โดยกำหนดเงื่อนไขคือ

ตำแหน่ง a สามารถปรากฏเลข 0 – 9

ตำแหน่ง b สามารถปรากฏเลข 1 – 9

ตำแหน่ง c สามารถปรากฏเลข 1 – 9 และไม่ซ้ำกับเลขในตำแหน่ง b

ตำแหน่ง d สามารถปรากฏเลข 1 – 9 และไม่ซ้ำกับเลขในตำแหน่ง b และ c

ตำแหน่ง e สามารถปรากฏเลข 1 – 9 และไม่ซ้ำกับเลขในตำแหน่ง b, c และ d

ดังนั้นรูปแบบโจทย์สามารถแยกกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1

a	b	c	d	e					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2	3	4	5	6	7	8	9	1
	3	4	5	6	7	8	9	1	2
	4	5	6	7	8	9	1	2	3
	5	6	7	8	9	1	2	3	4
	6	7	8	9	1	2	3	4	5
	7	8	9	1	2	3	4	5	6
	8	9	1	2	3	4	5	6	7
	9	1	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 10 การพิจารณาตำแหน่ง $a = 0$ และ

$$b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 10 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด 54 กรณี

กรณีที่ 2

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	3	4	5	6	7	8	9	2
	4	5	6	7	8	9	2	3
	5	6	7	8	9	2	3	4
	6	7	8	9	2	3	4	5
	7	8	9	2	3	4	5	6
	8	9	2	3	4	5	6	7
	9	2	3	4	5	6	7	8
	2	3	4	5	6	7	8	9

รูปที่ 11 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a \neq 0$ และ

$$a \neq b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 11 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$40 \times 9 = 360 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 3

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>					
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	3	4	5	6	7	8	9	2
	1	4	5	6	7	8	9	2	3
	1	5	6	7	8	9	2	3	4
	1	6	7	8	9	2	3	4	5
	1	7	8	9	2	3	4	5	6
	1	8	9	2	3	4	5	6	7
	1	9	2	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 12 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = b$ แต่

$$b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 12 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$48 \times 9 = 432 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 4

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>					
1	2	1	3	4	5	6	7	8	9
	3	1	4	5	6	7	8	9	2
	4	1	5	6	7	8	9	2	3
	5	1	6	7	8	9	2	3	4
	6	1	7	8	9	2	3	4	5
	7	1	8	9	2	3	4	5	6
	8	1	9	2	3	4	5	6	7
	9	1	2	3	4	5	6	7	8
	2	1	3	4	5	6	7	8	9

รูปที่ 13 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = c$ แต่

$$b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 13 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$48 \times 9 = 432 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 5

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>					
1	2	3	1	4	5	6	7	8	9
	3	4	1	5	6	7	8	9	2
	4	5	1	6	7	8	9	2	3
	5	6	1	7	8	9	2	3	4
	6	7	1	8	9	2	3	4	5
	7	8	1	9	2	3	4	5	6
	8	9	1	2	3	4	5	6	7
	9	2	1	3	4	5	6	7	8

รูปที่ 14 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = d$ แต่

$$b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 14 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

$$48 \times 9 = 432 \text{ กรณี}$$

กรณีที่ 6

a	b	c	d						e
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
	3	4	5	6	7	8	9	2	1
	4	5	6	7	8	9	2	3	1
	5	6	7	8	9	2	3	4	1
	6	7	8	9	2	3	4	5	1
	7	8	9	2	3	4	5	6	1
	8	9	2	3	4	5	6	7	1
	9	2	3	4	5	6	7	8	1

รูปที่ 15 ตัวอย่างการพิจารณา กรณีที่ $a = e$ แต่

$$b \neq c \neq d \neq e$$

จากรูปที่ 15 สามารถสร้างเลขโดดได้ทั้งหมด

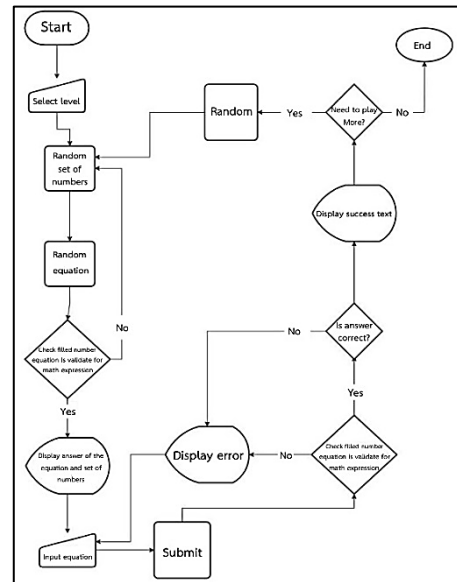
$$48 \times 9 = 432 \text{ กรณี}$$

ดังนั้น รูปแบบโจทย์เลขโดด 5 ตัวสามารถ
สร้างได้ทั้งหมด 2,142 กรณี

ขั้นที่ 4 พิจารณาวงเล็บของการดำเนินการ ของสมการ
เลขโดด 5 ตัว มีทั้งหมด 14 รูปแบบไม่ซ้ำกันดังนี้
กำหนดให้ □ คือ การดำเนินการทางคณิตศาสตร์

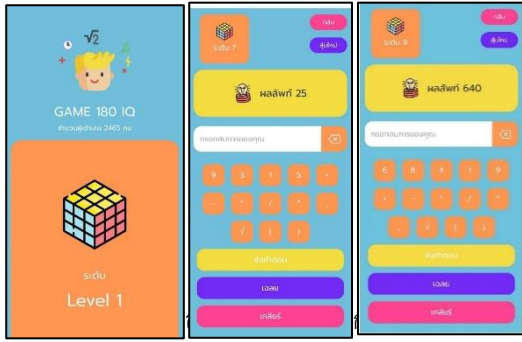
1. $((a \square b) \square c) \square d) \square e$
2. $((a \square (b \square c)) \square d) \square e$
3. $(a \square ((b \square c) \square d)) \square e$
4. $(a \square (b \square (c \square d))) \square e$
5. $((a \square b) \square (c \square d)) \square e$
6. $a \square (((b \square c) \square d) \square e)$
7. $a \square ((b \square (c \square d)) \square e)$
8. $a \square (b \square ((c \square d) \square e))$
9. $a \square (b \square (c \square (d \square e)))$
10. $a \square ((b \square c) \square (d \square e))$
11. $(a \square b) \square ((c \square d) \square e)$
12. $(a \square b) \square (c \square (d \square e))$
13. $(a \square (b \square c)) \square (d \square e)$
14. $((a \square b) \square c) \square (d \square e)$

ขั้นที่ 5 เมื่อได้โจทย์เลขโดดและการดำเนินการมาแล้ว
ผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือไลบรารีคณิตศาสตร์
ขั้นสูง (Advanced Mathematics Library) สำหรับภาษา
จาวาสคริปต์ (JavaScript) ชื่อ Math.JS ซึ่งโปรแกรมนี้จะ
ทำหน้าที่คำนวณโจทย์เลขโดดและการดำเนินการที่
สร้างไว้ ซึ่งขั้นตอนการคิดของโปรแกรมเกม 180 IQ มี
ขั้นตอนการคิดดังนี้ [5-6]



รูปที่ 16 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม 180 IQ

1. เมื่อผู้เล่นกดปุ่ม “สุ่มใหม่” ระบบจะสุ่มชุดตัวเลข
โดด รูปแบบวงเล็บและการดำเนินการ
2. ระบบจะนำเลขโดดเต็มในรูปแบบวงเล็บและชุดการ
ดำเนินการที่สุ่มได้
3. ให้ Math.JS คำนวณค่า
4. ถ้าได้คำตอบที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ทศนิยม จำนวน
เต็มลบ หรือจำนวนที่ไม่ตรงตามระดับความยากตามที่
กำหนดไว้ ระบบก็จะทำการสุ่มชุดตัวเลขโดด, รูปแบบ
วงเล็บและชุดการดำเนินการ ใหม่ จนกว่าจะได้คำตอบ
ที่พึงประสงค์
5. เมื่อ Math.JS คำนวณคำตอบได้ตรงตามที่กำหนด
ระบบจะเก็บ คำตอบ, สมการ และชุดตัวเลขไว้
6. โปรแกรมจะปรากฏโจทย์เลขโดด และคำตอบที่ได้ให้
ผู้เล่น
7. ผู้เล่นกรอกสมการคำตอบ
8. ให้ MathJS ตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบตาม
รูปแบบการดำเนินการทางคณิตศาสตร์
9. ถ้าคำตอบที่ผู้เล่นกรอกลงในระบบไม่ถูกต้อง
โปรแกรมจะแสดงผล “คำตอบไม่ถูกต้อง” ซึ่งผู้เล่น
สามารถกรอกคำตอบใหม่ได้ แต่ถ้าสมการคำตอบที่ผู้
เล่นกรอก ถูกต้องตามรูปแบบการดำเนินการทาง
คณิตศาสตร์ โปรแกรมจะแสดงผล “คำตอบถูกต้อง”



รูปที่ 17 ตัวอย่าง โปรแกรม เกม 180 IQ

3.2 การประเมินประสิทธิภาพโปรแกรมเกม 180 IQ ของผู้เชี่ยวชาญ

เมื่อผู้วิจัยสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ เสร็จแล้ว ผู้วิจัยจึงได้ให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 6 ท่าน ได้แก่ อาจารย์ประจำภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ และอาจารย์ประจำภาควิชาคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ประเมินประสิทธิภาพโปรแกรมเกมฯ ซึ่งมีผลการประเมินดังนี้

ตารางที่ 1. ผลประเมินประสิทธิภาพโปรแกรมเกม 180 IQ ของผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	\bar{x}	<i>S.D.</i>	แปลผล
1. ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของสื่อสารสนเทศ			
1.1 โปรแกรมเกมฯ สามารถคำนวณได้ถูกต้องตามหลักการคณิตศาสตร์	5.00	0	ดีมาก
1.2 โจทย์เลขโดดที่สุ่มได้ ตรงตามกติกาการแข่งขัน	4.83	0.37	ดีมาก
1.3 โปรแกรมเกมฯ น่าสนใจและดึงดูดการเรียนรู้	4.83	0.37	ดีมาก
1.4 โปรแกรมเกม 180 IQ มีผลการเฉลยถูกต้อง	5.00	0	ดีมาก
1.5 ความสะดวกในการใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งคอมพิวเตอร์และสมาร์ตโฟน	4.50	0.50	ดี
2. ด้านการออกแบบ และการจัดรูปแบบ			
2.1 โปรแกรมเกม 180 IQ มีสีสันสดใสสวยงาม	4.50	0.76	ดี
2.2 มีรูปแบบการใช้งานง่าย	4.17	0.90	ดี

ตารางที่ 1. (ต่อ) ผลประเมินประสิทธิภาพโปรแกรมเกม 180 IQ ของผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	\bar{x}	<i>S.D.</i>	แปลผล
2.3 มีตัวอักษรและ ปุ่มกด ที่มีขนาดและรูปแบบเหมาะสม	4.67	0.47	ดีมาก
2.4 การจัดวางตำแหน่งของปุ่มกดเหมาะสมใช้งานง่าย	4.83	0.37	ดีมาก
3. ด้านการนำไปใช้			
3.1 คุณภาพของสื่อโดยรวม	4.50	0.50	ดี
3.2 ความสะดวก ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน	4.50	0.50	ดี
3.3 การประมวลผล การคำนวณของโปรแกรมมีความรวดเร็ว	4.83	0.37	ดีมาก
3.4 โปรแกรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง	4.83	0.37	ดีมาก
รวม	4.69	0.42	ดีมาก

3.3 การพัฒนาระบบ

ก่อนที่จะนำโปรแกรมเกม 180 IQ ไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างผู้วิจัยได้ลองสุ่มโจทย์ของแต่ละระดับความยาก จำนวน 20 ข้อ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขการสุ่มโจทย์และรูปแบบผลเฉลย

3.4 การทดลองใช้งาน

ผู้วิจัยได้ทดลองใช้โปรแกรมเกม 180 IQ กับกลุ่มตัวอย่าง 624 คน ประกอบด้วย ครูผู้สอนวิชาคณิตศาสตร์ จำนวน 43 ท่าน และนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จำนวน 581 คน เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ ซึ่งมีผลการประเมินดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2. ผลความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ

รายการประเมิน	\bar{x}	S.D.	แปลผล
1. โปรแกรมมีรูปแบบสวยงาม	4.07	0.91	มาก
2. รูปแบบของโปรแกรมได้ออกแบบให้ผู้เล่นใช้งานได้ง่าย	4.03	0.99	มาก
3. ขนาด และสีตัวอักษรที่ใช้มีความเหมาะสม ชัดเจน	4.22	0.91	มาก
4. การป้อนตัวเลข สัญลักษณ์ การดำเนินการต่าง ๆ สามารถทำได้โดยง่ายและรวดเร็ว	3.95	1.05	มาก
5. เครื่องหมายการดำเนินการครบถ้วน สำหรับสร้างสมการ	4.12	0.95	มาก
6. โปรแกรมเกมฯ มีความยืดหยุ่นซึ่งผู้เล่นสามารถเลือกเล่นได้	4.10	0.93	มาก
7. คู่มือการใช้งานโปรแกรมเกมมีความชัดเจนและเข้าใจง่าย	4.07	0.96	มาก
8. โปรแกรมเกมฯ ช่วยพัฒนาทักษะการคำนวณให้แก่ผู้เล่น	4.13	0.92	มาก
9. โปรแกรมเกมฯ ช่วยพัฒนาความสามารถในการสร้างสมการคณิตศาสตร์	4.11	0.93	มาก
10. โปรแกรมเกมฯ ใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง	4.07	0.95	มาก
11. โปรแกรมเกมฯ สร้างความท้าทายด้านการคิดคำนวณ	4.26	0.91	มาก
12. โปรแกรมเกมฯ สามารถใช้งานได้ทั้งคอมพิวเตอร์และสมาร์ตโฟน	4.27	0.90	มาก
13. โปรแกรมเกมฯ มีแบบเฉลยสมการคำตอบที่ถูกต้อง	4.24	0.96	มาก
14. โปรแกรมเกมฯ สร้างเจตคติที่ดีต่อวิชาคณิตศาสตร์	4.09	0.94	มาก
15. ความพึงพอใจของท่านต่อโปรแกรมเกม 180 IQ	4.15	0.94	มาก
รวม	4.12	0.94	มาก

3.5 การเผยแพร่โปรแกรม

ผู้วิจัยจึงได้เผยแพร่โปรแกรมเกม 180 IQ บน www.mathstat.cmru.ac.th ซึ่งเป็นเว็บไซต์ของภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ในบล็อก (Blog) หรือเว็บบล็อก (Weblog) ชื่อ GAME 180 IQ [7]



รูปที่ 18 ตัวอย่างหน้าเว็บไซต์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติที่เผยแพร่ โปรแกรม เกม 180 IQ

4. บทสรุปและอภิปรายผล

จากขั้นตอนการสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนามาจาก ไลบรารีคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันขั้นสูง (Advanced Mathematics Library) สำหรับภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) จึงทำให้โปรแกรมเกม 180 IQ ที่สร้างขึ้นทุกโจทย์สามารถสร้างสมการคำตอบให้ตรงกับผลลัพธ์ที่กำหนดให้ได้ สอดคล้องกับ ผลการประเมินประสิทธิภาพของผู้เชี่ยวชาญ ที่มีผลคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.69 ซึ่งอยู่ในระดับ ดีมาก โดยข้อที่ได้คะแนนเต็ม 5 คะแนน มี 2 ข้อ คือ 1) โปรแกรมเกม 180 สามารถคำนวณได้ถูกต้องตามหลักการคณิตศาสตร์ และ 2) โปรแกรมเกม 180 IQ มีสมการผลเฉลยถูกต้องจากการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ จำนวน 624 คน ประกอบด้วย ครูผู้สอนวิชาคณิตศาสตร์ จำนวน 43 ท่าน และนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จำนวน 581 คน พบว่า มีผลคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.12 ซึ่งอยู่ในระดับ มาก โดยข้อที่ได้คะแนนมากที่สุดเป็นอันดับ 1 คือ โปรแกรมเกมฯ

สามารถใช้งานได้ทั้งคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน ซึ่งมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.27 คะแนน ข้อที่ได้คะแนนมากเป็นอันดับ 2 คือ โปรแกรมเกมฯ สร้างความท้าทายด้านการคิดคำนวณ ซึ่งมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 คะแนน และ ข้อที่ได้คะแนนมากเป็นอันดับ 3 คือ โปรแกรมเกมฯ มีแบบเฉลยสมการคำตอบที่ถูกต้องตรงตามโจทย์ที่สุดได้ ซึ่งมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.24 คะแนน

5. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและสร้างโปรแกรมเกม 180 IQ ที่สามารถสร้างโจทย์พร้อมเฉลย วิธีการคำนวณ ตามที่โจทย์กำหนดให้ และ เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกม 180 IQ โดยมุ่งหวังว่าโปรแกรมเกม 180 IQ นี้จะเป็นนวัตกรรมที่ช่วยส่งเสริมทักษะการคิดทางคณิตศาสตร์ เช่น การคิดคำนวณ การคิดเชิงสร้างสรรค์ และพัฒนาความรู้สึกเชิงจำนวนของนักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาและมัธยมศึกษา ซึ่งครูผู้สอนวิชาคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นเครื่องมือในการจัดกิจกรรมในชั้นเรียน ไม่ว่าจะเป็นการนำเข้าสู่บทเรียน การละลายพฤติกรรมของนักเรียนก่อนจัดการเรียนการสอน การฝึกสมาธิของผู้เรียน และ ยังสามารถใช้โปรแกรมนี้สำหรับการพัฒนาทักษะการแก้ปัญหาของนักเรียนได้อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และขอขอบคุณนักศึกษาฝึกประสบการณ์วิชาชีพครู สาขาวิชาคณิตศาสตร์ทุกคน ที่ให้ความร่วมมือ ทดลองใช้และเผยแพร่โปรแกรมเกม 180 IQ ให้กับนักเรียนตลอดจนเก็บข้อมูลความพึงพอใจของผู้ใช้โปรแกรมเกมให้แก่ผู้วิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Grambs JD, Carr JC, Fitch RM. Modern methods in secondary education. 3rd ed. United states of America: Holt Rinehart and Winston; 1970.
- [2] Katmada A, Mavridis A, Tsiatsos T. Implementing a game for supporting learning in mathematics. J The Electronic e-Learning. 1970;12:230-42.
- [3] Sawatphon S. Basic computer gamemproramming. Bangkok: wangakson; 2017
- [4] Juntun C, Fongchanta S. The solvent program of Game 24. Chiang Mai: Chaing Mai Rajabhat University; 2018.
- [5] Write games like a pro with Visual C++ and Direct X. Bangkok: diffbook; 2013.
- [6] Aouprasitwong P. Fundamentals ofprogramming in C language and algorithm. Bangkok: Seeducation; 2010.
- [7] Phimphanit P. Principles of creating 2D games computer game creation. Bangkok: Srinakharinwirot University; 2013.

กำลังตัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง

ทวีชัย สํารานวนิช^{1,*} และ ลีน่า ปรัก²
twc@buu.ac.th^{1*}, lyna_p@rmutt.ac.th²

¹ ศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 16-Dec-2020
Revised : 31-Jan-2021
Accepted : 17-Aug-2021

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษากำลังตัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) ผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ทำการศึกษากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยด้วย โดยใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัดและกำลังแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังตัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งด้วยสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 5.0% เป็นระยะเวลาสองปี รวมทั้งตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตควบคุมไม่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็ก สำหรับกำลังตัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้งพบว่า กำลังตัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคาน คสล. ควบคุมที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก กำลังตัดของคาน คสล. เมื่อเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าคาน คสล. เมื่อเผชิญน้ำเปล่า นอกจากนี้ คาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เส้นใยเหล็ก กำลังตัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ คลอไรด์

Flexural Strength and Chloride Penetration Resistance of Reinforced Concrete Beam with Steel Fiber after Exposure to Chloride Environment with Cyclic Wetting and Drying

Taweechai Sumranwanich^{1,*} and Lyna Prak²
twc@buu.ac.th^{1*}, lyna_p@rmutt.ac.th²

¹ Center of Construction Technology and Traffic Management, Faculty of Engineering, Burapha University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 16-Dec-2020
Revised	: 31-Jan-2021
Accepted	: 17-Aug-2021

Abstract

This paper aims to study the flexural strength and chloride penetration resistance of reinforced concrete (RC) beam containing steel fiber after exposure to chloride environment with cyclic wetting and drying. The compressive and splitting tensile strengths of concrete containing steel fiber were also studied. Steel fiber was used at the content of 0.50% by volume of the concrete. Compressive and splitting tensile strengths were tested at the age of 28 days. RC beams' flexural strength was tested after exposure to the cyclic wetting and drying period with 5.0% of chloride solution for two years. The chloride penetration of concrete was investigated. The study results found that the compressive strength of concrete containing steel fiber was similar to control concrete without steel fiber, but the splitting tensile strength of concrete mixed with steel fiber was higher than that without steel fiber. Considering the RC beam's flexural strength after exposure to cyclic wetting and drying, the RC beam's flexural strength with steel fiber was higher than the control RC beam without steel fiber. The RC beam's flexural strength exposed to the chloride environment was lower than that exposed to the water. Besides, RC beams with steel fiber had higher chloride penetration resistance than those without steel fiber.

Keywords: reinforced concrete beam, steel fiber, flexural strength, chloride penetration resistance, chloride

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากเป็นวัสดุที่แข็งแรงและทนทาน จากความก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้าง คอนกรีตจึงถูกพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงขึ้น เช่น คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber reinforced concrete) เพื่อใช้เสริมแรงในโครงสร้างชั่วคราว หรือใช้ทดแทนเหล็กเสริมบางส่วน หรือใช้แทนเหล็กเสริมทั้งหมดของชิ้นส่วนโครงสร้างหล่อในที่และหล่อสำเร็จรูป [1] จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เส้นใยเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่บริเวณสิ่งแวดล้อมทะเล (Marine environment) ซึ่งมีเกลือคลอไรด์ (Chloride) การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กจึงเป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึงด้วย [2-3]

ทั้งนี้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ (Chloride environment) ขึ้นอยู่กับสมบัติของคอนกรีต คุณภาพงานการก่อสร้าง การบ่มและระยะหุ้มเหล็ก เป็นต้น [4] อย่างไรก็ตามเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม ทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลง ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างลดลง เมื่อสนิมเหล็กมีปริมาณมากขึ้นก็จะดันผิวคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กให้แตกร้าวเสียหายได้ ซึ่งการซ่อมแซมต้องใช้วัสดุที่เหมาะสมและทนทานต่อสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ภายหลังการซ่อมแซม [5] เมื่อต้องออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญเกลือคลอไรด์ต้องเลือกคอนกรีตที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์สูง [6-7] และควรออกแบบไม่ให้เกิดรอยแตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวเป็นช่องทางที่เกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่าย ทั้งรอยแตกร้าวจากการหด หรือจากการหดตัวของคอนกรีต แต่หากหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุด นอกจากนี้ หากต้องการให้โครงสร้างรับกำลังได้มากขึ้น โดยทั่วไปมักใช้วิธีขยายขนาดหน้าตัดโครงสร้าง แต่ก็อาจสิ้นเปลืองและสูญเสียพื้นที่ใช้สอย ดังนั้นอีกแนวทางหนึ่งที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ คือ การใช้วัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น เส้นใยเหล็ก

เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มทั้งกำลังดึงของคอนกรีตและกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย [8] แต่หากต้องใช้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลก็ต้องพิจารณาความคงทนของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ไปพร้อมกัน ซึ่งการศึกษาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) ยังมีอยู่จำกัด

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษากำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยศึกษาผลกระทบของประเภทสิ่งแวดล้อมและกำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย เพื่อประโยชน์ในการประเมินการใช้งานต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 1 โดยมีคอนกรีตที่แตกต่างกัน 2 กลุ่มคือ กลุ่มกำลังอัดออกแบบ 240 กก./ชม.² (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55) และกลุ่มกำลังอัดออกแบบ 350 กก./ชม.² (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.38) ใช้เส้นใยเหล็กผสมคอนกรีตในปริมาณ 0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยขนาดและสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็กแสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนลักษณะและรูปร่างของเส้นใยเหล็กแสดงไว้ในรูปที่ 1 และเงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 1 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยเหล็กที่ใช้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

รหัสส่วนผสม คอนกรีต	กำลังอัด ออกแบบ f'_c (กก./ชม. ²)	w/b	ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m ³)					เส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของ คอนกรีต)
			ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	สารลดน้ำ พิเศษ (SP)	
C1	240	0.55	304	167	909	1,024	1.52	-
C2			304	167	909	1,024	1.52	0.50
C3	350	0.38	405	154	851	957	2.03	0.50

ตารางที่ 2 ขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็ก

ชนิดเส้นใย	ความยาว l_f (ชม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง d_f (ชม.)	ความถ่วงจำเพาะ	กำลังดึง f_f (กก./ชม. ²)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ชม. ²)
เส้นใยเหล็ก	3.5	0.055	7.85	11,200	1,121,300

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

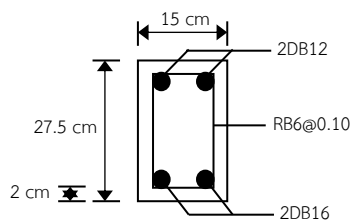
รหัสคาน คสล.	ปริมาณเส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของ คอนกรีต)	กำลังอัดออกแบบ, f'_c (กก./ชม. ²)	ประเภทสิ่งแวดล้อมในรูปแบบวัฏจักร เปียกสลับแห้ง
B1	-	240	น้ำเปล่า
B2	0.50		
B3	-		สารละลายคลอไรด์ 5.0%
B4	0.50		
B5	0.50	350	น้ำเปล่า
B6			สารละลายคลอไรด์ 5.0%

2.2. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

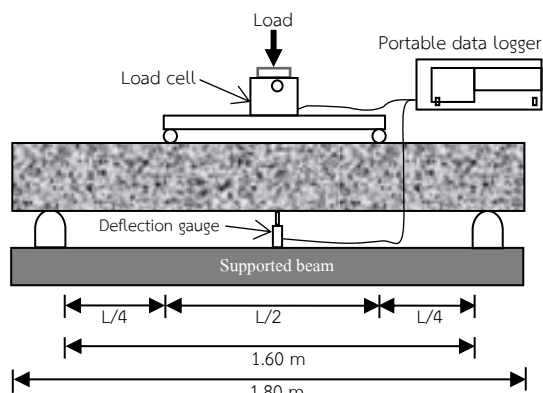
สำหรับการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตนั้นใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หล่อตัวอย่างด้วยส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 1 ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [9] กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting tensile strength test) ตามมาตรฐาน ASTM C 496 [10] ส่วนการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flexural strength test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 78 [11] ซึ่งทดสอบกำลังดัดด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด (Four-point

bend test) โดยทำการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) ตามส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 1 (กรณีผสมเส้นใยเหล็ก เส้นใยเหล็กถูกผสมเข้าในคอนกรีตตั้งแต่ตอนผสมคอนกรีต) โดยใช้คานคสล. ที่มีความกว้าง 15 เซนติเมตร สูง 27.5 เซนติเมตร ยาว 180 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับคานเท่ากับ 160 เซนติเมตร และเสริมเหล็กในคานแบบต่ำกว่าสภาวะสมดุล (Under reinforcement) ดังรายละเอียดในรูปที่ 2 ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง และบ่มคาน คสล. ด้วยกระสอบชุบน้ำตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างคาน คสล. ไปแช่ในประเภทสิ่งแวดล้อมแบบน้ำเปล่าและแบบสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 5.0% (ดังตารางที่ 3) เป็นระยะเวลา 2 ปี ในรูปแบบวัฏ

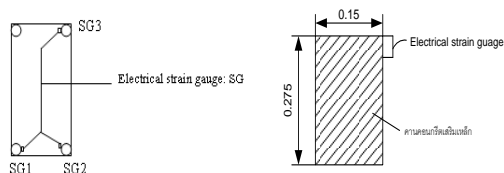
จักรเปือกสลับแห้ง (5 วัน เปือก และ 2 วัน แห้ง) เพื่อเทียบเคียงกับบริเวณสภาวะน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล โดยคอนกรีตเผชิญอยู่ในช่วงเปือกยาวนานกว่าช่วงแห้ง ทั้งนี้ในช่วงวัฏจักรเปือกตัวอย่างคาน คสล. ถูกวางในบ่อน้ำเปล่าหรือบ่อสารละลายคลอไรด์โดยให้ระดับท้องคาน คสล. จมอยู่ใต้น้ำเปล่าหรือสารละลายคลอไรด์เป็นระยะความลึก 5 เซนติเมตร วัดจากระดับท้องคานส่วนที่จมขึ้นมา



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคาน คสล.

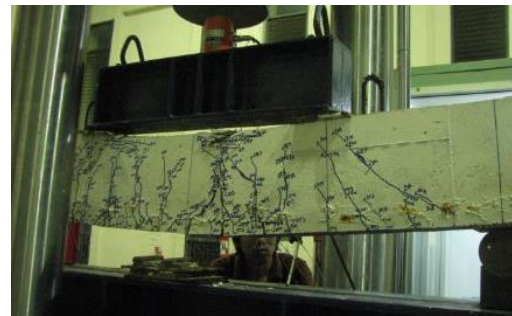


รูปที่ 3 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบกำลังดัดของคาน คสล.



(ก) บนเหล็กเสริม (ข) บนผิวของคอนกรีต

รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical-strain gauge

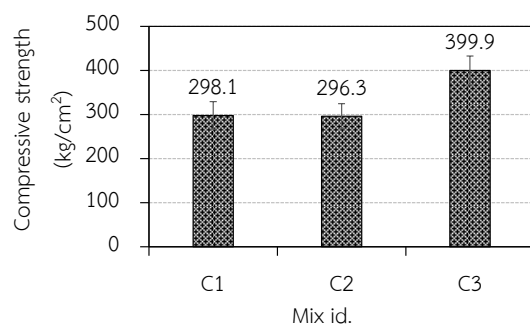


รูปที่ 5 การทดสอบกำลังดัดของคาน คสล.

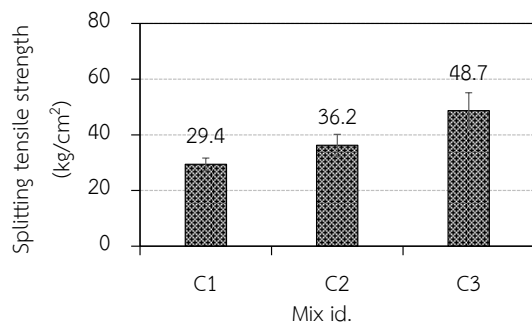
รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบกำลังดัดของคาน คสล. ด้วยวิธีการดัดแบบ 4 จุด ที่มีแรงเหวี่ยงเป็นศูนย์ในช่วงที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3 ใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ขนาด 150 ตัน เป็นต้นกำเนิดแรงกดกระทำที่กึ่งกลางคาน คสล. โดยอ่านค่าแรงกดจากโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 50 ตัน สำหรับการวัดการโก่งตัวของคานใช้อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) ติดตั้งที่กึ่งกลางใต้ท้องคานระหว่างจุดรองรับทั้งสอง และการวัดระยะการยืดหดของเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ Electrical-strain gauge (SG) ติดที่บนผิวเหล็กที่ช่วงกลางคานทั้งเหล็กบนและเหล็กล่างดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และในการวัดการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านบนของคาน คสล. โดยใช้ Electrical-strain gauge ประเภทที่ติดผิวคอนกรีต ติดที่ผิวด้านข้างส่วนที่ชิดผิวด้านบนของคาน คสล. บริเวณช่วงกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ค่อยๆ ให้แรงกดจนคาน คสล. วิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 5

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1. กำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีต

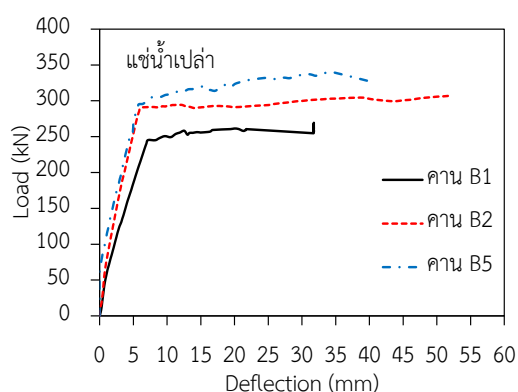


รูปที่ 7 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

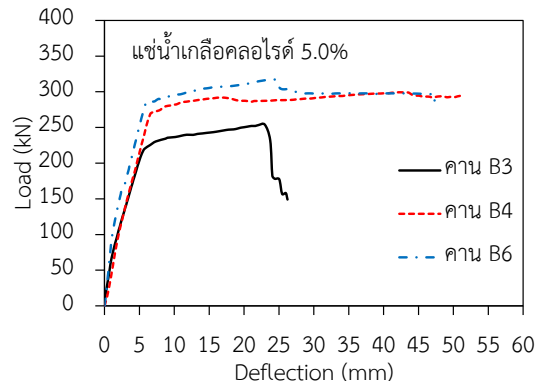
กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งเมื่อพิจารณาคอนกรีตกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกัน 240 กก./ซม.² (C1 และ C2) พบว่าเส้นใยเหล็กไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตลดลง (C2 และ C3)

3.2. กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต เมื่อพิจารณาคอนกรีตกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกัน 240 กก./ซม.² (C1 และ C2) พบว่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็กซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng et al. (2018) [12] และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง (C2 และ C3)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่เผชิญกับน้ำเปล่า



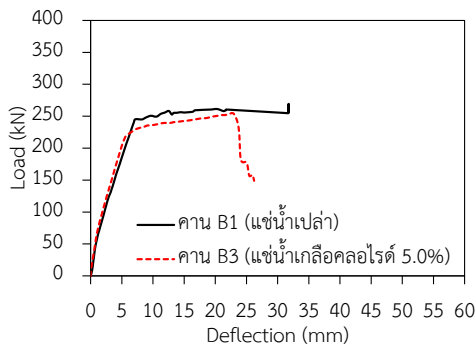
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่เผชิญกับสารละลายคลอไรด์ 5.0%

3.3. กำลังดัดของคาน คสล.

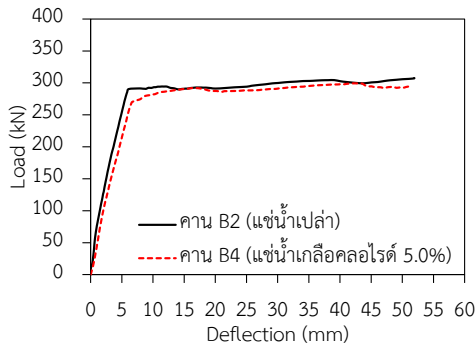
รูปที่ 8 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำและการแอ่นตัวของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กและไม่ผสมเส้นใยเหล็กภายใต้การเผชิญสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์เป็นระยะเวลา 2 ปี แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง โดยจากรูปที่ 8 และ 9 เมื่อพิจารณาผลกระทบของเส้นใยเหล็กต่อความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. กรณีเป็นกลุ่มกำลังอัดออกแบบเดียวกันแต่เผชิญสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์ตามลำดับ (เปรียบเทียบระหว่าง B1 กับ B2 และ B3 กับ B4) พบว่า คาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดัดได้สูงกว่าคาน คสล. ที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. นอกจากนี้เมื่อพิจารณากรณีเป็นกลุ่มกำลังอัดออกแบบต่างกันเมื่อใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดออกแบบสูงกว่าทำให้ความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. สูงขึ้นตามไปด้วย (B5 และ B6)

เมื่อพิจารณาความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล. ภายใต้การเผชิญในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันคือน้ำเปล่าและสารละลายคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 10 (กรณีคอนกรีตไม่ผสมเส้นใยเหล็ก) พบว่า คาน คสล. ที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรงดัดสูงสุดน้อยกว่าคาน คสล. ที่เผชิญกับน้ำที่ไม่มีคลอไรด์ เนื่องจากเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเกิดสนิมจากการทำลายของคลอไรด์ทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลัก

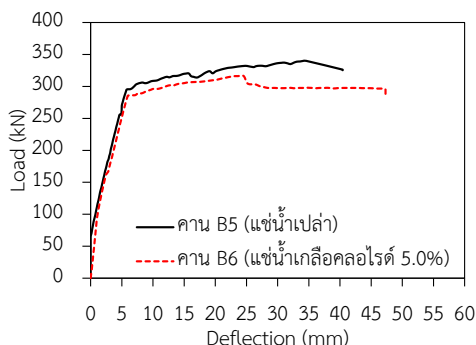
ลดลง ความสามารถแรงดัดของคาน คสล. จึงลดลง ในทำนองเดียวกัน สำหรับคาน คสล. ที่ผสมเส้นใย เหล็ก ดังรูปที่ 11 และ 12 ความสามารถรับแรงดัดของ คาน คสล. ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์สามารถรับแรง ดัดสูงสุดได้น้อยกว่าคาน คสล. ที่ไม่เผชิญสิ่งแวดล้อม คลอไรด์ (เผชิญกับน้ำเปล่า) เนื่องจากเส้นใยเหล็กเกิด สนิมเมื่อต้องเผชิญในสิ่งแวดล้อมเกลือคลอไรด์ ดังเห็น ได้จากรูปที่ 13 ส่งผลให้ความสามารถรับแรงดัดของ คาน คสล. ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัว ของคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C1)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอ่นตัว ของคาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C2)



รูปที่ 12 แรงกดและการแอ่นตัวของคาน คสล. ที่ผสม เส้นใยเหล็ก (คอนกรีต C3)



รูปที่ 13 การเกิดสนิมของเส้นใยเหล็กและเหล็กเสริมใน คาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ตารางที่ 4 กำลังดัดของคาน คสล.

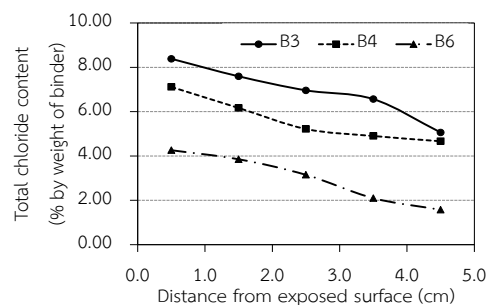
No.	กำลังดัดของคานที่สภาวะต่างๆ		
	M_{cr} (kg-m)	M_y (kg-m)	M_n (kg-m)
B1	1,530	4,897	5,490
B2	2,141	5,918	6,269
B3	1,427	4,695	5,372
B4	2,039	5,515	6,100
B5	2,446	6,018	6,932
B6	2,345	5,764	6,457

ค่ากำลังดัด (โมเมนต์ดัด, M) ของคาน คสล. ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ตั้งแต่เริ่มแตกร้าว (Cracking) เหล็กเสริมล้าคราก (Yielding) และสูงสุด (Nominal) ได้ถูกวิเคราะห์และสรุปไว้ในตารางที่ 4 จากตารางพบว่า คาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงมีกำลัง ดัดสูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็กในทุกสภาวะ ของการดัด (กำลังดัดแตกร้าว (M_{cr}) กำลังดัดคราก (M_y) และกำลังดัดสูงสุด (M_n)) ทั้งในกรณีที่คานเผชิญ สิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์และสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์ (น้ำเปล่า) โดยเมื่อพิจารณาที่ค่ากำลังดัดสูงสุด (M_n) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า กำลังดัดสูงสุดของ คาน B2 และ B5 เมื่อเทียบกับคาน B1 มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 14.2% และ 26.3% ตามลำดับ (กรณีคาน คสล. เผชิญสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์หรือน้ำเปล่า) และกำลังดัดสูงสุดของคาน B4 และ B6 เมื่อเทียบกับ คาน B3 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.6% และ 20.2% ตามลำดับ (กรณีคาน คสล. เผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์) โดยกำลังดัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญ สิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่าเมื่อ

เทียบคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีคลอไรด์ เนื่องจากการการเกิดสนิมทั้งที่เหล็กเสริมและที่เส้นใยเหล็กจากเกลือคลอไรด์ จึงทำให้ความสามารถต้านทานกำลังดัดของคาน คสล. ลดลงมากนั่นเอง โดยเมื่อพิจารณาคาน คสล. ที่ใช้คอนกรีตชนิดเดียวกัน (คาน B1 กับ B3, คาน B2 กับ B4, และคาน B5 กับ B6) แต่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันพบว่า กำลังดัดสูงสุดของคาน คสล. ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าของคาน คสล. ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมไม่มีคลอไรด์ -2.1%, -2.7 และ -6.9% สำหรับคาน B3, B4 และ B6 ตามลำดับ

3.4. การแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล.

หลังจากที่ทดสอบกำลังดัดของคาน คสล. เสร็จแล้ว ทำการเจาะคาน คสล. B3, B4 และ B6 ตรงบริเวณด้านข้างคานเหนือเหล็กล่าง (คอนกรีตที่เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้งของสารละลายคลอไรด์) ที่ความลึกชั้นละ 1 เซนติเมตร จนถึง 5 เซนติเมตร เพื่อนำผงคอนกรีตไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] จากรูปที่ 14 พบว่าการแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็ก (B4 และ B6) ต่ำกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก (B3) หรือกล่าวได้ว่าคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก อาจเนื่องจากการใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่เหมาะสม (0.50% โดยปริมาตรของคอนกรีต) ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น ประกอบกับเส้นใยขวางการแทรกซึมจึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของลิน่า ปรัก และทวีชัย สำราญวานิช (2563) [14] ที่พบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.50 โดยปริมาตรคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก นอกจากนี้ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (B6) มีค่าสูงกว่าคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง



รูปที่ 14 การแทรกซึมคลอไรด์ในคาน คสล.

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังดัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เส้นใยเหล็กไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังดัดของคอนกรีต แต่ส่งผลทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตสูงขึ้น
2. กำลังดัดของคาน คสล. ผสมเส้นใยเหล็กสูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใย ทั้งกรณีภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์หรือสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าในรูปแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เนื่องจากเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถรับแรงดัดของคาน คสล.
3. กำลังดัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่ำกว่ากำลังดัดของคาน คสล. ภายหลังเผชิญสิ่งแวดล้อมน้ำเปล่าในรูปแบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เนื่องจากเกิดการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลักมากกว่า
4. คาน คสล. ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคาน คสล. ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก อาจเนื่องจากการใช้เส้นใยเหล็กทำให้เนื้อคอนกรีตทึบแน่นขึ้นและขัดขวางการแทรกซึมของคลอไรด์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 110/2558 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) และศูนย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Marcos-Meson V, Michel A, Solgaard A, Fischer G, Edvardsen C, Skovhus T.L. Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete – A literature review. Cement and Concrete Research. 2018; 103:1-20.
- [2] Pyo S, Koh T, Tafesse M, Kim HK. Chloride-induced corrosion of steel fiber near the surface of ultra-high performance concrete and its effect on flexural behaviour with various thickness. Construction and Building Materials. 2019;224:206-13.
- [3] Yoo DY, Shin W, Chun B. Corrosion effect on tensile behaviour of ultra-high performance concrete reinforced with straight steel fibers. Cement and Concrete Composites. 2020;109: 103566.
- [4] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Concrete structure deterioration. Bangkok: Charansanitwong Printing; 2018. (in Thai)
- [5] Prak L, Sumranwanich T. Chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash, limestone powder, and expansive additive. Journal of Engineering, RMUTT. 2020; 18(2):133-44. (in Thai)
- [6] Prak L, Sumranwanich, T. Investigation of Chloride Penetration and Steel Corrosion in Repaired Concrete after Exposure to Marine Environment of Thailand. Journal of Engineering, RMUTT. 2020;18(1);165-73.
- [7] Arttamart S, Sumranwanich T. Compressive strength and chloride penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash. Journal of Engineering, RMUTT. 2019;17(2):113-25. (in Thai)
- [8] Sumranwanich T, Phuchan A, Manwicha S. Behavior and calculation method of the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber. KMUTT Research and Development Journal. 2007;30(2):345-62. (in Thai)
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Annual Book of ASTM Standard. 2004.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C496. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Annual Book of ASTM Standard. 2004.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM C78. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). Annual Book of ASTM Standard. 2004.
- [12] Zheng Y, Wu X, He G, Shang Q, Xu J, Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. Advances in Civil Engineering. 2018:1-11.

- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards. 2004.
- [14] Prak L, Sumranwanich T. Compressive strength and water permeability of concrete mixed with steel fiber. In: Proceedings of the 25th National Convention of Civil Engineering; 2020 Jul 15-17; Chonburi, Thailand. p. 1826-30. (in Thai)

ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

สุรินทร์ แหวมงาม^{1*} ณัฐ ตั้งปรีชาพาณิชย์² ชีระพล เหมือนขาว¹ สุทธิ ทับทองดี³

กัณฑ์เอนก พุ่มแก้ว¹ และ ประวี ภูอินทร์¹

surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, nuth.tha@rmutr.ac.th², theerapol.m@en.rmutt.ac.th¹,

suthi.t@mail.rmutk.ac.th³, kananake.tk@gmail.com¹, prawee.phi@gmail.com¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

³ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 12-Nov-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยระบบประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือเครื่องเติมเงินและเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ในส่วนของเครื่องเติมเงินจะใช้สำหรับเติมเงินให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า จากนั้นข้อมูลการเติมเงินจะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านระบบออนไลน์ และในส่วนของเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ สามารถแจ้งเตือนจำนวนเงินที่เติมและจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้ไปยังผู้ใช้ผ่านแอปพลิเคชันไลน์ได้ รวมถึงสามารถตรวจสอบจำนวนเงินและจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้จากหน้าจอ LCD ที่ติดอยู่ที่ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 8 ชนิด คือ พัดลม หลอดอินแคนเดสเซนต์ หม้อหุงข้าวไฟฟ้า กระจกน้ำร้อนไฟฟ้า เตาไรต์ไอน้ำ ตู้เย็น กระจกไฟฟ้า กัดม้น้ำร้อนไฟฟ้า และทำการอ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์เปรียบเทียบกับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมา จากผลการทดสอบพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 0.37 และระบบยังสามารถแจ้งเตือนจำนวนเงินที่เติม ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้และข้อมูลอื่น ๆ ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า เติมเงินออนไลน์ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ แอปพลิเคชันไลน์

Prepaid Electric Energy Consumption System via Online Top-Up System and a Notification Through LINE Application

Surin Ngaemngam^{1*}, Nut Thangpreecharparnich², Theerapol Muankhaw¹, Sutte Tubtongdee³,
Kananake Toomkaew¹ and Prawee Phuin¹
surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, nuth.tha@rmutr.ac.th², theerapol.m@en.rmutt.ac.th¹,
suthi.t@mail.rmutk.ac.th³, kananake.tk@gmail.com¹, prawee.ph@gmail.com¹

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

³ Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 12-Nov-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

Abstract

This research presents a prepaid electric energy consumption system via online top-up system and a notification through Line application. The system is composed of two parts: the prepaid machine and the electric power consumption-control machine. The prepaid machine is used for topping up money for the electric power users and then the information of the top-up money will be sent to the electric power consumption-control machine via online system. The electric power consumption-control machine is used for controlling the electric energy consumption of the electric power users. This machine can notify the users of the amount of top-up money and the amount of electricity that can be used via Line application. In addition, the electric power users can verify the amount of money and the amount of electricity that can be used on LCD monitors attached to the electric power consumption-control machine. The efficiency of the system was tested using eight electrical appliances namely: an electric fan, an incandescent lamp, an electric rice cooker, an electric jar pot, a steam iron, a refrigerator, an electric pan, and an electric kettle. The electric power consumption was measured by kilowatt-hour meter compared with the proposed electric power control system. For the experimental results, it was found that the average error of the electric power consumption was at 0.37 %. In addition, the notification system that notifies the electric power users of the existing the amount of money, the amount of electricity that can be used and other information is proven effective.

Keywords: Electric energy consumption system, Online Top up, Kilowatt-hour meter, LINE application

1. บทนำ

ปัจจุบันจะเห็นว่ามีกรรเรียนจากผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมากในเรื่องของการเรียกเก็บค่าใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าทั้งในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกเรียกเก็บจากการไฟฟ้าไม่ตรงกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์-ชั่วโมงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้า และอีกกรณีหนึ่งที่พบคือการไฟฟ้าไม่สามารถเรียกเก็บค่าไฟฟ้าจากผู้ไฟฟ้าได้ซึ่งอาจจะด้วยหลายสาเหตุปัจจัย เช่นผู้ใช้ไฟฟ้าไม่มีเงิน ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่มีเวลาไปจ่ายค่าไฟฟ้า หรือผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ได้รับใบเรียกเก็บจากการไฟฟ้า ดังนั้นระบบการใช้ไฟฟ้าแบบจ่ายก่อนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อจะแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอระบบการใช้ไฟแบบจ่ายก่อน ประดิษฐ์ ลักษณะอังกฤษ [1] เสนอการพัฒนา มิเตอร์แบบจ่ายก่อน โดยใช้โปรแกรมภาษาซีในการติดต่อกับฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ส่วนมากเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีราคาในการสร้างค่อนข้างสูง และเนื่องมีการใช้งานกลางแจ้งจึงมีผลต่อเสถียรภาพในการ บันทึก แก้วศรี [2] เสนอระบบชำระเงินค่าไฟฟ้าแบบล่วงหน้าด้วยเครื่องสมาร์ตการ์ด กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์แบบรีโมทข้อมูลผ่านโครงข่ายคู่สายเช่า จากการศึกษาพบว่าต้องมีการกำหนดเลือกเส้นและคู่สายของโทรศัพท์ที่เหมาะสม ดังนั้นต้องมีการทดสอบค่าความเป็นฉนวน ระยะทางความยาวของคู่สายโทรศัพท์ และค่าความเป็นฉนวน ทำให้มีความยากและซับซ้อน ธนาวิทย์ โปรยเจริญ และ ธนาภัทร์ เทศสวัสดิ์ [3] เสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 ซึ่งระบบการแจ้งเตือนของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 แสดงข้อมูลผ่านจอ LCD เพียงอย่างเดียว ในกรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ห่างจอ LCD ผู้ใช้งานจะไม่สามารถรู้ข้อมูลได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้เหลือเท่าไร ตลอดจนการเติมเงินเข้าระบบโดยผ่านบัตร RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 มีความยุ่งยากต่อผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าต้องมีบัตร RFID เมื่อต้องการใช้ไฟฟ้าต้องเอาบัตร RFID ให้ผู้ดูแลระบบเติมเงินใส่ในบัตรก่อน จากนั้นต้อง

เอาบัตร RFID มาทาบบเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะทำการเปิดระบบและจึงจะสามารถใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าได้

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบออนไลน์และส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ซึ่งปัจจุบันแอปพลิเคชันไลน์เป็นที่นิยมใช้ในการติดต่อสื่อสารและการการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์จะทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถรู้ข้อมูลได้ทันทีสำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบออนไลน์และแจ้งเตือนการใช้งานผ่านแอปพลิเคชันไลน์

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์

กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้ามีหน่วยวัดเป็นเป็นกิโวลต์-ชั่วโมง เป็นเครื่องวัดที่ใช้ตามอาคารบ้านเรือนทั่วไป [4] ในงานวิจัยนี้กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์ ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ากับโมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือ PZEM กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กิโวลต์-ชั่วโมงมิเตอร์ 1 เฟสของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2.2 โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า

โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (PZEM) เป็นโมดูลที่สามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า [5] ในงานวิจัยนี้ PZEM ถูกนำมาใช้สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและประมวลผลต่อไป โดยโมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (PZEM)

2.3 Node MCU ESP8266

ESP8266 เป็นชื่อเรียกของชิพของโมดูล ESP8266 สำหรับติดต่อสื่อสารบนมาตรฐาน WIFI ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 3.0-3.6V ทำงานใช้กระแสโดยเฉลี่ย 80mA รองรับคำสั่ง deep sleep ในการประหยัดพลังงาน ใช้กระแสต่ำกว่า 10 ไมโครแอมป์ สามารถ wake up กลับมาส่งข้อมูลใช้เวลาไม่น้อยกว่า 2 มิลลิวินาที ภายในมี Low power MCU 32bit ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงานได้ มีวงจร analog digital converter ทำให้สามารถอ่านค่าจาก analog ได้ความละเอียด 10bit [6] บอร์ด Node MCU ESP8266 แสดงดังรูปที่ 3 ในงานวิจัยนี้ Node MCU ESP8266 ถูกนำมาใช้สำหรับส่งข้อมูลจำนวนเงินไปยัง Node MCU ESP32

2.4 Node MCU ESP32

ESP32 เป็นชื่อของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถรองรับการเชื่อมต่อ WIFI และ Bluetooth 4.2 BLE ในตัว โดยตัวไอซี ESP32 มีข้อมูลโดยละเอียดดังนี้ ชิพใช้สถาปัตยกรรม Tensilica LX6 แบบ 2 แกนสมอง สัญญาณนาฬิกา 240MHz มีแรมในตัว 512KB รองรับการเชื่อมต่อรอมภายนอก สูงสุด 16MB

มาพร้อมกับ WIFI มาตรฐาน 802.11 b/g/n รองรับการใช้งานทั้งในโหมด Station soft AP และ Wi-Fi direct มีบลูทูธในตัว รองรับการใช้งานในโหมด 2.0 และโหมด 4.0 BLE ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 2.6 V ถึง 3 V [7] ในงานวิจัยนี้ Node MCU ESP32 ถูกนำมาใช้สำหรับการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยบอร์ด Node MCU ESP32 แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 บอร์ด Node MCU ESP8266



รูปที่ 4 บอร์ด Node MCU ESP32

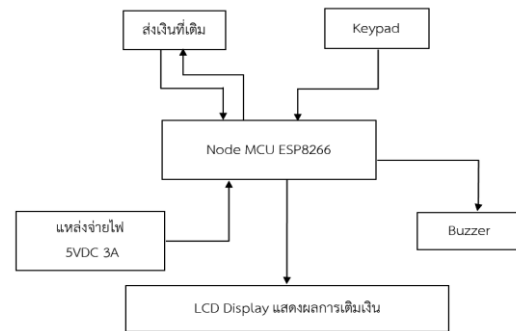
3. การออกแบบระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า

3.1 ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

ภาพรวมการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 5 โดยระบบแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือเครื่องเติมเงินเข้าระบบและเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะต้องมีการเติมเงินเข้าระบบผ่านเครื่องเติมเงินและข้อมูลการเติมเงินจะถูกส่งผ่านระบบออนไลน์ไปยังเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า จากนั้นเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าจะส่งข้อมูลจำนวนเงินที่เติม จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าความถี่ และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์



รูปที่ 5 ภาพรวมการทำงานของระบบ



รูปที่ 7 แผนผังการควบคุมการเติมเงินเข้าระบบ



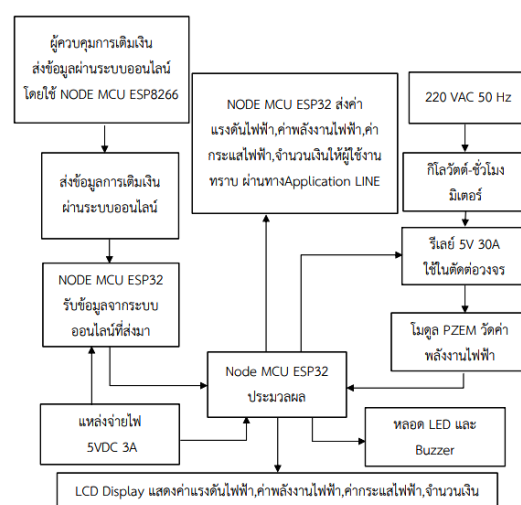
(ก)

(ข)

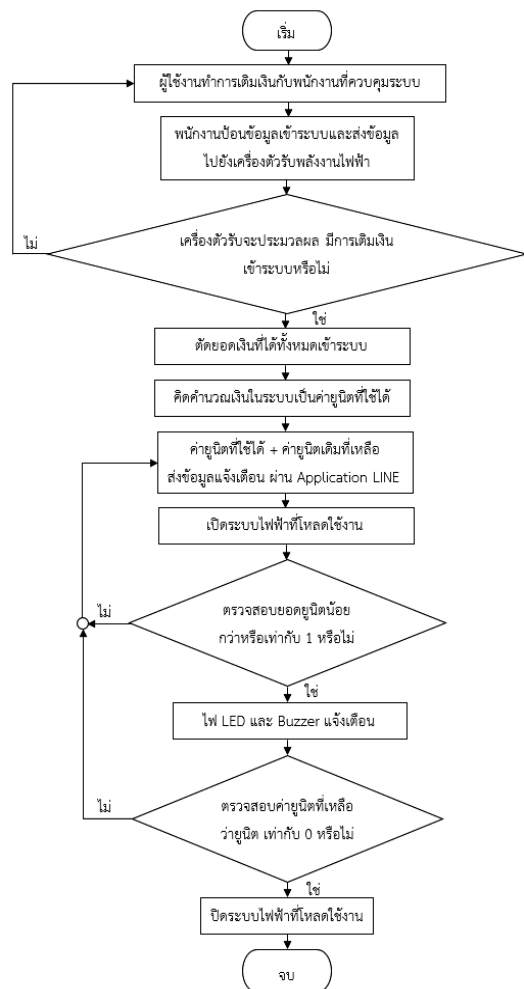
รูปที่ 6 (ก) เครื่องเติมเงินเข้าระบบ (ข) เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

ส่วนที่ 1 เครื่องเติมเงินเข้าระบบ จะประกอบด้วยโมดูล Node MCU ESP8266 เป็นอุปกรณ์ที่ประมวลผลค่าต่างๆ รับค่าอินพุตและเอาต์พุตทำหน้าที่ส่งข้อมูลการเติมผ่านระบบออนไลน์ไปยังเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ในส่วนที่เป็นอินพุตนั้นประกอบไปด้วย Keypad ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมการเติมเงินเข้าระบบ ทางด้านของเอาต์พุตจะประกอบด้วยจอแสดงผล LCD (LCD Display) ซึ่งใช้แสดงผลจากการสั่งการของ Keypad ส่วนโมดูล Buzzer เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ผู้ใช้งานทราบการใช้งานผ่านเสียงเมื่อมีการกด Keypad หลักการทำงานของส่วนต่างๆ เหล่านี้ต้องทำงานให้มีความสัมพันธ์โดยจะใช้ Arduino เป็นตัวควบคุมหลัก แผนผังการควบคุมการเติมเงินเข้าระบบแสดงดังรูปที่ 7

ในส่วนที่ 2 เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูลการเติมเงินแล้วนำข้อมูลไปคิดคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย Node MCU ESP32 จะรับข้อมูลจากเครื่องส่งคือ Node MCU ESP8266 เพื่อทำการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าและ Module PZEM 004T เป็นอุปกรณ์อินพุตวัดค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้คำนวณ เป็นต้นต่อมาในส่วนของเอาต์พุตจะประกอบไปด้วย 1) LCD Display ใช้แสดงค่าพลังงานไฟฟ้า, ค่าแรงดัน, กระแส และเวลาที่สามารถใช้งานได้ 2) รีเลย์ใช้สำหรับเปิด-ปิดระบบ 3) หลอด LED และ Buzzer สำหรับแจ้งเตือนเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าเหลือต่ำกว่าที่กำหนด แผนผังการควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังการควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า

3.2 ขั้นตอนการใช้งาน

การทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 9 โดยเริ่มจากผู้ใช้งานทำการเติมเงินกับพนักงานที่ดูแลระบบ พนักงานเติมเงินเข้าระบบ ระบบจะทำการประมวลผล คิดคำนวณเงินเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถได้ และส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ และทำการเปิดระบบภายในห้องพักโดยแสดงการทำงานจากจอแสดงผลแบบ LCD จนเมื่อผู้ใช้งานใช้พลังงานไฟฟ้า เหลือน้อยกว่าหนึ่งหน่วย หลอด LED จะกระพริบและ Buzzer จะเปลี่ยนเสียงแจ้งเตือนผู้ใช้ไฟฟ้าให้ทำการเติมเงินเข้าในระบบ ไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเป็น 0

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวน 8 ชนิด คือ พัดลม หลอดอินแคนเดสเซนต์ หม้อหุงข้าวไฟฟ้า กระจกน้ำร้อนไฟฟ้า เตารีด ตู้เย็น กระทะไฟฟ้า และกาต้มน้ำร้อนไฟฟ้า โดยมีการทดสอบดังนี้

4.1 ทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ครั้งที่	พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)	เปิดระบบ	สถานะหลอด LED กระพริบและ Buzzer ส่งเสียงเตือนเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้า น้อยกว่า 1 หน่วย	เติมเงินเข้าระบบเพื่อให้ค่าพลังงานไฟฟ้า เพิ่มขึ้น	สถานะหลอด LED และ Buzzer ดับ เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้า มากกว่า หรือเท่ากับ 1 หน่วย	ระบบปิด
1	1	✓	✓	✓	✓	✓
2	1	✓	✓	✓	✓	✓
3	1	✓	✓	✓	✓	✓
4	1	✓	✓	✓	✓	✓
5	1	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ :

ระบบเปิด หมายถึง สามารถใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าได้

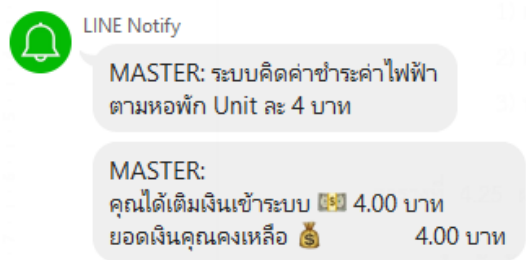
LED กระพริบและ Buzzer ส่งเสียงเตือน แสดงถึงเงินในระบบใกล้หมดและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 1 หน่วย

เติมเงินใหม่ หมายถึง เติมเงินเข้าไปในระบบ เพื่อให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าไม่น้อยกว่า 1 หน่วย

LED และ Buzzer ดับ แสดงถึง ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับ 0

ระบบปิด หมายถึง ไม่สามารถใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าได้เมื่อพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้เท่ากับ 0

จากผลการทดสอบจากตารางที่ 1 จากการทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานไฟฟ้า จนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยตัวอย่างการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานไฟฟ้า จนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 10 - 17



รูปที่ 10 ข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านเมื่อมีการเติมเงินเข้าระบบ

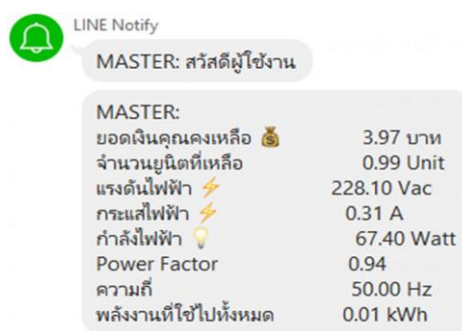


รูปที่ 11 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วย ระบบเปิดอัตโนมัติ

รูปที่ 10 แสดงข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์หลังจากและหลังเติมเงินเข้าระบบแล้วทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยทำให้ระบบเปิดอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วย หลอดไฟ LED จะกระพริบและ Buzzer ส่งเสียงเพื่อเป็นการแจ้งเตือน ดังแสดงในรูปที่ 12 และมีข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วยเพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทำการเติมเงินเข้าระบบ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 12 ค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วย หลอด LED กระพริบ

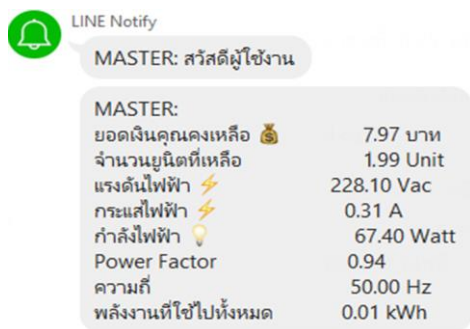


รูปที่ 13 ข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 1 หน่วย

เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าทำการเติมเงินเข้าระบบแล้วและค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าตั้งแต่หนึ่งหน่วยขึ้นไป หลอดไฟ LED จะดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 และจะมีข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ดังแสดงในรูปที่ 15 และเมื่อเงินในระบบมีและค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 16 ระบบควบคุมจะทำการสั่งให้ระบบปิดและจะมีข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ดังแสดงในรูปที่ 17



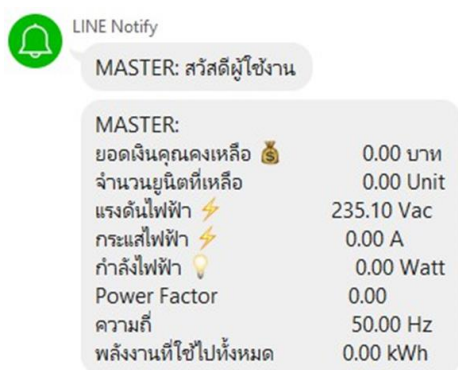
รูปที่ 14 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่ามากกว่าหนึ่งหน่วยหลอด LED และ Buzzer หยุดการแจ้งเตือน



รูปที่ 15 ข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าหลังจากเติมเงินค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่า 1.99 หน่วย



รูปที่ 16 เงินในระบบมีค่า 0 บาท และค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่า 0 หน่วย



รูปที่ 17 ข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่า 0 หน่วย

4.2 ทดสอบและวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 และตัวอย่างค่าพลังงาน

ไฟฟ้าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และที่เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า เริ่มต้นที่ 0 หน่วย แสดงดังรูปที่ 18 - 19

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และจากระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

ครั้งที่	จำนวนหน่วยเริ่มต้นของกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (kWh)	ค่าพลังงานที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (kWh)	จำนวนหน่วยเริ่มต้นของ PZEM (kWh)	ค่าพลังงานที่อ่านได้จาก PZEM (kWh)	ค่าความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
1	0	1.03	0	1.03	0.00
2	1.03	2.04	1.03	2.05	0.49
3	2.04	3.07	2.05	3.08	0.33
4	3.07	4.08	3.08	4.10	0.49
5	4.08	5.09	4.10	5.11	0.39
6	5.09	6.08	5.11	6.10	0.33
7	6.08	7.06	6.10	7.09	0.42
8	7.06	8.09	7.09	8.12	0.37
9	8.09	9.08	8.12	9.12	0.44
10	9.08	10.07	9.12	10.11	0.40
			ค่าเฉลี่ย		0.37



(ก)



(ข)

รูปที่ 18 ตัวอย่างค่าพลังงานไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 0 หน่วย (ก)กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และ (ข) เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า



(ก) 5.09 หน่วย



(ข) 5.11 หน่วย

รูปที่ 19 ตัวอย่างค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก (ก) กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และ (ข) เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์กับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.37 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{x_1 - x_2}{x_2} \right| \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ x_1 คือค่าพลังงานที่อ่านได้จาก PZEM

x_2 คือค่าพลังงานที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

5. วิเคราะห์และสรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านระบบออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ซึ่งการทำงานของระบบนั้นจะต้องมีการเติมเงินผ่านทางเครื่องเติมเงิน หลังจากนั้นข้อมูลการเติมเงินจะถูกส่งผ่านระบบออนไลน์ไปยังเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าและเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าจะส่งข้อมูลจำนวนเงินที่เติม ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้และข้อมูลอื่น ๆ ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถรู้ข้อมูลได้ทันที นอกจากนี้ผู้ใช้ไฟฟ้ายังสามารถตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ได้ทางหน้าจอ LCD ที่ติดอยู่กับเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ จากการทดสอบการทำงานของระบบ

ควบคุมที่นำเสนอเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 8 ชนิดพบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์กับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.37 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากโวลตบางชนิดมีการตัด-ต่อ การทำงานทำให้มีการกระชากของกระแส ซึ่งความเร็วในการทำงานของ Node MCU ESP32 ไม่สามารถตอบสนองได้โดยทันที

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณคุณธนวิทย์ โปรายเจริญ คุณธนภัทร์ เทศสวัสดิ์ ที่ช่วยแนะนำและให้ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยและขอขอบคุณ คุณอัสมันต์ บาเหะ ที่ช่วยตรวจสอบข้อมูลและจัดการข้อมูลผลการทดสอบ รวมถึง ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pradit L. 2548. Small rice milling machine [master's thesis]. Faculty of Industrial Education and technology: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2005. (in Thai)
- [2] Bundit K. 2549. Remote data smart card kilo watt-hour meter on leased line network [master's thesis]. Faculty of Engineering: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang; 2006. (in Thai)

- [3] Thanavit P, Thanapat T. Prepaid electric energy consumption system via RFID controlled by Arduino Uno R3 [Bachelor's thesis] Faculty of Engineering: Rajamangala University Of Technology Thanyaburi; 2020 (in Thai)
- [4] W. Jantin, Kilowatt-Hour Meter. [Internet]. 2008 [cited 2020 Nov 5]. Available from: <http://watcharin2121.blogspot.com/2016/05/kilowatt-hour-meter.html> (in Thai)
- [5] Nongnuch S. PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module. [Internet] 2018 [cited 2020 Nov 10]. Available from: <http://nemoman.blogspot.com/2018/01/pzem004t.html> (in Thai)
- [6] ArduinoAll, ESP8266. [Internet] 2019 [cited 2020 Feb 5]. Available from: <https://www.arduinoall.com/article/30/node-mcu-esp8266-esp8285-arduino-1.html> (in Thai)
- [7] Ioxhop. Node MCU ESP32. [Internet] 2018 [cited 2020 Feb 5]. Available from: <https://www.ioxhop.com/article/62/esp32-esp32.html> (in Thai)

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการทดสอบถังความดันในถังเก็บอากาศ ตามมาตรฐานมอก. 1252-2537

สุภักชัย ไชยวิเศษสกุล¹ มนุศักดิ์ จานทอง¹ มานพ แยมแพง¹ นพพร เปรมใจ¹ ศิริชัย เทพา² และ พิพัฒน์ ปราโมทย์^{1*}
Supakchai_c@mail.rmutt.ac.th¹, manusak.j@en.rmutt.ac.th¹, mamop.y@en.rmutt.ac.th¹
nopporn.p@en.rmutt.ac.th¹, sirichai.the@kmutt.ac.th², pipat.p@en.rmutt.ac.th^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Received : 20-Aug-2021
Revised : 6-Sep-2021
Accepted : 8-Sep-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดทดสอบถังเก็บอากาศแรงดันโดยการควบคุมด้วยมือเพื่อให้มีการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยลดขั้นตอนการปฏิบัติงานในการทดสอบแบบเดิมและมีความแม่นยำมากขึ้น ผู้วิจัยได้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ สำหรับการทดสอบถังรับแรงดันทรงแคบรูปทรงขนาด 64 ลิตร โดยใช้ชุดทดสอบถังเก็บอากาศทดสอบแรงดันด้วยวิธีใช้ไฮโดรสแตติกส์ตัวควบคุมแบบ PI โดยตั้งค่าพารามิเตอร์บนโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวสั่งการไปยังชุดทดสอบระบบควบคุม ปรับค่าตัวแปรอัตราขยายสัดส่วน K_c 13 , อัตราขยายปริพันธ์ K_i 1.308 แล้วเพิ่มแรงดันสัญญาณส่งออกไปยัง โซลินอยด์วาล์วที่สามารถควบคุมด้วยสัญญาณแบบ Pulse Width Modulation (PWM) เมื่อเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแรงดันด้วยมือควบคุมแรงดันได้ด้วยการกำหนดค่าแรงด้วยชุดทดสอบที่ตัวควบคุมแบบ PI controller ผลการทดลองพบว่าชุดทดสอบที่ควบคุมแบบ PI controller มีผลการตอบสนองสถานะความดันที่ 13 bar โดยค่าผิดพลาดของแรงดันภายในถังเก็บแก๊สต่ำกว่า มีค่าเฉลี่ย 1.71 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับวิธีการควบคุมด้วยมือ ที่มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสูงกว่า 1.75 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การทดสอบไฮโดรสแตติก การควบคุมแบบ PI โปรแกรม LabVIEW

Automatic Control System for Pressure Tank Testing According to Tis 1252-2537

Supakchai Chaivisetsakul¹, Manusak janthong¹, Manop yamfang¹, Nopporn preamjai¹

Sirichai thepha² and Pipat pramot^{1*}

Supakchai_c@mail.rmutt.ac.th¹, manusak.j@en.rmutt.ac.th¹, mamop.y@en.rmutt.ac.th¹

nopporn.p@en.rmutt.ac.th¹, sirichai.the@kmutt.ac.th², pipat.p@en.rmutt.ac.th¹

¹ Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Energy Technology Faculty of Energy, Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received	: 20-Aug-2021
Revised	: 6-Sep-2021
Accepted	: 8-Sep-2021

Abstract

This research is to develop a test kit for air pressure tanks for regular manual control, to achieve higher efficiency by reducing work steps in the traditional experiment and more accurate. The researcher studied the design of the automatic control system for testing 64-liter capsule-shaped pressure tanks by using the test kit for air pressure storage to test the pressure by using the Hydrostatic Pressure method and using a PI controller and setting the parameters on the program LabVIEW to control the system. Adjust the proportional growth rate variable K_c and the expansion rate of integral T_i to 13 and 1.308, respectively. The signal output is then amplified to control the solenoid valve using PWM (Pulse Width Modulation). By comparing the traditional manual control methods to the PI controller, the results showed that the PI controller better responds to a set point of a constant pressure state at 13 bar. The average error is lower than 1.71 percent compared to the traditional manual control method, with an average error of about 1.75 percent.

Keywords: hydrostatic testing, PI controller, LabVIEW program

1. บทนำ

ถังเก็บลม (Air Tank) ถังเก็บลมเป็นอุปกรณ์อีกชนิดที่มีความสำคัญในระบบลมอัด เพื่อเป็นตัวพักลมอัด ที่ส่งมาจากปั๊มลม ทำให้สามารถจ่ายลมอัดได้คงที่ ลดการทำงานของปั๊มลม ลดอุณหภูมิของลมอัด คัดน้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวของลมอัดทำให้ลดภาระของเครื่องอัดลมแห้ง ถังเก็บลมส่วนใหญ่ทำมาจากเหล็กและสแตนเลส ส่วนวัสดุที่เป็นสแตนเลสไม่ค่อยนิยมเพราะมีราคาสูง ส่วนใหญ่ จะนิยมถังเก็บลมที่เป็นเหล็กเพราะมีราคาถูกกว่า เหล็กที่นำมาทำถังเก็บลมจะเป็นเหล็กชนิด SS400 ทำมาจากเหล็กแผ่นอย่างดีภายในทาสีกันสนิมอย่างดีผ่านการรับรองจากวิศวกร

จากมาตรฐานการใช้ถังเก็บอากาศจะต้องนำถังเก็บอากาศ ไปตรวจสอบความสามารถในการรับแรงดันของถัง ให้เป็นไปตามมาตรฐานและเป็นการเพิ่มความปลอดภัยและสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ใช้งาน จึงเกิดการร่างชุดทดสอบถังเก็บอากาศของเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กแบบลูกสูบ ของ ประภากร ประเวศชโยดม และคณะ (2561) มีการทดสอบด้วยวิธีใช้แรงดันน้ำ (Hydrostatic Pressure Test) เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงดันของถัง เก็บอากาศให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.1252-2537 [1] เกณฑ์การทดสอบความทนความดันไฮดรอลิกที่ใช้งานสูงสุดกับการทดสอบลื่นรั่วโดยมีปัญหาในการทดสอบเรื่องความเที่ยงตรงของความดันในถังเก็บอากาศและขั้นตอนในการทดสอบ รวมถึงจำนวนคนที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบมาตรฐานของถังเก็บอากาศใช้คนทำให้มีความเสี่ยงค่อนข้างมากและอาจเป็นอันตรายต่อคนทดสอบ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่ใช้ในระบบควบคุมความดันในถังลมในระบบปิดโดยชัยพร ไทรเกตุ [2] จากคณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน จะใช้วิธีการของ Ziegler Nichols ตัวควบคุมแบบ PI ตั้งค่าพารามิเตอร์บนโปรแกรม LabVIEW ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมความดันในถังลมได้ตั้งแต่ 2.0-4.0 บาร์ และในการทดสอบพบว่าระบบควบคุม ที่พัฒนาขึ้นบน PLC สามารถควบคุมความดันภายในถัง

ลมให้เข้าสู่ความดันเป้าหมายได้ ภายใน 12 วินาที โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงที่ไม่เกิน 5%

วิริยะ มะมา และ ธนา ราษฎร์ภักดี [3] จากคณะวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้ศึกษาการพัฒนาการควบคุมพีไอดีสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบ เปิด/ปิด สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในระบบ ทางความร้อนแบบเปิดที่มีการไหลเวียนของน้ำตลอดเวลา โดยการออกแบบตัวควบคุม 3 แบบ คือตัวควบคุมแบบ Digital PID, ตัวควบคุมแบบ On/Off และตัวควบคุมแบบ PID จากผลการทดลอง พบว่า ตัวควบคุมแบบ Digital PID ค่าช่วงเวลาขาขึ้นที่ 956 วินาที นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในระบบทางความร้อนของน้ำที่ไหลเวียน

ไชโย จิโคทห้วย สุทธิพงษ์ เอกพันธ์ และ ดร.ณัฐดนัย ตัณทวิรุฬห์ [4] จากคณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ออกแบบสร้างชุดควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติ โดยอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของสำหรับปั๊มน้ำมอเตอร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยใช้วิธีการควบคุม 3 แบบคือตัวควบคุมแบบ P, Pi, และ PID และมีการควบคุมการไหลจาก Transfer Function ใน 3 แบบ คือ การเปิดวาล์วด้านล่างอย่างเดียว การเปิดวาล์วด้านบนอย่างเดียว และการเปิดวาล์วด้านล่างและวาล์วด้านบน

ในงานวิจัยระบบควบคุมสำหรับการทดสอบความดันในถังเก็บอากาศตามมาตรฐาน นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PI (PI Controller) เป็นตัวควบคุมความดัน และได้ใช้โปรแกรม LabVIEW กับการ์ดอินเทอร์เฟซ (DAQ USB-6008) เป็นตัวส่งการ จากคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์การทดสอบถังเก็บอากาศรับแรงดันทรงแคปซูล สามารถทำการทดสอบแรงดันได้ถึง 13 bar เมื่อเทียบกับงานวิจัยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่ใช้ในระบบควบคุมความดันในถังลมในระบบปิดโดยชัยพร ไทรเกตุ [4] ทดสอบแรงดันในถังลมที่ 2.0- 4.0 บาร์

2. ทฤษฎี

2.1 ความดัน (Pressure) [5] ความดันเป็นปริมาณชนิดหนึ่งในทางฟิสิกส์ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรง ที่กระทำตั้งฉากซึ่งทำโดยของแข็ง

ของเหลว หรือแก๊ส ต่อพื้นที่ของสารใด ๆ (ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส) ความดันเป็นปริมาณ สเกลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่ขนาดคงที่ ณ จุดใดจุดหนึ่งไม่ขึ้นกับทิศทาง จากความหมายของความดันข้างต้นสามารถเขียนเป็นสูตรคณิตศาสตร์ (โดยทั่วไป) ได้ดังนี้

$$P = \frac{F}{A} \text{ หรือ } P = \frac{dF_n}{dA} \quad (1)$$

กำหนดให้

P คือ ความดัน (Pressure)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น

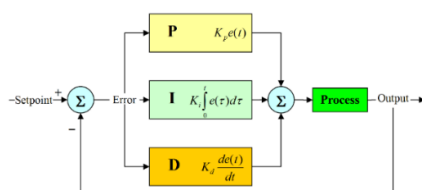
(Normal Force)

A คือ พื้นที่ (Area) หรืออาจใช้ S (Surface; พื้นผิว)

2.2 การควบคุมแบบพีไอดี (PID) [6] การ

ควบคุมแบบพีไอดี เป็นการควบคุมแบบระบบวงปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (closed-loop control systems, feedback control systems) ค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาด (e) ที่หามาจากความแตกต่างระหว่าง ค่าที่ตั้งกับค่าเอาต์พุตที่วัดได้ในปัจจุบัน แล้วใช้สมการที่ (3) คำนวณ เพื่อลดความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด การควบคุมแบบพีไอดี จะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่และ สำคัญ 3 ส่วน คือเทอม Proportional term $K_p e(t)$ และIntegral term $K_i e(t)dt$ และ Derivative term $K_d de/dt$ ตามไดอะแกรมในรูปที่ 3

$$Y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอดี [6]

2.3 การหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด

จากทดสอบ [7]

2.3.1 Repeatability (U_a):

ค่าความไม่แน่นอนจากค่า Repeatability ของเครื่องมือ UUC

จากสูตรคำนวณ

$$U_a = \delta_{n-1} / \sqrt{n} \quad (3)$$

เมื่อ δ_{n-1} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด จำนวน n ครั้งและ n คือจำนวนครั้งของการวัด

- หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด (Standard Deviation), δ_{n-1}

$$\delta_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

เมื่อ

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมด n ครั้ง
 X_i คือ ผลการวัดในแต่ละครั้ง
 n คือ จำนวนครั้งของการวัด

หาค่าเฉลี่ยของผลการวัด (Average), \bar{X}

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

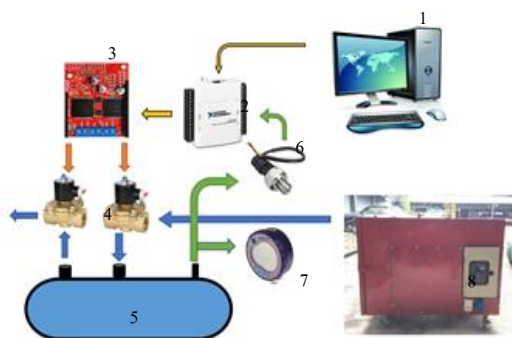
$$\text{หรือ } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (6)$$

เมื่อ

X_i คือ ผลการวัดในแต่ละครั้ง หรือค่าที่วัดได้แต่ละครั้งซึ่งอ่านจาก UUC (I_{IX})
 n คือ จำนวนครั้งของการวัด

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลองระบบ

3.1 อุปกรณ์ระบบควบคุมการทดสอบ



รูปที่ 5 ชุดทดลองระบบควบคุมการทดสอบถังรับแรงดัน



รูปที่ 6 ถังความดันที่ใช้ในการทดสอบ

1. คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลจากเครื่องมือวัดและส่งข้อมูลไปยังตัวขับเคลื่อน โดยจะนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบ

2. การ์ดอินเตอร์เฟซ NI USB6008 ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างกระบวนการวัดกับคอมพิวเตอร์

3. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ Motor Driver รุ่น VNH5019 ทำหน้าที่ควบคุมโซลินอยด์วาล์วตามสัญญาณแบบ PWM ที่ต่างกัน ก็จะทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณสวิต

4. โซลินอยด์วาล์ว อุปกรณ์ควบคุมการไหลของของไหล

5. ถังเก็บอากาศรับแรงดัน มีหน้าที่ในการเก็บลม เพื่อรักษาความดันลมของระบบให้คงที่อยู่ตลอดเวลา

6. pressure sensor เซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความดันที่วัดได้

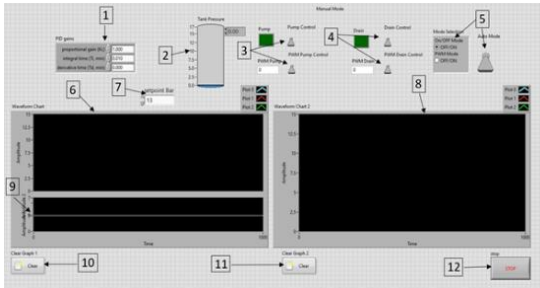
7. pressure gauge เป็นตัวอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดความดันที่อยู่ภายในถังว่ามีขนาดความดันเพียงพอสำหรับการทดสอบ

8. ชุดทดสอบถังเก็บอากาศแรงดัน จะอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง ใช้เครื่องพ่นยา 3 สูบเป็นตัวสร้างกำลังงาน และมีน้ำเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายกำลังงาน มอเตอร์ไฟฟ้าจะเป็นต้นกำลังไปขับเครื่องพ่นยา 3 สูบเพื่ออัดน้ำเข้าถังเก็บอากาศให้ได้ความดันตามที่ต้องการ

3.1 เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ของระบบ

โปรแกรม LabVIEW รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอนาล็อกขาเข้า (Voltage Analog Input) จาก sensor ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซ (DAQ USB-6008) ซึ่งแปลงสัญญาณมาจาก pressure sensor เมื่อคอมพิวเตอร์รับสัญญาณจะทำงานประมวลผลแรงดันที่ตั้งไว้ กับแรงดันที่เกิดขึ้น ถ้าแรงดันยังไม่ถึงที่ค่ากำหนด ระบบควบคุมแบบ PI ที่สร้างในคอมพิวเตอร์จะคำนวณค่าสัญญาณควบคุม แล้วส่งคำสั่งไปยังการ์ด (DAQ USB-6008) ผ่านช่องอนาล็อกขาออก (Analog output) ไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ VNH5019 ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณ PWM ไปควบคุมโซลินอยด์วาล์วที่ติดตั้งไว้ที่ ขาเข้าถังเก็บอากาศรับแรงดันและขาออกถังเก็บอากาศรับแรงดัน



รูปที่ 7 แสดงโปรแกรมที่พัฒนามาบนโปรแกรม LabVIEW ประกอบด้วย

1. พารามิเตอร์ที่ควบคุมระบบ
2. แสดงความดันในการทดสอบ
3. สวิตช์เปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว/สวิตช์เปิด-ปิดสัญญาณ PWM
4. สวิตช์เปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว/สวิตช์เปิด-ปิดสัญญาณ PWM
5. สวิตช์เปิด-ปิด การควบคุมแบบ Manual/Auto
6. กราฟแสดงความดัน
7. กำหนดค่าแรงดันในการทดสอบ
8. กราฟแสดงความดัน
9. กราฟแสดงสัญญาณ PWM
10. ปุ่มReset การแสดงกราฟ
11. ปุ่มReset การแสดงกราฟ
12. ปุ่มกดยกเลิกการทำงาน

3.2 วิธีการทดสอบ Hydrostatic Test

1. ปิดอุปกรณ์นิรภัยแบบระบายหรือ Safety relieve valve บริเวณด้านบนของถังภาชนะรับแรงดัน ด้วยหน้าแปลนชนิดปิดสนิท และทำการปิดวาล์วทั้งหมดก่อนอัดด้วยความดัน Hydrostatic Test
2. ตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ (Method for Visual examination) บริเวณภายนอกของถังภาชนะรับแรงดันที่ทำการทดสอบ เพื่อตรวจสอบสภาพผุกร่อนของถัง
3. ทำการเติมน้ำในถังภาชนะรับแรงดันจนเต็ม เพื่อเตรียมการทดสอบด้วยการอัดความดัน Hydrostatic Test โดยมีของไหลตัวกลาง ก็คือ “น้ำ” ที่แรงดัน $1.3P + 249 \text{ kPa}$
- 1.3 คือ ความดันสูงสุด

P คือ ความดันใช้งานสูงสุด

249 คือ กิโลพาสคัล

4. คงแรงดันที่ใช้ทดสอบไว้อย่างต่ำ เป็นระยะเวลา 3 นาที เพื่อให้เราตรวจสอบหาจุดรั่วซึม ปริมาตร หรือสภาพความสมบูรณ์ของถังภาชนะรับแรงดันว่าสามารถทนแรงดันที่ใช้ทดสอบได้หรือไม่

5. เป็นอันเสร็จสิ้นในการทดสอบ Hydrostatic Test และให้ทดสอบเซฟตี้วาล์วตามค่าที่กำหนดไว้ เพื่อดูการทำงานของเซฟตี้วาล์วว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่

3.3 เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Gauge)

1. เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Gauge) ควรมีความสามารถวัดสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความดันทดสอบแต่ไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของความดันทดสอบ
2. เครื่องวัดแรงดันอ่านความดันที่ใช้ในการทดสอบ (Test Pressure)
3. เกจวัดความดันจะต้องชี้ที่ค่าความดันเดียวเสมอตลอดการทดสอบ
4. เมื่อจบการทดสอบเกจวัดความดันทุกตัวจะต้องชี้ที่ 0 psi เสมอ

3.4 การทดสอบการควบคุมความดันภายในถัง

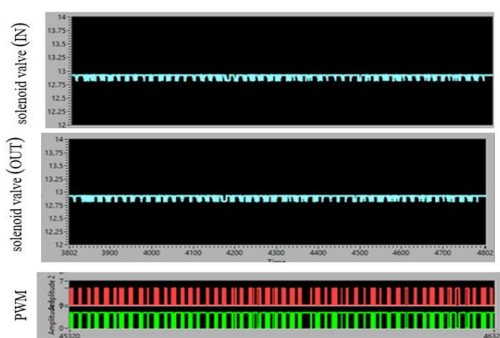
ทำการทดสอบผลการตอบสนองแบบ PI ตั้งค่า set point ที่ 13 bar ปรับเปลี่ยนค่าอัตรา K_p และ K_i เริ่มต้นจากที่ศูนย์ และค่อย ๆ ปรับเปลี่ยนค่า สังเกตผลตอบสนองที่เกิดขึ้นและทำการบันทึกค่า K_p และ K_i ที่ให้ผลการทดสอบค่าความดันที่ดีที่สุด



รูปที่ 8 ชุดการทดสอบกระบวนการควบคุมการทดสอบถังรับแรงดัน

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลทดสอบระบบควบคุมแบบ PI ใน สภาวะที่ความดันคงที่จะทำงานเปิดวาล์วทางเข้าถึง และปิดวาล์วทางออก พบว่าการทดสอบระบบควบคุม แบบ PI สามารถควบคุมแรงดันภายในถังเก็บอากาศให้ คงที่ดังแสดงในภาพที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลตอบสนองของความดันภายในถัง เก็บอากาศระบบควบคุม PI

ตารางที่ 1 ตารางแสดงตัวแปรของระบบควบคุม PI

(bar)	Kp	Ki
13	13	1.308

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการทดลอง Hydrostatic Test สำหรับความดันอ้างอิง 13 bar

ความดันในการทดสอบครั้งที่ (bar)				Average (bar)
1	2	3	4	
13.105	13.125	13.119	13.123	13.118

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการทดสอบ Safety valve สำหรับความดันอ้างอิง 8 bar

ความดันในการทดสอบครั้งที่ (bar)				Average (bar)
1	2	3	4	
8.105	8.129	8.120	8.117	8.118

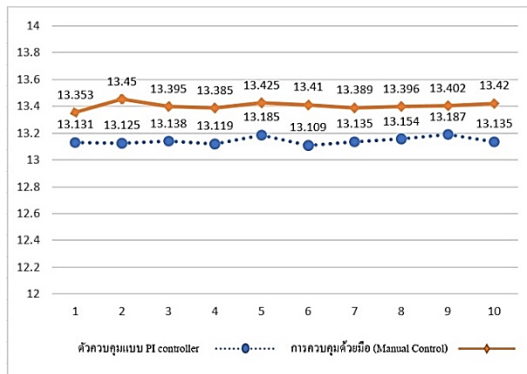
ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ การตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ (Method for Visual examination)

ความบกพร่อง/ตำหนิ	คำอธิบาย
แนวเชื่อม	ตรวจสอบไม่พบรอยรั่วซึมตามแนวเชื่อม
บวม/โป่ง	ตรวจสอบไม่พบรอยบวม/โป่งของถัง
แตก/รอยร้าว	ตรวจสอบไม่พบรอยแตก/รอยรอบบริเวณถัง

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด (Average) สำหรับความดันอ้างอิง 13 bar

การทดสอบครั้งที่	การควบคุมแรงดันในถังด้วยมือ	การควบคุมแบบ PI
1	13.453	13.131
2	13.45	13.125
3	13.495	13.138
4	13.485	13.119
5	13.458	13.135
6	13.464	13.109
7	13.489	13.135
8	13.476	13.154
9	13.502	13.167
10	13.481	13.135
ค่าเฉลี่ยของผลการวัด	13.475	13.134

4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบผล



รูปที่ 10 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดสอบ

แสดงกราฟผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีการควบคุมแรงดันในถังด้วยมือ (Manual Control) กับการใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในการควบคุมแรงดันในถังเก็บอากาศ

4.3.1 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(standard deviation) วิธีการควบคุมแบบ PI

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{10-1} \left[\begin{aligned} &(13 - 13.131)^2 + (13 - 13.125)^2 + (13 - 13.138)^2 \\ &+ (13 - 13.119)^2 + (13 - 13.135)^2 + (13 - 13.109)^2 \\ &+ (13 - 13.135)^2 + (13 - 13.154)^2 + (13 - 13.167)^2 \end{aligned} \right]}$$

$$= 0.143$$

4.3.2 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) วิธีการควบคุมแรงดันในถังด้วยมือ (Manual Control)

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{10-1} \left[\begin{aligned} &(13 - 13.453)^2 + (13 - 13.450)^2 + (13 - 13.495)^2 \\ &+ (13 - 13.485)^2 + (13 - 13.458)^2 + (13 - 13.464)^2 \\ &+ (13 - 13.489)^2 + (13 - 13.476)^2 + (13 - 13.502)^2 \\ &+ (13 - 13.481)^2 \end{aligned} \right]}$$

$$= 0.5013$$

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้วิจัยนี้ได้ออกแบบระบบควบคุมแบบ PI เพื่อใช้ในการทดสอบความสามารถในการรับแรงดันของถังเก็บอากาศจากการทดสอบ พบว่า การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้โปรแกรม LabVIEW และอุปกรณ์สั่งการสามารถควบคุมความดันในการทดสอบได้ถึง 13 บาร์ ในสถานะคงตัววกลบไม่เกิน 1.71 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับผลของการควบคุมด้วยมือมีค่าผิดพลาดเกิน 1.75 เปอร์เซ็นต์

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้คำแนะนำและสนับสนุนแนวทางจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ อาจารย์ ที่ปรึกษาโครงการและอาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือในการทำงานต่าง ๆ ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาบุคลากรเพื่ออุตสาหกรรมและปิโตรเคมี ให้สถานที่ให้การทดสอบและใช้เครื่องมือ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วง ในนามของผู้จัดทำโครงการ จึงขอขอบคุณในความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่ได้รับจากทุกท่าน ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] THAI INDUSTRIAL STANDARD, TIS.1252-2537, Small- Sized Reciprocating Air Compressors Thai, Industrial Standards Institute (TISI), September; 1994
- [2] Chaiyaporn S. Pressure Control in Series 2 Tank Using PLC. Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology. May 2016; 781-4
- [3] Wisawa M, Thana R. Development of APid Control Law for An On/Off Actuator. Jourma of Farm Engineering and Automation Technology. January – June 2017;3(1):19-24

- [4] Chaiyo J, Suthipong E. Automatic water level control system, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University; 2015.
- [5] Wikipedia. Pressure [Internet]. 2 Sep 2019 ; [cited 2021 Aug 1] Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure>
- [6] Wikipedia. PID controller [Internet]. 2 Sep 2019 [cited 2021 Aug 1] Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [7] Sitthichai N. Uncertainty of Hardness Tester HRA. Thai Industrial Standards Institute TISI [Internet]. 15 Jan 2007 [cited 2021 Aug 1] Available from: <https://www.tisi.go.th>.

หุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันด้วยเลเซอร์วัดระยะ

ณัฐชา อินทร์ชูธัญ¹ มนุศักดิ์ จานทอง¹ มานพ แยมแพง¹ นพพร เปรมใจ¹ ศิริชัย เทพา² และ พิพัฒน์ ปราโมทย์^{1*}

natsacha_i@mail.rmutt.ac.th¹, manusak.j@en.rmutt.ac.th¹, manop.y@en.rmutt.ac.th¹,

nopporn.p@en.rmutt.ac.th¹, sirichai.the@kmutt.ac.th², ppat.p@en.rmutt.ac.th^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Received : 20-Aug-2021
Revised : 8-Sep-2021
Accepted : 9-Sep-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบการควบคุมหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนเพื่อใช้วัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันด้วยเลเซอร์วัดระยะ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ตัวควบคุมวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้โปรแกรมสั่งการทำงานให้ชุดเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับแขนหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน ให้เคลื่อนที่ไปตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ ตามที่ได้ทำการโปรแกรมการทำงานไว้ เพื่อใช้วัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถึงความดัน โดยออกแบบต้นกำลังระบบขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ ใช้สเต็ปมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเนื่องจากสามารถคำนวณรอบของมอเตอร์ได้รวดเร็ว เพื่อหาระยะพิกัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยกระบวนการทดสอบคือ การวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดัน ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับความดันที่ 8,9,10,11,12, และ 13 บาร์ เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและศึกษาลักษณะการขยายตัวในตำแหน่งที่กำหนดของถึงความดันรูปทรงแคปซูล ที่เปลี่ยนแปลงไปในการเพิ่มความดันทุกครั้ง ผลการทดสอบการวัดระยะการเคลื่อนที่มี ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.06 ในการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแนวนอนหรือ แกน X จากระยะ 20,50,100,150,200 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบผลการวัดขนาดจริงกับการวัดด้วยหุ่นยนต์มีผลการคลาดเคลื่อนในการวัดระยะต่างกันเฉลี่ยไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ณ ตำแหน่งจุดวัดที่ 1 ถึง 10 ตามแนวแกน X ของถึงความดัน ได้ผลการทดสอบจริงของการวัดการขยายตัวของถึงความดันอยู่ที่ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และ ผลจากการทดสอบการจำลองด้วย Finite Element ได้ค่าการขยายตัวของถึงความดันคือ 0.037 มิลลิเมตร

คำสำคัญ : หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน, เลเซอร์วัดระยะ, วัดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดัน

Cartesian Robot for Measuring the Diameter of a Pressure Tank Using a Laser Distance Meter

Natsacha Inchoorun¹, Manusak Janthong¹, Manop Yamfang¹, nopporn preamjai¹,

Sirichai Thepha², and Pipat Pramot^{1*}

natsacha_i@mail.rmutt.ac.th¹, manusak.j@en.rmutt.ac.th¹, manop.y@en.rmutt.ac.th¹

nopporn.p@en.rmutt.ac.th¹, sirichai.the@kmutt.ac.th², pipat.p@en.rmutt.ac.th^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Energy Technology Faculty of Energy, Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received	: 20-Aug-2021
Revised	: 8-Sep-2021
Accepted	: 9-Sep-2021

Abstract

This research is the study and design of a cartesian robot control system for measuring the diameter of the pressure tank using a laser distance meter. The central part is a microcontroller control cabinet that communicates to the sensors kits on the cartesian robot arm. Then, the controller controls the robot arms to move through programmed positions to measure the pressure tank's diameter. Stepping motors are used for the mechanical power system to drive the robot arm because it quickly calculates the motors' rpm. These calculations give the coordinates of the moving position accurately with the most effective. The testing process measures the diameter of the pressure tank both before and after receiving the pressure at 8, 9, 10, 11, 12, and 13 bar to find the diameter and study the expansion characteristics of the capsule-shaped pressure tank. The size changes are measured with every increase in pressure and every designated position. The robots' movement has an average tolerance of about 0.06 percent for a straight line motion in the X direction at a distance of 20, 50, 100, 150, and 200 millimeters, respectively. The difference between the tank's actual size and the robot's measurement is averagely less than 1 millimeter. at the measurement point position 1 to 10 along the X axis of the pressure vessel. The actual test result of the pressure vessel expansion measurement is not more than 1 millimeter. And the results from the simulation test with Finite Element, the expansion of the pressure vessel is 0.037 millimeter.

Keywords: Cartesian robot, laser distance meter, pressure tank diameter measurement

1. บทนำ

การวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุโลหะทรงกระบอกยาวปลายมนเช่น ถึงความดันนั้น ไม่สามารถวัดและประมาณด้วยสายตาแล้วบอกเป็นจำนวนตัวเลขตามขนาดมาตรฐานหน่วยวัดสากลที่แม่นยำได้ เนื่องจากปัจจัยทางด้านรูปทรงของตัววัตถุที่ดุกกลมกลืน ยากต่อการวัดด้วยการสังเกตจากการมองเห็นเพียงอย่างเดียวได้ ดังนั้นในการศึกษาการวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถึงความดันซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในงานทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมเมืองไทยนี้ จึงเลือกใช้หน่วยการวัดในระบบ SI (The International System of Units : SI) เนื่องจากเป็นหน่วยวัดที่เป็นมาตรฐานสากล เข้าใจได้ง่าย ใช้งานง่ายและสามารถใช้เป็นหน่วยวัดเพื่อใช้ในการสื่อสารและเลือกใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์แสดงผลได้ โดยที่สามารถแสดงผลในหน่วยวัดแบบเดียวกันอย่างเหมาะสม โดยได้ทำการศึกษานหน่วยวัดและมาตรฐานเช่นของ Adam zeberkiewicz [1] ใช้หลักการแนวคิดการวัดพื้นฐานรูปทรงเลขาคณิตโดยวิธีการวัดระยะทางจากพื้นผิว แล้วเก็บค่าที่วัดเป็นระยะทางตามเส้นรอบวงเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอบวง ที่กล่าวใน Bogna Szyk และคณะ [2] จากนั้นทำการศึกษาในการออกแบบหุ่นยนต์ แบบคาร์ทีเซียน (Cartesian robot) 3 แกน ได้แก่ X,Y,Z เพื่อศึกษาการตอบสนองการเคลื่อนที่ไปตามระยะทางที่กำหนดและศึกษาความแม่นยำในการเคลื่อนที่ไปด้วยในขณะที่เดียวกันโดยมีขนาดระยะทางบอกเป็นตัวเลขดิจิทัลบนจอโน้ตบุ๊ก เทียบกับขนาดสเกลวัดระยะทางตามแนวการเคลื่อนที่ ตามการออกแบบของ Bhargav P และคณะ [3] นอกเหนือไปจากงานวิจัยที่กล่าวมายังมีการออกแบบการควบคุมการทำงานด้วยการโปรแกรมสั่งการชุดควบคุมอุปกรณ์มอเตอร์ที่ติดตั้งเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ผ่านชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ของ Alok Mukherjee และคณะ [4] ส่วนในการเลือกใช้อุปกรณ์เลเซอร์วัดระยะทางเพื่อเก็บผลทดสอบวัดระยะทางจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 เพื่อตรวจสอบผล

ผลทดสอบความแม่นยำโดยศึกษาค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์เลเซอร์ที่เลือกใช้ตามแนวทางของ Meh-e-Munir และคณะ [5] จากการทดสอบการใช้งานอุปกรณ์เลเซอร์เบื้องต้นพบว่าเกิดการผิดพลาดในการอ่านค่าตัวเลขที่มีความผิดพลาดเพี้ยนอยู่เนื่องมาจากเซ็นเซอร์อ่านค่าเร็วและถี่เกินไปจึงทำให้ได้ค่าตัวเลขที่ไม่นิ่งจึงต้องทำการศึกษาเทคนิคการลดและการขยายแรงดันอินพุต-เอาต์พุต เพื่อใช้ปรับแต่งวงจรสัญญาณให้อุปกรณ์อ่านค่าสัญญาณได้นิ่งขึ้น จากคู่มือการปรับแต่งอ็อปแอมป์ Ron Mancini [6] และเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือที่ใช้สามารถวัดค่าระยะได้ความแม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงได้ศึกษาวิธีการสอบเทียบเลเซอร์เพื่อใช้หาเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเพื่อมาปรับใช้กับงานวิจัยนี้ ของ Chang Liu และคณะ [7] จากนั้นจึงศึกษาวิธีการประเมินค่าด้วยเทคนิคต่างๆสำหรับการประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความสูงจากพื้นจากวิธีการสแกนด้วยเลเซอร์เช่นของ Tongyu Yang และคณะ [8] เมื่อทำการทดสอบสแกนหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถึงความดันโดยเทียบกันระหว่างก่อนอัดแรงดันและหลังอัดแรงดันพบว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของถึงความดันขนาด 20 ลิตร ที่ความดัน 9 บาร์ และได้ใช้โปรแกรมทดสอบทางทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาและศึกษาจุดวิกฤต ที่จะทำให้ถึงความดันมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยพบว่าความหนาและความบางของผนังถึงความดันจะมีผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่อตัวถึงความดัน

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลองวิจัย

การศึกษาค้นหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันโดยใช้หลักการออกแบบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เช่นเดียวกันเครื่องสแกนซึ่งมีการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 แกนหรือแกน X,Y,และ Z ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 (ก) โดย แกน X จะเคลื่อนที่ไปตามแนวราบ แกน Y จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางขึ้นและลง แกน Z จะติดตั้งชุดเลเซอร์ 2 ชุด ในฝั่งตรงข้ามกันของวงรัศมีโดยเคลื่อนที่ลักษณะครึ่งวงกลมจากระยะมุม 0° ถึง 180° และยิงลำแสงตั้งฉากกับผนังถึงความดันตลอดการวัดระยะความยาวของถึง และทำการจำลองถึงความดันที่

มีขนาดความจุ 20 ลิตร ผนังหนา 3 มิลลิเมตร ลักษณะทรงแคปซูลเพื่อใช้ในการทดสอบ

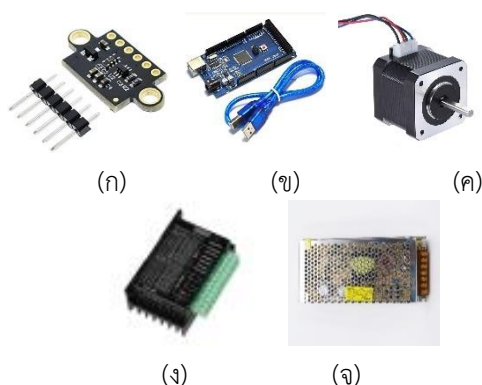
ชุดเลเซอร์ 2 ชุด และเลเซอร์วัดระยะเทียบแนวแกน X ใช้รุ่น VL53LOX V2 เป็นเลเซอร์ วัดระยะทาง ความยาวคลื่น 940 นาโนเมตร ซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า มีความปลอดภัยต่อสายตา ใช้ชิพ VL53LOX สื่อสารแบบ I2C วัดได้ระยะสูงสุด 1200 มม. ความคลาดเคลื่อน 5% ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และสีแสงเงาของวัตถุที่วัด ตามรูปที่ 1 (ก)

บอร์ด Arduino รุ่น Arduino Mega 2560 ขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 5.5 x 11.0 ซม. พร้อมขาจับสัญญาณ 50 ขา ทำให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อหากมีการเพิ่มอุปกรณ์ภายหลัง ตามรูปที่ 1 (ข)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ รุ่น 17HS6001 1 ตัว ทำหน้าที่ขับเคลื่อนแกนกลไปตามแนวแกน X ที่ระยะ 0 ถึง 1200 มม. เพื่อง่ายต่อการคำนวณรอบมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปจุดที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ตามรูปที่ 1 (ค)

กล่องขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์มอเตอร์ รุ่น TB6600 จำนวน 4 กล่อง ทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ให้สามารถหมุนเคลื่อนที่ไปตามทิศทางและพิกัดตำแหน่งที่ต้องการได้ ตามรูปที่ 1 (ง)

สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย 12 V 10 A 120 W เพื่อจ่ายไฟให้ชุดทดสอบสามารถทำงานได้ตามรูปที่ 1 (จ)



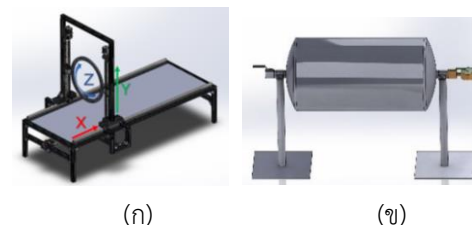
รูปที่ 1 ชุดเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุมการทำงานด้วยไฟฟ้า

รูปที่ 1 แสดง (ก) ชุดเซ็นเซอร์เลเซอร์ VL53LOX V2 (ข) บอร์ด Arduino รุ่น Mega 2560 (ค) สเต็ปเปอร์มอเตอร์ รุ่น 17HS6001 (ง) กล่องขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์มอเตอร์ รุ่น TB6600 (จ) สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย

2.1 วิธีการการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนและชุดทดสอบ ประกอบด้วย

โครงสร้างหุ่นยนต์ คาร์ทีเซียน (Cartesian) เป็นอูมิเนียมโปรไฟล์ ขนาดเครื่อง กว้าง 519 มม. ยาว 1500 มม. สูง 890 มม. ประกอบด้วยรางคู่ทำจากฉากอลูมิเนียมติดตั้งเพลสแตนเลส ยึดกับโครงสร้าง และประกอบชุดแกนหุ่นยนต์ขึ้นรูปเป็นขั้วประตูดึง 600 มม. จากพื้นโครงสร้าง ด้านในติดตั้งวงแหวนแบบจานเบร็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมภายใน 337 มม. ขอบวงด้านนอก 390 มม. ลักษณะแกนของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนที่ออกแบบเป็นการทำงาน 3 แกน โดยแกนของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น 2 แกน คือ X และ Y แกนที่ 3 จะเคลื่อนที่ในลักษณะพิกัดเชิงขั้วคือเคลื่อนที่ทำมุม 0° ถึง 180° โดยรวมแล้วแกนหุ่นยนต์จะทำงานในลักษณะคล้ายเครนตามรูปที่ 2

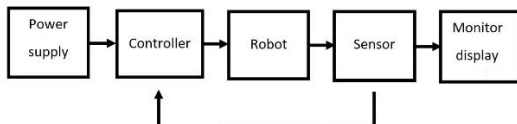
ถังความดันมีขนาดโดยประมาณ 20 ลิตร ผนังโลหะหนา 3 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเท่ากับ 240 มม. ความยาว 520 มม. ออกแบบให้วางบนแท่นของหุ่นยนต์ มีขาตั้งรองรับพร้อมหูรูดแบบขันเกลียวยึดหัวและท้ายถัง ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 (ก) การออกแบบหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (ข) การออกแบบขาตั้งรับถังความดัน

2.2 การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน

ออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการจำลอง และเขียนระบบควบคุมร่วมกับเครื่องมือการควบคุมพีไอดี (PID Control) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่แสดงแผนภาพกรอบ ตามรูปที่ 3



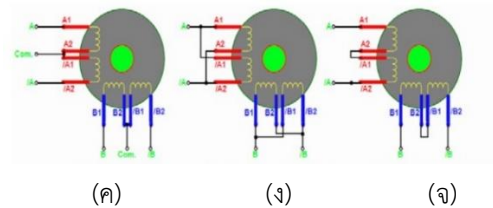
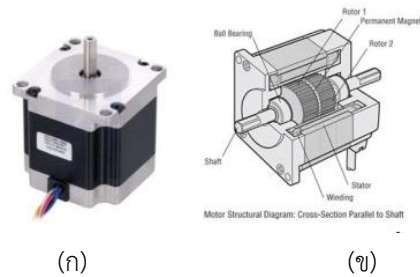
รูปที่ 3 แผนภาพกรอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

การหาประสิทธิภาพความแม่นยำการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่โดยอาศัยหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียน เพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ซึ่งนำผลการทดลองจากการกำหนดจุดการเคลื่อนที่เข้าไปหา และใช้สมการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน ได้ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ค่า\%คลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจริงที่กำหนด} - \text{ค่าเฉลี่ย}}{\text{ค่าจริงที่กำหนด}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ผลรวมความคลาดเคลื่อน}}{\text{จำนวนการทดลอง}} \times 100 \quad (2)$$

สเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทคือ 1.แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor หรือ PM) 2.แบบแปรผันค่ารีลักแตนซ์ (Variable Reluctance Stepping Motor หรือ VR) และ 3.แบบผสม (Hybrid Stepping Motor) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของขดลวด สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดสองขั้ว (Bipolar) และ ชนิดหลายขั้ว (Unipolar) โดยมีผังการต่อสายดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชนิดของมอเตอร์ที่เลือกใช้และแบบวงจรการต่อขั้วมอเตอร์

รูปที่ 4 แสดง (ก) ลักษณะภายนอก (ข) ลักษณะภายในของสเต็ปป์มอเตอร์ (ค)การต่อขั้วมอเตอร์แบบอนุกรม 3 ขั้ว (ง) การต่อขั้วแบบขนาน 2 ขั้ว (จ) การต่อขั้วแบบอนุกรม 2 ขั้ว

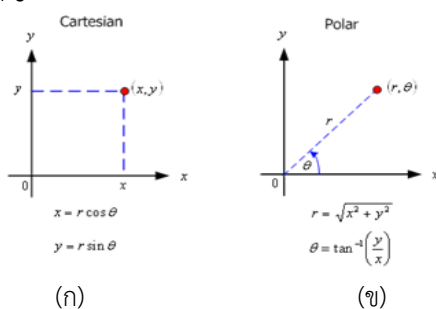
สเต็ปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่หมุนตามจำนวนองศา ความละเอียดการหมุนจะขึ้นอยู่กับจำนวนองศาต่อหนึ่งจังหวะการหมุน หลักการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางและองศาที่เราต้องการได้จะต้องทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดของมอเตอร์ เพื่อให้เกิดเป็นอำนาจของสนามแม่เหล็กขึ้นอย่าง เป็นลำดับที่ถูกต้องและสัมพันธ์กัน ซึ่งเทคนิควิธีการที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ สเต็ปป์มอเตอร์จะมีขดลวดทั้งหมด 2 ขด โดยมีข้อสังเกตคือ จะมีสายออกมา 4 เส้น ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะไม่มีจุดร่วม การต่อเข้ากับวงจรขับจะใช้ปลายทั้งสองด้านของขดลวดแต่ละชุด การทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของขดลวด และการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ชุดเดียวกันนี้ทำได้โดยสลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นเอง

การออกแบบการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์โดยใช้แนวคิดในการโปรแกรมสั่งการทำงานไว้ดัง รูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการโปรแกรมสั่งการทำงานหุ่นยนต์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

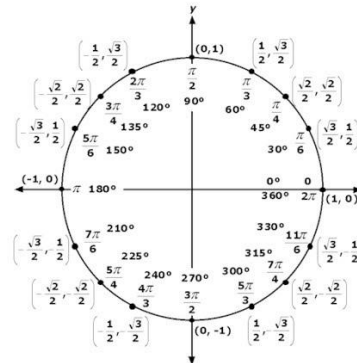
ระบบพิกัดที่นิยมใช้มีสองระบบใหญ่ๆ คือ ระบบพิกัดฉากหรือคาร์ทีเซียน (rectangular or Cartesian coordinate system) และระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) ทั้งนี้เราสามารถทำการแปลงพิกัดจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งได้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 (ก) การแปลงพิกัดฉากเป็นพิกัดเชิงขั้ว (ข) การแปลงพิกัดเชิงขั้วเป็นพิกัดฉาก

การเคลื่อนที่เป็มมุมมองสามารถระบุเป็นพิกัดได้เช่นกันเมื่อใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติทั้ง 6 ฟังก์ชัน โดยเทียบจากวงกลมหนึ่งหน่วย ที่มีรัศมียาว 1 หน่วย และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด วงกลมหนึ่งหน่วยในการคำนวณและหาค่าฟังก์ชันตรีโกณมิติสำหรับค่าคงที่ในแต่ละตำแหน่งเป็นบวกและลบได้ตั้งแต่ 0 ถึง 2π

โดยมีสมการวงกลมหนึ่งหน่วยคือ $x^2 + y^2 = 1$ หรือเทียบจากวงกลมหนึ่งหน่วย ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 พิกัดมุมในจุดต่างๆของวงกลมหนึ่งหน่วย[9]

2.3 การเตรียมการทดลอง

โดยการขึ้นรูปโครงสร้างชุดทดลองประกอบหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดัน และถึงความดันขนาด 20 ลิตร ซึ่งสร้างขึ้นจากวัสดุที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาด เช่น ท่อเหล็ก, อลูมิเนียมโปรไฟล์, ชุดน็อตยึด (Bracket) และ (T-Nut) ตัดขึ้นรูปขึ้นน็อตเชื่อมประกอบตามที่ได้ออกแบบไว้เบื้องต้นตามรูปที่ 8

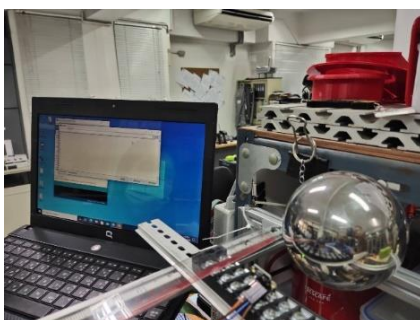


รูปที่ 8 การสร้างประกอบหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน และความดันขนาด 20 ลิตร

รูปที่ 8 แสดง (ก) การประกอบโครงสร้างหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (ข) การติดตั้งอุปกรณ์มอเตอร์, เซ็นเซอร์และการเดินสายไฟ (ค) ถึงความดัน (ง) การติดตั้งถึงความดันพร้อมขาจับน้ำหนัก

2.4 การทดสอบการตกกระทบแสงเลเซอร์ กับวัตถุทรงกลมผิวเรียบมันเงา

โดยการจัตุอุปกรณ์ทดสอบได้แก่ บอร์ด Arduino UNO R3 ต่อสายไฟ 4 เส้นต่อเข้ากับขารับสัญญาณระหว่างตัวบอร์ดและเซนเซอร์รุ่น VL53LOX V2 โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กผ่านสาย USB และใช้ไม้บรรทัดเป็นอุปกรณ์เทียบขนาดวัดระยะทาง ตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการทดสอบวัดระยะทางด้วยเซนเซอร์

จากนั้นทำการป้อนโค้ดโปรแกรมแล้วอัปโหลดข้อมูลโค้ดลงบอร์ดอาดูโนเพื่อให้เซนเซอร์ทำการอ่านค่าระยะเพื่อเป็นการศึกษาและทดสอบผลกระทบเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุเงาสท้อนแสงก่อนขัดเงา และหลังขัดเงา ตามรูปที่ 10

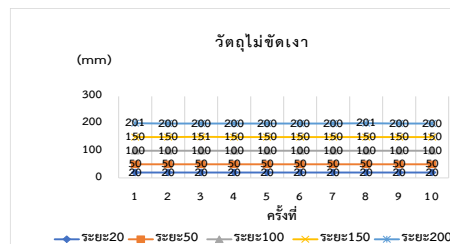
```
#include <Wire.h>
#include <VL53LOX.h>
int led = 3;
int buzzer = 4;

VL53LOX sensor;

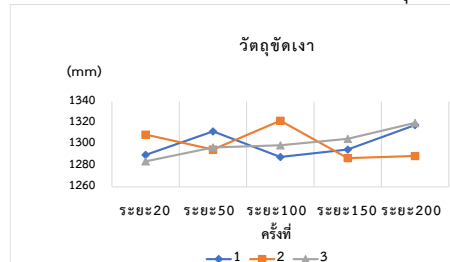
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(buzzer, OUTPUT);
  sensor.init();
  sensor.setTimeout(500);
  sensor.startContinuous();
}

void loop() {
  Serial.print(sensor.readRangeContinuousMillimeters());
  if (sensor.timeoutOccurred()) {
    Serial.print(" TIMEOUT");
  }
  if (sensor.readRangeContinuousMillimeters() < 50) {
    digitalWrite(led, HIGH);
    digitalWrite(buzzer, LOW);
  }
  if (sensor.readRangeContinuousMillimeters() > 50) {
    digitalWrite(led, LOW);
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
  }
  Serial.println();
}
```

รูปที่ 10 โปรแกรม Arduino โค้ดในการทดสอบวัดระยะ
ด้วยเซนเซอร์เลเซอร์



รูปที่ 11 ผลการทดสอบการวัดระยะวัตถุไม่ขัดเงา



รูปที่ 12 ผลการทดสอบการวัดระยะวัตถุขัดเงา

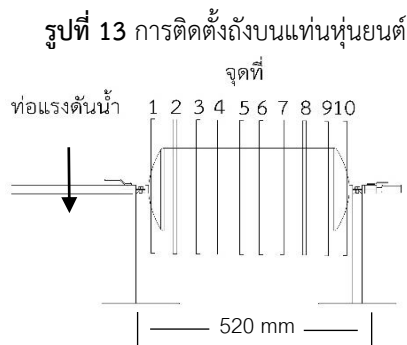
จากการศึกษาและทดสอบเซนเซอร์ที่ใช้

พบว่าเลเซอร์รุ่น VL53LOX V2 เมื่อทำการวัดระยะวัตถุเงาสท้อนแสงแบบยังไม่ขัดเงา สามารถอ่านค่าระยะได้อย่างถูกต้องตามรูปที่ 11 โดย วัดระยะที่ 20, 50, 100, 150, และ 200 มม. ตามลำดับ เป็นจำนวน 50 ครั้ง จากนั้นทำการทดสอบซ้ำโดยการเชื่อมต่อความสะอาดวัตถุเงาสท้อนแสง แล้วทำการวัดระยะใหม่ พบว่าไม่สามารถให้ค่าที่ชุดเซนเซอร์อ่านค่าได้เหมือนรอบแรก เนื่องจากวัตถุเงาส่งแสงจากโลหะเคลือบสแตนเลส 304 มีลักษณะรูปทรงลูกบอลภายในกลวง มีความใสและผิวเนียนเรียบมันเงา จึงเกิดการสะท้อนและการหักเหของแสงทำให้ไม่สามารถวัดค่าจากวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่เนียนเรียบมันเงาเช่นนี้ได้

2.5 วิธีการทดลอง

จัดวางถึงความดันไว้บนแท่นหุ่นยนต์ตามรูปที่ 11 กำหนดจุดพิกัดระยะในแนวแกน X เป็น 10 ระยะ ได้แก่ จุดที่ 1 ถึง 10 เพื่อให้แขนกลทำการเลื่อนจุดวัดหาเส้นผ่านศูนย์กลาง โดย เชื้อระยะเลื่อนจาก 1 ไปจุดที่ 2 ให้มีระยะห่างเท่ากับ 33 มม. และจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ให้มีระยะห่างเท่ากับ 50 มม. เท่าๆกัน ตามรูปที่ 12 โดยระยะดังกล่าวคำนวณแบ่งจากระยะ แนวข้อต่อด้านหน้าของถังความดันไปจรดปลายถังจะได้ระยะที่กำหนดตามขั้นตอนเบื้องต้น โดยจะต้องใช้ระยะพิกัดตามแนวแกน X จุดเริ่มต้น

ระยะ 0 มม. ที่จุดข้อต่อหัวถังเสมอ จากนั้นเปิดการทำงานหุ่นยนต์ผ่านคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่โปรแกรมไว้เพื่อทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง โดยวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังเปล่าก่อน 1 รอบ แล้วบันทึกผลการทดลอง จากนั้นอัดแรงดันน้ำเข้าไปที่แรงดัน 8 บาร์ แล้วบันทึกค่าเป็นรอบที่ 2 ต่อไปค่อยๆเพิ่มการอัดแรงดันน้ำในรอบต่อไปที่ความดัน 9,10,11,12,และ13 บาร์ตามลำดับและบันทึกค่าผลการทดลองทุกๆรอบที่ทำการเพิ่มความดัน



รูปที่ 14 จุดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังความดัน



(ก)



(ข)



(ค)



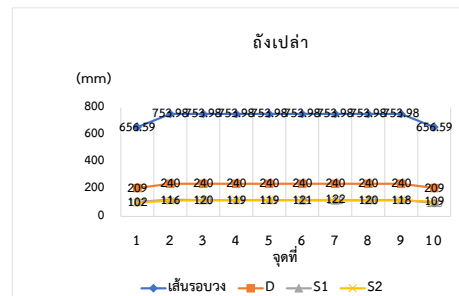
(ง)

รูปที่ 15 การประกอบหุ่นยนต์วัดขนาดถังเข้ากับชุดปั๊มแรงดันน้ำ

รูปที่ 15 แสดง (ก) การต่อท่อน้ำเข้าถัง (ข) ติดตั้งเกจวัดความดัน (ค) ทดสอบปั๊มแรงดันน้ำ (ง) ชุดอุปกรณ์การทดลอง

3.ผลการทดลอง

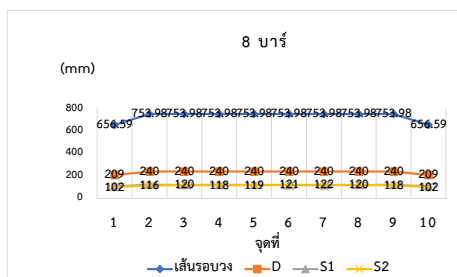
การทดลองในการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังความดัน โดยแบ่งรอบการวัดทั้งหมด 7 รอบคือ วัดถังเปล่าก่อน 1 รอบ,และวัดหลังจากทำการเพิ่มแรงดันน้ำ 8,9,10,11,12,13 บาร์ตามลำดับ โดยถังความดันนั้นได้ถูกออกแบบและสร้างตามหลักทางวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะเหล็กเกรด ss400 ความหนา 3 มม. ซึ่งเป็นมาตรฐานโดยทั่วไปของถังความดันที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนสามารถวัดขนาดการขยายตัวของถังความดันได้ดังกราฟต่อไปนี้ เมื่อ D คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง, S1 คือ ค่ารัศมีของถังที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เลเซอร์ตัวที่ 1,และ S2 คือ ค่ารัศมีของถังที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เลเซอร์ตัวที่ 2



รูปที่ 16 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังความดัน โดยยังไม่ทำการอัดแรงดันเข้าสู่ภายในถัง

ตารางที่ 1 แสดงรายการสรุปข้อมูลถังเปล่าจากรูปที่ 16

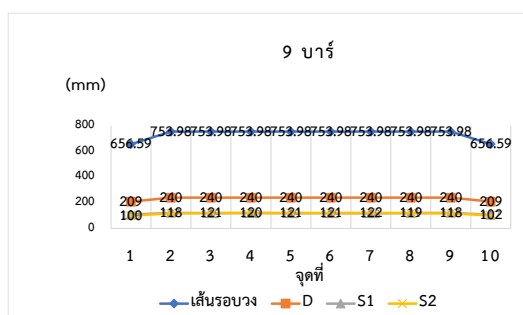
จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	107	102
2	753.98	240	124	116
3	753.98	240	120	120
4	753.98	240	121	119
5	753.98	240	121	119
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	118	122
8	753.98	240	120	120
9	753.98	240	122	118
10	656.59	209	100	109



รูปที่ 17 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 8 บาร์

ตารางที่ 2 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 8 บาร์
จากรูปที่ 17

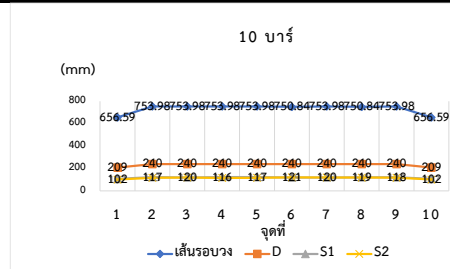
จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	107	102
2	753.98	240	124	116
3	753.98	240	120	120
4	753.98	240	122	118
5	753.98	240	121	119
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	118	122
8	753.98	240	120	120
9	753.98	240	122	118
10	656.59	209	107	102



รูปที่ 18 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 9 บาร์

ตารางที่ 3 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 9 บาร์
จากรูปที่ 18

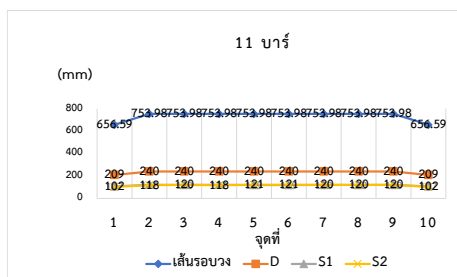
จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	109	100
2	753.98	240	122	118
3	753.98	240	119	121
4	753.98	240	120	120
5	753.98	240	119	121
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	118	122
8	753.98	240	121	119
9	753.98	240	122	118
10	656.59	209	107	102



รูปที่ 19 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 10 บาร์

ตารางที่ 4 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 10 บาร์
จากรูปที่ 19

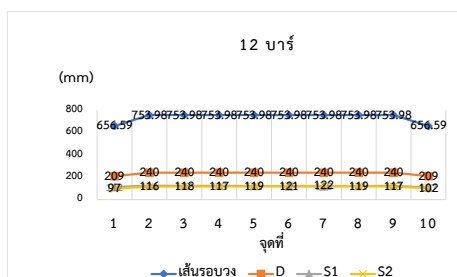
จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	107	102
2	753.98	240	123	117
3	753.98	240	120	120
4	753.98	240	124	116
5	753.98	240	123	117
6	750.84	240	119	121
7	753.98	240	120	120
8	750.84	240	121	119
9	753.98	240	122	118
10	656.59	209	107	102



รูปที่ 20 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 11 บาร์

ตารางที่ 5 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 11 บาร์
จากรูปที่ 20

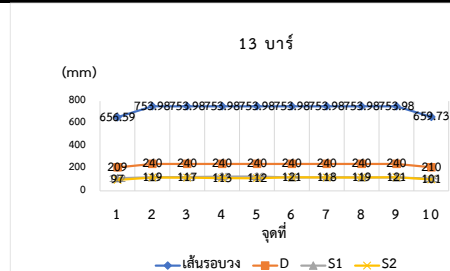
จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	107	102
2	753.98	240	122	118
3	753.98	240	120	120
4	753.98	240	122	118
5	753.98	240	119	121
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	120	120
8	753.98	240	120	120
9	753.98	240	120	120
10	656.59	209	107	102



รูปที่ 21 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 12 บาร์

ตารางที่ 6 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 12 บาร์
จากรูปที่ 21

จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	112	97
2	753.98	240	124	116
3	753.98	240	122	118
4	753.98	240	123	117
5	753.98	240	121	119
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	118	122
8	753.98	240	121	119
9	753.98	240	123	117
10	656.59	209	107	102

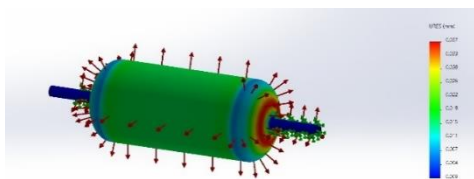


รูปที่ 22 ผลการทดสอบการวัดขนาดถังเมื่อป้อนความดันที่ 13 บาร์

ตารางที่ 7 แสดงรายการสรุปข้อมูลความดันที่ 13 บาร์
จากรูปที่ 22

จุดที่	เส้นรอบวง	D	S1	S2
1	656.59	209	112	97
2	753.98	240	121	119
3	753.98	240	123	117
4	753.98	240	127	113
5	753.98	240	128	112
6	753.98	240	119	121
7	753.98	240	122	118
8	753.98	240	120	119
9	753.98	240	119	121
10	659.73	210	109	101

ในการทำการทดลองวัดขนาดการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันและเก็บบันทึกข้อมูล 7 รอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดถึงความดันเมื่อทำการป้อนแรงดันน้ำที่ 8,9,10,11,12,13 บาร์ตามลำดับ พบการเปลี่ยนแปลงของขนาดน้อยมากๆ คือเริ่มเห็นผลการเปลี่ยนแปลงที่ความดัน 13 บาร์ เมื่อเทียบกับถึงเปล่า และ ป้อนแรงดันน้ำที่ 8 บาร์ ได้ผลจากการพดงนี้ จุดที่ 1,2,3,4,5, 6,7,8,9,10 วัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 209,240,240, 240,240,240,240,240,210 บาร์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ จุดเดียวกันในตำแหน่งที่ 9 ของทั้ง 2 กราฟระหว่าง 8 บาร์,และ13 บาร์ พบการเปลี่ยนแปลงขนาด 1 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการศึกษาในทางทฤษฎีเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบถึงเหตุผลเกิดการขยายตัวของถึงความดันในแนวส่วนโค้งของขอบถังโดยได้ทำการจำลอง Simulation ผ่าน โปรแกรม Solidwork ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 การจำลอง Finite element analysis

จากการทดลองวัดขนาดถึงความดันด้วยหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนและทำการเปรียบเทียบผลทดสอบด้วยการทำการจำลอง Finite element analysis โดยตั้งค่าคุณสมบัติของโลหะและความดันที่ป้อนเข้าไปให้ใกล้เคียงกับการทดลองให้มากที่สุด จึงได้พบว่าถึงความดันที่ได้ทำการวัดโดยค่อยๆเพิ่มแรงดันในทุกๆรอบการวัดรอบละ 1 บาร์นั้น เมื่อเพิ่มความดันไป 13 บาร์แล้วมีค่าความเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของขนาดถึงความดันในแนวหน้าตัดรูปทรงกระบอกเล็กน้อยมากๆหรือเรียกได้ว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันเลย ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมา จากแรงที่กระทำต่อผนังทรงกระบอกเป็นพื้นที่ผิวผนังส่วนใหญ่ของของถึงความดัน ดังนั้นแรงที่กระทำต่อผนังจึงเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

เท่าๆ กันตลอดแนวรูปทรงกระบอก ส่งผลให้แรงที่กระทำโดยตรงกับผนังทรงกระบอกมีค่าความหนาแน่นของแรงดันน้อยกว่าเมื่อเทียบบริเวณรูปวงกลมสีแดงดังรูปที่ 23 แรงที่กระทำในผิวส่วนโค้งด้านหัวถังแล้วด้านท้ายถึงความดัน บริเวณรูปวงกลมสีแดงดังรูปที่ 23 ไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้ถึงความดันขยายตัวจนสามารถวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางถึงความดันได้อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ว่ามีเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดระหว่างข้อมูลกราฟรูปที่ 17 ที่ความดัน 8 บาร์ และ ข้อมูลกราฟรูปที่ 22 ที่ความดัน 13 บาร์ พบการเปลี่ยนแปลงขนาดของถึงความดันเล็กน้อยในช่วงจุดที่ 10 จาก ขนาดเดิม 209 มม. เพิ่มขึ้น 210 มม. ความเปลี่ยนแปลงของขนาดถึงความดันในส่วนนี้จะเป็นบริเวณส่วนโค้ง ของปลายถังโดยมีเหตุผลปัจจัยรองรับในการทดสอบด้วยการออกแบบจำลอง Finite element analysis [10] ที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการขยายตัวของถึงความดันแล้วสามารถวัดค่าหาขนาดที่ยึดโก่งตัวจนเกิดการเสียรูปได้ที่สุดนี้ จึงได้ทำแบบจำลองการทดสอบตามทฤษฎีดังรูปที่ 23 โดยการทดสอบเทียบกับการวัดแบบแนวนอนตามมาตรฐานการทดสอบอัดแรงดัน มอก. ที่ 13 บาร์ ค้างไว้เป็นเวลา 3 นาที [11] แล้วทำการจดบันทึกผลทดสอบ

4.สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนเพื่อใช้ในการทดสอบวัดระยะขนาดเพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางของถึงความดัน โดยมีหลักการทดสอบการขยายตัวของถังเก็บอากาศภายใต้สภาวะการเพิ่มความดันเข้าไปในถังเก็บอากาศโดยรอบแรกเริ่มต้นที่ 8 บาร์ แล้วทำการวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง จากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 10 แล้วเก็บค่าผลการทดสอบที่วัดได้ในรอบแรก จากนั้นทำการทดสอบซ้ำในขั้นตอนเดิมรอบถัดไป โดยเพิ่มความดันมากขึ้นรอบละ 1 บาร์ จนถึงรอบสุดท้ายที่ 13 บาร์ แล้วจึงเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดของผลการทดสอบจริงที่ได้ เทียบกับผลการจำลอง Finite element โดยป้อนข้อมูลคุณสมบัติของโลหะ และ

ความดันที่เพิ่มเข้าไปให้ใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งนี้พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบจริง เริ่มมีผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงในการขยายตัว ณ ตำแหน่งของจุดที่ 10 โดยมีการขยายตัวที่วัดได้น้อยมาก มีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นไปในแนวทางที่สอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการจำลอง Finite element คือพบการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของขอบถึง ที่จุดเดียวกันอยู่ที่ 0.037 มิลลิเมตร

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Adam zeberkiewicz Measurement unit and standards Cental office of Measures [Internet]. 2021[cited 2021 May 06 10:15]. Available from: <https://www.gum.gov.pl/en/services/measurement-units-and-s/20>
- [2] Bogna Szyk and Mateusz Mucha [Internet]. Formula for circumference [updated 2021 May 06]. Available from: <https://www.omnicalculator.com/math/Circumference>
- [3] Bhargav P, Chethan Babu international Journal of Scientific & Engineering Research Volume11, Issue 6, June-2020 ISSN 2229-5518.
- [4] Alok Mukherjee, Susanta Ray, and Arabinda Das International Journal of Electronics and Electrical Engineering Vol. 2, No. 1, March, 2014.
- [5] Meh-e-Munir, ShahidLatif [Internet]. Improved Distance Measuring Using Laser Light Department of Electrical Engineering, Iqra National University, Pakistan 2018. Available from:<https://www.researchgate.net/publication/327282802>
- [6] Ron Mancini Op Amps For Everyone Design Reference Texas instruments August 2002. 18-1-18-22.
- [7] Chang Liu, Yanqiu Xing, Jialong Duanmu and Xin Tian Evaluating Different Methods for Estimating Diameter at Breast Height from Terrestrial Laser Scanning College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, China; 2017.
- [8] Tongyu Yang, Zhong Wang, Zhengang Wu, Xingqiang Li, Lei Wang and Changjie Liu Calibration of Laser Beam Direction for Inner Diameter Measuring Device State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University. China; 2018.
- [9] Waraphon Sinthuyanon, Pannipa Hitasak Satri Sukhothai School, [Internet]. Online. [updated 2009 Aug 30 22:15] Available from: <http://www.thaigoodview.com/node/48584>
- [10] Michael A. Porter, Pedro Marcal, and Dennis H. Martens. On Using Finite Element Analysis for Pressure Vessel Design Journal of American Society of Mechanical Engineers [Internet]. 1999 [cited 1999 jan]; Available from:https://www.researchgate.net/publication/255579325_On_Using_Finite_Element_Analysis_for_Pressure_Vessel_Design
- [11] THAI INDUSTRIAL STANDARD, TIS. 1252 2537, Small - Sized Reciprocating Air Compressors Thai, Industrial Standards Institute (TISI), September; 1994 (in Thai)

วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*} และ พิริยะ สารเอก¹
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}, Top_Piriya@hotmail.com¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 31-Oct-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

บทคัดย่อ

พารามิเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีเลย์คั่นทำงานโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เอสอาร์จี) ประกอบด้วย แรงดันดีซีบัส ความเร็วรอบโรเตอร์ และมุมกระตุ้น เมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบโรเตอร์ คงที่ กำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีจะขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้น บทความนี้นำเสนอวิธีการกำหนดมุมกระตุ้นที่เหมาะสมของเอสอาร์จี โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าตามที่กำหนด เมื่อเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบโรเตอร์และกำลังไฟฟ้า เอาต์พุตที่ต้องการคือมุมกระตุ้น ชุดข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง เพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าด้านออกและมุมกระตุ้นที่ความเร็วรอบคงที่ระหว่าง 1,000-2,000 รอบต่อนาที เอสอาร์จีที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 48 โวลต์ 2.2 กิโลวัตต์ 6,000 รอบต่อนาที วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ใช้ขับเคลื่อนเอสอาร์จี ประมวลผลด้วย dSPACE DS1202 โปรแกรมควบคุมถูกออกแบบผ่าน MATLAB/Simulink ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk เพื่อควบคุมและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ความเร็วรอบโรเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่ต้องการถูกกำหนดค่าลงในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น ผลการทดลองกำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำเนิดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ผลการทดลองนี้ยืนยันความถูกต้องของมุมกระตุ้นที่ได้จากการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

คำสำคัญ: เอสอาร์จี มุมกระตุ้น โครงข่ายประสาทเทียม ความเร็วรอบต่ำ กำลังไฟฟ้าด้านออก

Method to Control the Output Power of SRG at Low Speed with Appropriate Excitation Angles using Artificial Neural Network

Pairote Thongprasri^{1*} and Piriya Saraake¹
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}, Top_Piriya@hotmail.com¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus

Received	: 24-Aug-2021
Revised	: 31-Oct-2021
Accepted	: 17-Nov-2021

Abstract

Parameters of a switched reluctance generator (SRG) consist of DC bus voltage, rotor speed and excitation angles. When the DC bus voltage and rotor speed are constantly controlled, the output power of an SRG depends on the excitation angles. This paper presents a method for determining the appropriate excitation angles of an SRG using artificial neural network to generate the required output power, when the SRG operates at low speed. The artificial neural network used as a back-propagation type in combination with a Levenberg-Marquardt algorithm. The inputs used in the artificial neural network have two variables; rotor speed and output power. The desired output is the excitation angles. The data set for teaching artificial neural network was obtained from an experiment to collect the results of the output power and excitation angles at a constant speed between 1,000-2,000 rpm. Half bridge converter circuit is used to drive the SRG, which is processed by a dSPACE DS1202. The control program is designed through MATLAB/Simulink together with the ControlDesk program to control and display via the computer screen. The rotor speed and required output power were determined into the artificial neural network to predict the excitation angle. The experiment results, the output power generated by the SRG has an average error of 1.76% compared with the required output power. This result confirms the accuracy of the excitation angles processed by artificial neural network.

Keywords: SRG, excitation angles, artificial neural network, low speed and output power

1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลัคแตนซ์ (switched reluctance machine) สามารถควบคุมให้ทำงานได้ 2 โหมด คือโหมดมอเตอร์หรือเอสอาร์เอ็ม (Switched Reluctance Motor : SRM) และโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเอสอาร์จี (Switched Reluctance Generator : SRG) ลักษณะที่เด่นเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น ได้แก่ บริเวณโรเตอร์ไม่มีขดลวดหรือแม่เหล็กถาวร [1] ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วสูง และในที่มีอุณหภูมิสูงได้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลาย เช่น ระบบไฟฟ้าสำรองโดยใช้ฟลายวีลเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน [2] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้กังหันแก๊ส [3] แหล่งพลังงานในรถยนต์ไฟฟ้า [4] ข้อด้อยของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลัคแตนซ์ คือความสัมพันธ์ระหว่างฟลักแม่เหล็กและกระแส ณ ตำแหน่งมุมโรเตอร์ต่างๆ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และค่าความเหนี่ยวนำไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ [5] ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถใช้วงจรสมมูลวิเคราะห์ทางไฟฟ้าได้ เช่นเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น กำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วย 1) ตำแหน่งของมุมกระตุ้น ประกอบด้วยตำแหน่งของมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 2) ค่าความเร็วรอบโรเตอร์ (ω) และ 3) แรงดันดีซีลิงค์หรือดีซีบัส (V_{dc}) ถ้าควบคุมให้แรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบโรเตอร์คงที่ ค่าของกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมุมกระตุ้น การควบคุมลักษณะนี้ได้ถูกนำไปใช้กับระบบกังหันแก๊ส [3] แต่ถ้านำเอสอาร์จีไปประยุกต์ใช้กับกังหันลมแรงดันดีซีบัสคงที่ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้น และความเร็วรอบโรเตอร์ [6] การนำเอสอาร์จีมาประยุกต์ใช้งานที่มีค่าความเร็วรอบเป็นตัวแปร ถ้าความเร็วรอบโรเตอร์ต่ำจะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟสหรือกระแสเฟสของเอสอาร์จีมีค่าสูง ซึ่งจะส่งผลให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย จำเป็นต้องมีการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดเฟสไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไป วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสนิยมใช้ควบคุมเอสอาร์จี ข้อดีของวงจรแบบนี้คือสามารถสร้างแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเฟสหรือแรงดันเฟสได้ทั้งค่าบวก ค่าลบ และค่าศูนย์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมรูปร่างของกระแส

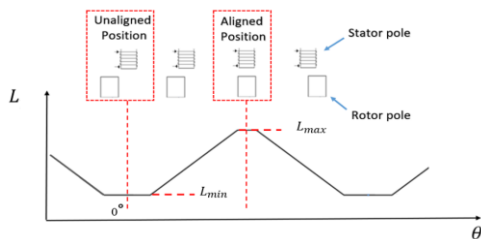
เฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดเฟสสามารถควบคุมได้โดยใช้วิธีควบคุมแรงดันแบบชอปป์ (Voltage Chopping Control : VCC) และวิธีควบคุมกระแสแบบชอปป์ (Current Chopping Control : CCC) วิธีควบคุมกระแสเฟสแบบชอปป์ [7] ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอสอาร์จีในช่วงความเร็วต่ำโดยตัวแปรหลักที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสคือ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส ถ้าความเร็วรอบโรเตอร์มีค่าสูงวิธีการควบคุมจะเป็นแบบกระแสพัลส์ ถ้าควบคุมให้รูปร่างของกระแสเฟสแบบ flat-top [8] จะส่งผลให้เอสอาร์จีเกิดประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการปรับมุมกระตุ้นโดยใช้วิธีการทดลองซ้ำๆ เพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้เอสอาร์จีเกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดในโหมดการควบคุมแบบกระแสพัลส์นำเสนอใน [9]-[10] การนำฟลักซ์ลอจิกมาใช้ในการควบคุมมุมกระตุ้นสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีบรรยายใน [11] วิธีการควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่ แต่ปรับมุมหยุดนำกระแสเพื่อให้ได้รูปร่างกระแสเฟสตามต้องการนำเสนอใน [12] วิธีการหาลำโพงไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีโดยใช้แบบจำลองการทำงาน ผลมีความน่าเชื่อถือแต่วิธีการค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อน โดยจำเป็นต้องทราบรูปร่างของกระแสเฟส เพื่อวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด [13] วิธีการควบคุมในสถานะที่เหมาะสมของมุมกระตุ้นซึ่งถูกประมวลผลด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัล เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดการกระเพื่อมของแรงบิดบรรยายใน [14] การประมาณหาค่าตำแหน่งโรเตอร์สำหรับใช้ควบคุมความเร็วรอบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับฟลักซ์ลอจิก [15] เพื่อติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเอสอาร์จี โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปใช้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ผลที่ได้ระบบควบคุมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบควบคุมแบบฟลักซ์ลอจิก [16]

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเอสอาร์จีมีค่าสูง จึงทำให้การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นโดยใช้สมการคณิตศาสตร์นั้นทำได้ยาก ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการกำหนดมุมกระตุ้นของเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม สำหรับกำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านออกตามที่กำหนด ชุดข้อมูลที่นำเสนอ โครงข่าย

ประสิทธิภาพ ประกอบด้วยความเร็วรอบมอเตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก มุมกระตุ้น ซึ่งได้มาจากการทดลอง วิธีการทดลองจะทำการปรับมุมกระตุ้นที่ความเร็วรอบคงที่ระหว่าง 1,000-2,000 รอบต่อนาที แล้วเก็บข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก สำหรับโครงสร้างของเอสอาร์จีที่ใช้เป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 48 V, 2.2 kW, 6,000 รอบต่อนาที วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชนิดฮาล์ฟบริดจ์เป็นแบบ 2 สวิตช์ต่อเฟส โดยใช้ตัวประมวลผล dSPACE DS1202 ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk สำหรับควบคุมและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

2. วิเคราะห์การทำงานของเอสอาร์จี

ความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อกำหนดค่ากระแสที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถหาได้จากสมการที่ (1)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำและตำแหน่งโรเตอร์

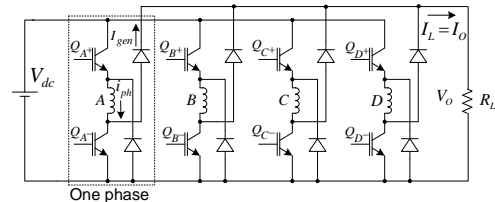
$$L(\theta, i) = \frac{\lambda(\theta, i)}{i} \quad (1)$$

โดยที่ L คือความเหนี่ยวนำ (H)
 θ คือตำแหน่งโรเตอร์ (°)
 i คือกระแส (A)

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ กำหนดให้ตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น 0° ที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้ว (unaligned position) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำมีค่าต่ำที่สุด เมื่อโรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ซ้อนทับขั้วสเตเตอร์ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งตรงขั้ว (aligned position) ที่ตำแหน่งนี้ขั้วโรเตอร์และขั้วสเตเตอร์ตรงกันพอดี และเมื่อขั้วโรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่แยกจากขั้วสเตเตอร์จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

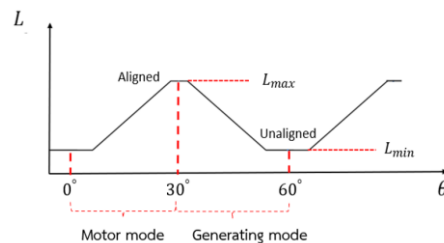
วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) การควบคุมแต่ละเฟสจะ

ประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2 ทุกรอบการทำงานของเอสอาร์จีประกอบด้วยโหมดกระตุ้นโดยการจ่ายพลังงานภายนอก (V_{dc}) เข้าไปในขดลวดเฟส A, B, C และ D เรียงตามลำดับ และโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

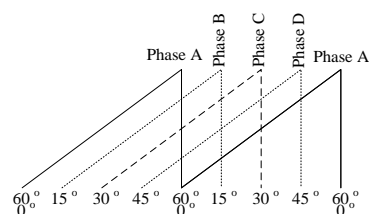


รูปที่ 2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

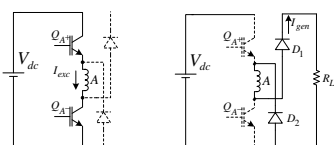
ระยะห่างของตำแหน่งไม่ตรงขั้วที่ติดกันหาได้จาก $360 / N_r$ โดยที่ N_r คือจำนวนขั้วโรเตอร์ ส่วนระยะห่างระหว่างเฟสหาได้จาก $360 / (N_{ph} \times N_r)$ เมื่อ N_{ph} คือจำนวนเฟส ในงานวิจัยนี้โครงสร้างเอสอาร์จีเป็นแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ และ 6 ขั้วโรเตอร์ การควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์จะอยู่ในช่วงความเหนี่ยวนำมีค่าลดลงหรือ $(dL / d\theta) < 0$ โดยมีค่าช่วงมุมโดยประมาณ $30^\circ - 60^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับขดลวดเฟส A, B, C และ D มีระยะห่างระหว่างเฟส 15° ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ช่วงการทำงานทั้ง 2 โหมด



รูปที่ 4 ระยะห่างระหว่างเฟสทั้ง 4 เฟส

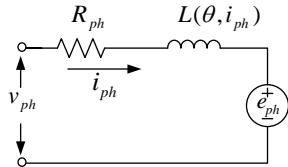


(ก) โหมดกระตุ้น

(ข) โหมดกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 5 โหมดการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์

ตัวอย่างที่ขดลวดเฟส A โหมดกระตุ้นต้องควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ถ้าควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- หยุดนำกระแส พลังงานที่สะสมในขดลวดเฟสจะถูกจ่ายผ่านไดโอด D1 และ D2 ไปยังโหลด โหมดการทำงานนี้เรียกว่าโหมดกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5(ข)



รูปที่ 6 วงจรสมมูลเอสอาร์จี 1 เฟส

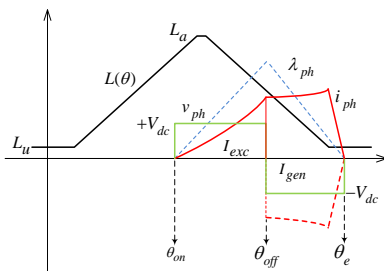
วงจรสมมูลของเอสอาร์จี 1 เฟส ดังรูปที่ 6 สามารถหาค่าแรงดันเฟสได้จากสมการที่ (2) ประกอบด้วย แรงดันความต้านทานเฟส แรงดันความเหนี่ยวนำเฟส และ แรงดันต้านกลับเฟส

$$v_{ph} = R_{ph} i_{ph} + \frac{L(\theta, i_{ph}) di_{ph}}{dt} + \frac{dL(\theta, i_{ph})}{d\theta} \cdot i_{ph} \cdot \omega \quad (2)$$

โดยที่ R_{ph} คือความต้านทานเฟส (Ω)
 i_{ph} คือกระแสเฟส (A)
 ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s)

$e_{ph} = \frac{dL(\theta, i_{ph})}{d\theta} \cdot i_{ph} \cdot \omega$ คือแรงดันต้านกลับเฟส (V)

รูปร่างสัญญาณเฟสของเอสอาร์จีประกอบด้วย กระแส แรงดัน และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ดังแสดงในรูปที่ 7 สามารถหาค่ากระแสในโหมดกระตุ้น โหมดเครื่องกำเนิด เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องอย่างง่าย (เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานขดลวดเฟส เนื่องจากมีค่าน้อยมาก) และ กระแส ได้จากสมการที่ (3) ถึง (6) ตามลำดับ [17]



รูปที่ 7 วงจรสมมูลเอสอาร์จี 1 เฟส

$$I_{exc} = \frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_{ph} d\theta \quad (3)$$

$$I_{gen} = \frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{off}}^{\theta_e} i_{ph} d\theta \quad (4)$$

$$\lambda_{ph} = \int_0^t V_{dc} dt = \frac{V_{dc}}{\omega} \begin{cases} \theta - \theta_{on}, & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{off} \\ \theta_e - \theta, & \theta_{off} < \theta \leq \theta_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

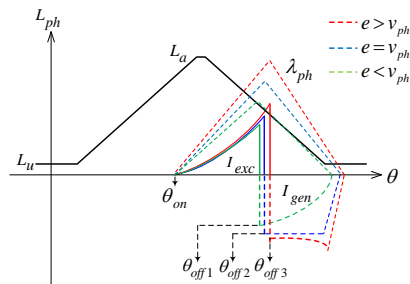
$$i_{ph} = \frac{V_{dc}}{\omega \cdot L(\theta, i)} \begin{cases} \theta - \theta_{on}, & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{off} \\ \theta_e - \theta, & \theta_{off} < \theta \leq \theta_e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่ V_{dc} คือแรงดันดีซีลิงค์ (V)
 θ_{on} คือมุมนำกระแส ($^\circ$)
 θ_{off} คือมุมหยุดนำกระแส ($^\circ$)
 $\theta_e = 2\theta_{off} - \theta_{on}$ คือมุมที่กระแสเฟสลดลงมีค่าเป็นศูนย์ ($^\circ$)

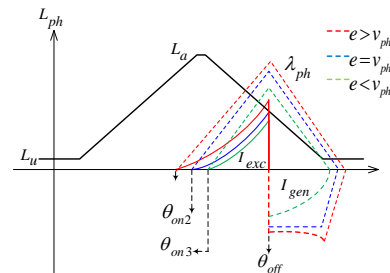
กำลังไฟฟ้าต้านออกของเอสอาร์จีสามารถหาได้จากสมการที่ (7)

$$P_{out} = N_{ph} \cdot I_{gen} \cdot V_o \quad (7)$$

รูปร่างคลื่นกระแสเฟสเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านไฟฟ้าออก สามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี คือ $e < v_{ph}$, $e = v_{ph}$ และ $e > v_{ph}$ ดังแสดงในรูปที่ 8



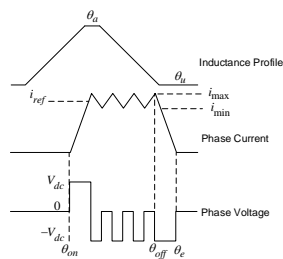
(ก) ควบคุมมุมนำกระแสคงที่แต่ปรับมุมหยุดกระแส



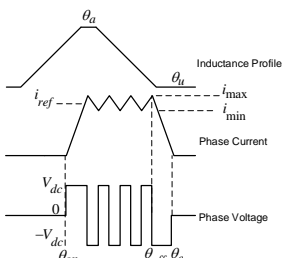
(ข) ปรับมุมนำกระแสแต่ควบคุมมุมหยุดนำกระแสคงที่
 รูปที่ 8 รูปร่างคลื่นกระแสเฟส 3 กรณี

เมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสคั้งที่ และความเร็วโรเตอร์ ให้มีรอบสูงคั้งที่ การควบคุมวงจรรคอนเวอร์เตอร์จะควบคุมแบบกระแสปัลส์ รูปร่างกระแสเฟสทั้ง 3 กรณิ จะขึ้นอยู่กั บมุนนำกระแสและมุนหยุดนำกระแส โดยสามารถควบคุมได้ 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบควบคุมมุนนำกระแสให้คั้งที่แต่ทำ การปรับเปลี่ยนมุนหยุดกระแส และ 2) แบบปรับเปลี่ยนมุน นำกระแสแต่ควบคุมมุนหยุดนำกระแสให้คั้งที่ ดังแสดงใน รูปที่ 8(ก) และ 8(ข) ตามลำดับ

พิจารณาจากสมการที่ (6) ถ้าควบคุมแรงดันดีซี บัสคั้งที่แต่ความเร็วโรเตอร์มีรอบต่ำคั้งที่ ส่งผลให้กระแส เฟสมีค่าสูง จำเป็นต้องควบคุมกระแสเพื่อไม่ให้วงจรรคอน เวอร์เตอร์เสียหาย การป้องกันจะควบคุมแบบ chopping มี 2 แบบคือ soft chopping และ hard chopping ดัง แสดงในรูปที่ 9



(ก) ควบคุมแบบ soft chopping



(ข) ควบคุมแบบ hard chopping

รูปที่ 9 รูปคลื่นกระแสแบบ chopping

ตารางที่ 1 วิธีการควบคุมแรงดันเฟสของเอสอาร์จี

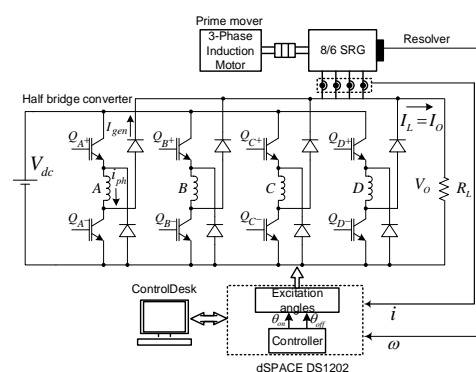
แรงดัน เฟส	สภาวะการทำงาน			
	Q_A^+	Q_A^-	D_1	D_2
V_{dc}	On	On	Off	Off
0	On	Off	On	Off
0	Off	On	Off	On
$-V_{dc}$	Off	Off	On	On

การควบคุมแบบ chopping กระแสเฟสจะถูก ควบคุมที่ค่าอ้างอิง (i_{ref}) อยู่ระหว่างค่าต่ำสุด (i_{min}) และ

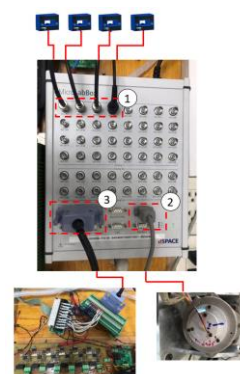
ค่าสูงสุด (i_{max}) ตามการควบคุมแรงดันเฟส ดังแสดงใน ตารางที่ 1 ที่ความถี่ในการสวิตช์เดียวกัน ผลการควบคุม แบบ hard chopping กระแสจะมีการกระเพื่อมสูงกว่าและ มีเสียงรบกวนสูงกว่าการควบคุมกระแสแบบ soft chopping โดยในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมกระแสแบบ soft chopping

3. ออกแบบระบบควบคุมด้วย dSPACE DS1202

ระบบควบคุมดังรูปที่ 10 ประกอบด้วยมอเตอร์ เหนียวนำ 3 เฟส สามารถปรับความเร็วรอบได้จาก อินเวอร์เตอร์ ถูกใช้เป็นตัวต้นขับกำลังให้เอสอาร์จี รีโซล เวอร์ถูกติดตั้งร่วมกับเอสอาร์จีสำหรับหาค่าตำแหน่งโร เตอร์ ค่ากระแสเฟสทราบจากตัวตรวจวัดกระแส ตัว ประมวลผลของระบบใช้ตัวควบคุม dSPACE DS1202 การ ออกแบบโปรแกรมควบคุมใช้ MATLAB/Simulink หน้าจอ ควบคุมและแสดงผลสร้างจากโปรแกรม ControlDesk สัญญาณลอจิกที่ประมวลผลจะถูกส่งไปควบคุมสวิตช์ของ วงจรรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮัลฟบริดจ์



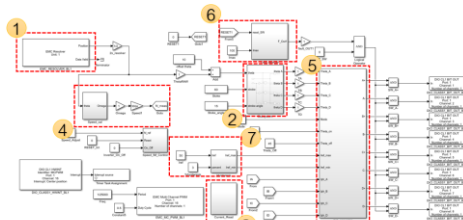
รูปที่ 10 ระบบควบคุม



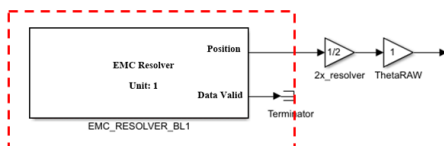
รูปที่ 11 การเชื่อมต่อ dSPACE DS1202

รูปที่ 11 แสดงการต่ออุปกรณ์ร่วมกับ dSPACE DS1202 มีทั้งหมด 3 ส่วน หมายเลข 1 เป็นส่วนที่ใช้ในการแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) ทำหน้าที่แปลงค่ากระแสเฟสที่รับมาจากตัวตรวจวัดกระแสให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำค่ากระแสที่ได้ไปใช้ในการควบคุมและป้องกัน หมายเลข 2 เป็นส่วนเชื่อมต่อกับรีโซลเวอร์ โดยจะรับค่าสัญญาณ sine และ cosine เพื่อแปลงเป็นค่าตำแหน่งโรเตอร์ และหมายเลข 3 เป็นส่วนเอาต์พุตเชื่อมต่อกับสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์

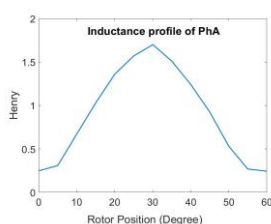
การออกแบบโปรแกรมควบคุมดังแสดงในรูปที่ 12 ออกแบบผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 ส่วนที่ใช้แสดงการอ่านค่าตำแหน่งโรเตอร์ หมายเลข 2 คือส่วนที่ใช้ในการจำลองเฟสของเอสอาร์จี หมายเลข 3 เป็นส่วนที่ใช้เปลี่ยนค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของตัวตรวจวัดกระแส หมายเลข 4 คือส่วนที่ใช้แสดงความเร็วของเอสอาร์จี หมายเลข 5 แสดงส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ หมายเลข 6 คือส่วนป้องกันกระแสเพื่อไม่ให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย และหมายเลข 7 เป็นส่วนที่ใช้ตั้งค่ากระแสอ้างอิงและปรับค่าต่ำสุดและสูงสุด (hysteresis)



รูปที่ 12 โปรแกรมควบคุมด้วย MATLAB/Simulink



(ก) เครื่องมือรับค่ารีโซลเวอร์โปรแกรม MATLAB/Simulink

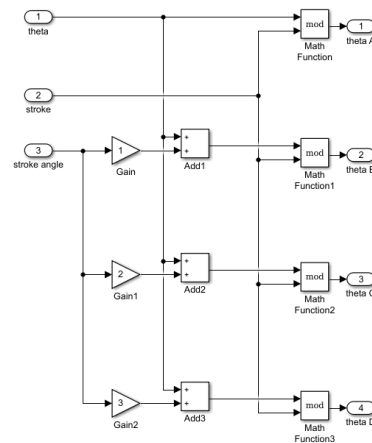


(ข) รูปร่างความเหนี่ยวนำเฟสจากการทดลอง

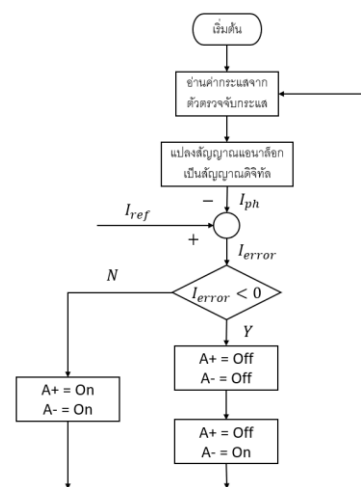
รูปที่ 13 วิธีการอ่านค่าตำแหน่งโรเตอร์

รูปที่ 13 (ก) แสดงเครื่องมือรับค่ารีโซลเวอร์ของ MATLAB/Simulink งานวิจัยใช้รีโซลเวอร์แบบ 2X สำหรับการหมุน 1 รอบ หรือ 360 องศาทางกล จะมีค่าเท่ากับ 180 องศาทางไฟฟ้า และในรูปที่ 13 (ข) แสดงรูปร่างเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัด ณ ตำแหน่งโรเตอร์ 0–60° โดยที่ตำแหน่ง 0° จะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด สำหรับตำแหน่ง 30° จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด

รูปที่ 14 (ก) แสดงวิธีการสร้างตำแหน่งมุมอ้างอิงให้เฟส A, B, C และ D โดยแต่ละเฟสจะมีมุมต่างกัน 15° องศา โดยอินพุต theta รับค่าตำแหน่งของโรเตอร์ได้มาจากรีโซลเวอร์ สำหรับ stroke และ stroke angle กำหนดค่าคงที่ 60 และ 15 ตามลำดับ



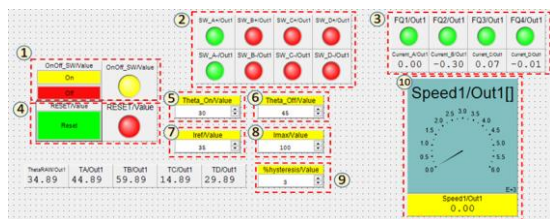
รูปที่ 14 วิธีการสร้างตำแหน่งมุมอ้างอิงทั้ง 4 เฟส



รูปที่ 15 วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์

การสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ มีหลักการทำงานดังแสดงในโฟลวชาร์ตรูปที่ 15 ลำดับแรกจะอ่านค่ากระแสเฟสจากตัวตรวจวัดกระแส ค่าของกระแสจะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จากนั้นค่าของกระแสเฟสที่อ่านมาได้นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิง ถ้ากระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสอ้างอิง จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ dSPACE DS1202 จะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ และสวิตช์ A- ไม่ทำงาน จากนั้นจะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ ไม่ทำงานส่วนสวิตช์ A- ทำงาน ในทางตรงข้ามถ้ากระแสเฟสมีค่าน้อยกว่ากระแสอ้างอิง ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่าศูนย์ตัวควบคุม dSPACE DS1202 จะสร้างสัญญาณควบคุมให้สวิตช์ A+ และ A- ทำงานพร้อมกัน

สำหรับการป้องกันกระแสเกิน มีหลักการการทำงานคือกระแสเฟสที่อ่านได้นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าของกระแสสูงสุดของระบบ หากกระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุดของระบบ ตัวควบคุม dSPACE DS1202 จะสั่งให้สวิตช์ทุกตัวของวงจรคอนเวอร์เตอร์หยุดการทำงาน เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์วงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหาย



รูปที่ 16 หน้าจอควบคุมและแสดงผล

การออกแบบหน้าจอสำหรับควบคุมและแสดงผลใช้โปรแกรม ControlDesk ดังรูปที่ 16 ประกอบด้วย หมายเลข 1 คือส่วนควบคุมเปิด-ปิดระบบ หมายเลข 2 คือส่วนที่ใช้แสดงสถานะการทำงานของสวิตช์แต่ละเฟสของวงจรคอนเวอร์เตอร์ หมายเลข 3 แสดงค่ากระแสแต่ละเฟส ถ้ากระแสเฟสมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุดของระบบไฟแสดงสถานะจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ระบบหยุดทำงานและสามารถรีเซ็ตได้ที่หมายเลข 4 สำหรับหมายเลข 5 และ 6 คือช่องสำหรับกำหนดค่ามุนำกระแสและมุนหยุดนำกระแสตามลำดับ หมายเลข 7 คือช่องสำหรับกำหนดค่ากระแสอ้างอิง หมายเลข 8 จะเป็นช่องสำหรับกำหนดค่ากระแสสูงสุดที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงาน

ได้ปลอดภัย หมายเลข 9 จะเป็นช่องสำหรับกำหนดค่าของ hysteresis และหมายเลข 10 แสดงความเร็วของเอสอาร์จี

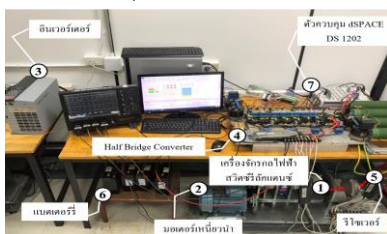
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งในปัญญาประดิษฐ์ ลักษณะการทำงานจะลอกเลียนแบบเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ โครงข่ายประสาทเทียมแบ่งได้ 5 ประเภท ได้แก่ การคาดเดา การจัดลำดับหมู่ การเชื่อมโยงข้อมูล กระบวนการสร้างความคิด และกลั่นกรองข้อมูล สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งได้ 3 ชนิด คือ 1) ชนิดชั้นเดียว จะมีอินพุตเชื่อมต่อกับเอาต์พุตโดยมีค่าน้ำหนักเป็นตัวปรับระดับสัญญาณอินพุตเพียงชั้นเดียว ใช้กับการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน 2) ชนิดหลายชั้น จะมีชั้นซ่อน (hidden layer) คั่นอยู่ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต สามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าแบบชั้นเดียว และ 3) ชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ มีขั้นตอนที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น โดยสามารถปรับค่าน้ำหนักชั้นซ่อน โดยใช้วิธีการแพร่ค่าความผิดพลาดจากชั้นเอาต์พุตกลับมายังชั้นซ่อน มี 3 ขั้นตอนคือการป้อนไปข้างหน้า (feedforward) ของรูปแบบอินพุต การคำนวณและส่งค่าผิดพลาดกลับคืน (backpropagation of error) และการปรับค่าน้ำหนักให้เหมาะสม การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งเป็นแบบมีผู้สอนและแบบไม่มีผู้สอน

งานวิจัยนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (levenberg marquardt) เพื่อทำการปรับค่าน้ำหนักและค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียมและปรับผลลัพธ์ให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดการสอน ได้แก่ ค่า gradient factor และ learning factor โดยค่าการฝึกสอนจะสิ้นสุดเมื่อค่า gradient factor มีค่าน้อยกว่าศูนย์ สำหรับค่า learning factor เป็นค่าคงที่ใช้เร่งการปรับน้ำหนักค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสให้เข้าหาคำตอบ การสอนจะสิ้นสุดเมื่อมีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ สำหรับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบ และกำลังไฟฟ้า สำหรับเอาต์พุตที่ต้องการคือ มุมกระตุ่น ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง วิธีการทดลองปรับความเร็วรอบให้คงที่

1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที แต่ละความเร็วรอบทำการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยมุมนำกระแสสามารถปรับให้ต่ำกว่า 30° ได้ แต่การปรับตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน $2\theta_{off} - \theta_{on} \leq 60^\circ$ แต่ละการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้นจะทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกไว้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ถูกนำมาสร้างโครงข่ายประสาทเทียม การทดสอบหาความเที่ยงตรงของโครงข่ายประสาทเทียม ทดสอบโดยกำหนดค่าความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการลงไปในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น หลังจากได้มุมกระตุ้นนำไปทดลองเพื่อดูผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง

4. ผลการทดลอง

ชุดทดลองเอสอาร์จีในรูปที่ 17 ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 คือเอสอาร์จี 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 2.2 kW, 48 V, 6,000 รอบต่อนาที หมายเลข 2 อุปกรณ์ต้นขับกำลังที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 2.2 kW โดยความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถปรับความเร็วได้จากอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 3) หมายเลข 4 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ สวิตช์ที่ใช้คือ IGBT เบอร์ MG100Q2YS42 ขับนำเกตด้วยไอซีเบอร์ ISO5851 และใช้ไดโอดเบอร์ RURG 8060 โหลดเป็นความต้านทานขนาด 1Ω หมายเลข 5 รีโซเวอร์ 2X เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ หมายเลข 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกที่ใช้เป็นแบตเตอรี่รีขนาด 12 โวลต์ต่ออนุกรมกัน 4 ลูก และหมายเลข 7 ตัวควบคุม dSPACE DS1202 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ

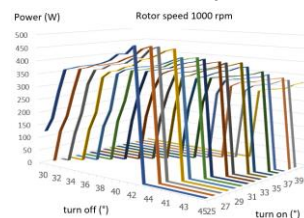


รูปที่ 17 ชุดทดลองเอสอาร์จี

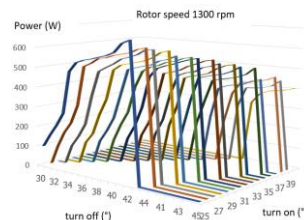
ชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วยความเร็วรอบ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก มุมกระตุ้น เงื่อนไขสำคัญในเก็บข้อมูลแรงดันเฟสจะต้องมีลักษณะเป็นแบบ soft chopping ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการ

อ้างอิง และความเร็วรอบ ผลจากการทดลองหาค่ากระแสอ้างอิงสูงสุดอยู่ที่ 60 A ความเร็วรอบโรเตอร์อยู่ในช่วง 1,000-2,000 รอบต่อนาที สำหรับการปรับตำแหน่งมุมนำกระแสสามารถปรับให้ต่ำกว่า 30° ได้ แต่การปรับตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน $2\theta_{off} - \theta_{on} \leq 60^\circ$

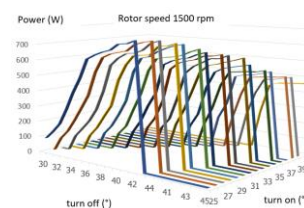
ทดลองการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก เมื่อปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น โดยตำแหน่งมุมนำกระแสต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 25° และ 40° ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 42° และ 50° ตามลำดับ เมื่อควบคุมความเร็วให้คงที่ 1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที ผลที่ได้ดังรูปที่ 18-22 ตามลำดับ



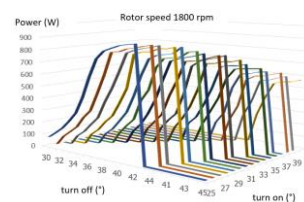
รูปที่ 18 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,000 rpm



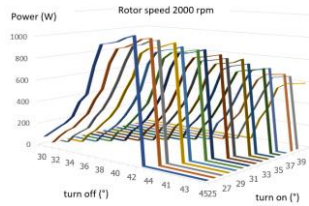
รูปที่ 19 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,300 rpm



รูปที่ 20 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,500 rpm

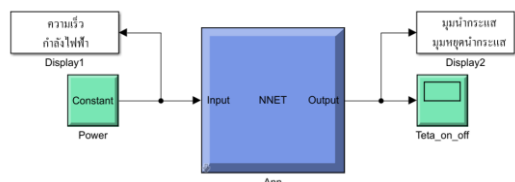


รูปที่ 21 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่ ความเร็วรอบ 1,800 rpm

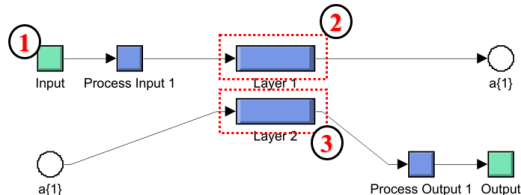


รูปที่ 22 กำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อปรับมุมกระตุ้น คงที่
ความเร็วรอบ 2,000 rpm

ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปสอนให้
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network :
ANN) โดยใช้ฟังก์ชัน nftool ของ MATLAB/Simulink ผล
ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 23 โดยอินพุตมี 2 ตัวแปรคือ
ความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้า ส่วนเอาต์พุตคือมุมกระตุ้น



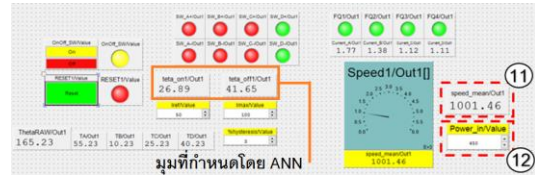
รูปที่ 23 โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 24 องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นจะประกอบไป
ด้วย 3 ชั้น คือ 1) ชั้นอินพุต 2) ชั้นซ่อนโดยมีจำนวน
นิวรอน 10 ตัว และ 3) ชั้นเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 24 ใน
ส่วนของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตจะประกอบไปด้วย ค่าถ่วง
น้ำหนัก และค่าไบแอส โดยฟังก์ชันที่ใช้ในชั้นซ่อน คือ
ไฮเปอร์โบลิค แทนเจน ส่วนชั้นเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชัน
ลิเนียร์

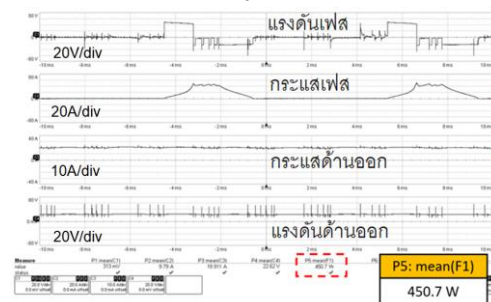
เพื่อป้องกันการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็น
อินพุตเกินกว่าที่เอสอาร์จีกำหนดได้จริง ในแต่ละความเร็ว
จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไข โดยถ้ามีการกำหนดค่า
กำลังไฟฟ้าอินพุตเกินกว่าที่กำหนดได้จริง ผลมุมกระตุ้นจาก
โครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 25 กำหนดค่าอินพุตผ่านหน้าจอควบคุม

ทดลองปรับความเร็วรอบให้ได้ 1,000 รอบต่อ
นาที กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเป็น 450 W ผ่านหน้าจอ
ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 25 หมายเลข 11 และ 12
ตามลำดับ ผลที่เกิดขึ้นโครงข่ายประสาทเทียมประมวลผล
เอาต์พุตที่ได้คือ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสอยู่ที่
ตำแหน่ง 26.89° และ 41.65° ตามลำดับ

ผลการใช้เครื่องมือวัดดังแสดงในรูปที่ 26
กำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำหนดได้ 450.7 W ใกล้เคียงกับ
กำลังไฟฟ้าอินพุต (450 W) เมื่อพิจารณารูปร่างของแรงดัน
มีลักษณะ soft chopping ถูกต้อง



รูปที่ 26 รูปคลื่นของเอสอาร์จี

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลองเอสอาร์จีกำหนด
กำลังไฟฟ้าโดยใช้มุมกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งประมวลผลจาก
โครงข่ายประสาทเทียม เมื่ออินพุตคือกำลังไฟฟ้าและ
ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ โดยค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกที่
เอสอาร์จีกำหนดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76%
เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ต้องการ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการประมวลผลของ ANN

ค่าอินพุตที่กำหนด		ค่า ANN ประมวลผล		การทดลอง
Power (W)	Speed (rpm)	Turn on (°)	Turn off (°)	Power (W)
100	1000	25.03	29.57	96
100	1100	25.44	30.25	103
200	1100	30.62	36.45	202.5
200	1200	31.18	37.36	214.6
300	1200	32.87	39.05	292

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการประมวลผลของ ANN (ต่อ)

ค่าอินพุตที่กำหนด		ค่า ANN ประมวลผล		การทดลอง
Power (W)	Speed (rpm)	Turn on (°)	Turn off (°)	Power (W)
300	1300	31.53	37.85	307
400	1300	37.87	45.46	412
400	1400	36.27	43.5	395
500	1400	34.28	43.07	502
500	1500	37.95	46.5	497
500	1400	34.28	43.07	502
500	1500	37.95	46.5	497
700	1600	29.99	42.66	714
700	1700	32.91	43.53	694
800	1700	26.76	41.74	801
800	1800	28.9	42.43	806
900	1900	26.57	41.58	899
900	2000	28.83	42.1	910

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีควบคุมเอสอาร์จีให้กำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านนอกตามที่กำหนด เมื่อเอสอาร์จีทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมประมวลผลมุมกระตุ้นที่ถูกต้อง โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับร่วมกับวิธีการฝึกสอน เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอธ อินพุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบ และกำลังไฟฟ้า สำหรับเอาต์พุตที่ต้องการคือมุมกระตุ้น ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการทดลอง โดยปรับความเร็วรอบให้คงที่ 1,000, 1300, 1500, 1,800 และ 2000 รอบต่อนาที แต่ละความเร็วรอบทำการปรับเปลี่ยนมุมกระตุ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดลองทำให้ทราบความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดแต่ละความเร็วรอบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ถูกนำมาสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

การทดลองหาความเที่ยงตรงของโครงข่ายประสาทเทียม กำหนดค่าความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการลงไปในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ทำนายมุมกระตุ้น หลังจากได้มุมกระตุ้นนำไปทดลองเพื่อดูผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง ผลจากการทดลองกำลังไฟฟ้าที่เอสอาร์จีกำเนิดได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.76% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ จะพบว่าวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำ แต่จำเป็นต้องมีการทดลองเก็บ

ข้อมูลจำนวนมาก เพื่อนำไปสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมระบบคือ dSPACE DS1202 โปรแกรมควบคุมถูกออกแบบผ่าน MATLAB/Simulink ร่วมกับโปรแกรม ControlDesk ทำให้สามารถประมวลผลแบบทันเวลา (real time) ได้ เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมรับอินพุตคือความเร็วรอบและกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โครงข่ายประสาทเทียมจะประมวลผลได้มุมกระตุ้นที่ถูกต้อง เพื่อส่งไปควบคุมสวิทช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทันที ทำให้เอสอาร์จีกำเนิดไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าอินพุตที่กำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Li G.J. Zhang K, Zhu Z.Q, Jewell G.W. Comparative studies of torque performance improvement for different doubly salient synchronous reluctance machines by current harmonic Injection. IEEE Transactions on Energy Conversion. June 2019;34(2):1094-104.
- [2] Cardenas R, Pena R, Perez M, Clare J, Asher G, Wheeler P. Power smoothing using a flywheel driven by a switched reluctance machine. IEEE Transactions on Industrial Electronics. June 2006;53(4):1086-93.
- [3] Ferreira C.A, Jones S.R, Heglund W.S, Jones W.D. Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application. IEEE Transactions on Industry Applications. June 1995;31(3):553-61.

- [4] Schofield N, Long S. Generator operation of a switched reluctance starter/ generator at extended speeds. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Jan 2009;58(1): 49-56.
- [5] Chen H, Sun C, Wang Q. Analysis of flux-linkage characteristics of switched reluctance linear generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. June 2014;24(3):5000105- 5000105.
- [6] Choi D.A, Byun S.I, Cho Y.H. A study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind Turbine. *IEEE Transactions on Magnetics*. Jan 2014;50(1):4003004-4003004.
- [7] Sikder C, Husain I, Sozer Y. Switched reluctance generator control for optimal power generation with current regulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan 2014;50(1):590-3.
- [8] Yu S, Zhang F, Lee D.H, Ahn J.W. High efficiency operation of a switched reluctance generator over a wide speed range. *Journal of Power Electronics*. Jan 2015;15(1):123-30.
- [9] Zan X, Huo Y, Gu J. Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system. *IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. 2015:864-9.
- [10] Faiz J, Fazai R. Optimal excitation angles of a high speed switched reluctance generator by efficiency maximization. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2006:287-91.
- [11] Viijante G.P, Chaves E.N, Miranda L.C, Freitas M.A.A.d, Queiroz C.A.d, Santos Josemar A.d, Gomes L.C, Fidelis R.T. Design and implementation of a fuzzy control system applied to a 6×4 SRG. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan 2021;57(1):528-36.
- [12] Asadi P, Ehsani M, Fahimi B. Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power. *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2006;1639-44.
- [13] Xiong L, Xu B, Gao H, Xu L. A novel algorithm of switched reluctance generator for maximum power point tracking in wind turbine application. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 2009:1-5.
- [14] Sozer Y, Torrey D.A. Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. March 2004;19(2):355-62.
- [15] Babitha S, Kulkarni V, Koujalagi J.P. Vector control based speed and flux estimation in switched reluctance motor using ANN controller. *4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology*. 2019:10-4.
- [16] Rahmanian E, Akbari H, Sheisi G.H. Maximum Power Point Tracking in Grid Connected Wind Plant by Using Intelligent Controller and Switched Reluctance Generator. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Jul 2017;8(3):1313-20.
- [17] Miller T.J.E. *Electronic Control of switched reluctance machines*. Newnes Publisher. 2001.

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวณัณ^{1*}, สุมณมาลย์ เนียมกลาง² และกุลยา สาริชีวิน³

porakoch.s@en.mutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.mutt.ac.th², kullaya.s@en.mutt.ac.th³

^{1*}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

Porakoch Sirisuwan^{1*}, Sumonman Niamlang² and Kullaya Saricheewin³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

^{1*} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (JERMUTT). Authors are required to strictly follow the guideline provided here, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If no completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required the length of all should not exceed 300 words.

Keywords: submission procedure, manuscript format, font size, font style and blank line

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
2. ชื่อผู้เขียน/อีเมล (Author, E-mail)
3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
4. บทคัดย่อ (Abstract)
5. คำสำคัญ (Keywords)
6. บทนำ (Introduction)
7. เนื้อหา (Text)
8. สรุป (Conclusion)
9. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)
(Acknowledgements)
10. เอกสารอ้างอิง (References)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่อง สื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก)

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อดัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจงใจให้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

ระยะขอบ	เซนติเมตร
บน (Top)	3
ล่าง (Bottom)	2
ซ้าย (Left)	3
ขวา (Right)	3
ระยะห่างคอลัมน์	1

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษร

รูปแบบ “TH SarabunPSK”

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	18	กึ่งกลาง	ตัวหนา
ชื่อผู้เขียน อีเมล	14	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	12	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อดัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อหัวข้อ, หัวข้อย่อย	14	ชิดซ้าย	ตัวหนา
เนื้อความ	14	กระจายแบบไทย	ปกติ
สมการต่างๆ	14	กึ่งกลาง	ตัวเอียง
คำบรรยายประกอบรูปและตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและ
ขวาย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ
หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

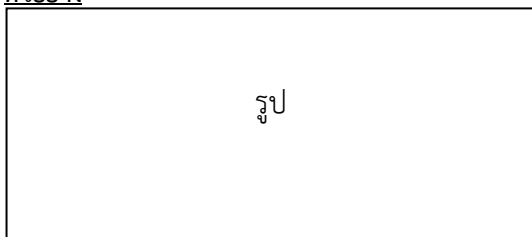
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้
ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษา
รายละเอียดในภาพ อาจยอมมิให้ความกว้างได้เต็ม
หน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่
สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยาย
ใต้ภาพ

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่น
ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง..” ที่
ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง..”

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปถ่ายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่าย
ควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้
รูปถ่ายควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น
ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะ
จอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือ
รูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่
ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะ
เอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของ
หมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้น
หนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียน
สมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c$$

(1)

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรใน
เนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำ
บรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้
รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยาย
เหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1
บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7.4 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความ
ยาวน้อยกว่า 8 หน้า และยาวไม่เกิน 12 หน้า กระดาษ A4

2.7.5 กรณียกบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณา
คำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์
ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิก
วารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

● Word ● PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ
ทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราช
วมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือ
จัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชวมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้น
เสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์ม ยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอ ก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ 1,2,3 ตามการใช้งาน โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

ตัวอย่าง (Example)

- [1] Kalsirisilp R, Nadpakdee A, Langkapin J. Performance evaluation of sugarcane grab loader. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(1):1-12. (in Thai)

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมาย\หมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)

รูปแบบบทความวารสาร

(Articles in Journals)

- [2] Author.\Article Title.\Journal Title.\ Year of Publication;Volume(Issue Number): Pagintion.

ตัวอย่าง(Example)

- [3] Nanthasamroeng N. Application of center of risk gravity in the location analysis for a sitting of emergency medical service vehicles. Journal of Engineering RMUTT. 2011;9(2):21-9. (in Thai)
- [4] Halpern SD, Ubel PA, Caplan AL. Solid-organ transplantation in HIV-infected patients. N Engl J Med. 2002;347(4):284-7.

รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง

(Books and Other Monographs)

- [5] Author.\Title.\Edition.\ Place of Publication: \Publisher;\Year of Publication.
- [6] Author.\Title[dissertation or master's thesis]. \ Place of Publication:\ University; \ Year of Publication.

ตัวอย่าง(Example)

- [7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.
- [8] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์

(Electronic Material)

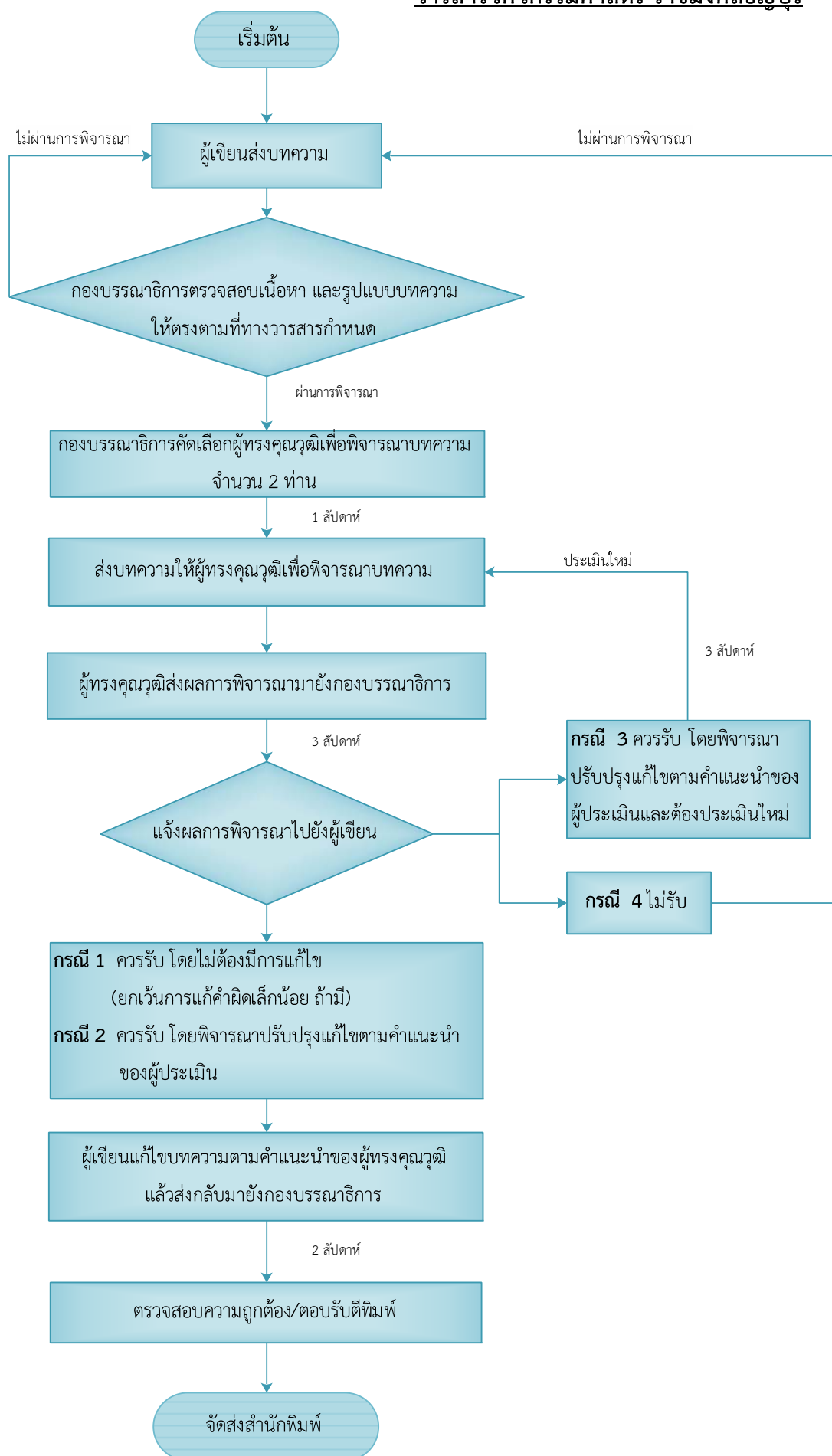
[9] Author.\ Article Title.\ Journal Title.\[Internet].\
Year of Publication\[cited YY\MM\DD];
Volume(Issue Number);page numbers.\
Availability From:\URL

ตัวอย่าง(Example)

- [10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Feb 25];19 (3):409-21. Available from:http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593 (in Thai)
- [11] Abood S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. Am J Nurs [Internet]. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102(6): [about 1 p.]. Available from : <http://www.nursingworld.org/AJN/2002/june/Wawatch.htmArticle>

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmelUTtRwHH3HEfFuVZXsIOPV>



ในกรณีที่ 2 และ 3 หลังจากบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาการแก้ไขและส่งบทความกลับมาในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิ)

หมายเหตุ : รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ
ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล
เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์
โทรศัพท์ โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท

(สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท

(สำหรับนักศึกษา)

ต่ออายุสมาชิก ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท

(สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท

(สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร ส่งจ่าย

ตั๋วแลกเงินไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียน

ชื่อ – นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาทะเบียนราษฎรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบรีย

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493 www.engineer.rmutt.ac.th/journal e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนัคลัธบุรี

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ).....

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน

เว็บไซต์ www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ หรือ <http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/> เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความ
จริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณา
ตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

Name-Surnames

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant

Professor ☐ Lecturer ☐ Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

Fax Number..... E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on

www.engineer.mutt.ac.th/journal/ or <http://journal.engineer.mutt.ac.th/enjournal/>

The days of Online Submission.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article.

In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT.

Sign

(.....)

...../...../.....