



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน 2564

www.engineer.rmUTT.ac.th/journal

Print : ISSN 2730-2148

Online : ISSN 2697-4339

การจัดวางผังคลังบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมน้ำมันถั่วเหลือง

Package Warehouse Layout for Soy Milk Industry

- วรพจน์ มีถม และธรรณก สุภัทโรบล

1

การประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ในการเลี้ยงไหม

The Application of Combined Systems Including Evaporative Cooling and Vapor Compression Air Conditioning System for a Silkworm Rearing House

- มานพ แยมแพง จักรวาล บุญหวาน ชีโนรส ละอองวรรณ ญัฐกฤษ อัสนี รัตนชัย ไพรัตน์ และมนพร กุปดาลา

13

การพัฒนาเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติกส์

Development of a Semi-automatic Phyllanthus Emblica Tapping Machine with Pneumatic System

- ญัฐฐิ สิริวรรณานนท์ และธนาพล สุขชนะ

25

การพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ

Development of a Low-Cost Heat Pipe Solar Thermal Collector

- เรวัตน์ เต็มกล้า อนันต์ มัทธจักร และธนรัฐ ศรีวิระกุล

35

การเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีโดยตรงกับบนผ้าฝ้ายด้วยโอโซน

Improvement of Dyeing Efficiency of Direct Dyes on Cotton Fabric with Ozone

- พิเชตพล เจริญทรัพย์นันท์ ธวิภา ธรรมรงค์ และธนวัฒน์ สิทธิประสงค์

47

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้า ในจังหวัดชลบุรี

A Study on Factors Influencing Decision-making for Choosing Cargo Transportation Servicers in Chonburi Province

- พิษรา ศรีพระบุ และเชษฐา ชำนาญหล่อ

55

ผลกระทบของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

Effect of Using Synthetic Zeolite on Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete

- อัญญา กิจจานนท์ และทวิชัย สำราญวานิช

67

ผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย พังคินปูนและสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์

Effects of Binary and Ternary Binder Systems of Mortar with Fly Ash, Limestone Powder, and Expansive Additive on Chloride Resistance

- สีน่า ปรีก และทวิชัย สำราญวานิช

79

ผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว

Effect of Freezing Temperature on Quality of Rice Wrapped Lotus Leaf Product

- สุณัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพันธ์

91

ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3

Prepaid Electric Energy Consumption System via RFID Controlled By Arduino Uno R3

- สุรินทร์ แหงมงาม จักริ รัชมิดาย ศศิวรรณ อินทรวงศ์ ธนาวิทย์ ปิระเจริญ และนันทิ์ เทศสวัสดิ์

103

การพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาสำหรับวิสาหกิจชุมชน

Development of Water Hyacinth Gypsum Board for Community Enterprise

- กิตติพันธ์ บุญโตสตรกุล ปราโมทย์ วิจารณ์กุล วัชร ดิปัญญา และกิตติพงษ์ สุวิโร

113

การพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์เพื่อใช้ในการงานวัสดุตกแต่ง

Development of Particleboard from Northern Black Wattle Tree Bark for Using as Decorative Materials

- ภควัต เทวประสิทธิ์ ปราโมทย์ วิจารณ์กุล กิตติร ม่วงมณี อภิธิ วิจารณ์กุล และกิตติพงษ์ สุวิโร

125

การศึกษาเปรียบเทียบผลการตกแต่งด้วยกระบวนการพ่นบนผ้าแบบสองขั้นตอนของสารยึดติดพอลิยูรีเทนพ่นทับด้วย

สารละลายอนุภาคไมโครซิลิกาไทยและอนุภาคไมโครซิลิกาไทยอีร์ บนผ้าฝ้ายทอลายขัด

A Comparative Study on Finishing Process Results using Two Steps Spraying Method by Coating Polyurethane Binder Sprayed Over with Micro-Thai Silk Particle Solutions and Micro-Eri Silk Particle Solutions on Plain Cotton Woven Fabrics

137

- สุภษฎ์ กริมสูงเนิน และอภิชาติ สนธิสมบัติ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ และบุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ทำผลงานทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม
4. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12100
โทร. 0-2549-3400
โทรสาร 0-2577-5026

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ออกเผยแพร่ 2 ฉบับต่อปี
ตั้งแต่ เดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน
และเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม
ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ที่ **บริษัท กริปเพิล กรุ๊ป จำกัด**

95 ถ.แจ้งวัฒนะ ซ.6 แขวงตลาดบางเขน
เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
โทรศัพท์ 0 2521-8420
โทรสาร 0 2521 8424

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นคณะหนึ่งที่มีการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมศาสตร์โดยมีจุดประสงค์ เพื่อผลิตวิศวกรในหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) วิศวกรในหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) และวิศวกรในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สนองความต้องการในตลาดแรงงาน และพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ

ส่งเสริมงานด้านวิจัย และดำเนินงานวิจัยทางอาชีวศึกษาและเทคโนโลยี

จัดอบรมและสัมมนาวิชาการให้กับครูประจำการ และอาจารย์ผู้สอนทั้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเอกชน เพื่อยกระดับความรู้ทางวิชาการให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและแผนภูมิการบริหารงานคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์มีวัตถุประสงค์ที่จัดการเรียนการสอนเพื่อให้นักศึกษามีความรู้พื้นฐานและวิชาชีพ และสามารถวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบและงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะให้สำเร็จเป็นบัณฑิตที่มีความสามารถในการประกอบอาชีพ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยบัณฑิตจะต้องมีความรับผิดชอบและซื่อสัตย์ ควบคู่กับความรู้ทางด้านวิชาการ มีจริยธรรม ควบคู่กับการมีคุณธรรมประจำใจ

การจัดวางผังคลังบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมน้ำมันถั่วเหลือง Package Warehouse Layout for Soy Milk Industry โดย : วรพจน์ มีถม และรฐนนท์ สุภัทโรบล	หน้า 1
การประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ในโรงเรือนเลี้ยงไหม The Application of Combined Systems Including Evaporative Cooling and Vapor Compression Air Conditioning System for a Silkworm Rearing House โดย : มานพ แยมแพง จักรวาล บุญหวาน ชีโนรส ละอองวรรณ ณัฐกฤช อัสนี รัตนชัย ไพรินทร์ และมนพร คุปตาสา	13
การพัฒนาเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวเมติกส์ Development of a Semi-automatic Phyllanthus Emblica Tapping Machine with Pneumatic System โดย : ณัฏฐ์ สิริวรรณานนท์ และธนาพล สุขชนะ	25
การพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ Development of a Low-Cost Heat Pipe Solar Thermal Collector โดย : เรวดีณ์ เต็มกล้า อนิรุตต์ มัทธจักร และธนรัฐ ศรีวีระกุล	35
การเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไดเรกต์บนผ้าฝ้ายด้วยโอโซน Improvement of Dyeing Efficiency of Direct Dyes on Cotton Fabric with Ozone โดย : พิชิตพล เจริญทรัพย์นันท์ รวิภา ธรรมรงค์ และธนวัฒน์ สิทธิประสงค์	47
การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้า ในจังหวัดชลบุรี A Study on Factors Influencing Decision-making for Choosing Cargo Transportation Servicers in Chonburi Province โดย : พัทธรา ศรีพระบุ และเชษฐา ชำนาญหล่อ	55
ผลกระทบของการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต Effect of Using Synthetic Zeolite on Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete โดย : อัญญา กิจจานนท์ และทวีชัย สำราญวานิช	67
ผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ Effects of Binary and Ternary Binder Systems of Mortar with Fly Ash, Limestone Powder, and Expansive Additive on Chloride Resistance โดย : สีน่า ปริก และทวีชัย สำราญวานิช	79
ผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว Effect of Freezing Temperature on Quality of Rice Wrapped Lotus Left Product โดย : สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพันธุ์	91
ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 Prepaid Electric Energy Consumption System via RFID Controlled By Arduino Uno R3 โดย : สุรินทร์ แห่งงาม จักรี รัชมีฉาย ศศิวรรณ อินทวงศ์ ธนาวิทย์ ไปรยเจริญ และธนาภัทร์ เทศสวัสดิ์	103
การพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาสำหรับวิสาหกิจชุมชน Development of Water Hyacinth Gypsum Board for Community Enterprise โดย : กิตติพันธ์ บุญโตสิตระกุล ปราโมทย์ วีรานุกูล วิหาร ตีปัญญา และกิตติพงษ์ สุวีโร	113
การพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์เพื่อใช้ในงานวัสดุตกแต่ง Development of Particleboard from Northern Black Wattle Tree Bark for Using as Decorative Materials โดย : ภควัต เกอประสิทธิ์ ปราโมทย์ วีรานุกูล กิตติพร ม่วงพริบ อธิวี วีรานุกูล และกิตติพงษ์ สุวีโร	125
การศึกษาเปรียบเทียบผลการตกแต่งด้วยกระบวนการพ่นบนผ้าแบบสองขั้นตอนของสารยึดติดพอลิยูรีเทนพ่นทับด้วยสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทยและอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่ บนผ้าฝ้ายทอลายขัด A Comparative Study on Finishing Process Results using Two Steps Spraying Method by Coating Polyurethane Binder Sprayed Over with Micro-Thai Silk Particle Solutions and Micro-Eri Silk Particle Solutions on Plain Cotton Woven Fabrics โดย : สุกฤษฎ์ กริมสูงเนิน และอภิชาติ สนธิสมบัติ	137



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ

รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ์

รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์

รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์

รศ.ดร.กัณวรัช พลุปรายณ์

รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ

รศ.ดร.รงค์ บวบทอง

ผศ.ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์

ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ

ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ

ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์นัทร

ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง

ผศ.ดร.สุนันมาลย์ เนียมกลาง

ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คณะกรรมการบริหาร มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบูลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนรพี 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 Sangwasd	33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

Assistant Secretary

Mr.Uschana Koojarenphaiboon

System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏชัยบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏชัยบุรี ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม ถึง เดือน มิถุนายน ปีพุทธศักราช 2564 จำนวนบทความตีพิมพ์ 13 บทความ โดยในฉบับนี้มีเนื้อหาทั้งทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งทอ และวิศวกรรมจักรกลเกษตร ซึ่งวารสารยังคงมุ่งมั่นที่จะเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่สาธารณชนอย่างเสมอมา

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏชัยบุรี ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ประเมินบทความ ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการเผยแพร่ผลงานวิจัยต่างๆ เสมอมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกๆ ท่านจะมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปราศจากโรคภัยต่างๆ และยังคงติดตามการเผยแพร่ผลงานของวารสารฯ ต่อไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.กัณวรัช พูลุประชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.รุ่งนภา กิตติลาภ	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
รศ.ดร.ศิริชัย เทพา	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฐดนัย ตัญหวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ดร.กายรัฐ เจริญราษฎร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มานพ แย้มแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.กิตติชัย อธิกุลรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ชัยชัย เสริมพงษ์พันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
เดชเมธีกุล	
รศ.ดร.สิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ดร.ศรินยา เมื่อกผ่อง	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สุลักษณ์ มงคล	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผศ.ดร.ภักพัฒน์ แสนเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.สาลินี อาจารย์	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Peer Reviews

Assoc.Prof.Dr. Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Dr.Rungnapha Kittilap	Faculty of Business Administration North Eastern University
Assoc. Prof.Dr.Sirichai Thepa	School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.Natdanai Tantawiroon	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Dr.Kairat Jaroenrat	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Assoc.Prof.Dr.Jaturoung Lungapin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Boonyang Plangklang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Apichart Sonthisombat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Rapee Kanchana	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Supaake Pramoonmak	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manop Yamfang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Piyapom Kampeerapappun	Faculty of Textiles Industries, Rajamangala University of Technology Krungthep
Asst.Prof.Dr.Kittichai Athikulrat	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Chatchai Srempongpan	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Dr.Anuwat Attachaiyawuth	Faculty of Engineering at Sriracha Kasetsart University Sriracha Campus
Assoc.Prof.Dr.Penjit Srinophakun	Faculty of Engineering Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul	Faculty of Agro-Industry Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Siree Chaiseri	Faculty of Agro-Industry Kasetsart University
Dr.Sarunya puakpong	Faculty of Agriculture, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Sulaksana Mongkon	School of Renewable Energy, Maejo University
Asst.Prof.Dr.Pakawat Sanchaen	Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University
Asst.Prof.Dr.Rattanaphol Mongkhorrattanasit	Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Asst.Prof.Dr.Salinee R-jaree	College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

การจัดวางผังคลังบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมน้ำมันถั่วเหลือง

วรพจน์ มีถม^{1*} และรฐนนท์ สุภัทโรบล¹

warapoj.m@kmutnb.ac.th^{1*}, ratanon.guncez@gmail.com¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received	: 14-Oct-2020
Revised	: 25-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

บทคัดย่อ

บริษัทผู้ผลิตน้ำมันถั่วเหลืองกรณีศึกษามีพื้นที่ในการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ 3 คลัง สามารถรองรับการจัดวางจำนวนพาเลทได้สูงสุด 665 พาเลท และมีผังการจัดวางบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการกำหนดพื้นที่และตำแหน่งที่แน่นอน ส่งผลให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีบรรจุภัณฑ์ถูกจัดวางเกินพื้นที่ที่กำหนด 31 พาเลท และในระยะเวลา 1 เดือน เกิดระยะทางการขนย้าย 279,251.58 เมตรต่อเดือน วัตถุประสงค์งานวิจัยฉบับนี้เพื่อลดระยะทางการขนย้ายบรรจุภัณฑ์ โดยการออกแบบการจัดวางผังคลังวัสดุ จึงใช้ Why Why Analysis มาวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาสาเหตุ และแนวทางการแก้ไข โดยทำการวางผังคลังสินค้าใช้ตัวแบบภาระงานระยะทาง และการจัดวางตำแหน่งบรรจุภัณฑ์ด้วย Facility Layout จากการออกแบบผังการจัดวางใหม่คลังบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 คลัง ผลการวิจัยพื้นที่ในการจัดเก็บ บรรจุภัณฑ์ 3 คลัง สามารถรองรับจำนวนพาเลทได้สูงสุด 714 พาเลท มีพื้นที่ในการจัดเก็บเพิ่มขึ้น 49 พาเลท และสามารถลดระยะทางในการขนส่งได้ 36,224.52 เมตรต่อเดือน ลดลงร้อยละ 12.97 ของการขนส่งบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด

คำสำคัญ: การวางผังคลังสินค้า ตัวแบบภาระงานระยะทาง การวางผังการผลิต

Package Warehouse Layout for Soy Milk Industry

Warapoj Meethom ^{1*} and Ratanon Supattarabol¹

warapoj.m@kmutnb.ac.th ^{1*}, ratanon.guncez@gmail.com¹

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

Received	: 14-Oct-2020
Revised	: 25-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

Abstract

The soy milk company case study had 3 package warehouses, those could support the maximum of 665 pallets and there were no fixed location for inventory package layout. Resulting in problem of package storage which packages were placed over the specified area 31 pallets and in a period of 1 month, the transport distance was 279,251.58 meters per month. The purpose of this research was to reduce the package transport distance by designing the material layout. So, used why why analysis to analyze the problems for finding the causes and solutions by using warehouse layout, load - distance model and fixed the package with facility layout. Therefore, the design of 3 warehouse layout, the results of improvement showed that the 3 package warehouses could support the maximum of 714 pallets which increased 49 pallets and decreased the transport distance was 36,224.52 meters per month or 12.97% of the all package transport distance.

Keywords: Warehouse Layout, Load – Distance model, Facility Layout

1. บทนำ

ปัจจุบันในสถานะที่มีการแข่งขันที่สูงทางด้านธุรกิจนั้นได้เป็นแรงผลักดันให้ภาคธุรกิจ บริษัท และอุตสาหกรรม ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน กระบวนการผลิต และปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการสร้างศักยภาพในการแข่งขัน ได้แก่ การลดต้นทุนที่ต่ำกว่า การเพิ่มคุณภาพที่เหนือกว่า และการส่งมอบที่ตรงเวลา เพื่อสร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้าอย่างสูงสุด และความได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงานต่อสถานะการแข่งขันที่สูงและความต้องการที่ไม่แน่นอนของลูกค้าในปัจจุบัน ทำให้บริษัทหลาย ๆ แห่ง มีการวางแผนและนโยบายที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของลูกค้าที่ไม่แน่นอน โดยมีการจัดเก็บของสินค้าและวัสดุคงคลังในระดับที่มีปริมาณมาก เพื่อป้องกันการขาดแคลนของวัตถุดิบเมื่อต้องการใช้ที่เกิดความแปรปรวนจากการส่งมอบของซัพพลายเออร์ (Supplier) และความต้องการจากลูกค้า หรือผิดพลาดจากกระบวนการทำงาน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่อพื้นที่การจัดเก็บของวัสดุคงคลัง ที่มีปริมาณวัสดุคงคลังและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูง เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ในการจัดวางวัสดุและพื้นที่ใช้สอยจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งพื้นที่ในการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์บริษัทกรณีศึกษา มี 3 คลัง ประกอบด้วย โกดัง 1 โกดัง 2 และโกดัง 3 มีพื้นที่ในการจัดเก็บที่จำกัดสามารถรองรับจำนวนพาเลทได้ 665 พาเลทจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า มีบรรจุภัณฑ์ถูกจัดวางเกินพื้นที่กำหนดสูงสุด 31 พาเลท ในระยะเวลา 1 เดือนมีการขนย้ายบรรจุภัณฑ์ 1,010 รอบ เกิดระยะทางการขนย้าย 279,251.58 เมตรต่อเดือน

จึงทำการรวบรวมข้อมูลบรรจุภัณฑ์คงคลังของบริษัทกรณีศึกษาและศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการคลังวัสดุ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงฝั่งคลังวัสดุที่เหมาะสมแก่บริษัทกรณีศึกษา ในการออกแบบการจัดวางฝั่งคลังวัสดุและลดระยะทางการขนส่งบรรจุภัณฑ์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวางฝั่งคลังสินค้า (Warehouse Layout) พื้นที่เป็นทรัพยากรที่สำคัญอย่างยิ่งในการกระจายสินค้าและระบบโลจิสติกส์ ฉะนั้นพื้นที่คลังสินค้า

จำเป็นต้องได้รับการแบ่งสรรอย่างระมัดระวัง การคำนวณความต้องการพื้นที่อย่างไม่ระมัดระวังย่อมนำไปสู่การใช้ประโยชน์ซึ่งทรัพยากรที่มีคุณค่ามากที่สุด การคำนวณความต้องการพื้นที่คลังสินค้าต้องพิจารณาต่อไปนี้ เกณฑ์กำหนดขนาดทางเดิน เพื่อให้สามารถทำการยกขนและจัดวางสินค้าได้สะดวก ดังต่อไปนี้ 1) ทางเดินระหว่างตู้เก็บสินค้าในช่องคลังสินค้าเป็นส่วนย่อยในการยกขนด้วยมือหรือรถเข็นขนาดเล็กให้มีความกว้างระหว่าง 0.75 ถึง 1.00 เมตร 2) รถขนชนิดใช้กำลังคนหรือกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กในการคลังสินค้าเป็นส่วนใหญ่ ทางเดินกว้างประมาณ 1.50 เมตร 3) รถยกหรือฟอร์คลิฟท์ชนิดใช้เครื่องยนต์ชนิดช่วงซ่อมยาว 1.00 เมตร ใช้ทางเดินกว้างตามขนาด ดังนี้ 3.1) รถยกขนาด 1,350 กิโลกรัม (Very Narrow Aisle : VNA) ทางเดินกว้าง 1.75 เมตร 3.2) รถยกขนาด 890 กิโลกรัม ทางเดินกว้าง 2.75 เมตร 3.3) รถยกขนาด 1,750 กิโลกรัม ทางเดินกว้าง 3.00 เมตร 3.4) รถยกขนาด 2,500 กิโลกรัม ทางเดินกว้าง 3.50 เมตร และเกณฑ์การกำหนดขนาดพาเลทเพื่อคำนวณพื้นที่ใช้งานและพื้นที่ว่าง ดังนี้ 1) พาเลทขนาด 80 × 100 เซนติเมตร พื้นที่ใช้งาน 1.00 ตารางเมตร 2) พาเลทขนาด 100 × 120 เซนติเมตร พื้นที่ใช้งาน 1.50 ตารางเมตร 3) พาเลทขนาด 120 × 150 เซนติเมตร พื้นที่ใช้งาน 2.25 ตารางเมตร 4) พาเลทขนาด 120 × 180 เซนติเมตร พื้นที่ใช้งาน 2.25 ตารางเมตร 5) พาเลทขนาดอื่น ๆ อาจคำนวณได้โดยเอาความยาวบวก 15 เซนติเมตร คูณด้วยความกว้างบวก 15 เซนติเมตร เป็นจำนวนตารางเมตรของพื้นที่คลังสินค้าซึ่งใช้กองพาเลท [1]

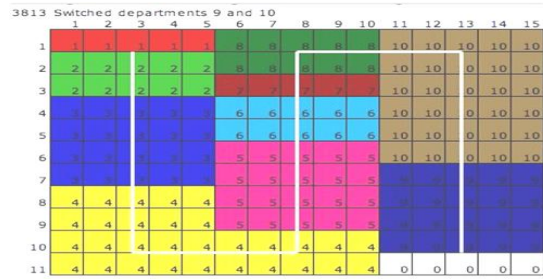
2.2 การจัดเก็บและจ่ายสินค้าแบบพาเลท การจัดเก็บและจ่ายสินค้าแบบพาเลทของเรานั้นประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ระบบการจัดเก็บสินค้าแบบพาเลท (Pallet Storage System) และระบบการจ่ายสินค้าแบบพาเลท (Pallet Retrieval System) แม้ว่าทั้งสองจะต้องพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันแต่ความต้องการที่จะปรับปรุงความหนาแน่นในการจัดเก็บจะเป็นแรงผลักดันสำคัญในการเลือกระบบวิธีการจัดเก็บโดยมีจำนวนสินค้าที่อยู่ในคลังและรอบการหมุนเวียนสินค้าบนพาเลทเป็นตัวกำหนด การวางกองเป็นตั่งเป็นการวางสินค้าซ้อนกันในแนวตั้งเก็บอยู่ในชอยหรือพื้นที่ที่แบ่งไว้แล้ว สินค้าตั่งหนึ่ง ๆ จะซ้อนกันตั้งแต่ 2 ถึง 10 ลัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ 1) ระดับ

ความปลอดภัยที่ยอมรับได้ 2) ความสามารถในการเรียงซ้อน 3) น้ำหนักของสินค้า 4) สภาพของพาเลท 5) ความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้น 6) สภาพอากาศ (อาจทำให้เกิดการอ้วนตัวและเกิดเป็นรอยย่นของภาชนะจากความชื้นในอากาศ) 7) ความสามารถในการยกสูงของอุปกรณ์ยกสินค้า 8) ความเสียหายของตัวสินค้า 9) ระยะความสูงของตัวอาคาร [2]

2.3 การวางแผนผังตามกระบวนการผลิต

ตัวแบบภาระงานระยะทาง เป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวางแผนผังตามกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นที่การลดต้นทุนอันเกิดจากการขนส่งหรือเคลื่อนย้ายวัสดุและผลิตภัณฑ์ในระหว่างการผลิต โดยตำแหน่งของแผนกต่าง ๆ ในโรงงานจะสามารถจัดวางได้ถึง n! วิธี ถ้าจำนวนครั้งในการเคลื่อนย้ายวัสดุ หรือผลิตภัณฑ์ระหว่างการผลิตจากแผนกหนึ่งไปยังแผนกอื่น ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าวางแผนผังโรงงานแตกต่างกันไป ต้นทุนที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายวัสดุจะมีค่าแตกต่างกันไป ทั้งนี้เพราะระยะทางของแต่ละแผนกจะเปลี่ยนไปจัดวางแผนกต่างกันออกไป [3]

2.4 คำสั่งการวางแผนการผลิต Facility Layout Add-in เป็นคำสั่งและพีเจอรสำหรับ Microsoft Excel เพิ่มเติม เป็นการรับข้อมูลของรายชื่อ และขนาดของแผนก และเส้นทางการไหล ค่าใช้จ่ายที่เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุระหว่างแผนก และขนาดของพื้นที่อำนวยความสะดวกหรือโรงงานที่ต้องคำนึงถึง โปรแกรมจะประมวลผลการค้นหาตำแหน่ง จัดวางของแผนกในโรงงานที่เกิดค่าใช้จ่ายในการเคลื่อนย้ายวัสดุที่ต่ำที่สุด มีชุดของคำสั่ง 2 แบบ ประกอบด้วย 1) Traditional CRAFT (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique) เป็นการจัดวางแบบดั้งเดิม 2) Optimum Sequence เป็นการจัดวางแบบเรียงลำดับทั้ง 2 ขั้นตอนเป็นแบบ Heuristic ซึ่งไม่จำเป็นต้องหาวิธีที่เหมาะสมก็ได้ โปรแกรมจะแสดงตำแหน่งจัดวางของแผนกดังรูปที่ 1 ผู้ใช้สามารถทดลองออกแบบแผนผังหรือเลือกตำแหน่งจัดวางอื่นได้ [4]



รูปที่ 1 แผนผังตำแหน่งแผนกของ Facility Layout

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้าและวัตถุดิบ กรณีศึกษา บริษัท AA Steel จำกัด ที่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการการจัดเก็บสินค้าและวัตถุดิบที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากการติดตั้งเครื่องจักรใหม่ในพื้นที่เดิมของโรงงาน ทำให้พื้นที่ในการจัดเก็บสินค้าและวัตถุดิบมีน้อยลง โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางแก้ไขในเรื่องความเหมาะสมของพื้นที่การจัดเก็บและการจัดวางแผนผังใหม่สำหรับจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปและวัตถุดิบ โดยใช้ทฤษฎีคลังสินค้าและการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลมาใช้ในการแก้ปัญหา ผลการศึกษา สามารถช่วยลดระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยในการจัดส่งสินค้าได้ 18.56 % และเมื่อปรับปรุง การจัดเก็บโดยการวางแผนผังจัดเก็บวัตถุดิบใหม่ สามารถลดระยะทางและระยะเวลาในการเคลื่อนที่หีบวัตถุดิบเฉลี่ยลดลง 62.42 % [5]

การศึกษาการออกแบบและวางแผนผังโรงงานผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งในโรงงานต้นแบบมีพื้นที่ใช้สอยจำกัด เกิดความไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายวัสดุ ทำให้สูญเสียเวลาและเกิดการรอคอยในกระบวนการผลิตสูง และต้องคอยระมัดระวังวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในการเคลื่อนย้ายไม่ให้เสียหายขณะหลบหลีก เนื่องจากใช้กระจกเป็นแผ่นฐานรอง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบผังโรงงานใหม่รองรับการขยายกำลังการผลิตในอนาคต โดยใช้การวางแผนผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning : SLP) ร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ กระบวนการไหลในกระบวนการผลิต และประเมินประสิทธิภาพสายการผลิตเพื่อคัดเลือกผังโรงงานที่เหมาะสม โดยผลการวิเคราะห์ คือ การวางแผนผังโรงงานแบบที่ 3 ที่ใช้พื้นที่รวมในการวางแผนผังโรงงานเท่ากับ 1,650 ตาราง

เมตร มีระยะทางการเคลื่อนย้ายวัสดุ ในกระบวนการผลิตขั้นที่สุด เท่ากับ 24,840 เมตรต่อเดือน และต้นทุนที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายวัสดุในกระบวนการผลิตน้อยที่สุดเท่ากับ 1,210,950 บาทต่อเดือน ผลการวิจัยจะให้ได้ว่าการออกแบบและวางผังโรงงานเพื่อขยายกำลังการผลิต จากเดิมเป็น 10 เมกะวัตต์ ต่อปี จะทำให้สายการผลิตมีประสิทธิภาพการใช้แรงงานเพิ่มขึ้นจากเดิม 46.54 % เป็น 66.75 % และเวลาว่างงานที่เกิดขึ้นในสายการผลิตลดลงจากเดิม 53.46 % เหลือเพียง 33.25 % [6]

การศึกษาการออกแบบและวางแผนผังเป็นขอบเขตในการเลือกการจัดเรียงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการจัดการทรัพยากรในการผลิต ในการตอบสนองความต้องการที่จะเปลี่ยนแปลงแผนผังขณะที่ลดการจัดการวัสดุ โดยมีวัตถุประสงค์ระยะทางในการเคลื่อนย้ายวัสดุในเวลาของการผลิตที่ลดลง ในบทความนี้จะนำเอาอัลกอริทึม CRAFT มาใช้ในการออกแบบแผนผัง เนื่องจาก CRAFT มีความเหมาะสมต่อการจัดการวัสดุที่มีค่าใช้จ่ายเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาในการลดต้นทุนการเคลื่อนย้ายสิ่งของระหว่างแผนก [7]

3. วิธีดำเนินงาน

รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคลังวัสดุและบรรจุภัณฑ์คลัง ของบริษัทผู้ผลิตน้ำมันถั่วเหลือง โดยจะศึกษาพื้นที่ในการจัดเก็บและผังการจัดวาง บรรจุภัณฑ์

3.1 ศึกษาสภาพทั่วไปของคลังวัสดุ

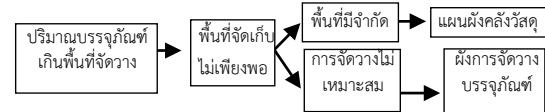
ปัจจุบันที่ใช้ในการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 คลังวัสดุ ประกอบไปด้วย โกดัง 1 โกดัง 2 และโกดัง 3 ที่มีพื้นที่ทั้งหมด 506 178.5 และ 451.14 ตารางเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 สามารถจัดเก็บพาเลทได้ทั้งหมด 665 พาเลท

ตารางที่ 1 พื้นที่ในการจัดเก็บของโกดังทั้ง 3 โกดัง

พื้นที่โกดัง	โกดัง 1	โกดัง 2	โกดัง 3	ทั้งหมด
พื้นที่ทั้งหมด (ตารางเมตร)	506	178.5	451.14	1,135.64
พื้นที่ในการจัดเก็บ (ตารางเมตร)	337.04	102.53	250.26	689.83
พื้นที่ในการใช้ประโยชน์ (ตารางเมตร)	168.96	75.97	200.88	445.81
จำนวนแถวจัดวาง (แถว)	24	9	17	50
จำนวนช่องในการจัดวางพาเลท (ช่อง)	161	47	125	333
จำนวนพาเลทที่สามารถจัดวางในพื้นที่ (พาเลท)	322	93	250	665

3.2 วิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหา

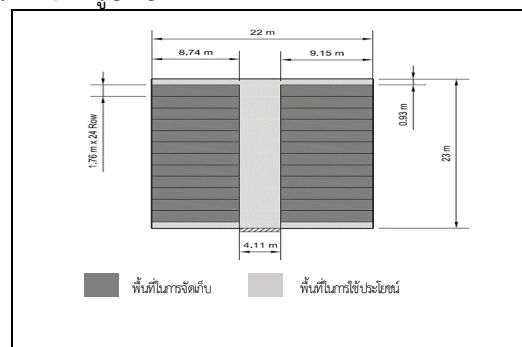
ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคลังวัสดุและบรรจุภัณฑ์คลัง วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา Why Why Analysis แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังแสดง Why Why Analysis ของกรณีปัญหาปริมาณบรรจุภัณฑ์เกินพื้นที่จัดวาง

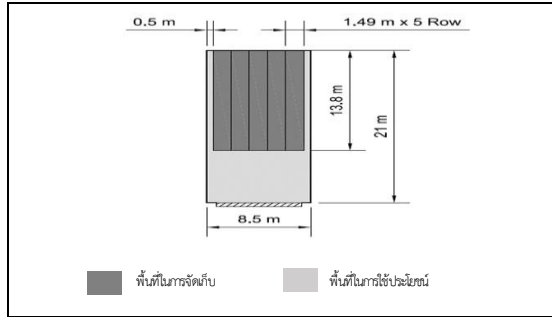
พื้นที่จัดเก็บไม่เพียงพอ เกิดจากการออกแบบผังการจัดเก็บไม่เหมาะสมต่อพื้นที่จัดเก็บที่มีจำกัดและตำแหน่งในการจัดวางของบรรจุภัณฑ์แต่ละรายการไม่มีแบบแผนที่แน่นอน ส่งผลให้มีบรรจุภัณฑ์ถูกจัดวางในพื้นที่ที่ไม่ใช่พื้นที่ไว้สำหรับการจัดเก็บหรือไม่ได้จัดเก็บไว้ในคลังวัสดุ

การออกแบบผังการจัดเก็บไม่เหมาะสมต่อพื้นที่จัดเก็บ บริษัทกรณีศึกษามีการใช้งานรถยนต์ขนาด 2,500 กิโลกรัม มีเกณฑ์กำหนดขนาดของทางเดิน 3.50 เมตร และกำหนดขนาดพื้นที่การจัดเก็บพาเลทไม่มีขนาดที่แน่นอน เกณฑ์การกำหนดพาเลทขนาด 1 x 1.2 เมตร ที่ต้องใช้พื้นที่ 1.50 ตารางเมตร เป็นช่องในการจัดวาง คลังวัสดุทั้ง 3 คลังประกอบไปด้วย โกดัง 1 ดังรูปที่ 3 โกดัง 2 ดังรูปที่ 4 และโกดัง 3 ดังรูปที่ 5



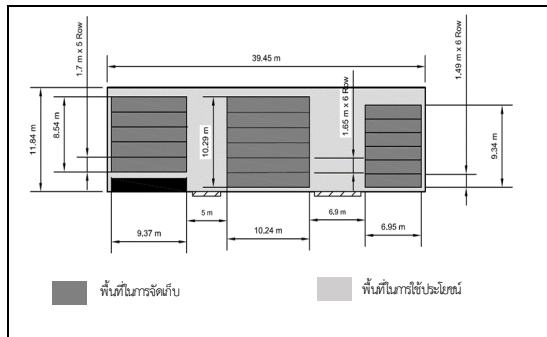
รูปที่ 3 แผนผังของโกดัง 1

จากรูปที่ 3 โกดัง 1 มีช่องการจัดวางพาเลทขนาดความกว้าง 1.76 เมตร ไม่มีกำหนดขนาดความยาว และมีขนาดทางเดินรถยนต์มากกว่าเกณฑ์อยู่ 0.61 เมตร



รูปที่ 4 แผนผังของโกดัง 2

จากรูปที่ 4 โกดัง 2 มีช่องการจัดวางพาเลท ขนาดความกว้าง 1.49 เมตร ไม่มีกำหนดขนาดความยาว และมีการกำหนดขนาดทางเดินรถยกไม่แน่นอน



รูปที่ 5 แผนผังของโกดัง 3

จากรูปที่ 5 โกดัง 3 มีช่องการจัดวางพาเลท ขนาดความกว้าง 1.49 ถึง 1.7 เมตร ไม่มีกำหนดขนาดความยาว และมีทางเดินรถยก 2 ทาง โดยทางเดินรถยกที่ 1 มีขนาดมากกว่าเกณฑ์อยู่ 1.5 เมตร และทางเดินรถยกที่ 2 มีขนาดมากกว่าเกณฑ์อยู่ 3.4 เมตร

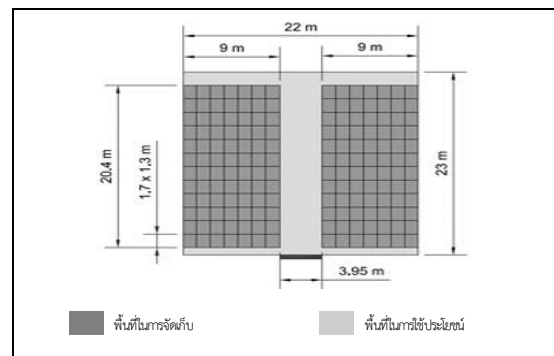
3.3 ดำเนินการออกแบบและปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่การจัดเก็บ

ในการจัดเก็บพาเลทและทางเดินรถยก (Folk Lift) ให้เหมาะสมตามเกณฑ์การกำหนดของขนาด พาเลทและรถยกที่ใช้ งาน โดยออกแบบขนาดของพื้นที่ในการจัดเก็บทั้ง 3 คลังวัสดุ ทำให้ทราบความสามารถคลังบรรจุภัณฑ์ในการรองรับการจัดเก็บสูงสุดอยู่ 714 พาเลท แสดงข้อมูลการจัดเก็บของคลังวัสดุใหม่ทั้งหมด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พื้นที่ในการจัดเก็บของคลังวัสดุใหม่ทั้ง 3 โกดัง

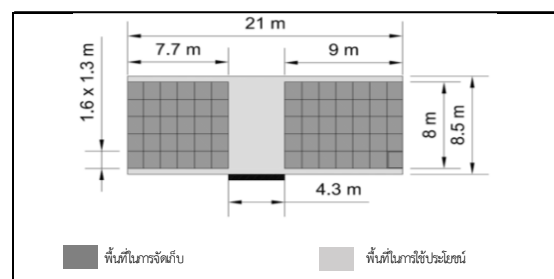
พื้นที่/โกดัง	โกดัง 1	โกดัง 2	โกดัง 3	ทั้งหมด
พื้นที่ทั้งหมด (ตารางเมตร)	506	178.5	451.14	1135.64
พื้นที่ในการจัดเก็บ (ตารางเมตร)	390.04	128	283.04	798.33
พื้นที่ในการใช้ประโยชน์ (ตารางเมตร)	115.96	50.5	168.1	337.31
จำนวนแถวจัดวาง (แถว)	24	10	16	50
จำนวนช่องในการจัดวางพาเลท (ช่อง)	168	65	124	357
จำนวนพาเลทที่สามารถจัดวางในพื้นที่ (พาเลท)	336	130	248	714

โกดัง 1 ออกแบบใหม่ให้มีช่องในการจัดเก็บพาเลท เป็นขนาด 1.7 x 1.3 เมตร ซึ่งการจัดวาง พาเลทในผังการจัดเก็บจะเกิดช่องว่างขนาด 0.33 ถึง 0.5 เมตร ในการเดินเข้าไปตรวจสอบ และกำหนดขนาดทางเดินรถยกได้ 3.95 เมตร มีจำนวนช่องในการจัดวางพาเลท 168 ช่อง สามารถจัดเก็บพาเลทได้สูงสุด 336 พาเลท ดังรูปที่ 6



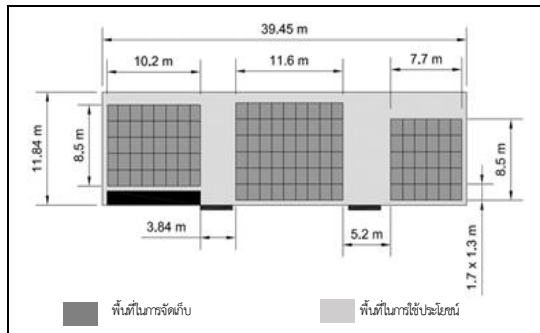
รูปที่ 6 แผนผังใหม่ของโกดัง 1

ส่วนโกดัง 2 ออกแบบใหม่ให้มีช่องในการจัดเก็บพาเลท เป็นขนาด 1.6 x 1.3 เมตร ซึ่งการจัดวางพาเลทในผังการจัดเก็บจะเกิดช่องว่างขนาด 0.23 ถึง 0.4 เมตร ในการเดินเข้าไปตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ และกำหนดขนาดทางเดินรถยกได้ 4.3 เมตร มีจำนวนช่องในการจัดวางพาเลท 65 ช่อง สามารถจัดเก็บ พาเลทได้สูงสุด 130 พาเลท ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังใหม่ของโกดัง 2

ส่วนโกดัง 3 ออกแบบใหม่ให้มีช่องในการจัดเก็บ พาเลท เป็นขนาด 1.7 x 1.3 เมตร ซึ่งการจัดวางพาเลทในผัง การจัดเก็บจะเกิดช่องว่างขนาด 0.33 ถึง 0.5 เมตร ในการ เดินเข้าไปตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ และกำหนดขนาดทางเดิน รถยกที่ 1 ได้ 3.84 เมตร และทางเดินรถยกที่ 2 ได้ 5.2 เมตร มีจำนวนช่องในการจัดวางพาเลท 124 ช่อง สามารถจัดเก็บ พาเลทได้สูงสุด 248 พาเลท ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังใหม่ของโกดัง 3

3.4 การขนส่งบรรจุภัณฑ์

ระหว่างการผลิตที่มีการขนส่งจากคลังวัสดุทั้ง 3 คลังไปที่สายการผลิต สายการผลิต 3 สายหลัก มี 12 สายการผลิตย่อย ดังนั้น สายการผลิตที่ 1 ประกอบไปด้วย A1, A2, A3, A4 และ A5 สายการผลิตที่ 2 ประกอบไปด้วย B1, B2 และ B3 สายการผลิตที่ 3 ประกอบไปด้วย C1, C2, C3 และ C4 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะทางระหว่างโกดังทั้งหมดไปสายการผลิต (เมตรต่อเดือน)

ระยะทางระหว่างโกดังทั้งหมดไปสายการผลิต (เมตร)												
คลังวัสดุ	Line A					Line B			Line C			
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4
โกดัง 1	244.93	251.20	247.68	258.27	261.27	420.07			416.41	401.64	391.67	381.70
โกดัง 2	191.17	197.44	213.92	224.51	227.51	396.75			306.17	291.40	281.43	271.46
โกดัง 3	45.85	52.12	68.60	79.19	82.19	220.99			446.49	431.72	421.75	411.78

4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษา ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากบริษัทฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงผังการจัดวางคลังวัสดุ โดยใช้การวางผังคลังสินค้า ตัวแบบภาระงานระยะทาง และการวางผังการผลิต (Facility Layout) สำหรับการออกแบบการจัดวางผังคลังวัสดุ และลดระยะทางการขนส่งบรรจุภัณฑ์

4.1 วิเคราะห์การขนย้ายบรรจุภัณฑ์ด้วยตัว

แบบภาระงานระยะทาง

เพื่อช่วยในการวางผังตามกระบวนการผลิตของ คลังวัสดุ โดยมุ่งเน้นในการลดต้นทุนที่เกิดจากการขนย้าย บรรจุภัณฑ์ในระหว่างการผลิตที่มีระยะทางไม่เท่ากัน ทำให้ ต้นทุนที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันไป เมื่อจัดวางผังโรงงานที่แตกต่างกัน เพราะระยะทางการขนย้ายจะเปลี่ยนไปตามการจัดวาง ผังของคลังวัสดุ ตัวแบบภาระงานระยะทางสามารถคำนวณ ได้จากสมการ (1) ดังนี้

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij} L_{ij} D_{ij} \quad (1)$$

- เมื่อ
- L_{ij} = จำนวนรอบ (Load) ของการขนส่งวัสดุ ระหว่าง i ไป j รอบต่อเดือน
 - D_{ij} = ระยะทาง (Distance) ของการขนส่งระหว่าง i ไป j เมตรต่อเดือน
 - K_{ij} = ต้นทุนของการขนส่งต่อหน่วยระยะทางจาก i ไป j แทน 1 เมตร เท่ากับ 1 บาท (โดยทาง บริษัทเป็นผู้กำหนด การสมมุติ เพื่อ เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย)
 - C = ต้นทุนรวมที่เกิดจากการขนส่งวัสดุ
 - i = โกดังที่การจัดเก็บ ประกอบไปด้วย โกดัง 1 โกดัง 2 และโกดัง 3
 - j = สายการผลิต ประกอบไปด้วย 3 สายการผลิต หลัก

4.2 ผลการวิเคราะห์ ผังการจัดวาง บรรจุภัณฑ์ในคลังวัสดุ

จากการที่ได้วิเคราะห์โดยการประยุกต์ใช้ตัวแบบ ภาระงานระยะทาง ในการวางผังการจัดวางบรรจุภัณฑ์ตาม การผลิตของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บ ในคลังวัสดุทั้งหมด 3 คลัง ประกอบไปด้วย โกดัง 1 โกดัง 2 และโกดัง 3 ไปที่ สายการผลิต สายการผลิต 3 สายหลัก มี 12 สายการผลิต ย่อย ดังนั้น สายการผลิตที่ 1 ประกอบไปด้วย A1, A2, A3, A4 และ A5 สายการผลิตที่ 2 ประกอบไปด้วย B1, B2 และ B3 สายการผลิตที่ 3 ประกอบไปด้วย C1, C2, C3 และ C4 ส่งผลให้มีระยะทางการขนส่งบรรจุภัณฑ์ เท่ากับ 243,026.06 เมตรต่อเดือน การวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ระยะทางจากโหนดทั้งหมดไป
สายการผลิต

รายการบรรจุภัณฑ์	i	j	D _{ij} (เมตร)	L _{ij} (รอบ)	C (เมตร)
220186	2	3	286.42	64	18,330.56
220224	2	3	306.17	58	17,757.86
220177	2	3	293.00	56	16,408.00
220399	3	2	220.99	42	9,281.58
220433	3	2	220.99	31	6,850.69
220384	2	3	281.43	66	18,574.38
220511	2	3	293.00	36	10,548.00
220709	2	3	298.79	34	10,158.69
220229	3	1	45.85	31	1,421.35
220187	2	3	293.00	45	13,185.00
220237	2	3	298.79	65	19,421.35
220697	1	3	396.66	13	5,156.58
220197	1	3	403.24	17	6,855.08
220175	3	1	68.60	42	2,881.20
220223	3	1	80.69	28	2,259.32
220198	1	3	409.03	24	9,816.72
220546	1	3	396.66	11	4,363.26
220657	1	3	403.24	16	6,451.84
220368	3	1	80.69	24	1,936.56
220165	3	1	45.85	18	825.30
220385	1	3	396.66	21	8,329.86
220363	3	1	79.19	17	1,346.23
220164	1	3	391.67	25	9,791.75
220339	3	1	45.85	26	1,192.10
220189	1	3	391.67	8	3,133.36
220241	3	1	52.12	11	573.32
220407	3	1	52.12	11	573.32
220597	3	1	79.19	6	475.14
220215	3	1	80.69	5	403.45
220509	3	1	52.12	10	521.20
220651	3	1	52.12	5	260.60
220170	3	1	68.60	24	1,646.40
220664	3	1	79.19	12	950.28
220674	3	1	45.85	8	366.80
220195	1	3	391.67	8	3,133.36
220567	1	3	391.67	7	2,741.69

รายการบรรจุภัณฑ์	i	j	D _{ij}	L _{ij}	C (เมตร)
220257	1	-	391.67	2	783.34
220185	1	3	391.67	6	2,350.02
220601	3	1	79.19	3	237.57
220203	1	3	396.66	4	1,586.64
220230	3	1	45.85	4	183.40
220455	1	3	396.66	6	2,379.96
220689	1	3	391.67	5	1,958.35
220174	1	1	247.68	2	495.36
220173	1	1	247.68	7	1,733.76
220242	1	1	251.20	6	1,507.20
220678	1	1	251.20	2	502.40
220501	1	1	247.68	7	1,733.76
220655	1	1	258.27	2	516.54
220599	1	1	258.27	2	516.54
220405	1	3	396.66	1	396.66
220550	1	3	396.66	1	396.66
220676	1	1	244.93	3	734.79
220672	1	1	244.93	2	489.86
220682	1	1	251.20	1	251.20
220213	1	1	258.27	0	0.00
220193	1	3	396.66	3	1,189.98
220479	1	3	396.66	3	1,189.98
220648	1	3	396.66	2	793.32
220528	1	1	244.93	3	734.79
220595	1	1	247.68	0	0.00
220607	1	1	244.93	2	489.86
220531	1	3	396.66	2	793.32
220667	1	1	258.27	2	516.54
220494	1	3	396.66	1	396.66
220684	1	1	244.93	1	244.93
220662	1	3	396.66	0	0.00
220680	1	1	251.20	0	0.00
220209	1	3	391.67	0	0.00
220686	1	1	251.20	0	0.00
220608	1	3	396.66	0	0.00
220556	1	-	396.66	0	0.00
220711	1	3	401.64	0	0.00
220713	1	2	420.07	0	0.00
220720	1	3	416.41	0	0.00
220726	1	1	261.27	0	0.00

รายการบรรจุภัณฑ์	i	j	D _{ij}	L _{ij}	C _{ij} (เมตร)
220698	1	1	251.20	0	0.00
220725	1	3	403.24	0	0.00
ผลรวม			20,883.39	1,010	243,026.06

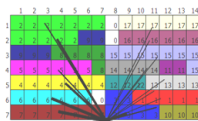
4.3 วิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์
ด้วย Facility Layout Add in

วิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วย Facility Layout โดยการ Add-in ใน Microsoft Excel ซึ่งได้ผลลัพธ์ของตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในคลังวัสดุที่เหมาะสม และเกิดการเคลื่อนย้ายภายในคลังวัสดุที่ต่ำที่สุด

4.3.1 วิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1

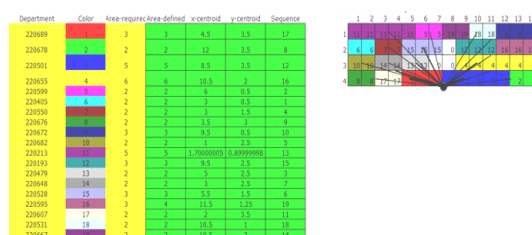
จากข้อมูลบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 1 มี 50 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 288 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 162 ช่อง ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งจัดวางจะแบ่งพื้นที่ตามลำดับความถี่ของรอบความต้องการใช้จากมากไปหาน้อยเป็น 3 ส่วน ด้วย Facility Layout โดยรายการบรรจุภัณฑ์แต่ละรายการกำหนดสัญลักษณ์เป็นหมายเลขและสี เพื่อบอกตำแหน่งการจัดวางในแผนผังคลังวัสดุ ประกอบด้วยโกดัง 1 ส่วนที่ 1 ดังรูปที่ 9 โกดัง 1 ส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 10 โกดัง 1 ส่วนที่ 3 ดังรูปที่ 11

Department	Color	Area-requires	Area-defined	x-centroid	y-centroid	Sequence	
220697	Red	3	3	10.000000	0.000000	1	
220197	Blue	12	12	5.110000	1.507333	2	
220198	Green	3	3	8.5	8.5	3	
220486	Yellow	4	7	7	3.5	5.847500	4
220637	Purple	5	6	6	4	4.5	5
220195	Orange	6	6	6	3	3.5	6
220194	Light Blue	7	7	5	3.5	4.072500	7
220193	Light Green	8	8	5	2.5	3.5	8
220637	Light Yellow	9	4	5	1.5	3	9
220192	Light Purple	10	2	5	1	2.5	10
220191	Light Orange	11	1	5	0.5	2	11
220698	Light Blue	12	1	5	0	1.5	12
220174	Light Green	13	4	5	0.5	1.5	13
220175	Light Yellow	14	4	5	0	1	14
220192	Light Purple	15	4	5	0	0.5	15
220192	Light Orange	16	4	5	0	0	16



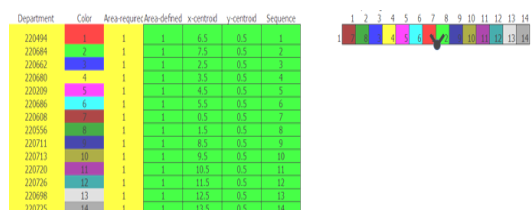
รูปที่ 9 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1 ส่วนที่ 1 ด้วย Facility Layout

จากรูปที่ 9 มีรายการบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 1 ส่วนที่ 1 มีทั้งหมด 17 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 181 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 95 ช่อง และพื้นที่โกดัง 1 ส่วนที่ 2 มีช่องในการจัดเก็บพาเลท 98 พาเลท จะมีอยู่ 3 ช่อง ที่ไม่มีการจัดวางพาเลท โดยมีการกำหนดจุดประตูดตามแผนผังใหม่ของโกดัง 1



รูปที่ 10 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1 ส่วนที่ 2 ด้วย Facility Layout

จากรูปที่ 10 มีรายการบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 1 ส่วนที่ 2 มีทั้งหมด 19 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 92 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 53 ช่อง และพื้นที่โกดัง 1 ส่วนที่ 2 มีช่องในการจัดเก็บพาเลท 56 พาเลท จะมีอยู่ 3 ช่อง ที่ไม่มีการจัดวาง พาเลท โดยมีการกำหนดจุดประตูดตามแผนผังใหม่ของโกดัง 1



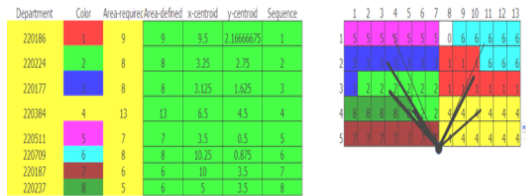
รูปที่ 11 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1 ส่วนที่ 3 ด้วย Facility Layout

จากรูปที่ 11 มีรายการบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 1 ส่วนที่ 3 มีทั้งหมด 14 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 5 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 14 ช่อง เนื่องจากมีบรรจุภัณฑ์อยู่ 10 รายการ มีสต็อกสูงสุดเท่ากับ 0 พาเลท เพราะไม่มีข้อมูลความต้องการใช้แต่ต้องมีพื้นที่ในการจัดวาง เพื่อตอบสนองในกรณีที่มีความต้องการใช้เกิดขึ้นและพื้นที่โกดัง 1 ส่วนที่ 3 มีช่องในการจัดเก็บพาเลท 14 พาเลท ซึ่งจะพอดีกับการจัดเก็บ โดยกำหนดจุดประตูดตามแผนผังใหม่ของโกดัง 1

4.3.2 ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 2

โกดัง 2 มีบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บทั้งหมด 8 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 121 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 64 ช่อง โดยรายการบรรจุภัณฑ์แต่ละรายการ

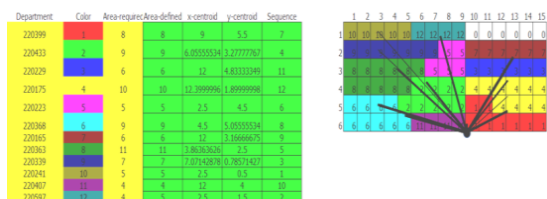
กำหนดสัญลักษณ์เป็นหมายเลขและสี เพื่อบอกตำแหน่งการจัดวางในแผนผังคลังวัสดุ แสดงผลของวิธีการและตำแหน่งการจัดวางของบรรจุภัณฑ์แต่ละรายการด้วย Facility Layout ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 2 ด้วย Facility Layout

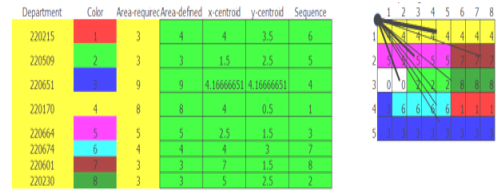
4.3.3 ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 3

จากข้อมูลบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 3 มีทั้งหมด 20 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 234 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 122 ช่อง ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งจัดวางจะแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน ด้วย Facility Layout โดยรายการบรรจุภัณฑ์แต่ละรายการกำหนดสัญลักษณ์เป็นหมายเลขและสีเพื่อบอกตำแหน่งการจัดวางในแผนผังคลังวัสดุ ประกอบด้วยโกดัง 3 ส่วนที่ 1 ดังรูปที่ 13 โกดัง 3 ส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 3 ส่วนที่ 1 ด้วย Facility Layout

จากรูปที่ 13 มีรายการบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 3 ส่วนที่ 1 มีทั้งหมด 12 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 161 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 84 ช่อง และพื้นที่โกดัง 3 ส่วนที่ 1 มีช่องในการจัดเก็บพาเลท 84 พาเลท ซึ่งจะพอดีกับการจัดเก็บ โดยมีการกำหนดจุดประตูเข้าออกตามแผนผังโกดัง 3



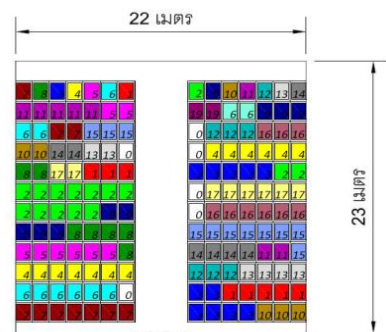
รูปที่ 14 หน้าจอการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 3 ส่วนที่ 2 ด้วย Facility Layout

จากรูปที่ 14 มีรายการบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 3 ส่วนที่ 2 มีทั้งหมด 8 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 73 พาเลท ใช้พื้นที่ในการจัดเก็บ 38 ช่อง และพื้นที่โกดัง 3 ส่วนที่ 2 มีช่องในการจัดเก็บพาเลท 40 พาเลท จะมีอยู่ 2 ช่องที่ไม่มีการจัดวาง พาเลท จากรูปที่ 14 เห็นได้ว่าการกำหนดจุดของประตูไว้ที่มุมบนด้านซ้าย เพราะถ้ากำหนดจุดของประตูไว้มุมล่างด้านขวาตามจริงจะมีช่องว่าง 2 ช่อง จะทำให้ระยะทางรวมเพิ่มขึ้นและมีช่องว่างในพื้นที่ที่ใกล้ประตูที่สุด

4.4 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในคลังวัสดุ

4.4.1 ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1

ตำแหน่งที่เหมาะสมของโกดัง 1 จะมีพื้นที่การจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 168 ช่อง สามารถรองรับการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์สูงสุดได้ 336 พาเลท จากข้อมูลบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 1 มีทั้งหมด 50 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 288 พาเลท ใช้ช่องในการจัดวาง 162 ช่อง ดังรูปที่ 15 โดยตำแหน่งการจัดวางมีการกำหนดเป็นสีแต่ละรายการบรรจุภัณฑ์ ในการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ด้วย Facility Layout Add in

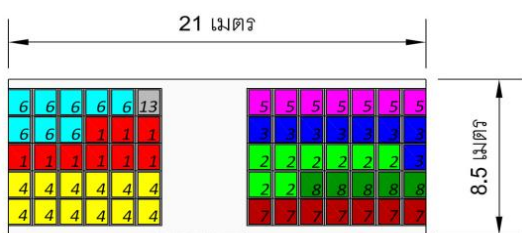


รูปที่ 15 ผังตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 1

4.4.2 ตำแหน่งการจัดวาง

บรรจุภัณฑ์ในโกดัง 2

ตำแหน่งที่เหมาะสมของโกดัง 2 จะมีพื้นที่การจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 65 ช่อง สามารถรองรับการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์สูงสุดได้ 130 พาเลท จากข้อมูลบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 2 มีทั้งหมด 8 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 112 พาเลท ช่องในการจัดวาง 64 ช่อง ดังรูปที่ 16 โดยตำแหน่งการจัดวางมีการกำหนดเป็นสีแต่ละรายการ บรรจุภัณฑ์ ในการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวาง บรรจุภัณฑ์ด้วย Facility Layout Add in



รูปที่ 16 ผังตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 2

4.4.3 ตำแหน่งการจัดวาง

บรรจุภัณฑ์ในโกดัง 3

ตำแหน่งที่เหมาะสมของโกดัง 3 จะมีพื้นที่การจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 124 ช่อง สามารถรองรับการจัดเก็บบรรจุภัณฑ์สูงสุดได้ 248 พาเลท จากข้อมูลบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในโกดัง 3 มีทั้งหมด 20 รายการ มีบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดเก็บสูงสุด 234 พาเลท ใช้ช่องในการจัดวาง 122 ช่อง ดังรูปที่ 17 โดยตำแหน่งการจัดวางมีการกำหนดเป็นสีแต่ละรายการบรรจุภัณฑ์ ในการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ด้วย Facility Layout Add in



รูปที่ 17 ผังตำแหน่งการจัดวางบรรจุภัณฑ์ในโกดัง 3

4.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์

4.5.1 เปรียบเทียบพื้นที่การจัดเก็บ

ของคลังวัสดุ

จากการออกแบบผังของคลังวัสดุใหม่ ทำให้สามารถรองรับการจัดเก็บจำนวนพาเลทได้ 714 พาเลท จากเดิมที่สามารถจัดเก็บได้ 665 พาเลท ส่งผลให้มีการจัดเก็บพาเลทเพิ่มขึ้น 49 พาเลท ข้อมูลพื้นที่คลังวัสดุดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบพื้นที่คลังวัสดุเก่าและใหม่

พื้นที่/คลังวัสดุ	ขนาดและความสามารถของคลังวัสดุทั้งหมด		ผลการออกแบบ
	คลังวัสดุเก่า	คลังวัสดุใหม่	
พื้นที่ทั้งหมด (ตารางเมตร)	1,135.64	1,135.64	0
พื้นที่ในการจัดเก็บ (ตารางเมตร)	689.83	798.33	+108.5
พื้นที่ในการใช้ประโยชน์ (ตารางเมตร)	445.81	337.31	-108.5
จำนวนแถวจัดวาง (แถว)	50	50	0
จำนวนช่องในการจัดวางพาเลท (ช่อง)	333	357	+24
จำนวนพาเลทที่สามารถจัดวางในพื้นที่ (พาเลท)	665	714	+49

4.5.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์การ

วิเคราะห์ระยะทางจากคลังวัสดุไปสายการผลิต

จากการวิเคราะห์ระยะทางการขนส่ง บรรจุภัณฑ์จากเดิม 279,251.58 เมตรต่อเดือน ด้วยตัวแบบภาระงานระยะทางลดลงเหลือ 243,026.06 เมตรต่อเดือน การออกแบบการจัดวางผังคลังวัสดุใหม่สามารถลดระยะทางการขนส่งบรรจุภัณฑ์ได้ 36,224.52 เมตรต่อเดือน แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์ระยะทางจากคลังวัสดุไปสายการผลิต (เมตรต่อเดือน)

ข้อมูลระยะทางจากคลังวัสดุไปสายการผลิต			
รายการ	ข้อมูลทางสถิติ 1 เดือน	ผลการออกแบบผังและตำแหน่งการจัดวางของคลังวัสดุ	เปรียบเทียบผลลัพธ์
ระยะทางจากการขนย้ายบรรจุภัณฑ์	279,251.58	243,026.06	-36,224.52

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลการจัดการคลังวัสดุ ทำให้ทราบปัญหาและสาเหตุของปัญหา จึงได้กำหนดแนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้ การวางผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ตัวแบบภาระงานระยะทาง และการวางผังการผลิต (Facility Layout) ซึ่งผลที่ได้สามารถเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บได้ 49 พาเลท และกำหนดตำแหน่งจัดวางบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในคลังวัสดุทั้งหมด ทำให้สามารถลดระยะทางได้ 36,224.52 เมตรต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 12.97 ของระยะทางการขนส่งบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Apiphachayasakul KH. Warehouse Management. No. 2: Focus Media and Publishing; 2007. (in Thai)
- [2] Frazelle E.H. World-class Warehousing and Material Handling. Translator Sappeutpon A. ,Gitwonwut P. No. 1 : E.I.Square Publishing; 2006. (in Thai)
- [3] Lalhitapom PH. Inventory Management in Supply Chains. No. 1. Chulalongkorn University Printing House: SE-ED; 2016. (in Thai)
- [4] Jensen P. Facility Layout Add-in. Operations management/Industrial Engineering [Internet]. 2004 [cited 2020/01/20]. Available from : http://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/omie/computation/unit/lay_add/lay_add.html
- [5] Kamjomjirapan N. Increasing efficiency of the product storage and raw : a case study of aa steel company [master's thesis]. Graduate School: University of the Thai Chamber of Commerce; 2013. (in Thai)
- [6] Bumrungrad N. Design and plant layout of 10 megawatts per year amorphous silicon solar module manufactory a case study : NSTDA's pilot plant [master's thesis]. Graduate School: Dhurakij Pundit University; 2009. (in Thai)
- [7] Deshpande V.A, Chopade I.K. Facility layout design by CRAFT technique. National Conference on Computational Methods in Mechanical Engineering Department of Mechanical Engineering, Osmania University, Hyderabad 500007, India. 2005 Sep 16-17;108-13.

การประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ ในโรงเรือนเลี้ยงไหม

มานพ แยมแพง^{1*} จักรวาล บุญหวาน¹ ชีโนรส ละออวรรณ¹ ณัฐฤกษ์ อัสนี¹ รัตนชัย ไพรินทร์² และมนพร คุปตาสา³
manop_yf@hotmail.com^{1*}, c_boonwan@yahoo.com¹, chin.laongwan@gmail.com¹, neo.solo.one@gmail.com¹,
rattanachai.pai@kmutt.ac.th², manaporn.g@gmail.com³

¹สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Received : 22-May-2020
Revised : 22-Dec-2020
Accepted : 25-Dec-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเลี้ยงไหม โดยการใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ โดยทำการทดลองในโรงเรือนที่มีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 21 เมตร สูง 3 เมตร สำหรับระบบการทำความเย็นแบบระเหยจะทำการติดตั้งแผ่นระเหยน้ำขนาดกว้าง 1.5 เมตร สูง 1.8 เมตรหนา 0.15 เมตร จำนวน 6 ชุด บนผนังด้านทิศใต้ของโรงเรือน และมีพัดลมดูดอากาศขนาด 30 นิ้ว จำนวน 6 ตัว ติดตั้งที่ผนังด้านทิศเหนือของโรงเรือน ส่วนระบบการทำความเย็นแบบอัดไอนั้นจะใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 30,000 Btu/hr จำนวน 4 เครื่อง ผลการทดลองจากโรงเรือนที่ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยสำหรับเลี้ยงไหมวัย 1 วัย 2 และวัย 3 พบว่ามีค่าความแตกต่างเฉลี่ยจากอุณหภูมิเหมาะสมสำหรับเลี้ยงไหมวัยดังกล่าวคือ 0.4°C 1.0°C และ 1.9°C ตามลำดับ สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ย 6.09% 0.61% และ 3.29% ตามลำดับ ส่วนระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5 นั้นพบว่าค่าความแตกต่างเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหมาะสม สำหรับการเลี้ยงไหมวัย 4 คือ 2.2°C 0.33% และ 3.1°C 4.86% สำหรับไหมวัย 5

คำสำคัญ: โรงเรือนเลี้ยงไหม ระบบการทำความเย็นแบบระเหย ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ

The Application of Combined Systems Including Evaporative Cooling and Vapor Compression Air Conditioning System for a Silkworm Rearing House

Manop Yamfang^{1*} Chakkawan Boonwan¹ Chinoros Laongwan¹ Natthakich Assanee¹ Rattanachai Pairintra²
and Manaporn Guptasa³

manop_yf@hotmail.com^{1*}, c_boonwan@yahoo.com¹, chin.laongwan@gmail.com¹, neo.solo.one@gmail.com¹,
rattanachai.pai@kmutt.ac.th², manaporn.g@gmail.com³

¹Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

²Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³Division of Manufacturing Systems Engineering, School of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received	: 22-May-2020
Revised	: 22-Dec-2020
Accepted	: 25-Dec-2020

Abstract

This research was to study the changes of temperature and humidity in silk worm rearing house by using an evaporative cooling system in combination with a vapor compression air conditioning system. This study was tested in greenhouse with configuration of 10 x 21 x 3 m. For evaporative cooling system, six sections of evaporative cooling of 1.5 x 1.8 x 0.15 m each were installed on the south wall of the house and six exhaust fans with diameter of 30 inches were installed on the north wall of the house. For the vapor compression cooling system, four air conditioners of 30,000 Btu/hr were used. The experimental results from the house with evaporative cooling for worm periods 1, 2 and 3 found that the average differences of suitable temperature for those worms were 0.4°C, 1.0°C and 1.9°C, respectively. For the relative humidity, the average differences were 6.09%, 0.61% and 3.29%, respectively. The experimental results from the house with the vapor compression cooling system for worm periods 4 and 5 found that the average differences of appropriate temperature and humidity were 2.2°C, 0.33% for worm period 4 and 3.1°C, 4.86% for worm period 5.

Keywords: Silkworm House, Evaporative Cooling System, Vapor Compression Refrigeration

1. บทนำ

ประเทศไทยนั้นนับตั้งแต่อดีตมาเป็นประเทศเกษตรกรรม การเลี้ยงไหมก็เป็นอาชีพหนึ่งที่เกษตรกรไทยทำการประกอบอาชีพการเลี้ยงไหมมาเป็นเวลานานโดยเฉพาะการเลี้ยงไหมแบบพื้นบ้านมีการถ่ายทอดความรู้และเทคนิคต่าง ๆ สืบเนื่องต่อมาเป็นช่วง ๆ จากบรรพบุรุษแต่ละครัวเรือนมีการเลี้ยงไหมกันเล็กน้อยเพื่อเอาไว้ทอผ้าไหมใช้เองต่อมาไหมได้มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่สินค้าเกษตรชนิดหนึ่งในเชิงเศรษฐกิจ การเลี้ยงไหมในระบบเดิมจึงจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาจากหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง ซึ่งวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการพัฒนาได้คือการใช้เทคโนโลยีและการจัดการที่เหมาะสมเข้ามาช่วยทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีปริมาณและคุณภาพสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการศึกษาสมรรถนะของระบบการทำความเย็นแบบระเหยซึ่งออกแบบระบบการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรงต่อร่วมกับคอยล์เย็น ทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำที่คอยล์เย็นและแผ่นระเหยน้ำ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำที่คอยล์เย็นและความหนาของแผ่นระเหยน้ำเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นเมื่อผ่านแผ่นระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำจะลดลง [1] การใช้แผ่นระเหยน้ำที่ทำจากเส้นใยถักดัดตั้งเรียงตัวในแนวทแยง เพราะจะช่วยให้น้ำสัมผัสกับอากาศมากกว่าการติดตั้งในแนวตรง จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอก 35.8°C เมื่อนำระบบการทำความเย็นแบบระเหยมาใช้สามารถลดลงได้ 9.9°C ทำให้อุณหภูมิภายในเหลือ 25.9°C โดยอาคารที่ใช้ทดลองดังกล่าวมีขนาด $10 \times 10 \times 2.8 \text{ m}^3$ ในรัฐ New South Wales ประเทศ Australia [2] การใช้กระดาษทำแผ่นระเหยน้ำมีลักษณะเป็นรังผึ้ง โดยสภาพอุณหภูมิอากาศทางเข้า 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิของน้ำ 30°C และอัตราการไหลของน้ำ 120 kg/h ซึ่งทำให้อุณหภูมิอากาศลดลง 9°C ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 50 % และอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 0.014 เป็น 0.021 $\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$ [3] การทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบระเหยโดยอ้อมในช่วงฤดูร้อนในประเทศคูเวต โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ $2,500 \text{ ft}^3/\text{min}$ ซึ่งใช้ระบบทำความเย็นขนาด 3.1 และ 2.4 ตันความเย็นสำหรับใช้พื้นที่ภายในและพื้นที่ชายฝั่งทะเล

ตามลำดับ ซึ่งปกติจะใช้ระบบทำความเย็นแบบ Package Unit Air-Conditioner (PU) จะใช้กำลัง 4.93 และ 3.85 kW ตามลำดับ แต่ถ้าใช้ระบบทำความเย็นแบบ IEC จะใช้กำลัง 1.11 kW เท่านั้น ดังนั้นถ้าใช้ระบบทำความเย็นแบบ IEC ไปใช้ในพื้นที่ทั่วไปของประเทศคูเวตจะสามารถประหยัดพลังงานได้ 12,418 kWh และถ้าใช้ระบบ IEC ไปใช้ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลจะสามารถประหยัดพลังงานได้อีก 6,320 kWh [4] มีการศึกษาการใช้แผ่นระเหยน้ำที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด คือ ใยจากต้นปาล์ม ใยจากต้นปอ และ ใยจากต้นบวบ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าแผ่นระเหยน้ำที่ทำจากใยปอให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดคือ 62.1% รองลงมาคือแผ่นระเหยน้ำที่ทำจากบวบ 55.1% และต่ำสุดคือแผ่นระเหยน้ำที่ทำจากใยปาล์ม 38.9% [5], [6] มีการพัฒนาแผ่นระเหยน้ำจากเส้นใยธรรมชาติทำจากเส้นใย aspen เส้นใย khus เส้นใย coconut และเส้นใย palash โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดให้อัตราการไหลของอากาศคงที่พบว่า ประสิทธิภาพของแผ่นระเหยที่ทำจากเส้นใย palash สูงกว่า เส้นใย aspen และเส้นใย khus 13.2% และ 26.31% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพของแผ่นระเหยน้ำที่ทำจากเส้นใย coconut พบว่าสูงกว่าเส้นใย khus 8.15% และเมื่อเปรียบเทียบความดันตกพบว่า แผ่นระเหยน้ำที่ทำจากเส้นใย khus ให้ความดันตกต่ำที่สุดและแผ่นระเหยน้ำที่ทำจากเส้นใย aspen ให้ความดันตกสูงสุดในสัปดาห์ หรือการนำเส้นใยจากต้นยูคาลิปตัสมาทำแผ่นระเหยน้ำเพื่อลดการใช้พลังงานที่เกิดจากการทำความเย็น จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิอากาศลดลงสูงสุดอยู่ระหว่าง 11.3°C ถึง 6.6°C ในขณะที่ประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดอยู่ในช่วง 71% และ 49% ที่ความเร็วลม 0.1 และ 0.6 m/s ตามลำดับ [7,8] มีการประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยไปลดอุณหภูมิในโรงเรือนกระจกพื้นที่ขนาด 2304 m^2 ในเชียงใหม่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของจีน ในสภาพอากาศร้อนชื้นโดยสามารถลดอุณหภูมิได้ $2-3^{\circ}\text{C}$ ทำให้ลดอุณหภูมิอยู่ในช่วง $27-29^{\circ}\text{C}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% [9] มีการศึกษาความสามารถของวัสดุธรรมชาติเช่นมูลวัวแห้ง โคโคพิทและขี้เลื่อยเพื่อใช้เป็นสารดูดความชื้นในระบบทำความเย็นแบบระเหยเพื่อลดความชื้นในอากาศเข้า เปรียบเทียบกับซิลิกาเจล โดยทดสอบในสภาพอากาศคือ $28^{\circ}\text{C}-85\% \text{ RH}$ $28^{\circ}\text{C}-60\% \text{ RH}$ และ $33^{\circ}\text{C}-$

60% RH ผลการทดลองพบว่าโคโคพีทและมูลโคแห้งมีศักยภาพในการแทนที่สารดูดความชื้นทางเคมีหรือซิลิกาเจล แต่ซีลี้อยไม่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นวัสดุดูดความชื้น [10] ซึ่งการเลี้ยงไหมโดยวิธีธรรมชาติโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศจะส่งผลต่อคุณภาพของรังไหมซึ่งรังไหมที่ได้จะเล็ก ความหนาแน่นของรังไหมน้อย ทำให้ได้ความยาวเส้นไหมน้อย แต่ถ้ามีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอากาศจะได้รังไหมที่มีขนาดใหญ่กว่าความหนาแน่นของรังไหมมากกว่าส่งผลให้ได้ความยาวของเส้นไหมมากกว่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอร่วมกับการทำความเย็นแบบระเหยมารักษาควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนเลี้ยงไหมวัยต่างๆตามที่เหมาะสมตามความต้องการ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

กรรมวิธีในการเลี้ยงไหมนั้นจะต้องมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อไหมทำรังโดยมีปัจจัยที่สำคัญคือ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศและการระบายอากาศ ดังนั้นสภาวะแวดล้อมของโรงเรือนเลี้ยงไหมที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 1 สภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหม[1]

วัยไหม	วัย	อายุหนอนไหม (วัน)	อุณหภูมิอากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (%)
วัยอ่อน	1	3 – 4	27 – 28	90
	2	2 – 3	26 – 27	85
	3	3 – 4	25 – 26	80
วัยแก่	4	4 – 5	24 – 25	75
	5	6 – 8	23 – 24	70
ทำรัง		2 – 3	22 – 24	65 – 70
นอน		18 – 36	ต่ำกว่าก่อนนอน 1 – 2	65 – 75

หมายเหตุ : * มีหน่วยเป็นชั่วโมง

2.1 อุณหภูมิอากาศ จะมีผลโดยตรงต่ออัตราการฟักไหม หากอุณหภูมิอากาศสูงการฟักเส้นใยจะเร็ว ทำให้การจัดวางเรียงเส้นไหมไม่เป็นระเบียบ เกิดรังหลวมส่งผลต่อคุณภาพของรังไหมและเส้นไหม อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการฟักเส้นใยไหมทำรังคือ 22-24°C

2.2 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ระดับความชื้นที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรังไหม เช่นหากความชื้นสูงเกินไปจะทำให้การเกาะติดเส้นใยไหมแน่นมากขึ้นทำให้สาวไหมได้ยากขึ้น แต่ถ้าความชื้นต่ำอากาศแห้งก็ทำให้รังไหมแบ่งเป็นชั้นไม่มีคุณภาพ

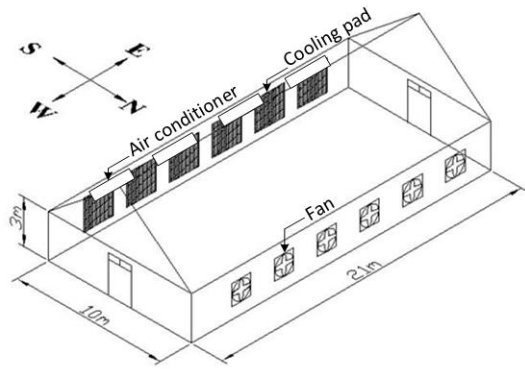
2.3 การระบายอากาศ ในห้องเลี้ยงไหมจะมีก๊าซ carbondioxide และ ammonia โดยเกิดจากมูลไหมและการหมักหมมของใบหม่อนที่เหลือ แต่ก๊าซที่เป็นอันตรายต่อหนอนไหมคือ carbonmonoxide และ sulphur dioxide ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ มีผลต่อสรีระของหนอนไหมถ้ามีปริมาณมาก

2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดอุณหภูมิและรังสีอาทิตย์ ยี่ห้อ Yokogawa Model MV 220 จำนวน 2 เครื่อง
2. Thermocouple Type K มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ Range ($-200^{\circ}\text{C} - 1350^{\circ}\text{C}$)
4. ไพรานอมิเตอร์ยี่ห้อ EKO รุ่น ML-01 มีค่าความคลาดเคลื่อน $< 3\%$
5. ดิจิตอลแอนนิโมมิเตอร์ Model HH 31 A
6. เครื่องมือวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก
7. เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Yokogawa Model 2433
8. พัดลมขนาด 30 in จำนวน 6 ตัว

3. ลักษณะของโรงเรือนเลี้ยงไหมที่ใช้ในงานวิจัย

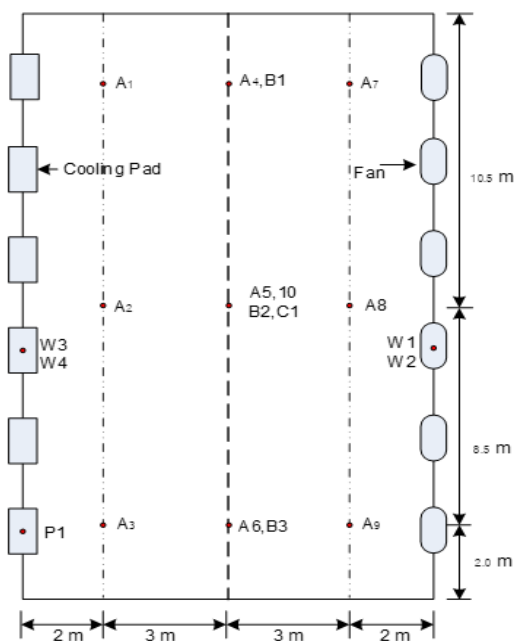
โรงเรือนเลี้ยงไหมใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ โดยใช้กระดาดเซลลูโลสเป็นแผ่นระเหยนํ้า ณ ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จ.สระบุรี (หม่อนไหม) ม.4 ต.หน้าพระลาน อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี ดังรูปที่ 1



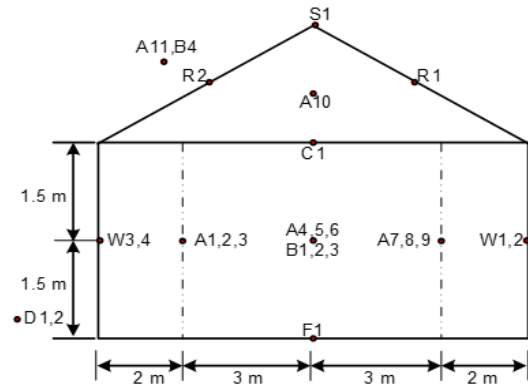
รูปที่ 1 ขนาดของโรงเรียนเลี้ยงไหม

3.1 ลักษณะโครงสร้างของโรงเรียนเลี้ยงไหม
โรงเรียน มีขนาด $10 \times 21 \times 3 \text{ m}^3$ หลังคาโรงเรียนชนิดกระเบื้องลอนคู่หนา 5 mm หลังคาทำมุมหลังคา 15 องศา กั้นระแนบ ผนังของทำจากคอนกรีตหนา 10 cm โรงเรียนมีระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยใช้แผ่นระเหยน้ำทำจากเซลลูโลสขนาด $1.5 \times 1.8 \times 0.15 \text{ m}^3$ จำนวน 6 ชุด ใช้ปั๊มน้ำขนาด 0.5 HP (0.37 kW) 380 V จำนวน 2 ตัว ด้านข้างทิศเหนือของโรงเรียนติดตั้งพัดลมขนาด 30 in ใช้มอเตอร์ขนาด 0.37 kW จำนวน 6 ตัว การวางตัวของโรงเรียน อยู่ในแนวทิศตะวันออก - ตะวันตก โดยแผ่นระเหยน้ำติดตั้งอยู่ด้านทิศใต้ ส่วนพัดลมดูดอากาศติดตั้งอยู่ทางทิศเหนือ

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง



รูปโรงเรียนด้านบน (ก)

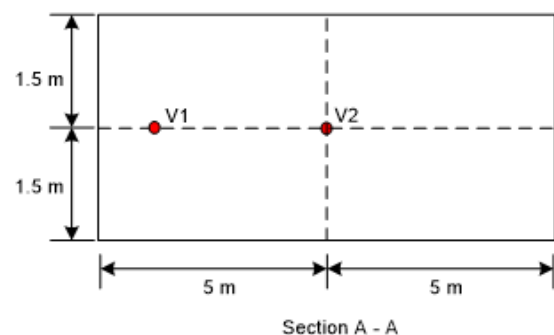


รูปโรงเรียนด้านหน้า (ข)

รูปที่ 2 ตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรียน (ก) และ (ข)

ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ดังนี้

1. ภายในโรงเรียนประกอบด้วย อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในโรงเรียน (A1-9) อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศภายในโรงเรียน (B1-3) อุณหภูมิแผ่นระเหยน้ำ (P1)
2. อุณหภูมิอากาศภายในช่องหลังคา (A10)
3. อุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกโรงเรียน อุณหภูมิกระเปาะแห้ง-เปียก (A11, B4)
4. อุณหภูมิน้ำเข้า - ออกแผ่นระเหยน้ำ (D1-2)
5. อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องปรับอากาศ
6. ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรียน (S1)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในโรงเรียน

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

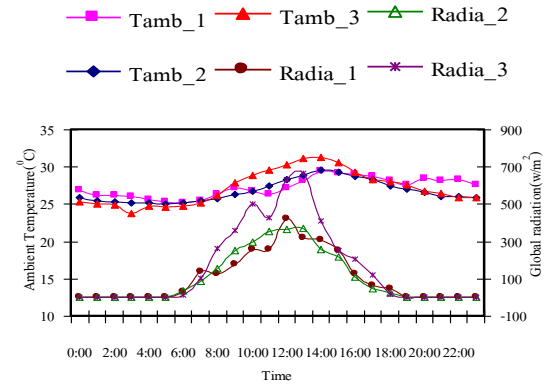
1. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เข้ากับ Data Logger โดยทำการบันทึกข้อมูลทุก 10 นาที
2. ติดตั้งไพรานอมิเตอร์จำนวน 1 ตำแหน่ง เข้ากับ Data Logger โดยทำการบันทึกข้อมูลทุก 10 นาที ในช่วงไหมวัย 1 ถึงวัย 3 จะใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหย ส่วนไหมวัย 4 และ 5 จะใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ
3. เปิดระบบทำความเย็นแบบระเหยในช่วงไหมวัย 1 ถึงวัย 3 และใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอในช่วงไหมวัย 4 และ 5 แล้วเริ่มบันทึกข้อมูล
4. วัดความเร็วลมของอากาศที่ผ่านแผ่นระเหยน้ำ ในช่วงไหมวัย 1 ถึงวัย 3 สำหรับไหมวัย 4 และ วัย 5 นั้นจะวัดความเร็วลมที่ออกจากคอยล์เย็น
5. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ภายใน - ภายนอกโรงเรือน และค่ารังสีอาทิตย์ทำการบันทึกข้อมูลทุก 10 นาที
6. เก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง จนครบ 5 วัย

4. ผลการทดลอง

ในการทดลองโดยโรงเรือนที่เก็บผลการทดลองนั้น วางตัวตามแนวทิศตะวันออก – ตะวันตก โรงเรือนมีขนาด $10 \times 21 \times 3 \text{ m}^3$ มีการติดตั้งระบบการทำความเย็นแบบระเหย ที่ผนังด้านทิศใต้ซึ่งระบบการทำความเย็นแบบระเหยนั้นมีขนาด $1.5 \times 1.8 \times 0.15 \text{ m}^3$ จำนวน 6 ชุด และมีพัดลมดูดอากาศขนาดใบพัด 30 นิ้ว จำนวน 6 ตัว ติดตั้งที่ผนังด้านทิศเหนือมีการเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง และเก็บผลการทดลองทุก ๆ 10 นาที

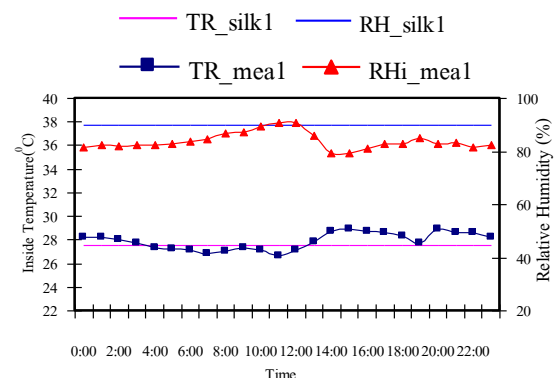
4.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 1 ถึงวัย 3 โดยใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหย

ผลการทดลองเลี้ยงไหมวัย 1 ถึงวัย 3 โดยใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของไหมวัย 1 วัย 2 และวัย 3

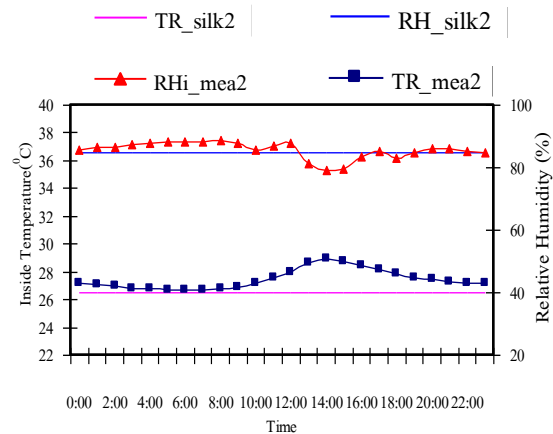
จากรูปที่ 4 แสดงค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของไหมวัย 1 วัย 2 และวัย 3 โดยมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด 424.4 372.4 และ 666.6 W/m^2 ที่เวลา 12.00 น.(วัย1) 13.00 น.(วัย2) และ 13.00 น.(วัย3) ตามลำดับ และมีอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด 29.4°C 29.6°C และ 31.4°C ที่เวลาเดียวกันคือ 14.00 น. อุณหภูมิแวดล้อมเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนเนื่องจากอากาศแวดล้อมจะไหลผ่านระบบการทำความเย็นแบบระเหยก่อนเข้าสู่โรงเรือน ผลของค่ารังสีอาทิตย์ของไหมวัย 1 และวัย 2 มีค่าต่ำใกล้เคียงกัน แต่ค่ารังสีอาทิตย์ของไหมวัย 3 นั้นมีค่าสูงกว่าเนื่องจากสภาพภูมิอากาศนั้นค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้มีค่ามาก



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 1

จากรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสถานะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 1 ซึ่งอุณหภูมิเหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 1 คือ 27.5°C แต่อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนนี้ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.9°C สำหรับความชื้นสัมพัทธ์เหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 1 คือ 90% แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหม มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 83.91% อุณหภูมิภายในโรงเรือนจะเริ่มสูงขึ้นและสูงสุดที่เวลา 15.00 น. คือ 28.91°C ถึงแม้ว่าช่วงเวลาดังกล่าวนั้นระบบทำความเย็นแบบระเหยทำงานแต่อุณหภูมิก็ยังสูงอยู่ เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์สูงทำให้อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูง ทำให้เมื่ออากาศแวดล้อมแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในระบบทำความเย็นแบบระเหย อุณหภูมิที่ผ่านระบบการทำความเย็นแบบระเหยมานั้นยังสูงอยู่ทำให้อุณหภูมิในห้องนั้นสูง แต่หลังจากเวลา 15.00 น. นั้น อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนก็จะเริ่มลดลงเนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์มีค่าลดลงและระบบการทำความเย็นแบบระเหยทำงานจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ไหมวัย 1 ต้องการ

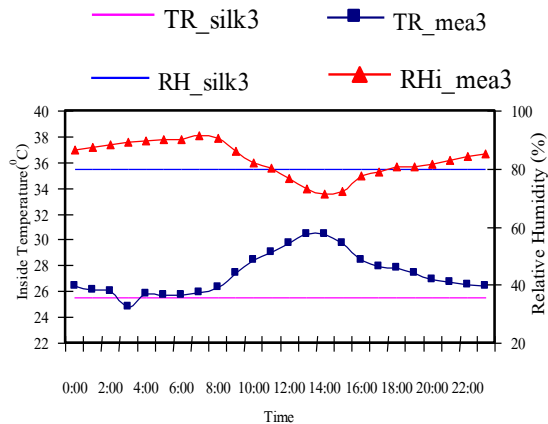
สำหรับการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนในช่วงเวลา 10.00 น. – 12.00 น. พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าใกล้เคียงกับความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงไหมวัย 1 คือ 90% ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวระบบทำความเย็นแบบระเหยทำงานจึงส่งผลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนสูง แต่หลังจากช่วงเวลา 12.00 น. ไปนั้นระบบทำความเย็นแบบระเหยหยุดทำงานเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนั้นใกล้เคียงกับที่ไหมวัย 1 ต้องการเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากระบบทำความเย็นแบบระเหยจะทำงานทำให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงตามที่ไหมวัย 1 ต้องการ แต่ช่วงเวลากลางคืนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนั้นยังคงมีค่าสูงเป็นผลมาจากสถานะอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสถานะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 2

จากรูปที่ 6 อุณหภูมิเหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 2 คือ 26.5°C แต่อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.5°C สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ยเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 2 คือ 85% แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหม มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 85.61% ซึ่งสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศของไหมวัย 2 ต้องการระบบการทำความเย็นแบบระเหยจึงหยุดทำงาน จึงส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนเริ่มมีค่าสูงจนถึง 28.9°C ที่เวลา 14.00 น. แต่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีค่าลดลง ดังนั้นระบบการทำความเย็นแบบระเหยเริ่มทำงานอีกครั้ง หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนเริ่มลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศเหมาะสมของไหมวัย 2 ต้องการ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนในช่วงเวลา 13.00 น. มีค่าเริ่มต้นเนื่องจากเป็นช่วงที่ระบบการทำความเย็นแบบระเหยหยุดการทำงานทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนลดลงและต่ำสุดที่เวลา 14.00 น. คือ 79.29%



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 3

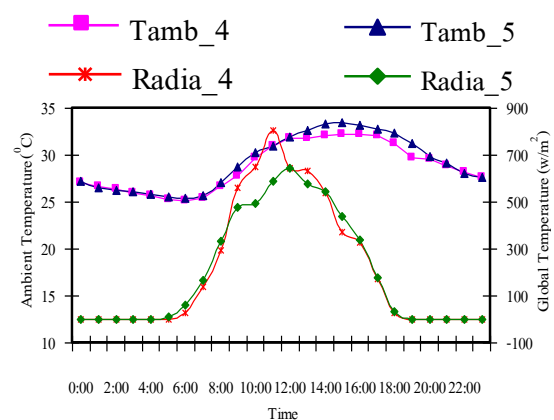
อุณหภูมิเหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 3 คือ 25.5°C จากรูปที่ 7 อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมที่ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหย โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.4°C สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 3 คือ 80% แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 3 นั้นมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 83.29% อัตราการเปลี่ยนแปลงของอากาศภายในโรงเรือนเมื่อระบบการทำความเย็นแบบระเหยทำงานในการเลี้ยงไหมวัย 3 ช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 19.00 น. ถึงเวลา 7.00 น. อุณหภูมิภายในโรงเรือนจะมีค่าค่อนข้างคงที่ และยังคงรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ในช่วงที่ไหมวัย 3 ต้องการคือ 25.5°C ในขณะที่เมื่อเวลากลางวันผลจากค่ารังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นตามชั่วโมงทำให้อุณหภูมิภายนอกโรงเรือนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนมีผลมาจาก ผงนังห้อง เพดาน พื้น และอากาศที่ร่วผ่านเข้ามาในห้อง

ในส่วนของการความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในช่วงเวลากลางคืนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าสูง เมื่ออากาศภายนอกที่ไหลผ่านระบบการทำความเย็นแบบระเหยเข้ามาในโรงเรือนจึงทำให้อากาศในโรงเรือนมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในสภาวะเหมาะสมที่ไหมวัย 3 ต้องการ จากการเก็บข้อมูลสำหรับการเลี้ยงไหมวัย 1 ถึง 3 โดยใช้ระบบการทำความเย็น

แบบระเหยพบว่าสามารถรักษาอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ตามที่ไหมต้องการ

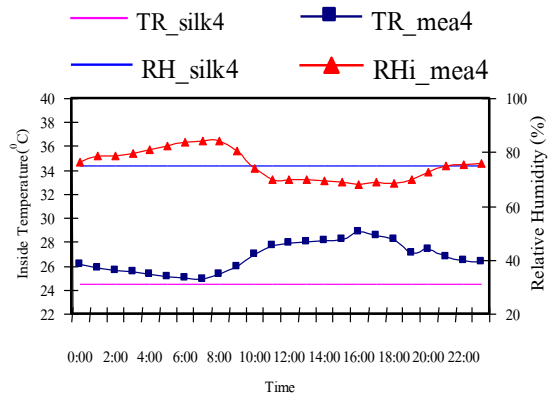
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5 โดยใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ

ผลการทดลองการเลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5 โดยใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 30,000 BTU/hr จำนวน 4 เครื่อง ผลการทดลองดังรูปที่ 8



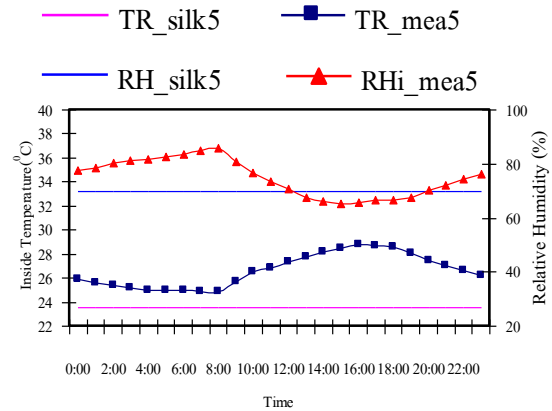
รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมของไหมวัย 4 และวัย 5

จากรูปที่ 8 แสดงค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5 โดยมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด 806.3 W/m^2 และ 642.2 W/m^2 ที่เวลา 11.00 น. และ 12.00 น. ตามลำดับ และมีอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด 32.3°C และ 33.4°C ที่เวลาเดียวกันคือ 15.00น. ซึ่งพบว่าค่ารังสีอาทิตย์ของการเลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5 มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยสูงใกล้เคียงกัน ซึ่งอุณหภูมิแวดล้อมสูงจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 4 และวัย 5



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4

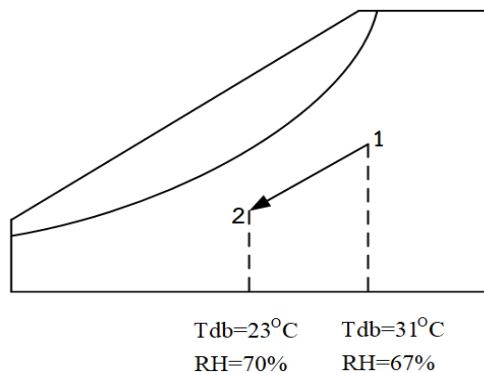
จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4 ซึ่งอุณหภูมิเหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4 คือ 24.5°C แต่อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมที่ใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอโดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 26.7°C สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 4 คือ 75% แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 4 นั้นมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 75.33% ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลทำให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาวะอากาศภายนอกโรงเรือน ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนนั้นแปรผกผันกับค่ารังสีอาทิตย์ แต่ทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนจะแปรตามอุณหภูมิอากาศภายนอกโรงเรือน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 5

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ได้จากการวัดกับสภาวะความเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 5 ซึ่งอุณหภูมิเหมาะสมเฉลี่ยที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 5 คือ 23.5°C แต่อุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมที่ใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอโดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 26.6°C สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหมาะสมที่ใช้เลี้ยงไหมวัย 5 คือ 70% แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 5 นั้นมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 74.86% ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนมีค่าสูงกว่าไหมวัย 5 ต้องการคือ อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ไหมต้องการโดยเฉลี่ยอยู่ 2°C ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในโรงเรือนนั้นมีขนาดเล็กเกินไป จนไม่สามารถที่จะทำอุณหภูมิอากาศให้ได้ตามที่ไหมวัย 5 ต้องการ จากการเก็บข้อมูลแล้วนำมาคำนวณพบว่าภาระการทำความเย็นทั้งหมดที่โรงเรือนได้รับคือ 12.26 ton ส่วนระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่ใช้อยู่ในโรงเรือนปัจจุบันซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 30,000 Btu/hr จำนวน 4 เครื่อง ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าเครื่องปรับอากาศแต่ละเครื่องทำได้เพียง 25,680 Btu/hr เท่านั้น โดยเครื่องปรับอากาศทั้งหมดสามารถทำได้ 8.56 ton เท่านั้น ดังนั้นเครื่องปรับอากาศจึงทำงานหนักเพราะว่าไม่สามารถทำความเย็นได้ตามที่ต้องการ จึงเป็นผลให้เสียค่าใช้จ่าย

ทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่สูง อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ไหมวัย 5 ต้องการคือ 23°C และ 70% RH ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กระบวนการของระบบการทำความเย็นในโรงเรือนเลี้ยงไหมวัย 5 ต้องการ

โดยอุณหภูมิแวดล้อม 31°C ความชื้นสัมพัทธ์ 67% แต่สภาวะเหมาะสมที่ไหมวัย 5 ต้องการคืออุณหภูมิ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ภายใต้ภาระการทำความเย็นที่ 43,099 W หรือ 12.26 ton จากการคำนวณพบว่าต้องใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาด 3 ton จำนวน 4 เครื่อง แต่ถ้าเครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพลดลงอาจจะต้องเพิ่มเครื่องปรับอากาศหรือเปลี่ยนเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ

5. สรุปผลการทดลอง

ไหมเป็นสัตว์เลือดเย็นโดยจะรักษาอุณหภูมิภายในตัวให้ต่ำกว่าอุณหภูมิรอบ ๆ ตัวเองอยู่ 1°C แต่ความสามารถในการปรับปรุงอุณหภูมิของตัวไหมไม่อาจจะปรับอุณหภูมิในตัวได้เมื่ออุณหภูมิรอบ ๆ ตัวเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อสภาวะอากาศไม่เหมาะสมที่ไหมต้องการนั้นจะทำให้ตัวไหมเกิดการอ่อนแอและจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของรังไหม ไหมวัย 1 วัย 2 และวัย 3 นั้นต้องการอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 27.5°C 26.5°C และ 25.5°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 90% 85% และ 80% ตามลำดับ โดยใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ยในโรงเรือน

ที่ได้จากการทดลอง 27.9°C 27.5°C 27.4°C และ 83.91% 85.61% 83.29% ตามลำดับของวัยไหม

สำหรับไหมวัย 4 และวัย 5 จะใช้ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งใช้เครื่องทำความเย็นขนาด 30,000 BTU/hr จำนวน 4 เครื่อง โดยไหมวัย 4 และวัย 5 ต้องการอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 24°C และ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 75% และ 70% ตามลำดับ แต่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศในโรงเรือนที่ได้จากการทดลองคือ 26.7°C 26.6°C และ 75.33% และ 74.86% ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิอากาศเหมาะสมสำหรับไหมวัย 4 และวัย 5 คือ 2.2°C และ 3.1°C ตามลำดับ สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างคือ 0.33% และ 4.86% ตามลำดับ การใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการทำความเย็นแบบอัดไอสามารถควบคุมสภาวะอากาศได้ใกล้เคียงกับที่ไหมต้องการทำให้ได้คุณภาพของรังไหมที่ดีซึ่งคุ้มค่ากับพลังงานที่ใช้ไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จ.สระบุรี (หม่อนไหม) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้สถานที่ในการเก็บผลการทดลอง และคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Chuprayoon S. Silk production techniques. Department of Agricultural Extension. 80 p.
- [2] John A, Zahra Giabaklou. A passive evaporative cooling system by natural ventilation. Building and Environment. 1996;31(6):503-7.
- [3] Dai Y.J, Sumathy K. Theoretical study on a cross-flow direct evaporative cooler using honeycomb paper as packing material. Applied Thermal Engineering. 2002;(22): 1417-30.

- [4] Maheshwari G.P, Al-Ragom F, Suri R.K. Energy-saving potential of an indirect evaporative cooler. *Applied Energy*. 2001;(69):69-76.
- [5] Faleh Al-Sulaiman. Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling. *Energy Conversion and Management*. 2002;(43):2267-73.
- [6] Hisham T.A, El-Dessouky, Amir A.Al-Haddad, Faisal Al-Juwayhel. Thermal and hydraulic performance of a modified two-stage evaporative cooler. *Renewable Energy*. 1996;7(2):165-76.
- [7] Jain J.K, Hindoliya D.A. Experimental performance of new evaporative cooling pad materials. *Sustainable Cities and Society*. 2011;(1): 252-6.
- [8] Pervin A.D, Saffa R, Guohui G, Devrim A. Experimental study of the potential of eucalyptus fibres for evaporative cooling. *Renewable Energy*. 2019;(131):250-60.
- [9] Xu J, Li Y, Wang R.Z, Liu W, Zhou P. Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates. *Applied Energy*. 2015; (138):291-301.
- [10] Singh A, Kumar S, Dev R. Studies on cocopeat, sawdust and dried cow dung as desiccant for evaporative cooling system. *Renewable Energy*. 2019;(142):295-303.

การพัฒนาเครื่องกรีตผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวเมติกส์

ณัฏฐ์ สิริวรรณานนท์¹ และธนาพล สุขชนะ^{2*}

thanaphols@rmutsb.ac.th¹, ton0019@hotmail.com^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Received : 23-Mar-2021
Revised : 23-Apr-2021
Accepted : 28-Apr-2021

บทคัดย่อ

การกรีตมะขามป้อมให้เป็นรายนั้นเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตมะขามป้อมแช่อิ่ม การทำงานแบบเดิมนั้นใช้มีดกดลงบนผลมะขามป้อมจนมีรอย 5-6 รอยตามต้องการ ซึ่งรอยกรีตที่เกิดขึ้นบนผลมะขามป้อมจะสามารถลดระยะเวลาของกระบวนการแช่อิ่มได้ 30-50% เครื่องกรีตแบบกึ่งอัตโนมัติเป็นการออกแบบและสร้างผสมผสานระหว่างการทำงานแบบกลไกร่วมกับระบบนิวเมติกส์ที่สามารถควบคุมให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ลูกกระทุ้งดันผลมะขามป้อมให้ผ่านมีดที่ติดตั้งบริเวณทางออกในแนวรัศมีจำนวน 6 ใบ ตามจังหวะการทำงานของก้านสูบที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยวาล์วปรับอัตราการไหลของลม และการหน่วงเวลาด้วย PLC ในขณะที่ผลมะขามป้อมจะสามารถเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงเข้าแทนที่ผลเดิมที่ถูกดันออกไปในจังหวะที่ลูกกระทุ้งเคลื่อนที่กลับ ผลการทดลองพบว่าเครื่องกรีตผลมะขามป้อมกึ่งอัตโนมัติมีกำลังการผลิตทดแทนการกรีตด้วยวิธีใช้มีดกดผ่านแท่นมีดได้ประมาณ 6 คน โดยความเร็วของลูกกระทุ้งที่สัมพันธ์กับการป้อนด้วยแรงโน้มถ่วงได้สูงสุดเฉลี่ย 150 ครั้ง/นาที โดยไม่สร้างความเสียหายต่อผลมะขามป้อม ซึ่งจะได้อัตรากำลังการผลิตเฉลี่ย 150 กก./ชม. และมีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องต้นแบบ 37 วัน

คำสำคัญ: มะขามป้อม เครื่องกรีต ระบบนิวเมติกส์ ระบบอัตโนมัติ การแช่อิ่ม

Development of a Sami-Automatic Phyllanthus Emblica Tapping Machine with Pneumatic System

Natt Siriwattananon¹ and Thanaphol Sukchana^{2*}
thanaphols@rmutsb.ac.th¹, ton0019@hotmail.com^{2*}

¹ Department of Teacher Training in Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Received	: 23-Mar-2021
Revised	: 23-Apr-2021
Accepted	: 28-Apr-2021

Abstract

The tapping on the surface of the phyllanthus emblica is one of the steps in the crystallized production process. The conventional operation is to use a knife to press down on the fruit for desired 5–6 marks. Tapping on the phyllanthus emblica surface can reduce the time of the crystallized process about 30 to 50%. The semi-automatic tapping machine is a design that combines a mechanism with a controllable pneumatic system which can be controlled to work continuously. A push-rod to push the phyllanthus emblica through six knives are installed in the radial outlet according to the working stroke of the connecting rod. Which can be speed adjusted by air flow adjustment valve and time delay by PLC. The phyllanthus emblica will move down by gravity to replace the original that was pushed away when the push-rod moves back. The results showed that the semi-automatic machine had the capacity more than the tapping method by handing pressing through the knife platform, approximately six people. The push-rod speed relative to the gravitational feed was averaging 150 times per minute without damaging of phyllanthus emblica. Which will get an average production capacity of 150 kg per hour and the break-even point of the prototype tapping machine about 37 days.

Keywords: phyllanthus emblica, tapping machine, pneumatic system, automatic, crystallized

1. บทนำ

มะขามป้อมนับเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งจะสามารถพบเห็นผลิตภัณฑ์จากมะขามป้อมและการแปรรูปเป็นสินค้าต่างๆ ทั้งอุปโภคและบริโภค ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการบริโภคนั้นมักมีกระบวนการในการผลิตหลายขั้นตอนและใช้เวลาในกระบวนการรวมทั้งกำลังการผลิตต่อแรงงานที่ใช้ดำเนินการผลิตในรูปแบบครัวเรือนหรือกลุ่มชุมชน โดยกระบวนการผลิตนั้นเป็นแบบวิถีดั้งเดิม การผลิตสินค้าจากผลผลิตทางการเกษตรนั้นโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องมีการเตรียมวัตถุดิบก่อนการแปรรูป ในการผลิตแบบวิถีดั้งเดิมนั้นมักใช้แรงงานคนในการเตรียมวัตถุดิบซึ่งต้องใช้แรงงานและเวลามาก การใช้เครื่องจักรในกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรนั้นจะสามารถช่วยลดเวลา แรงงาน และต้นทุนในการผลิต แต่ช่วยเพิ่มด้านคุณภาพ กำลังในการผลิต มีความสะอาด และมีความปลอดภัย ดังเช่นผลงานวิจัยพัฒนาเครื่องเตรียมวัตถุดิบทางการเกษตรที่เป็นระบบกลไก [1] ได้พัฒนาเครื่องผ่าผลหมากสดแบบกึ่งอัตโนมัติแบบกลไกโดยมีกำลังการผลิตเทียบได้กับแรงงานคนประมาณ 8-10 คน [2] ศึกษาพัฒนาเครื่องปอกเปลือกโดยใช้หลักการหมุนของชิ้นงานอยู่บนแกนคงที่และปอกโดยการใช้มีดควบคุมระยะของมีดเพื่อให้สามารถปอกได้ตามรูปร่างของเปลือกช่วยให้การทำงานเร็วขึ้นเป็น 2 เท่า [3] ได้ประดิษฐ์เครื่องควั่นเมล็ดลำไยแบบกลไกโดยใช้ชุดงานหมุนพาผลลำไยเข้าชุดกลไกควั่นแล้วกระทุ้งเอาเมล็ดออก โดยมีสมรรถนะเท่ากับการใช้แรงงานจำนวน 8 คน ต่อมามีการพัฒนาเครื่องแยกเมล็ดมะขามหวาน [4] โดยใช้หลักการให้ชิ้นงานอยู่กับที่แล้วมีดกรีดเคลื่อนที่ พบว่ามีกำลังการผลิตเฉลี่ย 8.57 กก./ชม. [5] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดบัวหลวงแห้งโดยใช้แรงกดจากชุดลูกกลิ้งสามารถกะเทาะเมล็ดบัวหลวงแห้งได้ นอกจากนี้ผลงานวิจัยพัฒนาเครื่องจักรที่เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติได้มีผู้วิจัยกันอย่างต่อเนื่องดังเช่น [6] ได้ออกแบบและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องบรรจุน้ำพริกน้ำเงี้ยว โดยใช้สัญญาณจากเครื่องชั่งแบบตัวเลขในการโปรแกรมควบคุมการหมุนของมอเตอร์เพื่อควบคุมปริมาณของน้ำพริกที่บรรจุ [7] ทดสอบโดยการติดตั้งระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติพีซีลอจิกเพื่อควบคุมการเติมผงสมุนไพรให้เครื่องผลิตสมุนไพรขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำ [8] พัฒนาเครื่องกวนเนื้อมังคุดชนิดควบคุมอุณหภูมิ

กึ่งอัตโนมัติ โดยใช้การตรวจจับอุณหภูมิควบคุมปริมาณการจ่ายแก๊สของเตา [9] ได้พัฒนาเครื่องควั่นเมล็ดเงาะแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ PLC ในการควบคุมการทำงานของกระบอกสูบ ลักษณะการทำงานเป็นแบบชิ้นงานอยู่กับที่และคมตัดเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติโดยมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 17 กก./ชม. สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรีดผลมะขามป้อมนั้นพบว่า [10] ได้สร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกลไกข้อเหวี่ยงโดยมีอัตรากำลังการผลิตเฉลี่ยถึง 100 กก./ชม.ซึ่งยังมีข้อจำกัดของกำลังการผลิตจากการเคลื่อนที่ในแนวเอียงของผลมะขามป้อม

จากผลงานวิจัยในการเตรียมวัตถุดิบทางการเกษตรที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเครื่องจักรต่างๆ มีการออกแบบและสร้างเครื่องจักรโดยประยุกต์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หลักการทางเทคนิคและประสบการณ์ช่วยในการออกแบบและสร้างเนื่องจากลักษณะรูปร่างและรูปร่างของวัตถุดิบทางการเกษตรแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งวิธีการสร้างรอยกรีดแบบดั้งเดิมนั้นมีข้อจำกัด ทั้งด้านกำลังการผลิตและปัญหาด้านการขาดแคลนแรงงาน ซึ่งแรงงานที่มีส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุเกิดอุบัติเหตุในการทำงานบ่อยครั้ง มีอาการเมื่อยล้าและอาการนิ้วล็อก เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการสร้างและการพัฒนาเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ระบบสมรรถนะหรือนิวเมติกส์ เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ปลอดภัย ประหยัดพลังงาน และลดแรงงานคน ผลผลิตถูกสุขลักษณะตามมาตรฐานการผลิตอาหาร

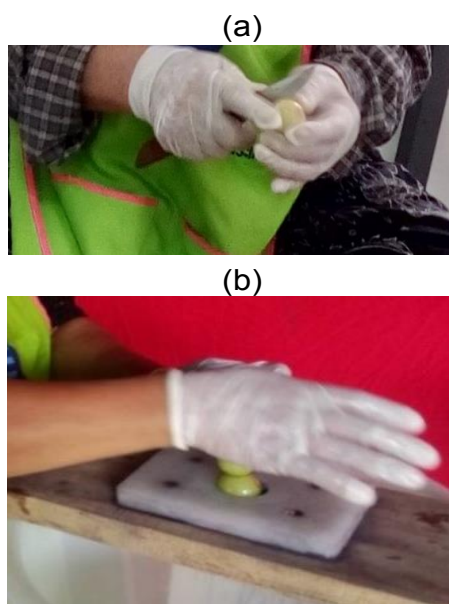
2. ขั้นตอนและวิธีการออกแบบ

2.1 วิธีการกรีดแบบเดิม

ในกระบวนการทำแช่อิ่มผลไม้ นั้นเป็นกระบวนการนำน้ำตาลเข้าไปแทนที่น้ำภายในเซลล์ของเนื้อผลไม้ เรียกว่ากระบวนการออสโมซิส [11] การแช่อิ่มผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว กระบวนการในการลดความเปรี้ยว คือการแช่น้ำเกลือแล้วทำให้ผิวมีรอยเล็ๆ จะเป็นผลให้น้ำ น้ำตาลหรือเกลือออสโมซิสเข้าสู่เซลล์ของเนื้อของผลไม้ได้รวดเร็วขึ้นสามารถลดระยะเวลาในการแช่อิ่มลงได้ [12] จากการศึกษาการแปรรูปมะขามป้อมแช่อิ่มพบวิธีการที่นิยมใช้เพื่อทำให้เกิดรอยบนผลมะขามป้อม 2 วิธีดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการใช้คมมีดกดลงบนผิวของผลมะขามป้อมโดยผู้ที่มีความ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏภูเก็ต 27

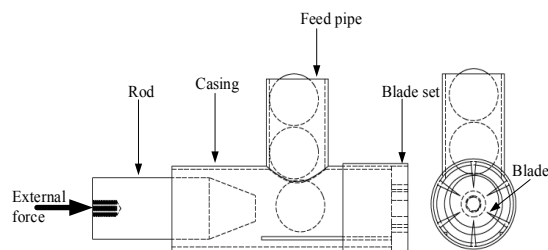
ชำนาญ (a) ซึ่งจะสามารถกรีดได้เฉลี่ย 10–15 กก./ชม./คน และอีกหนึ่งวิธีคือ (b) ติดตั้งใบมีดแล้วกดผลมะขามป้อมด้วยมือให้ผ่านชุดแท่นมีดซึ่งจะสามารถกรีดได้เฉลี่ยประมาณ 20–25 กก./ชม./คน ซึ่งประสบปัญหาทั้งด้านแรงงาน กำลังการผลิต ความปลอดภัย และควมมีมาตรฐานในการผลิตอาหาร



รูปที่ 1 วิธีการกรีดของกลุ่มแปรรูปมะขามป้อมแช่อิ่ม

2.2 การออกแบบกลไกการกรีด

แนวคิดในการออกแบบชุดกระบอกสำหรับสร้างรอยกรีด ดังรูปที่ 2 อาศัยการเคลื่อนที่ของวัสดุเริ่มต้นด้วยแรงกระทำจากกระบอกสูบลม (External force) ผ่านลูกกระทุ้ง (Rod) โดยส่วนปลายของลูกกระทุ้งจะมีลักษณะเป็นหลุมผิวโค้งเพื่อใช้บังคับให้ผลมะขามป้อมให้อยู่ตรงกลางชุดกรีดได้ในแนวนอนเมื่อสัมผัสกับมีด ลูกกระทุ้งจะถูกบังคับทิศทางด้วยตัวเรือน (Casing) และดันให้ผลมะขามป้อมผ่านชุดใบมีด (Blade set) ที่มีใบมีด (Blade) จำนวน 6 ใบติดตั้งในแนวรัศมีที่ระดับความสูงเดียวกัน ซึ่งเป็นการทำงานในแนวนอนและป้อนมะขามป้อมเคลื่อนที่เข้าในแนวดิ่งด้วยแรงโน้มถ่วงลงมาตามท่อป้อน (Feed pipe) ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ในแนวเอียงของผลมะขามป้อมที่เกิดการติดขัดระหว่างการทำงานของ [10] ได้ โดยลูกกระทุ้งจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิด-เปิดเพื่อให้ผลมะขามป้อมเคลื่อนที่ลงมาในตัวเรือนตามจังหวะการชักของลูกกระทุ้งที่ถูกดันและดึงด้วยก้านสูบของกระบอกลม



รูปที่ 2 โดอะแกรมกลไกการกรีดและชุดมีด

2.3 การคำนวณออกแบบ

กระบวนการในการออกแบบโดยศึกษาวิธีการกรีดแบบดั้งเดิมเพื่อทดสอบแรงในการกรีดแบบกดผลมะขามป้อมด้วยมือผ่านชุดใบมีดที่มีใบมีดจำนวน 6 ใบ ซึ่งรอยกรีดจะมีความลึกเฉลี่ย 10 มม. จากการทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักวางบนผลมะขามป้อมในแนวดิ่งจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านคมมีดได้เหมือนกับใช้มือกดดังรูปที่ 2 (b) ซึ่งจะได้แรงกด (F) เฉลี่ยเท่ากับ 70 นิวตัน [10] จากนั้นคำนวณหาขนาดของกระบอกสูบลม (d) เล็กที่สุดที่สามารถออกแรงทำงานได้ด้วยสมการที่ (1) กำหนดให้ความดันลม (P) ใช้งานต่ำสุดเท่ากับ 4 บาร์ เนื่องจากเป็นความดันต่ำสุดของระบบการตัด-ต่อในการทำงานของปั๊มลมทั่วไป ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีกำลังเพียงพอในการทำงานอย่างต่อเนื่อง แทนค่าในสมการที่ (1) จะได้ขนาดของกระบอกสูบลมเท่ากับ 14.92 มม. จึงเลือกใช้ขนาดกระบอกสูบลมเท่ากับ 25 มม. จากตารางขนาดมาตรฐานของกระบอกลม โดยจะได้ค่าความปลอดภัยในการออกแบบเท่ากับ 1.68 เท่า ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้ดีและสามารถช่วยให้ประหยัดลมอัด พร้อมกันนี้เลือกใช้ระยะชักของก้านสูบเท่ากับ 80 มม. จากนั้นคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ออกของก้านสูบ (V) ด้วยสมการที่ (2) ได้ความเร็วออกของก้านสูบเท่ากับ 9.42 ม./วินาที แล้วคำนวณหาเวลา (t_1) ในการเคลื่อนที่ไปและกลับของก้านสูบด้วยสมการที่ (3) เพื่อประเมินสมรรถนะสูงสุดเบื้องต้นของเครื่องกรีดผลมะขามป้อมกึ่งอัตโนมัติได้เวลาในการเคลื่อนที่ออกของก้านสูบเท่ากับ 0.0085 วินาที โดยจะได้เวลาในการเคลื่อนที่ไปและกลับของก้านสูบรวมกันเท่ากับ 0.017 วินาที ทั้งนี้เวลาในการเคลื่อนที่กลับของก้านสูบจริงนั้นจะใช้เวลาน้อยกว่าตอนเคลื่อนที่ออกแต่ในการออกแบบครั้งนี้เลือกใช้เวลาเดียวกันกับตอนเคลื่อนที่ออกซึ่งมากกว่า เพื่อให้ผลมะขามป้อมเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงเข้าตำแหน่งของการกรีดได้ทันเวลา นอกจากนี้ จะต้อง

คำนวณหาเวลาในการเคลื่อนที่ของผลมะขามป้อมในแนวตั้ง ด้วยแรงโน้มถ่วง (t_2) ด้วยสมการที่ (4) โดยใช้ระยะทางในแนวตั้ง (y) เท่ากับ 40 มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยขนาดของผลมะขามป้อมที่ใช้ในการทดลองเล็กน้อย เพื่อใช้สำหรับการห้วงเวลาก่อนที่ ลูกกระทุ้งจะเคลื่อนที่ ต้นผลมะขามป้อมผ่านชุดมีด ซึ่งได้เวลาในการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.085 วินาที ในการออกแบบจะเลือกใช้การห้วงเวลาน้อยสุดเท่ากับ 0.15 วินาที โดยคำนวณความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบลม (N) ได้ด้วยสมการที่ (5) และใช้เวลารวมในการทำงานต่อ 1 รอบ (Σt) เท่ากับ $0.017+0.15 = 0.167$ วินาที จะได้ความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบลมสูงสุดเท่ากับ 359 ครั้ง/นาที หรือมีความสามารถในการกรีดสูงสุดเท่ากับ 359 ผล/นาที หลังจากนั้นจะสามารถหาสมรรถนะการทำงานของเครื่อง (๘) ด้วยสมการที่ (6) โดยจะพิจารณาเลือกใช้งานอัตราเร็วตามความเหมาะสมเพื่อไม่ให้ผลมะขามป้อมเกิดความเสียหายจากการกรีดด้วยเครื่องกรีดแบบกึ่งอัตโนมัติ

$$d = \left[\frac{4F}{\pi \cdot P} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{s}{v} \quad (3)$$

$$t_2 = \left[\frac{2y}{g} \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$N = \frac{60}{\Sigma t} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{60N}{50} \quad (6)$$

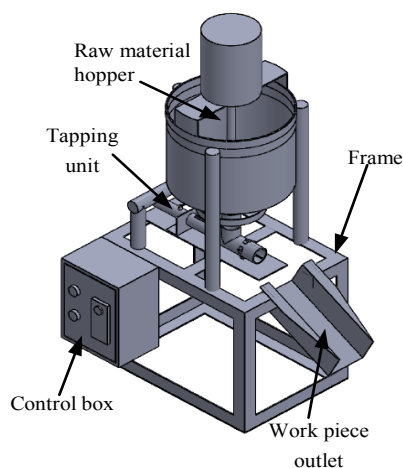
โดย d คือขนาดของกระบอกสูบลม (มม.), F คือแรงกดที่ทำให้ผลมะขามป้อมผ่านชุดใบมีด (นิวตัน), P คือความดันลมใช้งานต่ำสุด (บาร์), v คือความเร็วของก้านสูบ (ม./วินาที), Q คืออัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/นาที), t_1 คือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไปหรือกลับของก้านสูบ (วินาที), s คือระยะชักของก้านสูบ (มม.), t_2 คือเวลาในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของผลมะขามป้อม (วินาที), y คือระยะทางในการเคลื่อนที่แนวตั้งของผลมะขามป้อม (มม.), g คือความเร่ง

เนื่องจากแรงโน้มถ่วง, N คือจำนวนรอบ (ไป-กลับ) ในการเคลื่อนที่ของก้านสูบ (รอบ/นาที), Σt คือเวลารวมทั้งหมดต่อการเคลื่อนที่ต่อรอบของก้านสูบ (วินาที), ε คือสมรรถนะในการทำงานของเครื่อง (กก./ชม.) โดยใช้ค่าเฉลี่ยมวลของผลมะขามป้อมเท่ากับ 50 ผลต่อกิโลกรัม

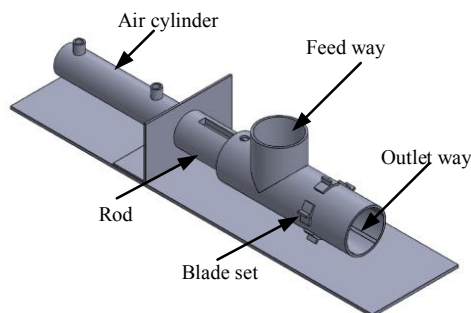
2.4 การสร้างเครื่องต้นแบบและการทดลอง

2.4.1 ลักษณะของเครื่องต้นแบบ

เครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวเมติกส์ (ลมอัด) ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือโครง (Frame) ทำด้วยเหล็ก ชุดสำหรับกรีดแนวนอน (Tapping unit) ชุดป้อนวัตถุดิบแนวตั้ง (Raw material hopper) กล่องควบคุมการทำงานของเครื่อง (Control box) และช่องทางออกของวัตถุ (Work piece outlet) ทั้งนี้ชุดสำหรับกรีดแนวนอนมีส่วนประกอบดังรูปที่ 4 โดยใช้กำลังจากกระบอกสูบลม (Air cylinder) ดันและดึงลูกกระทุ้งให้เคลื่อนที่ในตัวเรือนซึ่งในขณะที่ยกขึ้นก้านสูบดึงลูกกระทุ้งเข้าสู่ชุดจะเปิดให้ผลมะขามป้อมตกลงมาในตัวเรือนด้วยแรงโน้มถ่วงผ่านช่องทางป้อน (Feed way) จากนั้นก้านสูบจะดันให้ลูกกระทุ้งเคลื่อนที่ออกและดันผลมะขามป้อมให้เคลื่อนที่ผ่านชุดมีด (Blade set) จนถึงช่องทางออก (Outlet way) ในขณะเดียวกันลูกกระทุ้งจะทำหน้าที่ปิดกั้นไม่ให้ผลมะขามป้อมเคลื่อนที่เข้าในตัวเรือนได้จนกว่าลูกกระทุ้งจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ชุดและห้วงเวลาก่อนที่จะเคลื่อนที่ออกเพื่อให้มั่นใจว่าผลมะขามป้อมเคลื่อนที่เข้าตัวเรือนชุดกรีดแล้ว



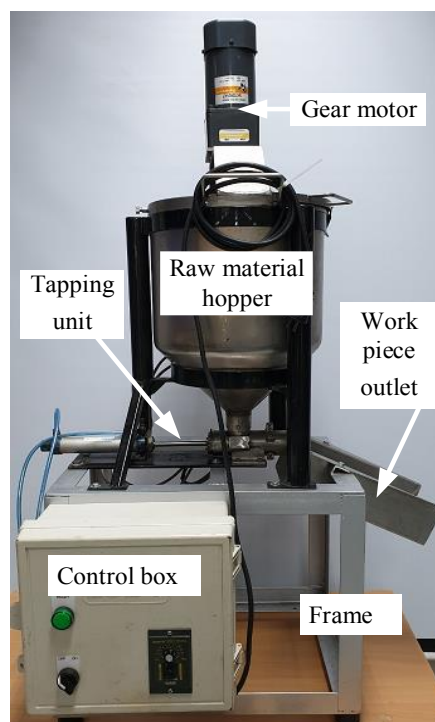
รูปที่ 3 ลักษณะการออกแบบเครื่องกรีดผลมะขามป้อม



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของชุดกรีด (Tapping unit)

2.4.2 เครื่องต้นแบบ

จากรูปแบบและลักษณะในการทำงานของเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบในหัวข้อ 2.4.1 สามารถสร้างเครื่องต้นแบบได้ดังรูปที่ 5 โดยมีถึงสามารถบรรจุผลมะขามป้อมเป็นวัตถุดิบได้ประมาณ 15 กก. มีใบสำหรับกวนให้ผลมะขามป้อมเกิดการเคลื่อนที่ และไหลเข้าสู่ชุดกรีดแบบไม่ติดขัดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์กระแสสลับ 220 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์ ตำแหน่งปกติในการทำงานก้านกระทุ้งจะอยู่ในตำแหน่งปิดทางลงของผลมะขามป้อมที่จะเข้ามายังชุดกรีด เริ่มทำงานโดยการเปิดสวิตช์ให้มอเตอร์ทำงานก่อนเพื่อไม่ให้เกิดการติดขัดในการเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกรีดของผลมะขามป้อม จากนั้นเปิดสวิตช์ให้กระบอกสูบลมทำงานก้านกระทุ้งจะถูกดึงกลับจนสุดและเปิดช่องทางให้ผลมะขามป้อมสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกรีดได้ครั้งละ 1 ผล ก้านกระทุ้งจะถูกหน่วงเวลาก่อนการเคลื่อนที่ออกตามเงื่อนไขการทดลองในหัวข้อที่ 2.4.3



รูปที่ 5 เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

2.4.3 การทดลอง

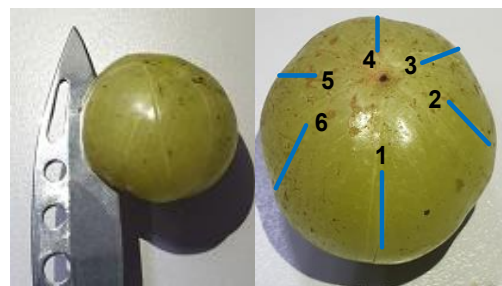
การทดลองนั้นจะเป็นการทดสอบการทำงานในเบื้องต้นและการทดสอบสมรรถนะของเครื่องกรีดโดยกำหนดให้ใช้งานได้กับผลมะขามป้อมสด สายพันธุ์ กจ-55-05 (พันธุ์แม่ลูกดก) [13] ที่มีขนาดเฉลี่ย 30–36 มม. โดยได้จากเครื่องคัดแยกขนาดซึ่งเป็นขนาดที่นิยมบริโภคและมีราคาสูงในท้องตลาดรวมทั้งมีรูปร่างค่อนข้างกลม จากการทดสอบโดยการชั่งพบว่ามีความหนาเฉลี่ย 50 ผลต่อ 1 กก. โดยทำการทดลองครั้งละ 3 กก. ตามเงื่อนไขการหน่วงเวลาก่อนการเคลื่อนที่ออกของก้านสูบดังตารางที่ 1 เพื่อหาความสัมพันธ์ของเวลาการหน่วงเวลากับการเคลื่อนที่ของผลมะขามป้อมที่เหมาะสมโดยไม่เกิดความเสียหายจากการกรีด การหน่วงเวลาจะอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.50 วินาที ซึ่งสามารถประเมินกำลังการผลิตได้โดยวิธีการคำนวณจะอยู่ในช่วง 139 ถึง 431 กก./ชม. ทำการทดลองตามเงื่อนไขการหน่วงเวลาอย่างละ 3 ครั้งๆ ละ 3 กก. แล้วนำค่าเฉลี่ยของเวลา 3 ครั้ง มาคำนวณเป็นสมรรถนะการทำงานของเครื่องในหน่วย กก./ชม. ด้วยสมการที่ 6 ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้ก้านสูบมีความเร็วคงที่เท่ากับ 9.42 ม./วินาที เนื่องจากใช้ความดันลมคงที่เท่ากับ 4 บาร์ ตามหัวข้อการคำนวณออกแบบ

ตารางที่ 1 การประเมินสมรรถนะโดยการหน่วงเวลา

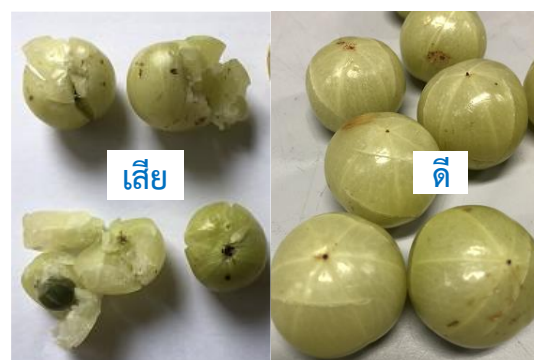
หน่วงเวลา (วินาที)	รวมเวลา/รอบ (วินาที)	ผลผลิตจากการ คำนวณ (กก./ชม.)
0.15	0.17	431
0.20	0.22	332
0.25	0.27	270
0.30	0.32	227
0.35	0.37	196
0.40	0.42	173
0.45	0.47	154
0.50	0.52	139

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบการทำงานเบื้องต้นพบว่าระบบนิวเมติกส์สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องกรีตผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยมีกำลังเพียงพอและปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเช่นเดียวกับ [9, 14] ผลจากการทดลองดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่ามีรอยกรีดจำนวน 6 รอยทุกๆ ผลตามที่ต้องการ และมีความลึกเพียงพอสำหรับช่วยลดระยะเวลาในการดองและแช่อิ่ม ซึ่งรอยกรีดนั้นจะอยู่ในแนวใดก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน สำหรับระบบการป้อนวัตถุดิบนั้นพบว่าหากไม่มีการกวนให้เคลื่อนไหวด้วยมอเตอร์เกียร์ เครื่องจะสามารถกรีดได้เพียง 3-5 ผล วัตถุดิบจะเกิดการติดขัดไม่มีการเคลื่อนที่เข้าในตำแหน่งที่ต้องการจะกรีด เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของผลมะขามป้อมที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมและเกิดการกดทับกันบริเวณทางลงจนไม่สามารถเคลื่อนที่ลงได้ตามจังหวะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้ง และแก้ไขโดยติดตั้งใบกวนให้ทำงานตลอดเวลาจึงจะสามารถช่วยให้ผลมะขามป้อมเคลื่อนที่เรียงแถวลงในแนวตั้งได้โดยไม่ติดขัด เช่นเดียวกันกับเครื่องผ่าผลหมาก [1] ที่ต้องมีใบสำหรับปัดให้ผลหมากเคลื่อนที่ หลังจากทดสอบการทำงานเบื้องต้นแล้วจึงทำการทดลองตามเงื่อนไขการหน่วงเวลาตามตารางที่ 1 โดยการปรับตั้งเวลาการหน่วงลูกกระทุ้งด้วยโปรแกรม PLC (Programmable logic Control) และจะคัดเลือกผลมะขามป้อมที่ใช้งานไม่ได้กับใช้งานได้ดังรูปที่ 7 แล้วนำมาคำนวณเป็นประสิทธิภาพและสมรรถนะในการกรีดดังรูปที่ 8

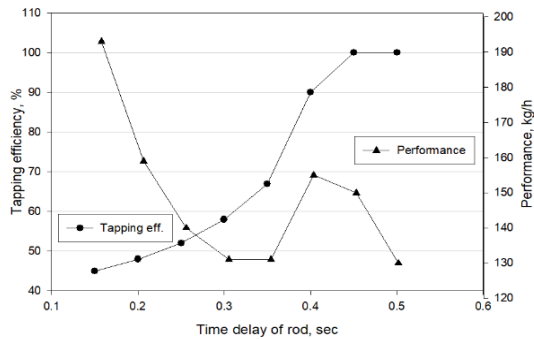


รูปที่ 6 ลักษณะรอยกรีดบนผลมะขามป้อม



รูปที่ 7 ลักษณะรอยกรีดบนผลมะขามป้อมที่ใช้งานไม่ได้และใช้งานได้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกรีดจะเห็นว่า ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อมีการหน่วงเวลาของก้านกระทุ้งเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าการหน่วงเวลามีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของผลมะขามป้อมด้วยเวลาในการหน่วง 0.4 วินาทีจะมีของเสียเฉลี่ย 10% และเมื่อหน่วงเวลาตั้งแต่ 0.45 วินาทีขึ้นไปจะไม่ทำให้มีของเสียจากการกรีดเลย ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาสมรรถนะในการทำงานของเครื่องพบว่า การหน่วงเวลามากขึ้นมีผลต่อสมรรถนะที่ลดลงเนื่องจากเวลาที่มีการหน่วงเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนครั้งในการทำงานของก้านกระทุ้งลดลง ทั้งนี้จากการทดลองควรเลือกใช้การหน่วงเวลาเท่ากับ 0.45 วินาทีจะส่งผลให้ระบบการทำงานของเครื่องมีความสัมพันธ์กันพอดีโดยไม่เกิดของเสียในกระบวนการและมีสมรรถนะเฉลี่ย 150 กก./ชม. ซึ่งสูงกว่าผลงานวิจัย [10] ประมาณ 33% ที่มีการป้อนผลมะขามป้อมในแนวเอียงและมีสมรรถนะเฉลี่ย 100 กก./ชม.



รูปที่ 8 ผลจากการหน่วงเวลาการกระทำต่อประสิทธิภาพ และสมรรถนะในการกรีด

4. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเครื่องต้นแบบ

จากผลการทดสอบเลือกใช้การหน่วงเวลา ก่อนการเคลื่อนที่ออกของก้านสูบได้เท่ากับ 0.45 วินาที จะได้ อัตราการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้ทำงานวันละ 8 ชั่วโมงจะได้กำลังการผลิตเท่ากับ 1,200 กิโลกรัมต่อวัน และมีค่าใช้จ่ายด้านกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 30 บาทต่อวัน (8 ชั่วโมงงาน) ในขณะที่ใช้แรงงานเพียง 1 คน คิดเป็นค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้ารวมค่าแรงประมาณ 180 บาทต่อวัน หรือคิดเป็น 0.15 บาทต่อกิโลกรัม ในการกรีดด้วยมือ สำหรับผู้มีความชำนาญนั้นจะได้กำลังการผลิตเฉลี่ย 25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 200 กิโลกรัมต่อวัน โดยคิดค่าแรงงานเฉลี่ย 350 บาทต่อวัน จะเป็นต้นทุนเท่ากับ 1.75 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนเครื่องกรีดกับแรงงานคนจะพบว่า การใช้เครื่องกรีดสามารถลดต้นทุนได้ 1.6 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต้นทุนในการสร้างและพัฒนาเครื่องต้นแบบเท่ากับ 70,000 บาท จะได้กำลังการผลิตที่เป็นจุดคุ้มทุนของเครื่องต้นแบบเท่ากับ 43,750 กิโลกรัม หรือประมาณ 37 วันทำงาน (8 ชั่วโมงต่อวัน) โดยพบว่ามีจุดคุ้มทุนต่ำกว่าเครื่องกรีดมะขามป้อมด้วยกลไกข้อเหวี่ยง [10] ประมาณ 10 วันเนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างสูงกว่า ในขณะที่เครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีสมรรถนะสูงกว่าการกรีดด้วยกลไกข้อเหวี่ยง

5. สรุปผลการทดลอง

การสร้าง พัฒนา และทดสอบสมรรถนะของเครื่องกรีดผลมะขามป้อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ด้วยอุปกรณ์และเงื่อนไขการทำงานที่ใช้ในการออกแบบนั้น ได้อัตราการผลิต 150 กก./ชม. โดยมีประสิทธิภาพการกรีด 100% ด้วย

การหน่วงเวลาของก้านสูบเท่ากับ 0.45 วินาที และมีกำลังการผลิตสูงกว่าแรงงานคนประมาณ 6-8 เท่า ขึ้นอยู่กับความชำนาญของบุคคลด้วยเครื่องมือแบบดั้งเดิม โดยมีระยะเวลาคืนทุนของเครื่องต้นแบบ 37 วัน เหมาะสำหรับกลุ่มธุรกิจขนาดย่อม (SMEs) และวิสาหกิจชุมชนที่มีการแปรรูปมะขามป้อม ที่ต้องการกำลังในการผลิตสูงหรือขาดแคลนแรงงาน นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนากำลังการผลิตให้สูงขึ้นได้โดยเพิ่มระบบป้อนที่มีประสิทธิภาพสูง จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้สูงสุดประมาณ 400 กก./ชม. หรือทดแทนแรงงานได้อย่างน้อย 15 คน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สอว.) สำนักงานส่งเสริมและถ่ายทอดเทคโนโลยี ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่ชุมชนโครงการพัฒนาและยกระดับสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม พื้นที่ จังหวัดกาญจนบุรี ในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Manop Y, Chakkawan B, Noppom P, Thanaphol S, Manaporn K. Development of the fresh betel nut splitter with a semi-automatic operation for the betel nut processing. Area Based Development Research Journal. 2017;9(6):420-9. (in Thai)
- [2] Sakkarin N. Development of a taro peeler. Agricultural Machinery Engineering Thesis. Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani. 2016. (in Thai)
- [3] Kiangkrai T. Two head automatic longan seed pulling machine (Invention). Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai. 2010. (in Thai).

- [4] Wittaya N, Thanapat M. Development of seed separating tamarind machine. Proceedings of the 16th Graduate Studies of Northern Rajabhat University Network Conference. 2016;1454-62. (in Thai).
- [5] Jaturong L, Sunan P, Roongruang K, Surawut S. Development of a dried lotus seed shelle. Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2018;17(2):11-22. (in Thai).
- [6] Niwatchai J, Amnuay K, Worapot S, Peerawat L. The design and development packing machine for increase packing process efficiency of Nam Ngiao Chili. Journal of Innovation Technology Research. 2019;3(1): 68-76. (in Thai)
- [7] Komsan M, Wayakorn U, Kritsana C. Small semi-automatic machine of herbal soap production for community. Rajabhat Rambhai Barni Research Journal. 2017; 11(1):39-45. (in Thai).
- [8] Kritsana C, Komsan M, Sarayut C. Development of mangosteen stirrer machine with semi-automatic temperature controller for Ban Tha sara community enterprise, Thamai district, Chanthaburi province. Rajabhat Rambhai Barni Research Journal. 2018; 12(1):58-67. (in Thai)
- [9] Anusara T, Krawee T, Tawarat T. Development of seme- automatic rambutan peeling and seed removing machine. Thai Society of Agricultural Engineering Journal. 2020;26(1): 1-8. (in Thai)
- [10] Natt S. The construction and performance testing of Indian gooseberry (*Phyllanthus emblica*) tapping machine with crank mechanism. RMUTSB Acad. J. 2020;8(2): 215-26. (in Thai)
- [11] Wannida S. Optimization of the osmotic dehydration of mangos (*Mangifera indica* Linn.) using bisulfite substituted compounds and humectants. Master of Food Science and Technology Thesis. Naresuan University Phitsanulok. 2009. (in Thai)
- [12] Tasanee L, Supawadee T, Noppamas P, Sunisa D. Local wisdom in the production of food products preserved by sugar in the upper central region. Proceedings of 46th Kasetsart University Annual Conference: Education, Humanities and Social Sciences, Economics and Business Administration, Agricultural Extension and Home Economics Bangkok: Kasetsart University. 2008;630-7. (in Thai)
- [13] Thothong S, Kameesak S, Chalaket J, Eakkapan, A, Aonboon P. Physical characteristics of different varieties of *phyllanthus emblica*. Songklanakarin Journal of Plant Science. 2016; 3 Suppl. (III), M10: 13-22. (in Thai)
- [14] Bundit T. Design and fabrication of fruit peeling machine using pneumatics system. Master of Engineering in Agricultural Engineering Thesis. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok. 2012. (in Thai)

การพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ

เรวัฒน์ เต็มกล้า¹, อนิรุตต์ มัทธูจักษ์¹ และธนรัฐ ศรีวีระกุล^{1*}

rewat.term@muti.ac.th¹, A.Matthujak@ubu.ac.th¹, thanarat.s@ubu.ac.th^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Received : 9-Oct-2020
Revised : 19-Oct-2020
Accepted : 2-Nov-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ โดยออกแบบแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ ขนาดพื้นที่ 1.5 ตารางเมตร ใช้ท่อความร้อนทองแดง (Heat Pipe) จำนวน 12 ท่อ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในท่อรวมน้ำ (Manifold) ทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-77 โดยมีเงื่อนไข คือ การเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเข้าแผง 3 ระดับ ได้แก่ อัตราการไหล 40 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผง และประสิทธิภาพของแผงขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่แผงผลิตได้เท่ากับ 53 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวม 6 ชั่วโมงต่อวัน เท่ากับ 3.95 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร และที่อัตราการไหล 80 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวมต่อวัน 3.39 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร แผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 55.61 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าการสูญเสียพลังงานความร้อนของแผง ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.40 วัตต์ต่อตารางเมตร รองลงมาคือที่อัตราการไหล 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 2.60 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 1.63 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าแผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำมีระยะเวลาคืนทุน 1.35 ปี ในขณะที่แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่ขายตามท้องตลาดมีระยะเวลาคืนทุนที่ 2.25 ปี และ 1.54 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ: ท่อความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน รังสีแสงอาทิตย์ แผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

Development of a Low-Cost Heat Pipe Solar Thermal Collector

Rewat Termkla¹, Anirut Matthujak¹ and Thanarath Sriveerakul^{1*}
rewat.term@rmuti.ac.th¹, A.Matthujak@ubu.ac.th¹, thanarat.s@ubu.ac.th^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

Received	: 9-Oct-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 2-Nov-2020

Abstract

The objective of this research is to develop a low-cost heat pipe solar thermal collector. A 1.5 m² flat-plate solar thermal collector equipped with 12 heat pipes as heat transfer elements to the water manifold was designed and tested. The performance of the solar thermal collector was tested following the ASHRAE standard 93-77. The following water flow rates in the manifold were adjusted; 40, 60, and 80 L/hr. The current results show that the water outlet temperature greatly depends on solar radiation intensity and the water flow rate in the manifold. The maximum water outlet temperature of 53°C can be achieved when the water flow rate of 40 L/hr. and average solar radiation of 3.95 kW/m² were applied. A maximum thermal efficiency of 55.61% can be reached when the water flow rate of 80 L/hr. and the average solar radiation of 3.39 kW/m² were applied. From the analysis, the maximum total heat loss of the collector of 3.40 W/m² can be found at the water flow rate of 40 L/hr. followed by the total heat loss of 2.60 W/m² at a water flow rate of 60 L/hr. and 1.63 W/m² at a water flow rate of 80 L/hr., respectively. From the simple economic analysis, a payback period of 1.35 years was obtained for this low-cost heat pipe-solar thermal collector. This is found to be a shorter payback period compared with that of the conventional commercial flat plate solar collector (2.25 years) and the vacuum solar collector (1.54 years).

Keywords: heat pipe, thermal efficiency, solar radiation, solar thermal collector

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ใหญ่ที่สุดและไม่มีวันหมดสิ้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ [1] สำหรับประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรหรืออยู่ในแถบร้อน มีพื้นที่รวมประมาณ 500,000 ตารางกิโลเมตร จะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยค่อนข้างสูงประมาณ 5.05 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบความร้อนได้ [2] การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบผลิตน้ำร้อนปัจจุบันเป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้โดยตรง โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและสามารถลดปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในอาคาร[3] สำหรับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ 1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งประสิทธิภาพในการผลิตน้ำร้อนจะขึ้นอยู่กับเลือกชนิดและขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2) ถังเก็บน้ำร้อน (Storage Tank) ซึ่งต้องมีขนาดที่เหมาะสมโดยจะถูกกำหนดให้เพียงพอต่อการใช้น้ำที่ความจุ น้อยที่สุดที่ประเมินได้ต่อวัน 3) ปัมป์หมุนเวียนน้ำร้อน ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการไหลรวมของระบบ ค่าความดันสูญเสียรวมของระบบท่อและค่าสมรรถภาพการดูดของปั๊ม 4) ระบบท่อน้ำร้อนและอุปกรณ์ ต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับอัตราการไหลและความดันสูญเสียภายในระบบท่อ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปความร้อนโดยใช้อุปกรณ์หลักที่เรียกว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector)

ปัจจุบันนิยมใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ 2 แบบ [4] คือ 1) ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีราคาไม่แพงมากนัก สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำถึงปานกลางหรืออุณหภูมิประมาณ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และ 2) ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบแต่มีราคาสูงกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ผลิตน้ำร้อนที่มี

อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ มีประสิทธิภาพสูงกว่าคือมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่น้อยกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบและภายในหลอดแก้วสุญญากาศยังประกอบไปด้วยท่อความร้อน (Heat pipe) ที่มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การใช้ท่อความร้อน (Heat pipe) มาสร้างเป็นแผงทำน้ำร้อนได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า มีประสิทธิภาพสูงและไวต่อความชื้นแสงอาทิตย์ แต่ที่ผ่านมานักวิจัยพบว่าผู้ใช้งานขาดความรู้และความเข้าใจในพื้นฐานการทำงานของระบบนี้ จึงทำให้การใช้งานระบบดังกล่าวเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่ยั่งยืน

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความนิยมใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศคือราคาลงทุนเบื้องต้นสูง การบำรุงรักษารวมถึงระยะเวลาคุ้มทุน ภายหลังจากติดตั้งมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นหากสามารถลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือใช้วัสดุทดแทนได้ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีราคาถูกแต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงลดการสูญเสียความร้อนในระบบเพื่อเพิ่มความสามารถผลิตน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงได้อันจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมใช้มากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบสำคัญในการผลิตน้ำร้อนคือแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ 2 ชนิดได้แก่ แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบและแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศ [5]

2.1.1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิด

แผ่นเรียบ

แผงเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบส่วนใหญ่ประกอบด้วยแผ่นรับรังสีอาทิตย์ซึ่งใช้แผ่นอลูมิเนียมด้านบนฉาบหรือพันทับด้วยวัสดุที่มีความสามารถดูดกลืนรังสี ด้านบนแผ่นรับรังสีจะเป็นกระจกชนิดโปร่งแสงให้รังสีอาทิตย์ผ่านเข้าไปและยังช่วยลดอัตราการสูญเสียความร้อน

ให้กับสิ่งแวดล้อม บริเวณด้านข้างและด้านล่างจะด้วย
ฉนวนกันความร้อนโดยปิดด้วยกรอบอลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่ง
เพื่อนำสำหรับรับความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ
ส่วนมากนิยมใช้ท่อทองแดงซึ่งมีการเชื่อมต่อกันทั้งด้านบน
และด้านล่าง

2.1.2 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อ

สุญญากาศ

แผงเก็บ รังสีอาทิ ตย ชนิดท่อสุญญากาศ
ประกอบด้วยท่อแก้วใสเรียงเป็นแถวหลายๆ แถว ภายในท่อ
แก้วใสจะมีท่ออีกท่อหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ซึ่งจะถูก
เคลือบด้วยวัสดุพิเศษที่มีคุณลักษณะดูดซับพลังงาน
แสงอาทิตย์ได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี
น้อย สำหรับช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก จะมี
ลักษณะเป็นสุญญากาศ นอกจากนี้จะมีการใช้งานร่วมกับ
ท่อความร้อน (Heat pipe) เพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อนที่
ได้จากแสงอาทิตย์

โดยแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศ
จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแผงเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบซึ่ง
ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ มี
ประสิทธิภาพสูงกว่าคือมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่น้อย
กว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

2.2 ค่าประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector Efficiency)

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำ
ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เราจำเป็นต้องคำนวณประสิทธิภาพ
ของแผงเก็บรังสีอาทิตย์คืออัตราส่วนระหว่างอัตราของความร้อน
ที่มีประโยชน์ (Q_u) ที่ถ่ายโอนโดยการแผ่รังสีแสงอาทิตย์
บนแผง ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้ [6]

$$\eta_{coll} = \frac{\text{Heat energy out}}{\text{Heat energy in}} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

เมื่ออัตราการความร้อนของแผงเก็บรังสีอาทิตย์

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_f C_{cp} (T_{fo} - T_{fi}) \quad (2)$$

จากสมการ (2) แสดงค่าความร้อนถูกดึงออกมา
จากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ในอัตราที่สามารถวัดได้โดยใช้
ปริมาณความร้อนที่ส่งไปยังของเหลวที่ไหลผ่านแผงเก็บรังสี

อาทิตย์และมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับความร้อนที่
แผงเก็บรังสีได้รับ Q_{in} สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$Q_{in} = G_T A_c \quad (3)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพแผงเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{out}}{G_T A_c} \quad (4)$$

2.3 ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)

ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal
Factor, F_R) เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่มี
ประโยชน์จากตัวเก็บรังสีต่อพลังงานความร้อนที่ถ่ายโอน
และถูกดึงโดยของไหลใช้งานในตัวเก็บรังสี ค่า F_R สามารถ
คำนวณได้ดังนี้ [7]

$$F_R = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c (G_T \tau \alpha - U_L (T_{fi} - T_a))} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของไหลเข้าแผง พลังงาน
ที่เป็นไปได้ในแผงเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้นเมื่อได้รับ
การถ่ายเทความร้อน (Q_u) เพื่อให้ได้พลังงานที่มีประโยชน์ที่
เป็นไปได้สูงสุด โดยมีค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (F_R) ซึ่ง
เขียนอยู่ในรูปของอุณหภูมิของของไหลเข้าแผงเก็บรังสี
อาทิตย์ สามารถเขียนสมการที่ (2) ใหม่ดังนี้

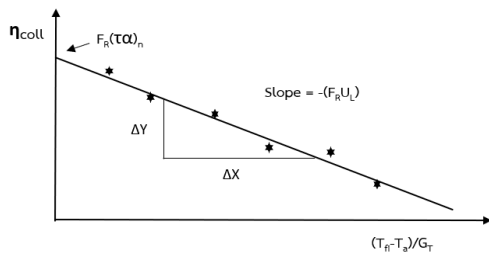
$$\dot{Q}_{out} = A_c F_R [G_T \tau \alpha - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (6)$$

สมการ (6) เป็นความสัมพันธ์ที่ใช้มากที่สุดในการ
คำนวณพลังงานที่สะสมในตัวแผงเก็บรังสีอาทิตย์โดยการ
พิจารณาจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นค่า
ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์สามารถคำนวณจาก

$$\eta_{coll} = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (7)$$

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fo} - T_{fi})}{G_T A_c} \quad (8)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง η_{coll} และ $(T_f - T_a) / G_T$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยที่ค่า $-F_R U_L$ คือความชันซึ่งเป็นเทอมที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียและ $F_R(\tau\alpha)_e$ คือค่าจุดตัดแกน y เป็นตัวชี้ถึงพลังงานที่ถูกดูดกลืน



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $(T_f - T_a) / G_T$

แผงเก็บรังสีที่มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ สูงแสดงว่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีมีค่าสูง ส่วนเทอม $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าตัวเก็บรังสีดังกล่าวป้องกันความร้อนสูญเสียไม่ดีพอ

โดยที่
 Q_u คือ พลังงานที่แผงรับรังสีอาทิตย์ดูดซับได้ (W/m^2)
 F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน
 U_L คือ อัตราการสูญเสียความร้อนรวม (W/m^2)
 A_c คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผงรับรังสีอาทิตย์ (1.5 m^2)

G_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวม W/m^2

T_f คือ อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ เท่ากับ $4.18 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$

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

τ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของฝาครอบกระจก

α คือ ค่าการดูดซับความร้อนของแผ่นดูดซับ

2.4 ต้นทุนการสร้างแผงเก็บรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 1 ตารางต้นทุนตัวเก็บรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนต้นทุนต่ำ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคารวม (บาท)
1	ท่อความร้อน	12	250	3,000
2	ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1	1,500	1,500
3	กรอบอลูมิเนียม	1	450	450
4	แผ่นอลูมิเนียม	1	1,350	1,350
5	ฉนวนใยแก้วกันความร้อน	1	400	400
6	กระจกนิรภัยเทมเปอร์	1	1,200	1,200
7	วัสดุประกอบอื่นๆ	-	300	300
รวม				8,200

2.5 ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์แบบระยะเวลาคืนทุน ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ กับการทำน้ำร้อนด้วยแผงทำความร้อนชนิดอื่นๆ ได้แก่แผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ และแผงทำความร้อนแบบท่อสุญญากาศจากผู้ผลิตดังตารางที่ 2 [8]

ตารางที่ 2 ต้นทุนและประสิทธิภาพแผงทำความร้อนของผู้ผลิต

ประเภท	ผลิตภัณฑ์	ประสิทธิภาพ	มาตรฐานการทดสอบ	($\text{kWh/m}^2/\text{ปี}$)	บาท/ตรม.	น้ำร้อนผลิตได้ ลิตร/ตรม.-ปี	ต้นทุนการผลิต บาท/ลิตร	ประเทศ
Flat	Bermuda	0.38	ASH-REA 93-77	679	10,500	NA	NA	ไทย
Flat	Chromagen	0.71	EN 12975	1,271	11,985	42,359	0.39	อิสราเอล
Flat	GJ(Forefront)	0.76	EN 12975	1,370	12,160	20,305.85	0.599	เดนมาร์ก/เวียดนาม
Flat	Infratech	0.65	EN 12975	1,301	16,429	34,590	0.498	ออสเตรเลีย
Flat	Solar Hart	0.55	ASH-REA 93-77	981	16,432	46,315.96	0.355	นิวซีแลนด์
Flat	Solar Ultra	0.51	ASH-REA 93-77	909	15,360	53,296	0.3	อิสราเอล/อเมริกา
Flat	TSUS	0.51	ASH-REA 93-77	909	11,375	18,994	0.658	ไทย
Vacuum	EnergyOne	0.52	ASH-REA 93-77	938	4,733.14	26,194.12	0.181	ไทย
Vacuum	Heritage	NA	NA	NA	12,000	NA	NA	ไทย
Vacuum	Power Solar	NA	NA	900	9,000	174,383	0.046	ไทย
Vacuum	Prosolar	0.63	EN 12975	1,133	11,000	NA	NA	จีน
Vacuum	Ravotec	0.56	ASH-REA 93-77	1,013	7,500	28,976.57	0.259	ไทย

2.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเก็บรังสี

จากประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์โดยทั่วไป จะอยู่ประมาณ 60% ที่ความเข้มเฉลี่ยรังสีของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ หรือ $5.05 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ ดังนั้นคำนวณพลังงานไฟฟ้าจริงที่ความเข้มรังสีเท่ากับ $10.92 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ หรือ $3 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ จากสมการดังต่อไปนี้

ค่าพลังงานไฟฟ้าแผงเก็บรังสี = พลังงานไฟฟ้าที่แผงเก็บรังสี × อัตราค่าไฟฟ้า × จำนวนวันใช้งานต่อปี (9)

2.7 ระยะคืนทุน (Payback period)

ระยะเวลาคืนทุน (PB) คือจำนวนปีที่กิจการจะได้รับ เงินที่ลงทุนเริ่มแรกของโครงการกลับคืนมา กล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะเวลาที่กระแสเงินสดสะสม (Cumulative cash flows) ของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์โดยคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

ระยะเวลาคืนทุน = ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก/ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี (10)

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

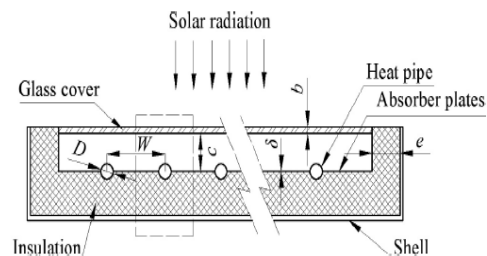
การออกแบบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำและชุดทดลอง จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน (2 Parts) โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำ (Part 1)

แผงเก็บรังสีอาทิตย์ ออกแบบให้เป็นแบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน (Flat plate heat pipe solar collector) มีขนาดพื้นที่ดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ 1.5 ตารางเมตร แผ่นดูดรังสีอาทิตย์ (Absorber Plate) เป็นครีบอลูมิเนียมเคลือบด้วยสารดูดซับความร้อน บริเวณกลางครีบบีท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นท่อทองแดง จำนวน 12 แท่ง (ดังรูปที่ 2) สวมอยู่กับท่อรวมน้ำเข้าสู่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ด้านล่างและด้านข้างของแผงมีฉนวนกันความร้อน ส่วนด้านบนของแผงมีฝาปิดโปร่งแสงซึ่งเลือกใช้กระจกใส (Glass cover)

เมื่อแผงได้รับรังสีจากแสงอาทิตย์ เกิดความร้อนถ่ายเทให้กับสารทำงานภายในท่อความร้อน ส่งผลให้สาร

ทำงานเดือดเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนบริเวณส่วนควบแน่นที่ต่อเข้ากับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Manifold) และกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านล่างของท่อเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง มิติของขนาดพื้นที่ของต้นแบบแผงเก็บรังสีอาทิตย์แสดงในตารางที่ 3



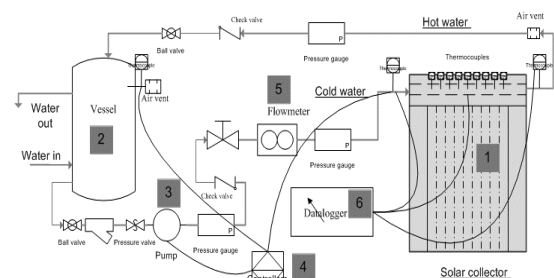
รูปที่ 2 ขนาดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 3 Detailed specifications fabricated solar collector

Description	Symbol	Size (mm)
Length of the heat pipe	L	1,700
Tube center to center distance	W	75
Diameter of the heat pipe	D	8
Heat pipe wall thickness	S	1
Thickness of the insulate	e	50
Thickness of the absorber plate	δ	0.9
Thickness of the glass cover	b	5
Distance of absorber plat to glass cover	c	45

3.1.2 ชุดทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Part 2)

1). ส่วนประกอบของชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ส่วนประกอบชุดทดลองระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตำแหน่งที่ 1 แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน

ตำแหน่งที่ 2 ถังเก็บน้ำร้อน

ตำแหน่งที่ 3 ปั๊มน้ำ

ตำแหน่งที่ 4 ชุดควบคุมระบบการทำงาน

ตำแหน่งที่ 5 ระบบวาล์ว เกจและอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ

ตำแหน่งที่ 6 เครื่องวัดอุณหภูมิและบันทึกข้อมูล

3.2 การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

3.2.1 มาตรฐานและเงื่อนไขการ

ทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ใช้มาตรฐาน ASHARE (American Society of Heating Refrigerating and Air - conditioning Engineers) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบของแผงรับรังสีอาทิตย์และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบตามตารางที่ 4 [9]

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ

รายการทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ		
	EN 12975	ASHRAE 93-77	ISO 9806
ความเข้มแสงเฉลี่ย (W/m^2)	≥ 700	≥ 790	≥ 800
ความเข้มแสงสามารถแผ่รังสีในช่วง (W/m^2)	50	32	50
อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)	-	30	-
ความเร็วลม (m/s)	3 ± 1	2.0-4.5	2-4
อัตราการไหล (kg/s-m^2)	0.02	0.02	0.02

ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบกลางแจ้งและทำการบันทึกผลและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a), อุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีอาทิตย์ (T_{fi}), อุณหภูมิน้ำออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ (T_{fo}), ค่ารังสีอาทิตย์ (G_T) และอัตราการไหลของน้ำ ($\dot{m}_p$) นำผลข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนและการสูญเสียความร้อนรวมของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ดังสมการที่ 5

3.3 วิธีการทดสอบ

ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เป็นการทดสอบ

กลางแจ้ง ตั้งแต่เวลา 09.00-15.00 น. โดยปรับให้แผงเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมเอียง 15 องศา และหันด้านรับแสงไปทางทิศใต้ เมื่อน้ำเข้าระบบปรับอัตราการไหลที่อัตรา 40 60 และ 80 L/hr. โดยอ่านค่าจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลจนกระทั่งมีอัตราการไหลของน้ำคงที่ บันทึกข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ทุกๆ 30 นาที ตลอดการทดลอง นำผลการทดลองมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามสมการที่ 8

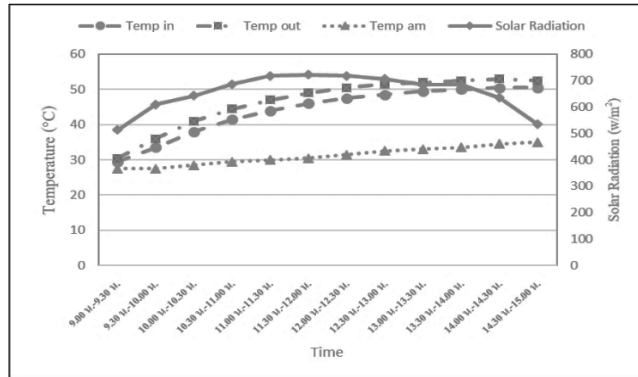


รูปที่ 4 ชุดทดสอบแผงเก็บรังสีอาทิตย์

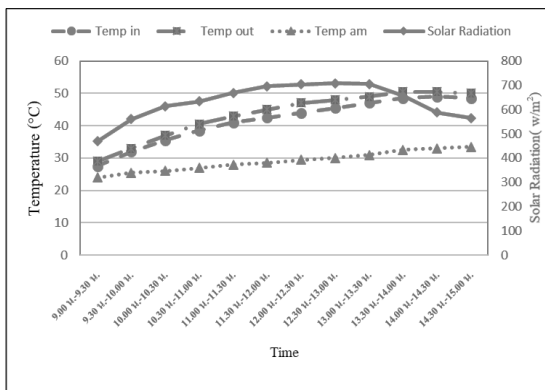
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำที่ผลิตได้จากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

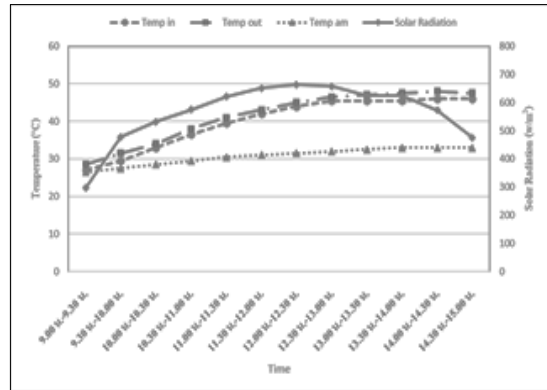
การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์โดยการผลิตน้ำร้อนจากชุดทดลองระบบปิดโดยใช้ปั๊มหมุนเวียนขนาดเล็ก ได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ตามจุดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดกับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ที่ช่วงเวลา 09.00 น. - 15.00 น. และอัตราการไหลของน้ำ 40 60 และ 80 L/hr. แสดงดังรูปที่ 3



(a) น้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr.



(b) น้ำที่อัตราการไหล 60 L/hr.



(c) น้ำที่อัตราการไหล 80 L/hr.

รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์กับอุณหภูมิที่จุดวัด

จากรูปที่ 5 (a) ที่อัตราการไหล 40 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (T_{am}) 31°C มีอุณหภูมิน้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) 29.5°C และมีอุณหภูมิน้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ 53°C รูปที่ 5 (b) ที่อัตราการไหล 60 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 620 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (T_{am}) 29°C มีอุณหภูมิน้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) 27.5°C และมีอุณหภูมิ น้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ 50.5°C และ รูปที่ 5 (c) ที่อัตราการไหล 80 L/hr. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 564 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย (T_{am}) 31°C มีอุณหภูมิน้ำเข้าในระบบเริ่มต้น (T_{in}) 27.5°C และมีอุณหภูมิ น้ำออกจากแผงสูงสุด (T_{out}) เท่ากับ 48°C

จากข้อมูลพบว่า ตลอดช่วงเวลาระหว่างวันของการทดลอง อุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิที่วัดได้อยู่ในช่วงประมาณ $24\text{--}35^\circ\text{C}$ และเนื่องจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากความเข้มรังสีอาทิตย์ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่ทางออกของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เท่ากับ 53°C ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m^2

4.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

4.2.1 ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์

การประเมินประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์สามารถคำนวณจากสมการที่ 8 โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{coll}}{G_T A_c} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{fi} - T_{fo})}{G_T A_c}$$

โดยที่

A_c คือ พื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของแผงรับรังสีอาทิตย์ (1.5 m²)

G_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรวม W/m²-day ทดสอบ 6 ชั่วโมงต่อวัน

T_{fi} คือ อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผงเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ เท่ากับ 4.18 kJ/kg·°C

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

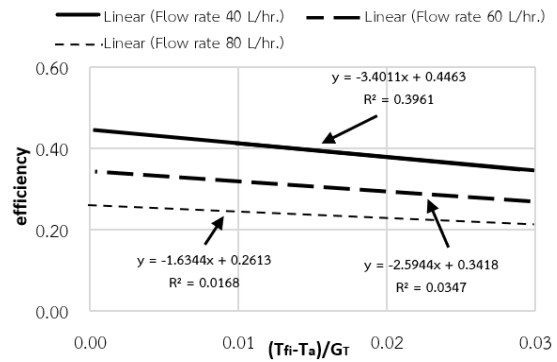
ทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 40 60 และ 80 L/hr. เวลาทดสอบทั้งหมด 6 ชั่วโมง มีข้อมูลดังตารางที่ 5 ได้ผลประสิทธิภาพดังนี้

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์

อัตราการไหล ($\dot{m}_f$)		ความเข้มรังสี (G_T)	อุณหภูมิน้ำ (°C)		ประสิทธิภาพ (%)
(L/hr.)	(kg/s)		(T_{fi})	(T_{fo})	
40	0.017	3.95	29.5	53	28.33
60	0.025	3.79	27.5	50.5	42.33
80	0.033	3.39	27.5	48	55.61

ผลการคำนวณประสิทธิภาพแผงเก็บรังสีอาทิตย์พบว่า ที่อัตราการไหล 80 L/hr. แผงเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% รองลงมา คือที่อัตราการไหล 60 และ 40 L/hr. คำนวณได้ประสิทธิภาพ 42.33% และ 28.33% จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของแผงเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของแผงทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สอดคล้องกับสมการที่ 4

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง η_{coll} และ $(T_{fi} - T_a) / G_T$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเส้นตรงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} กับ $(T_{fi} - T_a) / G_T$ ที่อัตราการไหล 40,60,80 L/hr.

โดยที่ค่า $-F_R U_L$ และ $F_R (\tau\alpha)_e$ จากผลการทดสอบทั้ง 3 อัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่า $-F_R U_L$ และ $F_R (\tau\alpha)_e$ จากผลการทดสอบ

อัตราการไหล ($\dot{m}_f$)		$-F_R U_L$	$F_R (\tau\alpha)_e$	R^2
(L/hr.)	(kg/s)			
40	0.017	3.4011	0.45	0.3961
60	0.025	2.5944	0.34	0.0347
80	0.033	1.6344	0.26	0.0168

จากตารางที่ 6 อัตราการไหล 40 L/hr. มีค่าการส่งผ่านค่าดูกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีสูงที่สุด โดยที่อัตราการไหล 80 L/hr. มีค่าการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด

4.3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

4.3.1 ระยะเวลาคืนทุน

ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเก็บรังสีจากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าจริงที่ความเข้มรังสีเท่ากับ 10.92 MJ/m²-day หรือ 3 kWh/m²-day ตามสมการที่ 9 จากพื้นที่แผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์เท่ากับ 1.5 m² ดังนั้น อัตราค่าไฟฟ้า 3.7171 บาท/kWh และจำนวนวันใช้งานต่อปี เท่ากับ 365 d/y ค่าพลังงานไฟฟ้าตัวเก็บรังสีเท่ากับ 6,105.34 บาท/ปี

ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนของแผงทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบแบบต้นทุนต่ำ จากต้นทุนแผงทำความร้อนในตารางที่ 1 เท่ากับ

ระยะเวลาคืนทุน = $(8,200 \text{ บาท}) / (6,105.34 \text{ บาท/ปี})$ เท่ากับ 1.35 ปี หรือ 1 ปี 4 เดือน

4.3.2 เปรียบเทียบแผนทำความร้อน

จากรูปที่ 2 แสดงราคาแผงทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัทต่างๆ ทั้งแผนทำความร้อนแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศ เมื่อเฉลี่ยราคาแผงทำความร้อนแบบแผ่นเรียบ พบว่า ราคาต้นทุนของแผงเฉลี่ยทั้ง 7 บริษัท เท่ากับ 13,463 บาท/ตารางเมตร และแผนทำความร้อนแบบท่อสุญญากาศ 5 บริษัท มีราคาเฉลี่ย 8,847 บาท/ตารางเมตร จากข้อมูลดังกล่าวนำมาคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน ได้ดังนี้

ระยะเวลาคืนทุนแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ = $(13,463 \text{ บาท}) / (6,105.34 \text{ บาท/ปี})$ เท่ากับ 2.25 ปี หรือ 2 ปี 3 เดือน

ระยะเวลาคืนทุนแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ = $(8,847 \text{ บาท}) / (6,105.34 \text{ บาท/ปี})$ เท่ากับ 1.54 ปี หรือ 1 ปี 6 เดือน

ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าแผนทำความร้อนที่สร้างขึ้นมีต้นทุนเท่ากับ 7,900 บาทต่อตารางเมตร ถูกกว่าแผนทำความร้อนเดิมที่อยู่ในท้องตลาด สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้ที่ 1 ปี 4 เดือน ระยะเวลาสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผนทำความร้อนแบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่มีระยะเวลาคืนทุนได้ที่ 2 ปี 3 เดือน และ 1 ปี 6 เดือน ตามลำดับ

5. สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาแผนทำความร้อนออกแบบให้เป็นแผนทำความร้อนแบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อน (Flat plate heat pipe solar collector) มีขนาดพื้นที่ ดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ 1.5 ตารางเมตร การทดสอบแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์เป็นการทดสอบแบบกลางแจ้งตั้งแต่เวลา 09.00-15.00 น. โดยปรับให้แผงเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมเอียง 15 องศา และหันด้านรับแสงไปทางทิศใต้ เมื่อน้ำเข้าระบบปรับอัตราการไหลที่อัตรา 40 60 และ 80 L/hr.

ผลการทดสอบตลอดช่วงเวลาระหว่างวันของการทดลอง อุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิแวดล้อมที่วัดได้อยู่ในช่วงประมาณ 24-35 °C เนื่องจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากความเข้มรังสีอาทิตย์

ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีอุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่ทางออกของแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เท่ากับ 53 °C ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบเท่ากับ 658 W/m² และที่อัตราการไหล 80 L/hr. แผงเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% รองลงมา คือที่อัตราการไหล 60 และ 40 L/hr. คำนวณได้ประสิทธิภาพ 42.33% และ 28.33% โดยค่าการสูญเสียพลังงานความร้อนของแผงเก็บรังสีอาทิตย์ ที่อัตราการไหล 40 L/hr. มีความมากที่สุดเท่ากับ 3.40 W/m² รองลงมาคือที่อัตราการไหล 60 และ 80 L/hr. มีค่าเท่ากับ 2.60 W/m² และ 1.63 W/m² ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าแผนทำความร้อนพลังงานอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.35 ปี ในขณะที่แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและแบบสุญญากาศที่ขายตามท้องตลาดมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยที่ 2.25 ปีและ 1.54 ปี ตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ประสิทธิภาพของแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้า ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพแผนทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัทผู้จำหน่ายอื่นๆ พบว่าแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.61% ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพดีกว่าบางบริษัทที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 76% (ดังตารางที่ 2) แต่หากเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น มีราคาถูกและมีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่าแผนทำความร้อนของบริษัทอื่น ซึ่งแผนทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในครัวเรือนหรือที่อยู่อาศัยรวมถึงความสะดวกในการบำรุงรักษาและชิ้นส่วนอะไหล่ที่สามารถหาได้ทั่วไปโดยไม่ต้องลงทุนซื้ออุปกรณ์ เช่น หลอดแก้วสุญญากาศ ที่มีราคาแพงดังเช่นในปัจจุบัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ที่คอยให้คำปรึกษาและสนับสนุนให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Promnamchum S, Nuanplub K, Plangklang B, Biancoongnem S. Measurement and display system for solar radiation. Journal of Engineering RMUTT.2007;10(2):87-92. (in Thai)
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Solar water heater (Hybrid Solar water heater system) Ministry of Energy. [Internet]. 2013 [cited 2020 Jan 25]. Available from: <http://www.tsus.co.th/download/d4.pdf>. (in Thai)
- [3] O'Hegarty R, Kinnane O, McCormack S. Parametric analysis of concrete solar collectors. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. Energy Procedia. 2016;91:954-62.
- [4] Sukchai S, Suriwong T, Chamsa-ard W, Sonsaree S, Laodee P. The development of flat plate solar collector integrated with compound parabolic concentrator (CPC). [Research]. School of Renewable Energy Technology: Naresuan University; 2013. (in Thai)
- [5] Sirisamphanwong C, Ngoenmeesri R, Ketjoy N, Chamsa-ard W. Determination of annual energy yield of solar collector. Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST). 2013;20(1):16-23. (in Thai)
- [6] Nshimyumuremyi E, Junqi W. Thermal efficiency and cost analysis of solar water heater made in Rwanda. Energy Exploration & Exploitation 2019;37(3):1147-61
- [7] Struckmann F. Analysis of a flat-plate solar collector. Project Report 2008-MVK160. Heat and Mass Transport. [Internet]. Lund, Sweden. [cited 2020 May 25]. Available from: http://www.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/Project_08/Fabio.pdf
- [8] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Project to promote the use of hot water from solar energy with an integrated system, 3rd. Ministry of Energy. [Internet]. 2012. [cited 2020 Jan 15]. Available from: <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files>. (in Thai)
- [9] Ashrea Standard 93-77. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. New York: The American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 1978.

การเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไคเร็กซ์บนผ้าฝ้ายด้วยโอโซน

พิชิตพล เจริญทรัพย์ยานันท์^{1*}, รวิภา ธรรมรงค์¹ และธนวัฒน์ สิทธิประสงค์¹

phichitpholj@mutp.ac.th^{1*}, ravipa-t@mutp.ac.th¹, thanawat-si@mutp.ac.th¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Received : 9-Jul-2020
Revised : 22-Dec-2020
Accepted : 25-Dec-2020

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการย้อมสีเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมลพิษทางน้ำสูง เนื่องจากมีสีและสารช่วยย้อมเหลืออยู่ในน้ำทิ้งปริมาณมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไคเร็กซ์บนผ้าฝ้ายด้วยโอโซน โดยศึกษาภาวะในการกระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซน ได้แก่ ปริมาณโอโซน เวลาในการกระตุ้น และภาวะการย้อมสี เช่น ปริมาณโซเดียมซัลเฟต อุณหภูมิและเวลาในการย้อม ผลการศึกษาพบว่า การกระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซนก่อนการย้อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสี Ambidirect Red 8BL 180 % และ Direct Yellow S-XF บนผ้าฝ้ายได้ โดยกระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซนปริมาณ 10-30 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที สามารถย้อมบนผ้าฝ้ายได้โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ในการย้อมลงได้ร้อยละ 50 ลดอุณหภูมิลงได้ 40°C และลดเวลาลงได้ 20 นาที เนื่องจากมีค่าการติดสีสูงกว่าการย้อมแบบไม่กระตุ้นน้ำสี ผลการทดสอบความคงทนของสีพบว่า ไม่มีผลต่อความคงทนของสีต่อการขัดถูทั้งสภาวะเปียกและแห้ง ความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาดลดลง

คำสำคัญ : โอโซน ประสิทธิภาพการย้อม สีไคเร็กซ์

Improvement of Dyeing Efficiency of Direct Dyes on Cotton Fabric with Ozone

Phichitphol Jaroensappayanant^{1*}, Ravipa Thammamong¹ and Thanawat Sittiprasong¹

phichitphol.j@rmutp.ac.th^{1*}, ravipa-t@rmutp.ac.th¹, thanawat-si@rmutp.ac.th¹

¹Department of Textile Chemical Technology, Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala

University of Technology Phra Nakhon

Received	: 9-Jul-2020
Revised	: 22-Dec-2020
Accepted	: 25-Dec-2020

Abstract

Dyeing industry release high water pollution. Because of, there are a lot of dyestuffs and auxiliary remain in waste water which affect directly to the environment. The aim of this research is improvement of dyeing efficiency of direct dye on cotton fabric with ozone. The stimulate conditions such as ozone quantity, stimulation time and dyeing conditions such as sodium sulfate quantity, dyeing temperature and time were study. The result was found that stimulation of dye liquor with ozone before dyeing can enhance dyeing efficiency of Ambidirect Red 8BL 180% and Direct Yellow S-XF. Stimulation with ozone 10-30 milligram per hour, at room temperature, for 10 minute. Then dyeing on cotton fabric by use 20 g/l sodium sulfate, at 60 °C, for 20 minute. Indicate that, stimulation with ozone decrease sodium sulfate 50%, dyeing temperature 40°C and time 20 minute. Because of higher K/S value. Color fastness testing was indicate that not effect to clocking fastness both dry and wet condition. Tearing strength also decrease.

Keyword : Ozone, Dyeing efficiency, Direct dyes

1. บทนำ

สีไดเรกต์สามารถยึดเกาะกับผ้าฝ้ายได้โดยตรงผลิตและจำหน่ายในรูปแบบเกลือโซเดียมของกรดซัลฟอนิก ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง การย้อมสีไดเรกต์บนผ้าฝ้ายต้องใช้เกลือโซเดียมซัลเฟตปริมาณมาก ทำให้มีปริมาณเกลือเหลืออยู่ในน้ำมากเช่นกัน ซึ่งส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไดเรกต์ด้วยวิธีการต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณเกลือในการย้อม[1]

โอโซนหรือไตรออกซิเจน เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอมเกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซออกซิเจน 1 โมเลกุล กับออกซิเจนอิสระ 1 อะตอม มีสูตรโมเลกุลเป็น O_3 สถานะเป็นก๊าซ เมื่อสลายตัวให้ก๊าซออกซิเจน 1 โมเลกุล กับ ออกซิเจนอิสระ 1 อะตอม ซึ่งออกซิเจนอิสระจะไปออกซิไดส์สารประกอบที่มีสีให้กลายเป็นไม่มีสี หรือไปกระตุ้นหมู่เคมีให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น[2]

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังไม่มีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไดเรกต์โดยการกระตุ้นด้วยโอโซน แต่มีข้อมูลงานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องการใช้โอโซนในการบำบัดสีในน้ำทิ้ง เช่น การบำบัดสีอะโซในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยโอโซน[3] การทำลายโครงสร้างสีดิสเพอร์สโดยการออกซิเดชันทางเคมีด้วยโอโซนไฮโปคลอไรท์ และเพนตัน รีเอเจนท์ ($H_2O_2 + Fe^{2+}$) เปรียบเทียบกับกระบวนการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมี[4] และการเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไดเรกต์โดยการดัดแปรประจุบนผิวผ้าด้วยสารประจุบวก เช่น ศึกษาพฤติกรรมการย้อมผ้าฝ้ายประจุบวกด้วยสีไดเรกต์ โดยการตกแต่ง 3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล ไตรเมธิลแอมโมเนียม คลอไรด์(CHPTAC)[5] การปรับปรุงพฤติกรรมการย้อมสีไดเรกต์บนผ้าฝ้ายโดยใช้สารพอลิแคทไอออนิก[6] ศึกษาสมบัติการดูดซึมสีไดเรกต์บนผ้าฝ้ายฟอกขาวและผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารประจุบวก(Cibafix WFF)[7] ผลของการดัดแปรประจุบนผ้าฝ้ายโดยใช้สารประจุบวก(Chromatech 9414) ต่อสมบัติการย้อมสีไดเรกต์[8]

2. วิธีการทดลอง

กระตุ้นน้ำสีไดเรกต์ด้วยโอโซน โดยเตรียมน้ำสีไดเรกต์ Ambidirect Red 8BL 180% และ Direct Yellow S-XF ที่ 1 %stock บรรจุในขวดพลาสติกใสจุ่มหัวปล่อยโอโซนลงในน้ำสี กระตุ้นด้วยโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน(OZZON OZ-582A) ใช้ปริมาณโอโซน 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง นาน 10 20 30 และ 40 นาที ดังรูปที่ 1



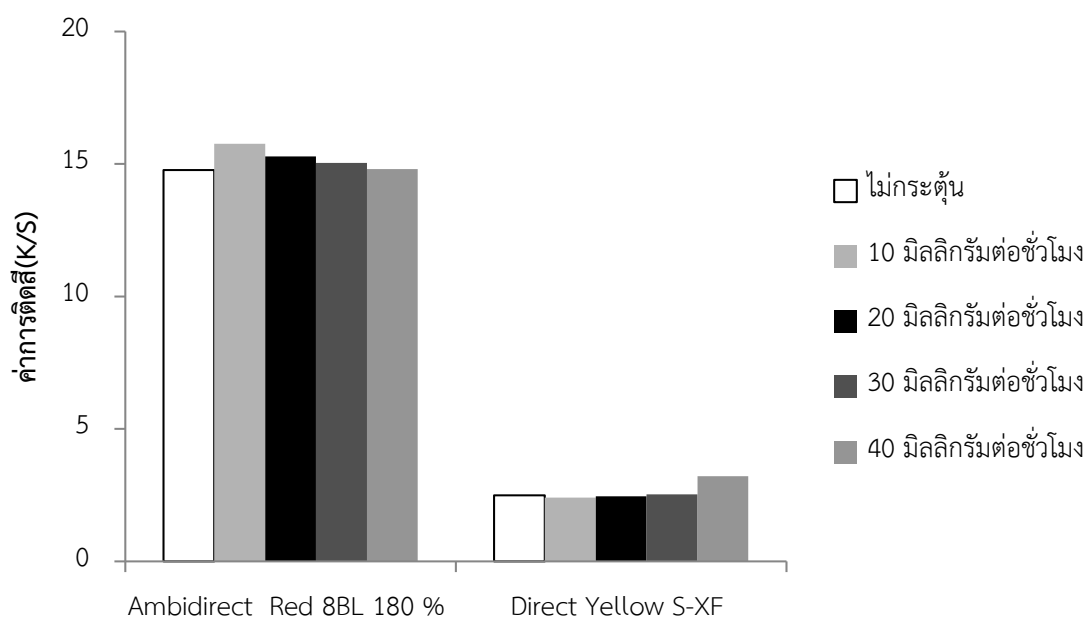
รูปที่ 1 การกระตุ้นน้ำสีไดเรกต์ด้วยโอโซน

ย้อมสีไดเรกต์ทั้งที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยโอโซนบนผ้าฝ้ายทอหลายขีดน้ำหนัก 127 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้สีไดเรกต์ 4 %owf โซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที ด้วยเครื่องย้อมตัวอย่างอัตโนมัติ(AHIBA NUANCE) ประเมินผลโดยการวัดค่าการติดสี(K/S) ด้วยเครื่องวัดความแตกต่างของสี(Spectraflash SF600+) จากนั้นทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการย้อมคือ ปริมาณโซเดียมซัลเฟต 10 20 30 และ 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส เวลา 20 30 และ 40 นาที โดยย้อมทั้งแบบกระตุ้นและไม่กระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซน สุดท้ายทดสอบสมบัติความคงทนของสีต่อการขัดถูตามมาตรฐาน ISO 105-X12 (2001) โดยใช้เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู(Crock Meter Type Rubbing Tester) และทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอตามมาตรฐาน ASTM D 1424(1996) ด้วยเครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาด

(Elmendorf Tearing Tester 1653) นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับ การย้อมสีไคเรกท์บนผ้าฝ้ายโดยไม่กระตุ้นน้ำสีด้วย โอโซน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไคเรกท์บนผ้าฝ้ายด้วยโอโซน โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการ กระตุ้นน้ำสี และภาวะที่เหมาะสมในการย้อมสีไคเรกท์ที่ ผ่านการกระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซนที่กล่าวมาในการวิธีการ ทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยปริมาณโอโซน และเวลาในการกระตุ้น ปริมาณโซเดียมซัลเฟต อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการย้อมสีไคเรกท์ที่ผ่านการกระตุ้น ด้วยโอโซน ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 2 ค่าการติดสี(K/S) ของการหาปริมาณโอโซนที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำสีไคเรกท์

สำหรับเวลาที่ต่างกันที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำสีไคเรกท์พบว่า ให้ค่าการติดสี(K/S) ดีกว่าการย้อมแบบไม่ กระตุ้นน้ำสี และไม่มีผลต่อความสว่าง-ทึบ(L*) ของสีไคเรกท์ ทั้ง 2 สี เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นน้ำสีตั้งแต่ 10-40 นาที ทำให้ค่าการติดสี(K/S) เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยดังรูปที่ 3 และเวลาในการกระตุ้นน้ำสีที่เหมาะสมที่สุดของสี Ambidirect Red 8BL 180 % และ Direct Yellow S-XF คือ 10 และ 40 นาที ตามลำดับ

3.1 ค่าการติดสี(K/S) และความสว่าง-ทึบ(L*)

ของสี

จากผลการทดลองย้อมสีไคเรกท์ที่ผ่านการ กระตุ้นน้ำสีด้วยโอโซนทั้ง 2 สี โดยใช้ปริมาณโอโซนในการ กระตุ้นต่างกันพบว่า ให้ค่าการติดสี(K/S) ดีกว่าการย้อมสีไคเรกท์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นน้ำสี โดยไม่มีผลต่อความสว่าง-ทึบ (L*) ของสี และเมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนตั้งแต่ 10-40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ทำให้ค่าการติดสี(K/S) เปลี่ยนแปลงไป เล็กน้อยดังรูปที่ 2 และพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมที่สุด สำหรับสี Ambidirect Red 8BL 180 % และ Direct Yellow S-XF คือ 10 และ 40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

การปรับปรุงกระบวนการย้อมสีไคเรกท์ โดย ศึกษาปริมาณโซเดียมซัลเฟต อุณหภูมิ และเวลาในการย้อม ที่แตกต่างกันพบว่า ให้ค่าการติดสี(K/S) ดีกว่าการย้อมแบบ ไม่กระตุ้นน้ำสี แต่ทำให้ค่าความสว่าง-ทึบ(L*) ของสีลดลง เล็กน้อยทั้ง 2 สี และเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลเฟตตั้งแต่ 10-40 กรัมต่อลิตร ค่าการติดสี(K/S) ของสี Ambidirect Red 8BL 180 % ลดลงและ Direct Yellow S-XF เพิ่มขึ้น สำหรับอุณหภูมิการย้อมเมื่อเพิ่มจาก 60-100 องศา

เซลเซียส ค่าการติดสี(K/S) ของสี Ambidirect Red 8BL 180 % ลดลง แต่สี Direct Yellow S-XF เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลาในการย้อมจาก 20-50 นาที ค่าการติดสี(K/S) ของสี Ambidirect Red 8BL 180 % ลดลง แต่สี Direct Yellow S-XF เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-6 ภาพการย้อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสี Ambidirect Red 8BL 180 % ที่ผ่านการกระตุ้นน้ำสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ โซเดียมซัลเฟต 10 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที และภาพการย้อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสี Direct Yellow S-XF ที่ผ่านการกระตุ้นน้ำสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ โซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 50 นาที

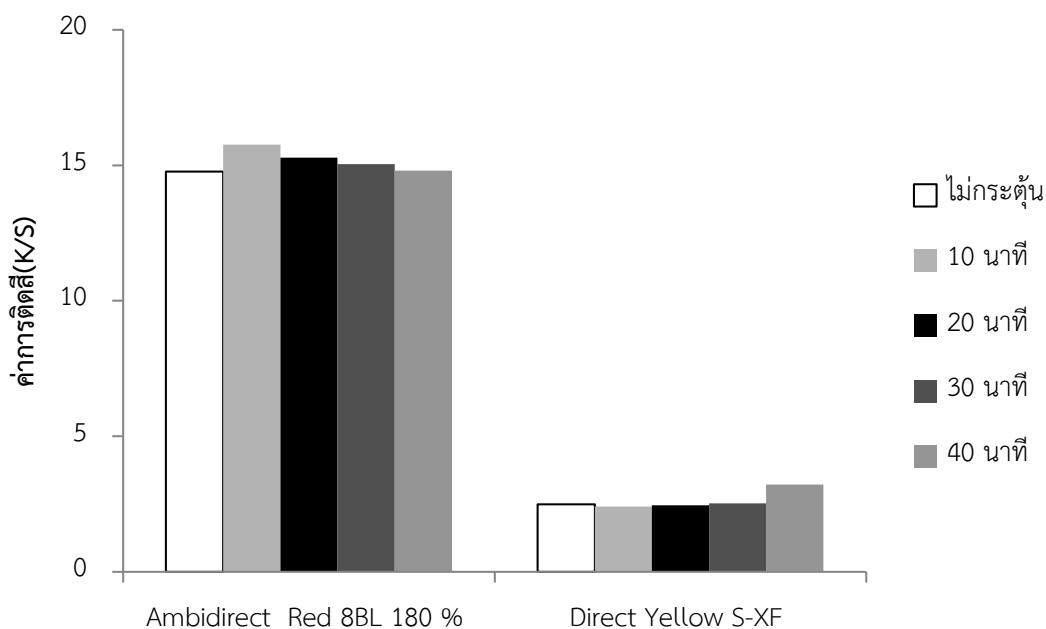
3.2 ความคงทนของสีต่อการซัก

จากการทดลองย้อมสีโดยตรงที่ผ่านการกระตุ้นน้ำสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทั้ง 2 สี เมื่อนำมาทดสอบความคงทนของสี

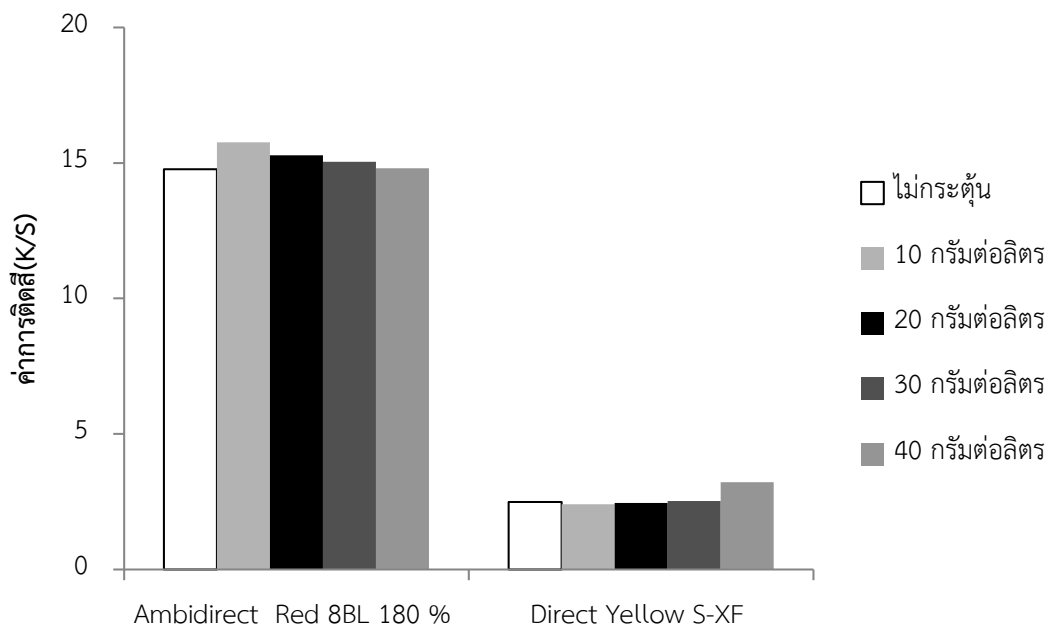
ต่อการซัก พบว่ามีความคงทนของสีต่อการซักที่เทียบเท่ากับการย้อมโดยไม่กระตุ้นน้ำสี ดังตารางที่ 1

3.3 ความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาด

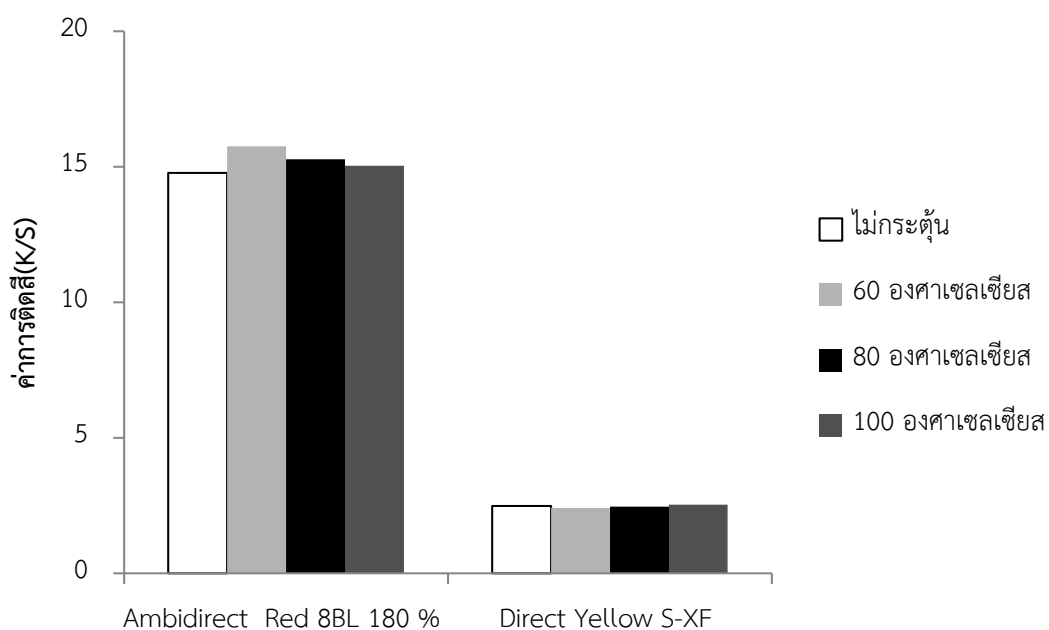
จากการทดลองย้อมสีโดยตรงที่ผ่านการกระตุ้นน้ำสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทั้ง 2 สี เมื่อนำมาทดสอบความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาด พบว่าความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาดลดลงทั้งแนวเส้นด้ายพุ่งและแนวเส้นด้ายยืน ดังตารางที่ 2 โดยผ้าฝ้ายที่ย้อมสี Ambidirect Red 8BL 180% ความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาดในแนวเส้นด้ายพุ่งและแนวเส้นด้ายยืนลดลงร้อยละ 22.00 และ 19.62 ตามลำดับ สำหรับผ้าฝ้ายที่ย้อมสี Direct Yellow S-XF ความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาดในแนวเส้นด้ายพุ่งและแนวเส้นด้ายยืนลดลงร้อยละ 7.27 และ 7.52 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นกระบวนการออกซิเดชัน ผ้าฝ้ายไม่ทนต่อกระบวนการออกซิเดชัน จึงทำให้ความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาดลดลง



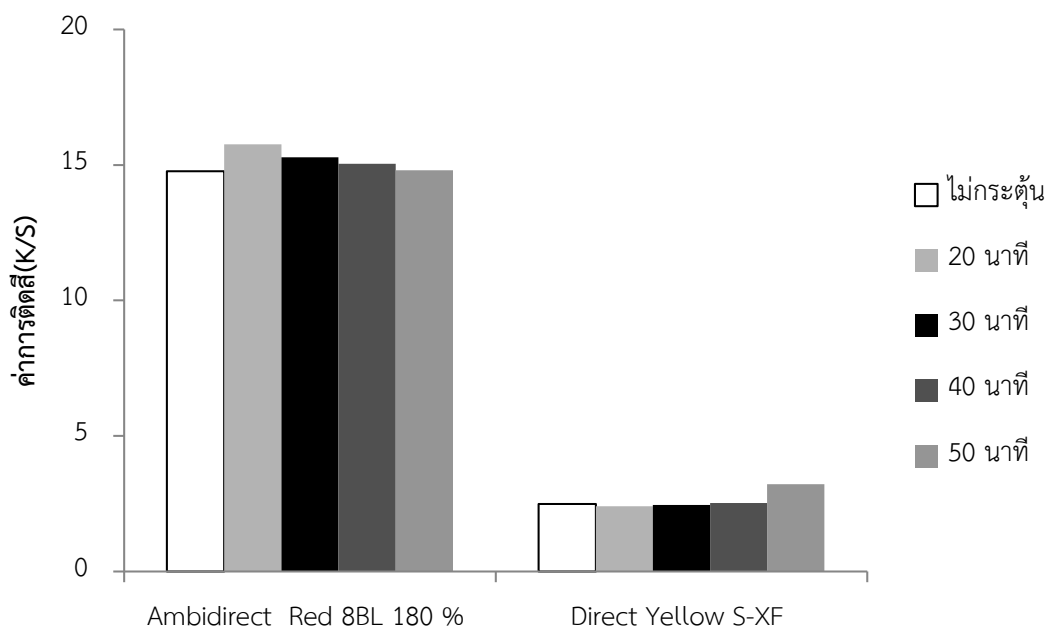
รูปที่ 3 ค่าการติดสี(K/S) ของการหาเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำสีโดยตรงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4 ค่าการติดสี(K/S) ของการหาปริมาณโซเดียมซัลเฟตในการย้อมสีไคเรกซ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอโซน



รูปที่ 5 ค่าการติดสี(K/S) ของการหาอุณหภูมิในการย้อมสีไคเรกซ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอโซน



รูปที่ 6 ค่าการติดสี(K/S) ของการหาเวลาในการย้อมสีไคเรกท์ที่ผ่านการกระตุ่นด้วยโอโซน

4. สรุป

จากผลการทดลองย้อมสีไคเรกท์ทั้ง 2 สี บนผ้าฝ้ายโดยใช้โอโซนกระตุ่นน้ำสี พบว่าปริมาณโอโซน 10 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ่นน้ำสี Ambidirect Red 8BL 180 % และสามารถย้อมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที และปริมาณโอโซน 40 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ่นน้ำสี Direct Yellow

S-XF และสามารถย้อมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 50 นาที เนื่องจากให้ค่าการติดสี(K/S) สูงกว่าการย้อมแบบไม่กระตุ่นน้ำสี มีความคงทนของสีต่อการขัดถูใกล้เคียงกับการย้อมแบบไม่กระตุ่นน้ำสี แต่ทำให้ความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าลดลง สรุปได้ว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย้อมสีไคเรกท์บนผ้าฝ้ายโดยใช้โอโซนกระตุ่นน้ำสีได้ โดยสามารถลดภาวะการย้อมคือ ลดปริมาณโซเดียมซัลเฟตลงได้ร้อยละ 50 ลดอุณหภูมิได้ 40 องศาเซลเซียส และลดเวลาได้ 20 นาที

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู

สีไคเรกท์	ภาวะการย้อม	ค่าการติดเปื้อนสี			
		ภาวะแห้ง		ภาวะเปียก	
		แนว้ายยืน	แนว้ายพุ่ง	แนว้ายยืน	แนว้ายพุ่ง
Ambidirect Red 8BL 180%	ไม่กระตุ่น	4/5	4/5	4	4
	กระตุ่น	4	4	3/4	4
Direct Yellow S-XF	ไม่กระตุ่น	4/5	4/5	4	3/4
	กระตุ่น	4/5	4/5	4/5	4/5

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาด

สีไทดเรกซ์	ภาวะการย้อม	ค่าความคงทนของผ้าต่อแรงฉีกขาด (มิลลินิวตัน)			
		เส้นด้ายพุ่ง	ร้อยละ	เส้นด้ายยืน	ร้อยละ
Ambidirect Red 8BL 180%	ไม่กระตุ้น	833.33		866.67	
	กระตุ้น	650.00	-22.00	696.67	-19.62
Direct Yellow S-XF	ไม่กระตุ้น	550.00		576.67	
	กระตุ้น	510.00	-7.27	533.33	-7.51

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีอย่างสมบูรณ์ โดยได้รับการสนับสนุนสีไทดเรกซ์จาก บริษัท ไทยอัมบริก้า เคมีคัลส์ จำกัด บริษัท สหกรกิจ จำกัด ได้รับความความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ รวมทั้งห้องปฏิบัติการย้อมและการทดสอบ จากสาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Textile Technology, Thailand Textile Institute. Document of textile dyeing and bleaching technology : direct dyes. 2000. (in Thai)
- [2] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Ozone chemical allotrope. [Internet]. 2019 [cited 2019 Nov 29]. Available from: <http://www.britannica.com/science/ozone>.
- [3] Liakou S, Komaros M, Lyberatos G. Pretreatment of azo dyes using ozone. Water Science and Technology. 1997;36(2-3):155-63.
- [4] Szpyrkowicz L, Juzzolino C, Kaul SN. A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and Fenton reagent. Water research. 2001;35(9):2129-36.
- [5] Draper SL, Beck KR, Smith CB. Characterization of the dyeing behavior of cationic cotton with direct dyes. AATCC Review. 2002 Oct 1;2(10).
- [6] Jaroensappayanant P, Sonthisombat A. An application of polycationic agent to improve the dyeing behaviour of direct dyes on cotton fabric. Journal of Engineering, RMUTT. 2008;11(6):9-15. (in Thai)
- [7] Khanjani Y, Farizadeh K, Ahmadi S. Improve of direct dye (Direct Orange 46) sorption on pretreated cotton fabric by cationic agent.
- [8] Shahin M. The influence of cationization on the dyeing performance of cotton fabrics with direct dyes. International Journal of Engineering Research and Applications. 2015;5(8):62-70.

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ผู้ประกอบการ ขนส่งสินค้า ในจังหวัดชลบุรี

พัชรา ศรีพระบุ¹ และเชษฐา ชำนาญหล่อ^{2*}
phatchara.sr@ku.th¹, chettha@eng.src.ku.ac.th^{2*}

¹ภาควิชาวิทยาการเดินเรือและโลจิสติกส์ทางทะเล คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Received	: 11-Nov-2020
Revised	: 28-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี โดยรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากตัวแทนของบริษัทที่ใช้บริการขนส่งสินค้า จำนวน 385 ตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์องค์ประกอบหรือปัจจัยเป็นเทคนิคทางสถิติที่จะถูกนำมาใช้ในการรวมกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันไว้ในปัจจัยเดียวกัน และใช้การถดถอยโลจิสติกส์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการ จากการศึกษาพบว่าตัวแปร 28 ตัวแปรที่นำมาศึกษาสามารถจัดกลุ่มได้ 7 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 การส่งเสริมการตลาด ปัจจัยที่ 2 อัตราการให้บริการที่เหมาะสม ปัจจัยที่ 3 การประสานงานและการบริการแบบครบวงจร ปัจจัยที่ 4 บุคลากรที่ทำงานอย่างมืออาชีพและเครื่องมือที่มีคุณภาพ ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพ ปัจจัยที่ 6 คุณภาพการให้บริการ และปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน โดยปัจจัยที่มีน้ำหนักมากที่สุดต่อการตัดสินใจเลือกใช้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี คือ ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย การส่งมอบสินค้าได้ครบถ้วนถูกต้อง และมีความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงาน ปัจจัยที่สำคัญรองลงมาคือ ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน ได้แก่ อุปกรณ์ทางด้านการปลอดภัยครบถ้วน และสภาพของรถอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

คำสำคัญ: การตัดสินใจ ผู้ให้บริการขนส่งสินค้า การวิเคราะห์ปัจจัย การถดถอยโลจิสติกส์

A Study on Factors Influencing Decision-making for Choosing Cargo Transportation Servicers in Chonburi Province

Phatchara Sriphrabu¹ and Chettha Chamnanlor^{2*}

phatchara.sr@ku.th¹, chettha@eng.src.ku.ac.th^{2*}

¹ Department of Nautical Science and Maritime Logistics, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

Received	: 11-Nov-2020
Revised	: 28-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

Abstract

This research aimed to study the important factors affecting the decision to choose the cargo transportation servicers in Chonburi province. The data were collected by questionnaires from 385 samples of carrier companies. For data analysis, descriptive statistics such as frequency distribution, percentage, mean, and standard deviation were used. Elemental or factor analysis, which is a statistical technique, was used to combines related variables in the same factor, and then logistic regression was used to study the factors affecting the decision of service selection. From the study, it was found that the 28 variables studied could be grouped into 7 factors, namely Factor 1: Marketing promotion, Factor 2: Optimal service rate, Factor 3 Coordination and full service, Factor 4: Professional personnel and quality tools, Factor 5: Efficient service, Factor 6 Service quality, and Factor 7: Safety in the workplace. The factor with the greatest weight, which is affecting choices of freight transportation services selection in Chonburi province, is Factor 5: efficient service, for example, the safe handling of the goods, the accomplished and correct delivery, and having knowledge and expertise for the operation. Another, the second most important factor is Factor 7: Safety in the workplace, for example, the completion of safety equipment, and the ready-to-use condition of the vehicles.

Keywords: decision making, cargo transportation servicers, factor analysis, logistic regression

1. บทนำ

การขนส่งสินค้าภายในประเทศส่วนใหญ่นิยมใช้การขนส่งทางถนนมากที่สุด โดยในปี 2561 มีสัดส่วนอยู่ที่ร้อยละ 79.30 ของการขนส่งสินค้าภายในประเทศ [1] การขนส่งทางถนนมีโครงข่ายถนนที่เชื่อมต่อถึงกันทุกภูมิภาคครอบคลุมทั่วประเทศ ทำให้ผู้ขนส่งและผู้รับสินค้าได้รับความสะดวก สบายในการเข้าถึงได้โดยตรง รวมทั้งสามารถบรรทุกสินค้าตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้ โดยสามารถจัดหาพาหนะบรรทุกได้สะดวกเหมาะสมกับขนาดของหน่วยการบรรทุกที่ต้องการ ดังนั้นการขนส่งสินค้าทางถนนจึงเป็นการขนส่งหลักที่ใช้ในการขนส่งสินค้าภายในประเทศ ประกอบกับการขนส่งรูปแบบอื่น ๆ มีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานที่ไม่สามารถรองรับความต้องการขนส่งสินค้าได้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนนมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น [1]

จังหวัดชลบุรีเป็นแหล่งที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ของประเทศ รวมทั้งมีท่าเรือแหลมฉบัง ซึ่งเป็นท่าเรือเพื่อการส่งออกนำเข้าทางทะเลที่สำคัญของประเทศ ทำให้จังหวัดชลบุรีเป็นศูนย์กลางการค้าและเศรษฐกิจของภาคตะวันออก ส่งผลให้มีปริมาณการขนส่งสินค้าจำนวนมากทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและท่าเรือ ดังนั้นทำให้มีการจดทะเบียนรถบรรทุกในจังหวัดชลบุรีเพิ่มขึ้น [2] ด้วยการเพิ่มจำนวนรถบรรทุกให้เพียงพอต่อความต้องการเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณการขนส่งที่เพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณการจดทะเบียนรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากทั้งผู้ประกอบการรายเดิมและผู้ประกอบการรายใหม่ที่สนใจดำเนินธุรกิจให้บริการรถขนส่งสินค้า ส่งผลให้มีการแข่งขันในตลาดมากขึ้นหลายเจ้า ทำให้ผู้ประกอบการต้องปรับตัวและปรับปรุงการให้บริการเพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดได้

ปัจจุบันผู้ประกอบการรถขนส่งบางรายมีการตัดราคาหรือเสนอราคาค่าขนส่งที่ต่ำกว่าบริษัทอื่นเพื่อดึงดูดให้ลูกค้าเข้ามาใช้บริการ ประกอบกับปริมาณผู้ประกอบการรถขนส่งที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีรถเข้ามาให้บริการที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ลูกค้ามีทางเลือกในการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งมากขึ้น ดังนั้นบริษัทผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้าจึงได้มุ่งเน้นพัฒนาการให้บริการเพื่อรักษาสถานะของลูกค้า

เดิมและขยายฐานลูกค้ารายใหม่ โดยพยายามพัฒนาการให้บริการ เช่น การสร้างความน่าเชื่อถือด้วยการติดตั้งระบบ GPS เพื่อให้ลูกค้าสามารถตรวจสอบตำแหน่งของรถขนส่งได้ รวมทั้งการนำกลยุทธ์ทางการตลาดมาใช้ ซึ่งแนวคิดส่วนประสมทางการตลาดสำหรับธุรกิจบริการ (Service Mix) ของ Philip Kotler [3] ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยส่วนประสมการตลาด (Marketing Mix) หรือ 7Ps ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ (Product) ราคา (Price) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Place) การส่งเสริมการตลาด (Promotion) บุคคล (People) การสร้างและนำเสนอลักษณะทางกายภาพ (Physical Evidence and Presentation) และกระบวนการ (Process) อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรเหล่านี้ในกลุ่มบริษัทที่ใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี

เหตุนี้ จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้า เพื่อเป็นแนวทางในการให้ผู้ประกอบการนำข้อมูลไปวางแผนปรับปรุงและพัฒนาการให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษางานวิจัยที่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ โดยได้ทบทวนจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น

กาญจนา พานิชการ และคณะ [4] ศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกที่ทำงานของนิสิต/นักศึกษา สาขาวิชาสถิติ ชั้นปีที่ 4 โดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 114 คน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือแบบสอบถามออนไลน์ ผลการวิเคราะห์ตัวแปร 24 ตัวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย สามารถจัดกลุ่มปัจจัยได้ 6 ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเลือกที่ทำงานของนิสิต/นักศึกษา โดยปัจจัยที่ 1 ด้านความมั่นคงของที่ทำงานและงานตรงกับสายวิชาที่เรียน เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด

วิชุดา ไชยศิริวัฒนกุล และคณะ [5] ได้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าหรือบริการบนพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของนักศึกษาปริญญาตรีมหาวิทยาลัยขอนแก่น ด้วยแบบสอบถามจำนวน 395 คน ใช้การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ปัจจัย การ

วิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์การถดถอย โลจิสติกส์แบบเรียงลำดับ ผลการวิเคราะห์ตัวแปร 42 ตัว สามารถจัดกลุ่มได้ 8 ปัจจัย โดยปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจซื้อมากที่สุดคือ พฤติกรรมการซื้อสินค้าหรือบริการบนเว็บไซต์ของบุคคลรอบข้างในยุคดิจิทัล

สุขมงคล เลิศภิรมย์สุข และคณะ [6] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในการเดินทางของนิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามจำนวน 400 ชุด และใช้แบบจำลอง Binary Logit พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ผลการทดสอบได้แก่ เพศ คณะ รายได้ต่อเดือน จำนวนวันในการมาเรียน ระยะทางในการเดินทาง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเดินทาง จำนวนการต่อรถ พื้นที่การให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะ สภาพพาหนะที่ใช้ในการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะ และสภาพลักษณ์

เบญจพร สุวรรณแสนทวี [7] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการในการขนส่งโลจิสติกส์ของผู้ประกอบการธุรกิจอาหารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวน 200 คน ผลการศึกษาพบว่า การบริการลูกค้า การตอบสนองอย่างรวดเร็ว ราคาและลักษณะองค์กรผู้ให้บริการ ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการในการขนส่งโลจิสติกส์ของผู้ประกอบการธุรกิจอาหารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

พัชชา ตีระดิเรก [8] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการบริษัททัวร์นำเที่ยวของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการวิจัย โดยมีกลุ่มตัวอย่างจากผู้ที่เคยใช้บริการบริษัททัวร์นำเที่ยวและเป็นประชากรที่อาศัยและทำงานอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 410 ตัวอย่าง ผลการวิจัยยังพบว่า ปัจจัยด้านส่วนประสมทางการตลาดที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการบริษัททัวร์นำเที่ยวของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ปัจจัยด้านราคา และช่องทางการสื่อสาร และปัจจัยด้านกระบวนการ

สิทธิ คำประสิทธิ์ [9] ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการรถทัวร์นครชัยแอร์ ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการวิจัย ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการรถทัวร์นครชัยแอร์ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์และราคา ปัจจัยด้านบุคคล ปัจจัยด้านกายภาพและความรวดเร็วในการให้บริการ ปัจจัยด้านส่งเสริมการตลาด และปัจจัยด้านการจำหน่ายตั๋วโดยสาร ในส่วนของการวิเคราะห์ปัจจัยด้านประชากรศาสตร์ ผลการวิจัยปัจจัยด้านอายุ ระดับ การศึกษาและรายได้เฉลี่ยต่อเดือน ที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการรถทัวร์ นครชัยแอร์

ณิชนน สารีพันธ์ และรุ่งนภา กิตติลาภ [10] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ประกอบการค้าส่ง ในจังหวัดขอนแก่น โดยเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 291 คน ใช้สถิติในการวิจัยได้แก่ ค่าความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก โดยวิธีการหมุนแกนอโธโกนอลแบบวารีแมกซ์ ผลการศึกษาพบว่า สภาพการเลือกใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ค้าส่งส่วนใหญ่เป็นเจ้าของธุรกิจคนเดียว ประเภทของเล่นของใช้ มีการจัดส่งสินค้า 2-4 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการส่งสินค้ามากที่สุดคือ ปัจจัยด้านกระบวนการให้บริการเกี่ยวกับการส่งมอบสินค้าตามเวลา รองลงมาเป็นปัจจัยด้านลักษณะทางกายภาพในเรื่องความมีชื่อเสียง ความน่าเชื่อถือ และปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ในเรื่องการตรวจสอบรายการส่งสินค้าถึงจุดหมายปลายทางได้ตลอดระยะทาง

จากการทบทวนงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการศึกษาและการเลือกใช้สูตรในการหา กลุ่มประชากรตัวอย่างมี 2 กรณีคือ ไม่ทราบขนาดของประชากร ใช้สูตร W.G. Cochran ในการเลือกกลุ่มตัวอย่าง และทราบขนาดของประชากร ใช้สูตร Yamane ในการเลือกกลุ่มตัวอย่าง การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทั้งสถิติเชิงพรรณนา และสถิติเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่วิเคราะห์องค์ประกอบหรือตัวแปร ในกลุ่มบริษัทที่ใช้บริการรถขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี ดังนั้นจึงสนใจศึกษาว่ากลุ่มบริษัทเหล่านี้ให้ความสำคัญกับปัจจัยใดบ้างในการตัดสินใจ

เลือกใช้บริการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการเพื่อนำไปวางแผนได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

บทความนี้ กำหนดกลุ่มประชากรคือบริษัทที่ใช้บริการรถขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นกลุ่มประชากรที่มีขนาดใหญ่และไม่สามารถระบุจำนวนที่แน่นอนได้ จึงใช้วิธีการคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ทราบประชากรแน่นอนโดยใช้หลักการของ Cochran [11] ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และความคลาดเคลื่อนของการประมาณที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.05 ด้วยสูตรในการคำนวณในสมการที่ (1) [11]

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{E^2} \quad (1)$$

โดยที่ n แทนขนาดตัวอย่าง
 P แทนสัดส่วนของประชากร
 Z แทนระดับความเชื่อมั่น
 E แทนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

เมื่อแทนค่าในสูตรการคำนวณได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ

$$n = \frac{(0.5)(1-0.5)(1.96)^2}{0.05^2} = 384.16 \text{ ตัวอย่าง ดังนั้น}$$

จึงเก็บข้อมูล 385 ตัวอย่าง

3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

บทความนี้ ใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีขั้นตอนในการพัฒนาแบบสอบถามมีดังนี้ (1) ศึกษาข้อมูลทฤษฎีโดยการศึกษาจากตำราเอกสาร บทความ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยอื่น ๆ เพื่อนำมาร่างแบบสอบถามให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดย แบบสอบถามแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** ข้อมูลทั่วไปของบริษัทที่ตอบแบบสอบถาม **ส่วนที่ 2** ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้า ซึ่งแบ่งระดับความสำคัญเป็นมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Rating Scale) **ส่วนที่ 3** ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม เป็นแบบสอบถามปลายเปิดซึ่งไม่ได้กำหนดคำตอบไว้ให้เลือกตอบ แต่เปิดโอกาสให้ผู้ตอบแบบสอบถามได้แสดงความ

คิดเห็นอย่างอิสระ (2) ตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถาม IOC (Index of item objective congruence) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการขนส่งและด้านสถิติตรวจสอบจำนวน 3 คน โดยให้เกณฑ์ในการตรวจพิจารณาข้อคำถาม [12] ดังนี้ คือ ค่าความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม หรือค่าสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์หรือเนื้อหา ค่าความค่า IOC ได้เท่ากับ 0.93 ซึ่งเกินจากเกณฑ์ 0.5 ถือว่าใช้ได้ (3) แก้ไขแบบสอบถามให้สมบูรณ์ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ โดยให้ผู้เชี่ยวชาญแนะนำในด้านความเหมาะสมของข้อคำถาม การจัดหมวดหมู่คำถาม การใช้ภาษาให้เหมาะสมในข้อคำถาม เพื่อให้เกิด ความเข้าใจได้ของกลุ่มตัวอย่าง และเพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (4) นำแบบสอบถามที่ผ่านการแก้ไขปรับปรุงแล้วไปทดลองใช้ (Try Out) กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 บริษัท เพื่อวัดหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยใช้การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น Cronbach's Alpha ได้เท่ากับ 0.82 ซึ่งเกินจากเกณฑ์ 0.7 จึงจะถือว่าแบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ศึกษากับกลุ่มตัวอย่างจริงได้

3.3. การวิเคราะห์ข้อมูล

บทความนี้ ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาเพื่ออธิบายข้อมูลทั่วไปและระดับความเห็นเกี่ยวปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งด้วยค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับระดับความสำคัญที่มีคะแนน 5 ระดับ ใช้เกณฑ์การแปลความดังนี้ 4.21-5.00 หมายถึง สำคัญมากที่สุด 3.41-4.20 หมายถึง สำคัญมาก 2.61-3.40 สำคัญปานกลาง 1.81-2.60 หมายถึง สำคัญน้อย 1.00-1.80 หมายถึง สำคัญน้อยที่สุด [13] และใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหรือปัจจัย เพื่อรวมตัวแปรที่สัมพันธ์กันไว้ในปัจจัยเดียวกัน จากนั้นเปรียบเทียบระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับที่พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้าใช้ค่า Logit Regression Coefficient ของค่าคะแนนปัจจัย (Factor Score) ไปวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ โดยตัวแปรตามคือระดับการตัดสินใจเลือกใช้บริการผู้ประกอบการรถขนส่งสินค้า

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

	หัวข้อ	จำนวน	ร้อยละ		หัวข้อ	จำนวน	ร้อยละ
ตำแหน่ง	1. ผจกฝ่ายจัดส่งสินค้า	63	16.36	ประเภทที่	1. รถ 6 ล้อ	6	1.56
	2. ผจกฝ่ายขาย	38	9.87		2. รถ 10 ล้อ	9	2.34
	3. ผจกฝ่ายการตลาด	29	7.53		3. รถกึ่งพ่วงพื่นเรียบ	22	5.71
	4. พนักงานฝ่ายจัดรถขนส่ง	157	40.78		4. รถบรรทุกตู้	146	37.92
	5. อื่น ๆ	98	25.45		5. รถ 6 ล้อ และรถ 10 ล้อ	3	0.78
ตำแหน่งธุรกิจ	1. บริษัทนำเข้าสินค้า	35	9.09	ประเภท	6. รถ 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงพื่นเรียบ	0	0.00
	2. บริษัทส่งออกสินค้า	29	7.53		7. รถ 6 ล้อ และรถบรรทุกตู้	14	3.64
	3. บริษัทผลิตสินค้า	68	17.66		8. รถ 10 ล้อ และรถกึ่งพ่วงพื่นเรียบ	7	1.82
	4. คลังสินค้า	77	20.00		9. รถ 10 ล้อ และรถบรรทุกตู้	5	1.30
	5. Freight forwarder	109	28.31		10. รถกึ่งพ่วงพื่นเรียบ รถบรรทุกตู้	91	23.64
	6. อื่น ๆ	67	17.40		11. รถ 6 ล้อ รถ 10 ล้อ รถกึ่งพ่วง	4	1.04
ระยะเวลา	1. น้อยกว่า 5 ปี	43	11.17	ประเภท	12. รถ 6 ล้อ รถ 10 ล้อ รถบรรทุกตู้	8	2.08
เปิดดำเนิน	2. 6-10 ปี	143	37.14		13. รถ 6 ล้อ รถกึ่งพ่วงพื่นเรียบ	7	1.82
	3. 11-15 ปี	99	25.71		14. รถ 10 ล้อ รถกึ่งพ่วง รถบรรทุกตู้	16	4.16
ธุรกิจ (ปี)	4. มากกว่า 15 ปี	100	25.97		15. ใช้รถทุกประเภท	38	9.87
					16. อื่น ๆ	9	2.34
ทุนจดทะเบียน	1. < 20 ล้านบาท	299	77.66	ความถี่ใช้	1. น้อยกว่า 5 เทีย	73	18.96
ทะเบียน	2. 20-200 ล้านบาท	79	20.52		2. 6-10 เทีย	144	37.40
	3. > 200 ล้านบาท	7	1.82		3. 11-20 เทีย	93	24.16
เคยใช้บริการ	1. ใช่	355	92.20		4. 21-30 เทีย	31	8.05
	2. ไม่ใช่	30	7.80		5. มากกว่า 30 เทีย	44	11.43
รถขนส่ง							

4. ผลการวิจัย

4.1. ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

จากจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด 385 ราย พบว่าตัวแทนของบริษัทที่ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ทำงานในตำแหน่งพนักงานฝ่ายจัดรถขนส่งสินค้าร้อยละ 40.78 โดยเป็นบริษัทที่ทำหน้าที่แทนผู้นำเข้าและส่งออกสินค้าร้อยละ 28.31 ดำเนินธุรกิจมาแล้ว 6-10 ปี ร้อยละ 37.14 เป็นธุรกิจขนาดเล็กมีทุนจดทะเบียนน้อยกว่า 20 ล้านบาทร้อยละ 77.66 เคยใช้บริการรถขนส่งสินค้าร้อยละ 92.20 รถที่ใช้บริการเป็นรถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ร้อยละ 37.92 และใช้บริการรถขนส่งสินค้าเฉลี่ย 6-10 เทียต่อเดือนร้อยละ 37.40 แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

4.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัย

ผลตรวจสอบความเหมาะสมการวิเคราะห์ปัจจัย โดยพิจารณาจาก KMO (Kaiser Meter Olkin) ได้เท่ากับ 0.883 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 และการใช้ Bartlett's Test พบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 [14] แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 ดังนั้นข้อมูลชุดนี้เหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์ปัจจัย

ตารางที่ 2 ค่า KMO ตัวสถิติทดสอบและค่า p-value ของการทดสอบสมมติฐานของ Bartlett

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy)	Bartlett's Test of Sphericity		
	χ^2	df.	Sig.
0.883	5297.686	378	.000

เมื่อนำตัวแปรทั้ง 28 ตัว กลุ่มตัวอย่าง 385 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับตัวแปรในระดับมากและมากที่สุด ยกเว้นตัวแปร มีการทำโฆษณาและประชาสัมพันธ์ มีเงื่อนไขการขายแบบใหม่ ๆ ให้ลูกค้าเลือก และมีโปรโมชั่นต่าง ๆ เช่น ส่วนลด มีความสำคัญอยู่ในระดับปานกลาง แสดงดังในตารางที่ 3

เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยพบว่าตัวแปร (คำถาม) 28 ตัว มีค่าไอเกน (Eigen Value) 7 ค่า ที่มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นจำนวนปัจจัยที่สำคัญแบ่งได้เป็น 7 ปัจจัย โดยปัจจัยที่ 1 เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เนื่องจากปัจจัยนี้ สามารถอธิบายความแปรผันหรือแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรเดิมได้ร้อยละ 31.929 แสดงดังในตารางที่ 4 และจากการพิจารณาค่า

น้ำหนักปัจจัย (Factor Loading) หลังจากการหมุนแกนองค์ประกอบแบบมุมฉาก (Orthogonal Rotation) วิธีวาริแมกซ์ (Varimax Method) สามารถจัดตัวแปรทั้ง 28 ตัวให้อยู่ในปัจจัย 7 ปัจจัย พร้อมทั้งตั้งชื่อปัจจัยแต่ละปัจจัยใหม่ดังตารางที่ 5

1. ปัจจัยที่ 1 ประกอบด้วยตัวแปร 6 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่าการส่งเสริมการตลาด โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.770) คือ มีเงื่อนไขการขายแบบใหม่ ๆ

2. ปัจจัยที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปร 5 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่า อัตราการให้บริการที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.745) คือ มีการแจ้งล่วงหน้าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราค่าบริการ

3. ปัจจัยที่ 3 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่าการประสานงานและการบริการแบบครบวงจร โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.738) คือ มีการติดต่อประสานงานและติดตามได้

4. ปัจจัยที่ 4 ประกอบด้วยตัวแปร 6 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่า บุคลากรที่ทำงานอย่างมืออาชีพและเครื่องมือที่มีคุณภาพ โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.684) คือ พุดจาสุภาพเรียบร้อย

5. ปัจจัยที่ 5 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่าการบริการที่มีประสิทธิภาพ โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.793) คือ การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย

6. ปัจจัยที่ 6 ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่า มาตรฐานคุณภาพการให้บริการ โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.773) คือ ความตรงต่อเวลาในการให้บริการ

7. ปัจจัยที่ 7 ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัว ซึ่งอธิบายได้ว่า ความปลอดภัยในการทำงาน โดยตัวแปรที่มีน้ำหนักมากที่สุด (Factor Loading = 0.804) คือ อุปกรณ์ทางด้านการปลอดภัยครบถ้วน

4.3 ผลการทดสอบสมมติฐาน

เมื่อนำคะแนนปัจจัย (Factor Score) ของแต่ละปัจจัยมาวิเคราะห์ว่าแตกต่างกันหรือไม่ระหว่างประเภทธุรกิจ ด้วยการใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) พบว่า มีเพียงปัจจัยเดียวที่ค่าเฉลี่ยของคะแนนปัจจัยระหว่างประเภทของธุรกิจไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ความปลอดภัยในการทำงาน (ปัจจัยที่ 7) แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรต่าง ๆ

ตัวแปร	Mean	S.D.	ระดับความสำคัญ
1. ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์/คุณภาพด้านการให้บริการ	4.25	0.475	มากที่สุด
1. มีการบริการถูกต้องตามที่ระบุไว้ในใบสั่งงาน	4.43	0.693	มากที่สุด
2. มีจำนวนรถที่ให้บริการมีความเพียงพอ	3.89	0.991	มาก
3. การบริการที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน	4.49	0.65	มากที่สุด
4. ความตรงต่อเวลาในการให้บริการ	4.57	0.646	มากที่สุด
5. การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย	4.16	0.795	มาก
6. การส่งมอบสินค้าได้ครบถ้วนถูกต้อง	4.22	0.739	มากที่สุด
7. มีความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงาน	4.02	0.832	มาก
2. ปัจจัยด้านราคา	3.69	0.806	มาก
8. ราคามีความเหมาะสมเมื่อเทียบกับบริษัทอื่น	3.69	1.032	มาก
9. มีราคาที่เหมาะสมกับคุณภาพการให้บริการ	3.68	0.898	มาก
10. อัตราค่าบริการเหมาะสมกับระยะทางในการจัดส่ง	3.63	0.979	มาก
11. มีการกำหนดราคาที่ทำให้บริการขนส่งที่ชัดเจน	3.79	0.942	มาก
12. มีการแจ้งล่วงหน้าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราค่าบริการ	3.65	1.092	มาก

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรต่าง ๆ (ต่อ)

ตัวแปร	Mean	S.D.	ระดับความสำคัญ
3. ปัจจัยด้านการส่งเสริมการตลาด	2.95	1.132	ปานกลาง
13. มีการทำโฆษณาและประชาสัมพันธ์	3.24	1.21	ปานกลาง
14. มีเงื่อนไขการขายแบบใหม่ๆ ให้ลูกค้าเลือก	2.88	1.257	ปานกลาง
15. มีโปรโมชั่นต่าง ๆ เช่น ส่วนลด	2.73	1.424	ปานกลาง
4. ปัจจัยด้านช่องทางในการให้บริการ	3.83	0.725	มาก
16. ช่องทางการติดต่อประสานงานมีความสะดวก	3.82	0.783	มาก
17. ช่องทางการติดต่อมีความเหมาะสมและเพียงพอ	3.84	0.824	มาก
5. ปัจจัยด้านบุคลากร	3.98	0.628	มาก
18. พูดยาสุภาพเรียบร้อย	4.06	0.795	มาก
19. แต่งกายเรียบร้อยสะอาด ถูกกาลเทศะ	3.96	0.865	มาก
20. มีความกระตือรือร้นในการให้บริการ	4.15	0.775	มาก
21. จำนวนพนักงานเพียงพอ	3.69	0.977	มาก
22. แก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบ	4.04	0.823	มาก
6. ปัจจัยด้านกระบวนการการให้บริการ	4.21	0.597	มากที่สุด
23. มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ได้มาตรฐาน	4.42	0.645	มากที่สุด
24. มีระบบเทคโนโลยีที่ทันสมัย เช่น GPS	4.42	0.71	มากที่สุด
25. มีการติดต่อประสานงานและติดตามได้	4.12	0.923	มาก
26. มีการให้บริการแบบครบวงจร	3.87	1.038	มาก
7. ปัจจัยการนำเสนอลักษณะทางกายภาพ	4.18	0.649	มาก
27. สภาพของรถอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน	4.11	0.712	มาก
28. อุปกรณ์ทางด้านการปลอดภัยครบถ้วน	4.24	0.741	มากที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าสถิติสำหรับแต่ละปัจจัยทั้งก่อนและหลังการสกัดปัจจัย

Total Variance Explained									
Component (ปัจจัย)	Initial Eigen values			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	% of	% of Variance	Cumulative %
1	8.940	31.929	31.929	8.940	31.929	31.929	3.749	13.391	13.391
2	2.425	8.659	40.588	2.425	8.659	40.588	3.512	12.542	25.933
3	2.047	7.312	47.900	2.047	7.312	47.900	2.734	9.766	35.699
4	1.576	5.628	53.528	1.576	5.628	53.528	2.464	8.800	44.500
5	1.310	4.679	58.207	1.310	4.679	58.207	2.331	8.327	52.826
6	1.156	4.127	62.334	1.156	4.127	62.334	1.941	6.932	59.758
7	1.107	3.954	66.288	1.107	3.954	66.288	1.828	6.530	66.288
8	.911	3.254	69.543						
9	.836	2.987	72.530						
10	.771	2.753	75.283						
11	.640	2.287	77.569						
12	.584	2.087	79.656						
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	.179	.640	100.000						

ตารางที่ 5 ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลังจากหมุนแกน (Rotation Component) จำแนกตามปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัย

	ประเด็นที่ใช้ในการถาม	ค่าน้ำหนักปัจจัย (Factor Loading)	คำอธิบายปัจจัย
1.1	14. มีเงื่อนไขการขายแบบใหม่ ๆ	0.770	ปัจจัยที่ 1 การส่งเสริมการตลาด
1.2	15. มีโปรโมชั่นต่าง ๆ เช่น ส่วนลด	0.751	
1.3	13. มีการทำโฆษณาและประชาสัมพันธ์	0.727	
1.4	16. ช่องทางการติดต่อประสานงานมีความสะดวก	0.650	
1.5	17. ช่องทางการติดต่อมีความเหมาะสมและเพียงพอ	0.560	
1.6	21. จำนวนพนักงานเพียงพอ	0.497	
2.1	12. มีการแจ้งล่วงหน้าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราค่าบริการ	0.745	ปัจจัยที่ 2 อัตราค่าบริการ
2.2	11. มีการกำหนดราคาให้บริกรขนส่งที่ชัดเจน	0.738	
2.3	9. มีราคาที่เหมาะสมกับคุณภาพการให้บริการ	0.719	
2.4	10. อัตราค่าบริการเหมาะสมกับระยะทางในการจัดส่ง	0.717	
2.5	8. ราคามีความเหมาะสมเมื่อเทียบกับบริษัทอื่น	0.706	
3.1	25. มีการติดต่อประสานงานและติดตามได้	0.738	ปัจจัยที่ 3 การประสานงานและการบริการแบบครบวงจร
3.2	26. มีการให้บริการแบบครบวงจร	0.683	
3.3	2. มีจำนวนรถที่ให้บริการมีความเพียงพอ	0.637	
4.1	18. พุดจาสุภาพเรียบร้อย	0.684	ปัจจัยที่ 4 บุคลากรและเครื่องมือที่มีมาตรฐาน
4.2	20. มีความกระตือรือร้น	0.626	
4.3	19. การแต่งกาย	0.614	
4.4	23. มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ได้มาตรฐาน	0.578	
4.5	22. การแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ	0.531	
4.6	24. มีระบบเทคโนโลยีที่ทันสมัย เช่น GPS	0.400	
5.1	5. การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย	0.793	ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพ
5.2	6. การส่งมอบสินค้าได้ครบถ้วนถูกต้อง	0.741	
5.3	7. มีความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงาน	0.704	
6.1	4. ความตรงต่อเวลาในการให้บริการ	0.773	ปัจจัยที่ 6 มาตรฐานคุณภาพการให้บริการ
6.2	3. การบริการที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน	0.748	
6.3	1. มีการบริการถูกต้องตามที่ระบุไว้ในใบสั่งงาน	0.630	
7.1	28. อุปกรณ์ทางด้านการปลอดภัยครบถ้วน	0.804	ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน
7.2	27. สภาพของรถอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน	0.751	

ตารางที่ 6 ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลังจากหมุนแกน (Rotation Component) จำแนกตามปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัย

ปัจจัยส่วนองค์กร	F	Sig.
ปัจจัยที่ 1 การส่งเสริมการตลาด	0.215	0.643
ปัจจัยที่ 2 อัตราค่าบริการที่เหมาะสม	1.785	0.182
ปัจจัยที่ 3 การประสานงานและการบริการแบบครบวงจร	1.657	0.199
ปัจจัยที่ 4 บุคลากรที่ทำงานอย่างมืออาชีพและเครื่องมือที่มีคุณภาพ	1.997	0.158
ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพ	4.563	0.033*
ปัจจัยที่ 6 คุณภาพการให้บริการ	0.185	0.667
ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน	3.153	0.077*

หมายเหตุ: *มีนัยสำคัญที่ .05

ตารางที่ 7 ค่าประมาณของพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ปัจจัย	Logit Regression Coefficients	SE.	Wald	df.	Sig.
ปัจจัยที่ 1	0.049	.255	.037	1	.848
ปัจจัยที่ 2	0.058	.284	.042	1	.837
ปัจจัยที่ 3	0.171	.238	.518	1	.472
ปัจจัยที่ 4	0.317	.242	1.725	1	.189
ปัจจัยที่ 5	0.636	.285	4.987	1	.026
ปัจจัยที่ 6	0.350	.210	2.766	1	.096
ปัจจัยที่ 7	0.452	.203	4.963	1	.026

เมื่อนำคะแนนปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัยวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ โดยตัวแปรตาม (Y) คือ ระดับการตัดสินใจเลือกให้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้า พบว่า ปัจจัยต่าง ๆ สอดคล้องกับข้อมูล (Chi-Square = 10.914, df. = 8, p -value = 0.207) และเมื่อพิจารณาว่า p -value ของตัวสถิติ wald ในตารางที่ 7 สามารถสรุปได้ว่า 2 ปัจจัย ที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการผู้ประกอบการขนส่งสินค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ ปัจจัยที่ 5 และปัจจัยที่ 7 ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ ร้อยละ 4.6 (Cox & Snell R Square โดยวิธี Cox and Snell) และเมื่อพิจารณาว่า Logit Regression Coefficients ในตารางที่ 7 พบว่า ปัจจัยที่สำคัญหรือมีค่าน้ำหนักมากที่สุดคือ ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพคือ การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย การส่งมอบสินค้าได้ครบถ้วนถูกต้อง และมีความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงาน ส่วนปัจจัยที่สำคัญรองลงมาคือ ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงานคือ อุปกรณ์ทางด้านความปลอดภัยครบถ้วน และสภาพของรถอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ตัวแปร 28 ตัว ทำให้สามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้ 7 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 การส่งเสริมการตลาด ปัจจัยที่ 2 อัตราการให้บริการที่เหมาะสม ปัจจัยที่ 3 การประสานงานและการบริการแบบครบวงจร ปัจจัยที่ 4 บุคลากรที่ทำงานอย่างมีอาชีพและเครื่องมือที่มีคุณภาพ ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพ ปัจจัยที่ 6 มาตรฐานคุณภาพการให้บริการ และปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน โดยปัจจัยที่มีน้ำหนักมากที่สุดซึ่งส่งผลต่อการเลือกใช้บริการผู้ประกอบการขนส่ง คือ

ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือ ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงาน

โดยปัจจัยที่มีน้ำหนักมากที่สุดต่อการตัดสินใจเลือกให้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรี คือ ปัจจัยที่ 5 การบริการที่มีประสิทธิภาพคือ การดูแลสินค้าอย่างปลอดภัย การส่งมอบสินค้าได้ครบถ้วนถูกต้อง และมีความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงาน ส่วนปัจจัยที่สำคัญรองลงมาคือ ปัจจัยที่ 7 ความปลอดภัยในการทำงานคือ อุปกรณ์ทางด้านความปลอดภัยครบถ้วน และสภาพของรถอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

นอกจากนี้ ผลการศึกษาของงานวิจัย ยังมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเลือกให้ผู้ประกอบการขนส่งสินค้า ที่ได้บทวนมาข้างต้น [7, 10] โดยพบว่า การบริการที่มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยที่ลูกค้าพิจารณาให้ความสำคัญมากที่สุดเป็นลำดับแรก

ข้อเสนอแนะ

การบริการที่มีประสิทธิภาพคือการบริการตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งจะเป็นการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าและดึงดูดให้ลูกค้ายังคงใช้บริการในระยะยาว ดังนั้นผู้ประกอบการขนส่งสินค้า ควรให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก โดยการขนส่งสินค้าจะต้องไม่ทำให้สินค้าได้รับความเสียหาย ลูกค้าได้รับสินค้าครบตามจำนวน ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติงานของบริษัท รวมทั้งควรมีการนำเสนอด้านความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อสร้างความเชื่อมั่นและความไว้วางใจจากลูกค้า เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านความปลอดภัยที่ครบถ้วน และสภาพของรถที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานจะเป็นสิ่งหนึ่งที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของสินค้า ดังนั้นผู้ประกอบการขนส่งสินค้าจึง

ควรจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยให้พร้อมใช้งาน

อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้ กำหนดกลุ่มประชากรเฉพาะ บริษัทที่ใช้บริการรถขนส่งสินค้าในจังหวัดชลบุรีเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปจึงควรมีการเก็บข้อมูลบริษัทที่ใช้บริการรถขนส่งสินค้าในจังหวัดพื้นที่ใกล้เคียงหรือจังหวัดที่มีลักษณะใกล้เคียง เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเชิงเปรียบเทียบว่ามีความสอดคล้องหรือแตกต่างกันอย่างไร และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจนทำให้สามารถนำไปใช้ได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณเกรียงไกร กำแก้ว คุณสกุลรัตน์ หาดยุดุ่น และคุณสุดาพร ตุมโคตร ที่ช่วยสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Logistics Development Strategy Division Office of the National Economic and Social Development Council. Retrieved December 23, 2019 https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=9359. (in Thai)
- [2] Department of Land Transport (2019) Vehicle Registration Statistics in Chonburi. Retrieved December 23, 2019 <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (in Thai)
- [3] Kotler P. (1997). Marketing management: Analysis, planning, implementation and control (9th ed.). New Jersey: A Simon & Schuster Company.
- [4] Panichakam K, Anurakputi S, Navarasuchitr I. Factors Influencing Workplace Choices of Senior Statistics Students. Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning. 2016;7(1):115-23. (in Thai)
- [5] Chaisiwamongkol W, Pattanagul K, Intharah T, Seenoi P, Maomeesri P, Konggao J. An analysis of influencing factors for the purchase decision on e-commerce of khon kaen university undergraduate students. KKU Science Journal. 2019;47(2):339-52. (in Thai)
- [6] Lertpiromsuk S, Danrattanachai P, Thaweevachiraphat P. Factors Affecting the Decision Using Private Car for Travel of Kasetsart University (Bangkhen Campus) Students. The 56th Kasetsart University Annual Conference. 30 January – 2 February 2561. Kasetsart University (Bangkhen Campus) p.417-426 (in Thai)
- [7] Suwansantawee B. Factors affecting the decisions on choosing logistics service providers in food business entrepreneur in bangkok metropolitan region. M.B.A., Graduate School, Bangkok University; 2016. (in Thai)
- [8] Teradirek P. Factors affecting decision making on using tourism services of people in bangkok and bangkok metropolitan region. The degree of master of business administration. Thammasat University; 2016. (in Thai)
- [9] Khamprasit S. Factors affecting consumer satisfaction with Nakhonchai Air Company passenger bus services in Thailand. The degree of master of business administration. Thammasat University; 2016. (in Thai)
- [10] Sariphan N, Kittilap R. Factors Affecting the Decision to Use Transportation Service of Wholesalers in Khon Kaen. NEU Academic and Research Journal. 20019;9(1):17-25 (in Thai)

- [11] Akakul T. Research Methods in Behavioral and Social Sciences. Ubon Ratchathani Rajabhat University; 2000. (in Thai)
- [12] Kongsat S. 2008. Determination of Questionnaire Validity (IOC). Retrieved December 3, 2019 <http://mcu.ac.th/site/> (in Thai)
- [13] Ruengpraprapan C. Basic statistics and analysis examples with Minitab SPSS and SAS programs. Khon Kaen University; 2000. (in Thai)
- [14] Cerny C. A. and Kaiser H. F. A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. Multivariate Behavioral Research. 1977;12(1):43-7.

ผลกระทบของการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต

อัญญา กิจจานนท์¹ และทวีชัย สำราญวานิช^{1*}
ann_aunchana@hotmail.co.th¹, twc@buu.ac.th^{1*}

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received : 1-Oct-2020
Revised : 19-Oct-2020
Accepted : 25-Dec-2020

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต โดยวัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีไอไลท์สังเคราะห์ ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงและกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตภายหลังบ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นระยะเวลา 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์สังเคราะห์มีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าของคอนกรีตล้วนทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีไอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์ดีที่สุด เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาของซีไอไลท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็น CSH และ CAH และขนาดอนุภาคที่เล็กของซีไอไลท์สามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ แต่พบว่าคอนกรีตที่ผสมซีไอไลท์สังเคราะห์มีกำลังอัดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน เนื่องจากการใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ในคอนกรีตทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีไอไลท์สังเคราะห์ลดลงด้วย นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

คำสำคัญ: ซีไอไลท์สังเคราะห์ ความต้านทานคลอไรด์ การแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด

Effect of Using Synthetic Zeolite on Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete

Aunchana Kijjanon¹ and Taweechai Sumranwanich^{1*}

Ann_aunchana@hotmail.co.th¹, twc@buu.ac.th^{1*}

¹ Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 1-Oct-2020
Revised	: 19-Oct-2020
Accepted	: 25-Dec-2020

Abstract

This paper aims to study the effect of using synthetic zeolite on chloride resistance and compressive strength of concrete. In this paper, Portland cement type I and synthetic zeolite were used as cementitious materials. The binder content in concrete was replaced by synthetic zeolite at 0.01, 0.03, 0.05 and 0.10 of synthetic zeolite to binder ratios. Water to binder ratios were kept at 0.50 and 0.60. The rapid chloride penetration and compressive strength of concrete were performed at 7, 28, 56 and 91 days of curing time. Chloride penetration by bulk diffusion was tested after 28 days of water curing and immersed in 5.0% chloride concentration for 28 days. The study results showed that concretes with synthetic zeolite had better chloride resistance than cement-only concrete at all water to binder ratios. Concrete with 0.03 of synthetic zeolite to binder ratio had the best chloride resistance. This property is because silica and alumina of synthetic zeolite can react with calcium hydroxide to form CSH and CAH, and the small particles of synthetic zeolite can fill the void in concrete. But, concretes with synthetic zeolite had lower compressive strength than cement-only concrete because cement content was reduced by using synthetic zeolite in concrete, resulting in decreased compressive strength. Moreover, concrete with 0.50 of water to binder ratio had higher chloride resistance and compressive strength than concrete with 0.60 of water to binder ratio.

Keywords: synthetic zeolite, chloride resistance, chloride penetration, compressive strength

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมทะเลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเล โดยคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้จากหลายกระบวนการ เช่น การแพร่ (Diffusion) การดึงดูดคาปิลลารี (Capillary suction) การดึงดูดไอออนคลอไรด์ (Ion adsorption) และความดันน้ำ (Hydraulic pressure) เมื่อคลอไรด์แทรกซึมภายในเนื้อคอนกรีตและมีการสะสมของคลอไรด์ที่บริเวณผิวของเหล็กเสริมจนมีค่ามากกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Critical chloride content) ชั้นฟิล์มที่เคลือบป้องกันเหล็กเสริมอยู่จะถูกทำลายลง และหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ เมื่อปริมาณของสนิมเกิดเพิ่มมากขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตเกิดการหลุดลอกและแตกร้าวในที่สุด [1, 2]

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือ สารประกอบออลูมิโนซิลิเกต ซึ่งหน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) โดยที่อะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกันก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในระบบสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม จึงทำให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน อีกทั้งในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะที่เกาะอยู่หลวม ๆ ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น และยังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกด้วย [3] โดยทั่วไปซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยซีโอไลต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน มีความบริสุทธิ์ และมีสารปนเปื้อนน้อยกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ แต่เมื่อพิจารณาด้านราคาของซีโอไลต์สังเคราะห์พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์มีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ Najimi et al. [4] สรุปว่า คอนกรีตผสมซีโอไลต์ช่วยลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยปรับปรุงการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนและคุณสมบัติด้าน

ความคงทนของคอนกรีต เช่น การแทรกซึมคลอไรด์ อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion rate) การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) และการแทรกซึมน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยของ Sabet et al. [5], Ahmadi and Shekarchi [6], Karakurt and Topcu [7], Valipour et al. [8] และ Valipour et al. [9] รายงานว่าการใช้ซีโอไลต์เป็นแร่ผสมเพิ่มในคอนกรีตช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนให้กับคอนกรีตได้

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีต โดยทำการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดของคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (I) เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Z) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์เป็นหลักแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 1 ส่วนรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์สังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มวลรวมหยาบ (R) ใช้หินปูนที่มีขนาดโตสุดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร และอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ส่วนมวลรวมละเอียด (S) ใช้ทรายบกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 และ 0.60 อัตราส่วนซีโอไลต์ต่อวัสดุประสาน (z/b) เท่ากับ 0.01 0.03 0.05 และ 0.10

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

ของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (I)	ซีโอไลท์สังเคราะห์ (Z)
SiO ₂	20.8	32.98
Al ₂ O ₃	5.5	27.73
Fe ₂ O ₃	3.16	0.04
CaO	64.97	0.04
MgO	1.06	-
SO ₃	2.96	0.04
Na ₂ O	0.08	19.86
K ₂ O	0.55	0.04
TiO ₂	0.01	-
P ₂ O ₅	0.01	-
LOI	2.89	19.19
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	2.16
ความละเอียดทดสอบโดยวิธี Blaine fineness (ม ² /กรัม)	3,480	4,227

2.2. วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

ไร้ดแบบเร่งของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [10] โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน ภายหลังจากครบกำหนดระยะเวลาบ่มน้ำตัวอย่างถูกตัดให้มีขนาดหน้า 5 เซนติเมตร บริเวณส่วนบน กลาง และ ล่าง และทำการทดสอบโดยเริ่มจากประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์ทดสอบแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ขั้วลบ (Cathode) ผ่านค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60±0.01 Volts ต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างแล้วคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านในหน่วยคูลอมป์ นำค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านหาค่าเฉลี่ยและพิจารณาเกณฑ์คุณภาพดังตารางที่ 3

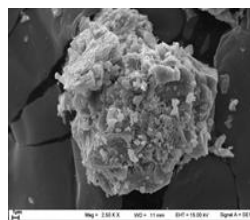
ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

Mix id	Mix proportions (kg/m ³)				
	I	Z	Water	S	R
I50-Z00	369	0	185	776	1,025
I50-Z01	365	4	184	776	1,025
I50-Z03	356	11	184	776	1,025
I50-Z05	348	18	183	776	1,025
I50-Z10	327	36	181	776	1,025
I60-Z00	329	0	198	776	1,025
I60-Z01	325	3	197	776	1,025
I60-Z03	318	10	197	776	1,025
I60-Z05	310	16	196	776	1,025
I60-Z10	292	32	194	776	1,025

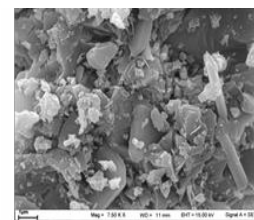
หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้ "Ixx"

หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ "0.xx", "Z.xx"

หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุเท่ากับ "0.xx"

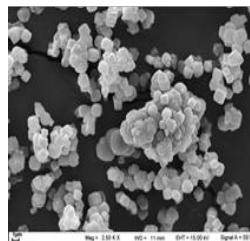


x2500

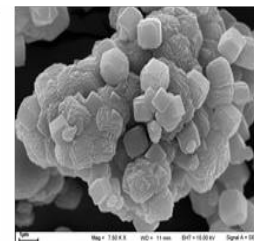


x7500

รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



x2500



x7500

รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของซีโอไลท์

ตารางที่ 3 ความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนใน

คอนกรีตภายใต้เกณฑ์ปริมาณประจุไฟฟ้า [10]

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 – 2,000	Low
100 – 2,000	Very low
< 100	Negligible

2.2.2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1556 [11] โดยหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของคอนกรีต โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรสูง 20 เซนติเมตร จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่ม น้ำตัวอย่างเคลื่อนผิวด้านข้างและด้านล่างด้วยฟ็อกซี ยกเว้นด้านบนหนึ่งด้านเพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่คอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ขี้เถ้าละลายคลอไรด์ความเข้มข้นคลอไรด์ร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาแช่ขี้เถ้าคลอไรด์นำตัวอย่างตัดหนาชั้นละ 1 เซนติเมตร นำมาบดเป็นผงเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 [12] ต่อไป

2.2.3 การทดสอบกำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [13] โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ซึ่งมีขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ต่อ 1 อายุทดสอบ และทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

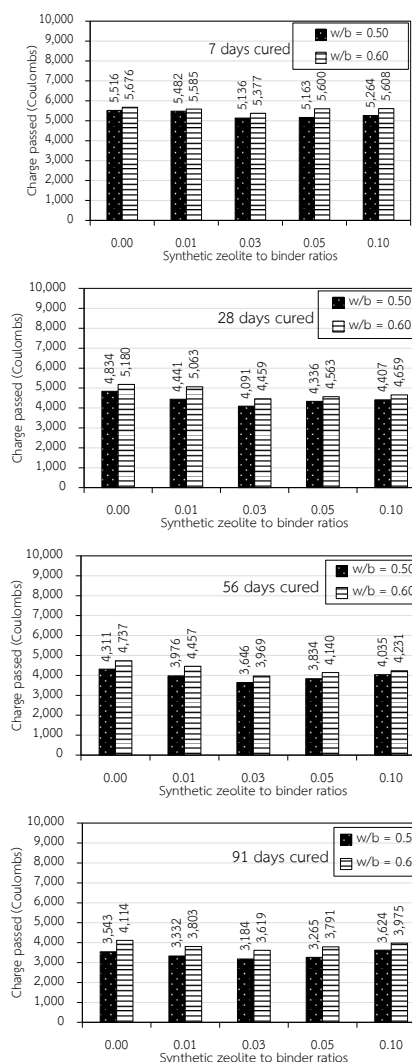
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1. การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

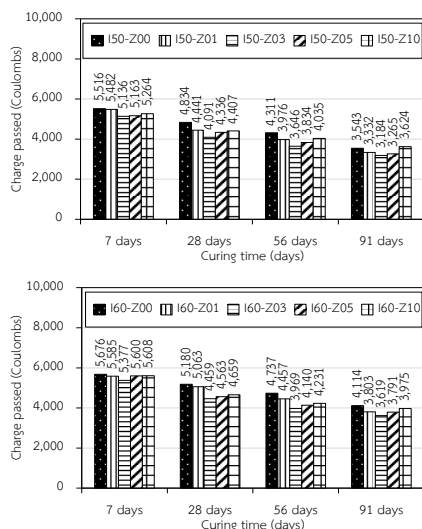
รูปที่ 3 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าต่ำกว่า และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า

จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้การไหลผ่านของประจุเป็นไปได้น้อยกว่า เมื่อปริมาณประจุที่ไหลผ่านมีค่าต่ำลงนั้นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น [8]

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำดังรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตบ่มน้ำ 7 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้ามากที่สุด และเมื่อคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้นค่าประจุไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ต่ำลง โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 3 ผลกระทบของ w/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต



รูปที่ 4 ผลกระทบของ z/b ต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

เมื่อคอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าไหลผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอล์ท์สังเคราะห์ดังรูปที่ 4 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 คอนกรีตที่ผสมซีโอล์ท์สังเคราะห์มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน และแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของ Nas et al. [14] และ Eskandari et al. [15] จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ หากพิจารณาตามเกณฑ์ ASTM C1202 พบว่า คอนกรีตนั้นมีการแทรกซึมคลอไรด์สูง สำหรับระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมากกว่า 4,000 คูลอมป์ เช่นเดียวกัน ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 และ 0.05 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตทุกส่วนผสมมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 2,000 -

4,000 คูลอมป์ เช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ 0.03 เป็นปริมาณที่เหมาะสม อาจเนื่องจากซิลิกาและอลูมินาของซีโอล์ท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็น CSH CAH ได้เต็มที่ และซีโอล์ท์สังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ด้วย จากเหตุผลข้างต้นคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 จึงมีความต้านทานคลอไรด์ดีกว่าการใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์ต่อวัสดุประสานอื่นๆ ทั้งนี้การใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์ต่อวัสดุประสานต่ำเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลของการเติมเต็มโพรงช่องว่างเกิดขึ้นไม่เต็มที่ ดังเห็นได้จากสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอล์ท์ต่อวัสดุประสาน 0.03

สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 พบว่าที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตผสมซีโอล์ท์สังเคราะห์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 และ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ หากพิจารณาตามเกณฑ์ ASTM C1202 พบว่าค่าที่ได้มีเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่สูง สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 91 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยังคงมีปริมาณประจุไฟฟ้ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีปริมาณประจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 คูลอมป์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์การแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง และคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ท์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีปริมาณประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด เช่นเดียวกันกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้ซีโอล์ท์สังเคราะห์ดังสมการที่ (1)

$$E_{cp,z=x} = \frac{CP_{z=0} - CP_{z=x}}{CP_{z=0}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $E_{cp,z=x}$ คือ ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของการใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานร้อยละ x (%), $CP_{z=0}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (Coulomb), $CP_{z=x}$ คือ ประจุที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานร้อยละ x (Coulomb)

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานบางส่วน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงขึ้นร้อยละ 6.0 10.1 และ 7.9 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วนร้อยละ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.03 มีความต้านทานคลอไรด์สูงสุด แต่คอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกับของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็กแทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3.2. การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโพลีโอสังกะเหล็กที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 และใช้อัตราส่วนซีโพลีโอสังกะเหล็กต่อวัสดุ

ประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ จากรูปพบว่า คอนกรีตผสมซีโพลีโอสังกะเหล็กที่มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโพลีโอสังกะเหล็กต่อวัสดุประสาน 0.03 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้การไหลผ่านของประจุเป็นไปได้อย่างน้อยเมื่อปริมาณประจุที่ไหลผ่านมีค่าต่ำลง นั่นหมายถึงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น [8]

จากผลการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีตตามสมการคำตอบของ Fick's 2nd law ดังสมการที่ (2)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้ซีโพลีโอสังกะเหล็ก

รหัส	ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง, E_{cp} (ร้อยละ)			
	ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)			
	7	28	56	91
I50-Z00	-	-	-	-
I50-Z01	1.3	8.1	7.8	6.0
I50-Z03	3.0	15.4	15.4	10.1
I50-Z05	2.5	10.3	11.1	7.9
I50-Z10	0.5	8.8	6.4	-2.3
I60-Z00	-	-	-	-
I60-Z01	1.6	2.3	5.9	7.5
I60-Z03	5.3	13.9	16.2	12.0
I60-Z05	1.3	11.9	12.6	7.8
I60-Z10	1.2	10.1	10.7	3.4

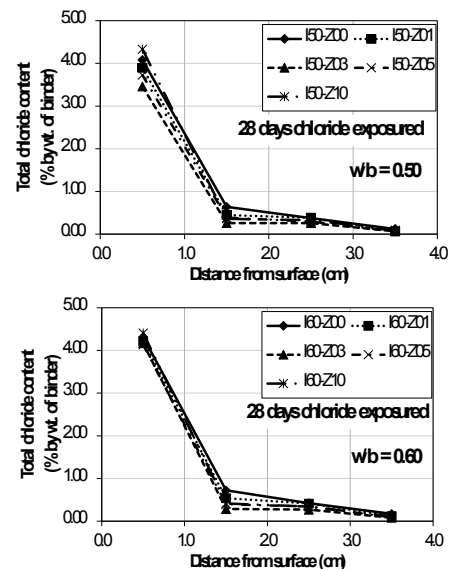
$$C(x, t) = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{D_{Cl} \times t}} \right) \right] + C_i \quad (2)$$

โดยที่ $C(x, t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x เวลา t ใดๆ (% by wt. of binder), x คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม),

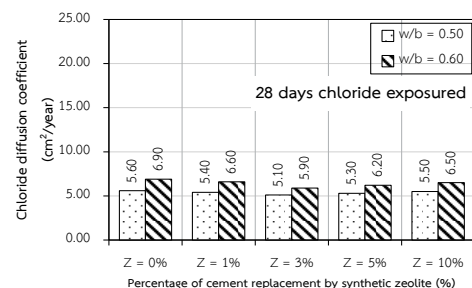
D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต ($\text{cm}^2/\text{ปี}$), t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี), C_s คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% by wt. of binder), C_e คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% by wt. of binder)

รูปที่ 6 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.00 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 จากรูปพบว่า คอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตล้วนทุกอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน หรือคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 5.60 5.40 5.10 5.30 และ 5.50 ตารางเซนติเมตรต่อปี สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ 6.90 6.60 5.90 6.20 และ 6.50 ตารางเซนติเมตรต่อปี สำหรับคอนกรีตล้วนและคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีตขึ้นอยู่กับโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตทั้งค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่าง (Average pore diameter) และความพรุนทั้งหมด (Total porosity) ซึ่งการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์ทำให้โครงสร้างโพรงช่องว่างลดลง เนื่องจากซีโอไลท์สังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกิดผลผลิตเช่น CSH และ CAH เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ซีโอไลท์สังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต จากเหตุผลข้างต้นคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จึงมี สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลงไปด้วย โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 มีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มี

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ



รูปที่ 5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์

3.3. กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 28 56 และ 91 วัน จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีกำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ทุกกระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีน้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ คอนกรีตจึงมีความทึบน้ำ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าสูง นอกจากนี้ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำสูงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดผลผลิตเช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) เพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ดังรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักมีกำลังอัดสูงสุด และคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานมีกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ เนื่องจากเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ถูกแทนที่มากขึ้น ปริมาณของสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ต่ำ กำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าต่ำกว่า แม้ซีลิกาและอลูมินาในซีโอไลต์สังเคราะห์จะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต CSH CAH เป็นต้น หรืออนุภาคนาขนาดเล็กของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ทำหน้าที่ในการช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตไม่ได้ก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้กำลังอัดจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วน ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Ikotun et al. [16] ซึ่งศึกษาซีโอไลต์ดัดแปลง แต่ผลกลับตรงข้ามกับงานวิจัยของ Canpolat et al. [17] ซึ่งศึกษาซีโอไลต์ธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น

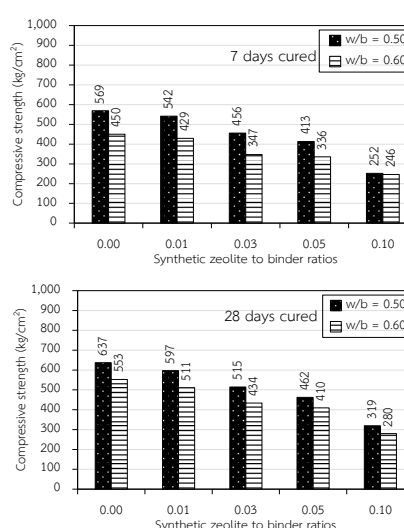
เพื่อให้การพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วนมีความชัดเจนขึ้น จึงคำนวณ

เปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ตามสมการที่ (3) โดยค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

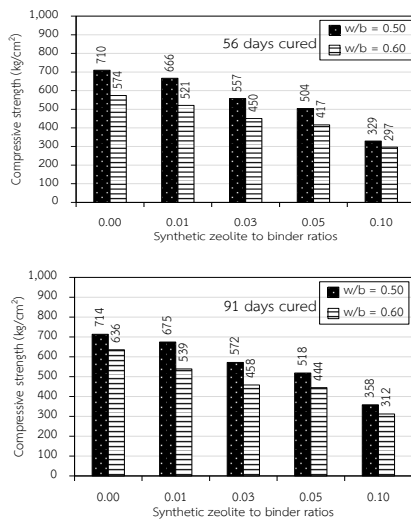
$$SI_{z=x} = \frac{S_{R,z=x}}{S_{z=0}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ $SI_{z=x}$ คือ ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ x เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (ร้อยละ), $S_{z=0}$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร), $S_{R,z=x}$ คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานร้อยละ x (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

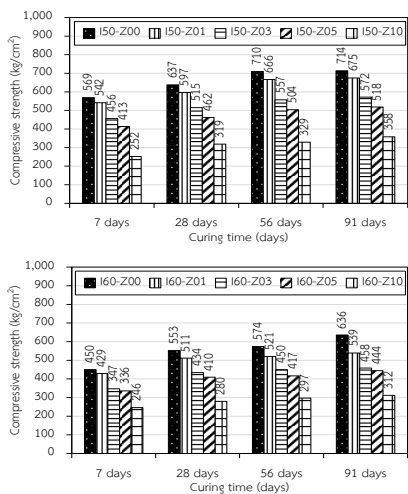
จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 การใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีกำลังอัดต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน โดยมีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 95 80 73 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วนและที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 การใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์แทนที่วัสดุประสานที่อัตราส่วน 0.01 0.03 0.05 และ 0.10 มีการพัฒนากำลังอัดที่ร้อยละ 85 72 70 และ 49 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน



รูปที่ 7 ผลกระทบของ w/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 7 ผลกระทบของ w/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต (ต่อ)



รูปที่ 8 ผลกระทบของ z/b ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 5 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

รหัส	ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์, SI (ร้อยละ)			
	ระยะเวลาบ่มน้ำ (วัน)			
	7	28	56	91
I50-Z00	100	100	100	100
I50-Z01	95	94	94	95
I50-Z03	80	81	79	80
I50-Z05	73	73	71	73
I50-Z10	44	50	46	50
I60-Z00	100	100	100	100
I60-Z01	95	93	91	85
I60-Z03	77	79	78	72
I60-Z05	75	74	73	70
I60-Z10	55	51	52	49

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์แบบแรงสูงสุด

2. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตล้วน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตล้วน

3. การใช้อัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน 0.03 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดสูงที่สุด และมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตต่ำที่สุด

4. การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตล้วน โดยกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซีโอไลท์สังเคราะห์ต่อวัสดุประสาน

5. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 20/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. Concrete structure deterioration. Bangkok: Charansanitwong Printing (in Thai); 2018.
- [2] Tangtermsirikul S. Durability and mix design of concrete (1st edition). Pathum Thani: Thammasat University, Rangsit Campus; 2003.
- [3] Davis M.E. Zeolite and molecular sieve : not just ordinary catalyst. Ind. Eng. Cham. Res. 1991;30:1675-83.
- [4] Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarch M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and Building Materials. 2012;35:1023-33.
- [5] Sabet F, Ali N, Shekarchi M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials. 2013; 44:175-84.
- [6] Ahmadi B, Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites. 2010; 32:134-41.
- [7] Karakurt C, Topcu I.B. Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete. Construction and Building Materials. 2012; 35:906-11.
- [8] Valipour, Pargar M, Shekarchi F, Khani S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete. Construction and Building Materials. 2013;41:879-88.
- [9] Valipour, Pargar M, Shekarchi F, Khani S, Moradian M. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. Construction and Building Materials. 2013;46:63-70.
- [10] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion.
- [12] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete.
- [13] British Standards. BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes.
- [14] Nas M, Kurbetci S, Nayir S. Investigation on strength and durability properties of concrete containing zeolite. 13th International Congress on Advances in Civil Engineering; 12-14 September 2018, Izmir, Turkey.
- [15] Eskandri H, Vaghefi M, Kowsari K. Investigation of mechanical and durability properties of concrete influenced by hybrid nano silica and micro zeolite. Procedia Materials Science. 2015;11:594-9.

- [16] Ikotun B.D, Ekolu S. Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. Construction and Building Materials. 2010;24:749–57.
- [17] Canpolat F, Yilmaz K, Kose M.M, Sumer M, Yurdusev M.A. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. Cement and Concrete Research. 2004;34:731–5.

ผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์

ลีน่า ปรีก¹ และทวีชัย สำราญวานิช^{2*}
lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received : 8-Sep-2020
Revised : 22-Dec-2020
Accepted : 28-Jan-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้ระบบวัสดุประสานสองชนิด และระบบวัสดุประสานสามชนิดในมอร์ตาร์ต่อความต้านทานคลอไรด์ โดยศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวในมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และ 0.50 ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสานบางส่วนตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 30 และใช้สารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานบางส่วนร้อยละ 10 ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของมอร์ตาร์ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ตาร์ (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สามารถลดปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์ภายใต้การแทรกซึมคลอไรด์ได้ โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุด นอกจากนี้ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) ในสัดส่วนที่เหมาะสมให้ผลความต้านทานคลอไรด์ที่ดีได้

คำสำคัญ: ความต้านทานคลอไรด์ มอร์ตาร์ เถ้าลอย ผงหินปูน สารขยายตัว

Effects of Binary and Ternary Binder Systems of Mortar with Fly Ash, Limestone Powder, and Expansive Additive on Chloride Resistance

Lyna Prak¹ and Taweechai Sumranwanich^{2*}

lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

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

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 8-Sep-2020
Revised	: 22-Dec-2020
Accepted	: 28-Jan-2021

Abstract

This paper aims to study the effect of binary and ternary binder system in mortars on chloride resistance. The study used fly ash (FA), limestone powder (LP), and expansive additive (EA) as partial cement replacement materials in mortars. Ordinary Portland cement type I was used as the main binder. Water-to-binder ratios were kept at 0.40 and 0.50. The FA and LP partially replaced the binder at percentages ranging from 5% to 30%, and EA partially replaced the binder at 10%. The chloride resistances of binary and ternary binder mortars were investigated. Rapid chloride penetration, rapid chloride migration and bulk chloride diffusion of mortars were tested. The study showed that the use of FA as a supplementary material of binder in mortar (binary binder system) can reduce the charge passed, chloride penetration depth, and chloride diffusion coefficient of the mortar under chloride ingress. The binary binder mortar with FA exhibited the highest chloride resistance. Furthermore, the mortar with FA and LP (ternary binder system) at appropriate proportions displayed good chloride resistance results.

Keywords: chloride resistance, mortar, fly ash, limestone powder, expansive additive

1. บทนำ

การทำลายเนื่องจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม โดยเฉพาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์ [1-3] ซึ่งการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพ [4] เมื่อคอนกรีตต้องเผชิญกับคลอไรด์ อีออนคลอไรด์จะค่อย ๆ แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับผิวเหล็กเสริมและสะสมจนมีปริมาณมากกว่าระดับคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตฟิล์มบาง ๆ (Passive film) ที่หุ้มเหล็กเสริมจะถูกทำลายและเมื่อมีความชื้นและออกซิเจนเหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมซึ่งนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง [5] ดังนั้น โครงสร้างคอนกรีตจึงต้องได้รับการออกแบบให้มีความคงทนเพียงพอที่จะทนทานต่อสภาพแวดล้อมคลอไรด์รวมทั้งยังสามารถต้านทานแรงกระทำทั้งหมดได้ ความคงทนของคอนกรีตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุพรุน การเคลื่อนที่ของไอออนสารเคมีหรือความชื้นในคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกการแพร่หรือการดูดซึมผ่านไปตามโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นเพื่อผลิตคอนกรีตให้มีความคงทนนั้นวัสดุปอซโซลานถูกนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตอย่างแพร่หลายซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น และวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ผงหินปูน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความคงทนมากขึ้น [6]

เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูงขึ้นบรรยากาศอีกด้วย [7] เถ้าลอยถูกนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างหลากหลายรูปแบบทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดสนิมเป็นต้น [8-12] ศิริระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช (2562) [13] พบว่า การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมเถ้ากันดาร้อยละ 10 ทำให้ความต้านทานการ

แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น ต้องการระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้น การพัฒนากำลังอัดต่ำ ต้องการเวลาพัฒนากำลังอัดมากกว่า 28 วัน จากงานวิจัยของ Hussain et al. (2013) [14] พบว่าการใช้เถ้าลอยทำให้ระยะเวลาบ่มน้ำคอนกรีตนานขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเข้าร่วมถึงความต้องการน้ำสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาว Deilami et al. (2017) [15] พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยส่งผลดีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ แต่กำลังอัดที่อายุต้นลดลง Sadrmomtazi et al. (2017) [16] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน

ส่วนผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อเป็นวัตถุดิบใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีต จากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [17, 18] เพื่อลดปัญหามลพิษและการกำจัดผลพลอยได้ที่เกิดจากอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการนำผลพลอยได้เหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง [19] จากงานวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้เหล่านี้มากขึ้น [20] การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้คุณสมบัติคอนกรีตดีขึ้น โดยผงหินปูนจะช่วยเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่าง (Filler effect) ภายในเนื้อคอนกรีต นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดต้นทุน อีกทั้งยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO_2 จากกระบวนการปูนซีเมนต์ (ลดปริมาณความต้องการใช้ปูนซีเมนต์) การใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นสูงขึ้น [21] ในขณะที่ทำให้ลงความต้องการระยะเวลาบ่มให้น้อยลง [14]

ปัญหาที่เกิดจากการหดตัวและการรับกำลังดึงได้ต่ำเป็นคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาสองประการพบได้บ่อยกับงานคอนกรีตในประเทศไทย โครงสร้างคอนกรีตภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง คอนกรีตอาจแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ แต่การหดตัวของคอนกรีตสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้สารเคมี

ผสมเพิ่ม เช่น สารขยายตัว (Expansive additives) โดยเมื่อคอนกรีตขยายตัว สารขยายตัวจะสร้างหน่วยแรงอัดในเนื้อคอนกรีตที่ที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้ง ซึ่งจะช่วยลดหรือขจัดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สภาพที่ถูกยึดรั้งนั้นได้ [22] จากการศึกษาของ Liu et al. (2019) [23] พบว่า การใช้สารขยายตัวในคอนกรีตบดอัดได้ด้วยตัวเอง (Self-compacting concrete) ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การหดตัวแบบออโตจีนิส (Autogenous shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อความคงทนของมอร์ตาร์ โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด (Binary binder system) และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด (Ternary binder system) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

2. วิธีการศึกษา

2.1. วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Fly ash, FA) ผงหินปูน (Limestone powder, LP) และสารขยายตัว (Expansive additive, EA) โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 เถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในขณะที่ผงหินปูนที่ใช้เป็นผงหินปูนที่ได้มาจากโรงงานย่อยหินปูนจังหวัดลพบุรี โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงหินปูนอยู่ที่ 8 μm ส่วนสารขยายตัวที่ใช้เป็นวัสดุเชิงพาณิชย์ที่มีขายตามท้องตลาดในประเทศไทยซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก โดยการขยายตัวของสารขยายตัวนี้เกิดจากผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ สำหรับมวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียดที่ 3.10

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (OPC1) เถ้าลอย (FA) ผงหินปูน (LP) และสารขยายตัว (EA)

Chemical compositions (%)	OPC1	FA	LP	EA
SiO ₂	20.20	36.10	0.06	9.60
Al ₂ O ₃	4.70	19.40	0.09	2.50
Fe ₂ O ₃	3.73	15.10	0.04	1.30
CaO	63.40	17.40	54.80	67.30
MgO	1.37	2.97	0.57	0.40
SO ₃	1.22	0.77	0.01	18.00
Na ₂ O	0.02	0.55	0.01	-
K ₂ O	0.28	2.17	0.01	-
LOI	2.72	2.81	43.80	0.40
Physical properties				
Fineness (cm ² /g)	3,430	2,460	9,260	3,500
Specific gravity	3.15	2.27	2.70	3.04

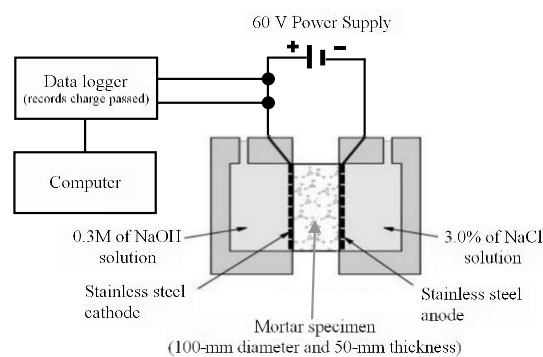
ในการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์นั้น ใช้มอร์ตาร์ทั้งหมด 20 ส่วนผสมแตกต่างกัน โดยมีมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวรวมทั้งมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด ซึ่งรายละเอียดส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิดประกอบไปด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (F30) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงหินปูนร้อยละ 15 และ 25 (L5 L15 และ L25) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยสารขยายตัวร้อยละ 10 (E10) ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิดประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 25 (F5L25) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 15 (F15L15) มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 รวมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (F25L5) และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 รวมกับสารขยายตัวร้อยละ 10 (F30E10) โดยในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 2.75 ทุกส่วนผสม และศึกษาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.50

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

No.	Designation	Cement (kg)	Sand (SSD) (kg)	Cement replacement materials (kg)			Water (kg)
				FA	EA	LP	
1	C1W40	1.00	2.75	-	-	-	0.40
2	C1F30W40	0.70	2.75	0.30	-	-	0.40
3	C1L5W40	0.95	2.75	-	-	0.05	0.40
4	C1L15W40	0.85	2.75	-	-	0.15	0.40
5	C1L25W40	0.75	2.75	-	-	0.25	0.40
6	C1E10W40	0.90	2.75	-	0.10	-	0.40
7	C1F5L25W40	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.40
8	C1F15L15W40	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.40
9	C1F25L5W40	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.40
10	C1F30E10W40	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.40
11	C1W50	1.00	2.75	-	-	-	0.50
12	C1F30W50	0.70	2.75	0.30	-	-	0.50
13	C1E10W50	0.90	2.75	-	0.10	-	0.50
14	C1L5W50	0.95	2.75	-	-	0.05	0.50
15	C1L15W50	0.85	2.75	-	-	0.15	0.50
16	C1L25W50	0.75	2.75	-	-	0.25	0.50
17	C1F5L25W50	0.70	2.75	0.05	-	0.25	0.50
18	C1F15L15W50	0.70	2.75	0.15	-	0.15	0.50
19	C1F25L5W50	0.70	2.75	0.25	-	0.05	0.50
20	C1F30 E10W50	0.60	2.75	0.30	0.10	-	0.50

2.2. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [24] ซึ่งเป็นการหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน (Charge passed) โพรงช่องว่างภายในมอร์ตาร์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในทดสอบนี้ทำการเตรียมหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ดังแสดงในตารางที่ 2 ทำการถอดแบบหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 27 และ 90 วัน และเริ่มทำการทดสอบที่ 28 และ 91 วัน โดยเมื่อตัวอย่างครบอายุกำหนดทดสอบแล้วนำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% ที่ขั้วลบ (Cathode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 60 V DC เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบถูกบันทึกเป็นปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างตลอดช่วงทดสอบมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb)

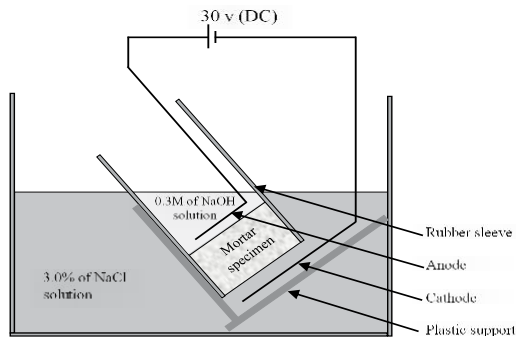


รูปที่ 1 รายละเอียดการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

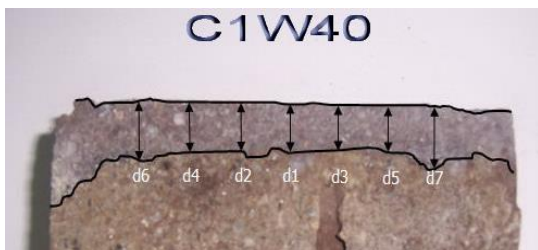
2.3. การทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่างเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 27 วัน หลังจากครบอายุบ่มแล้ว นำตัวอย่างไปตัดเป็นชิ้น หนา 5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปประกอบเข้ากับชุดทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride migration

test, RCMT) เพื่อหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration depth) โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดการทดสอบการเคลื่อนย้ายคลอไรด์แบบเร่ง



รูปที่ 3 การวัดความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์

วิธีการทดสอบนี้ประยุกต์จากวิธีการทดสอบที่เสนอโดย Tang and Nilsson (1992) [25] ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% เติมลงไปทั้งผิวลบ (Cathode) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M เติมเข้าที่ขั้วบวก (Anode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 30 V DC เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากชุดทดสอบแล้วนำไปกดให้แตกแบบผ่าซีกด้วยเครื่องกดคอนกรีตเพื่อวัดค่าความลึกการแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ตาร์ ซึ่งในการหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์จะใช้ซิลเวอร์ไนเตรด (Silver nitrate) เข้มข้น 0.1M พ่นไปที่ตัวอย่างทันทีหลังกดแตกแล้ว (พ่นด้านในเนื้อตัวอย่างที่แตก) [26] เมื่อผลึกสีขาวปรากฏบนผิวตัวอย่างที่พื้นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาจึงทำการวัดความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ โดยทำการวัดค่าความลึกตลอดหน้าตัดตัวอย่างอย่างน้อย 7 ค่าต่อหนึ่ง

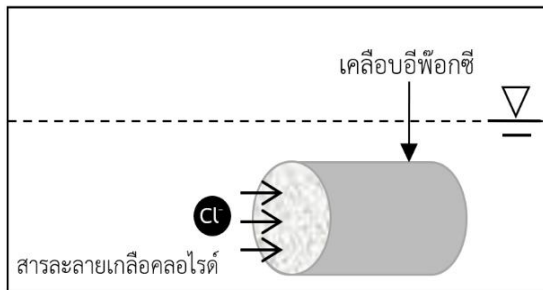
ตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3

2.4. การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด

ในการทดสอบหาปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ในมอร์ตาร์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1556 [27] โดยหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 27 วัน ก่อนนำไปเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เมื่อตัวอย่างมอร์ตาร์ครบอายุบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำและทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในตัวอย่าง โดยยกเว้นไว้หนึ่งด้านดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างได้ทิศทางเดียว หลังจากทือพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5.0% เป็นระยะเวลา 91 และ 182 วัน ตามลำดับ โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ประมาณ $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นหนา 1 เซนติเมตร ตามความยาวจากผิวหน้าที่ไม่ทือพ็อกซี (ด้านที่เผชิญคลอไรด์) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดแล้วไปบดเป็นผงผ่านตะแกรงเบอร์ 20 เพื่อนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในมอร์ตาร์ โดยในการบดตัวอย่างเลือกเอาเฉพาะบริเวณตรงกลางของแผ่นตัวอย่างทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงคลอไรด์ที่อาจปนเปื้อนจากด้านข้างได้ในการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Acid-soluble chloride content) ของมอร์ตาร์ทำตามมาตรฐาน ASTM C1152 [28] จากนั้นจึงนำข้อมูลปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต โดยใช้สมการคำตอบของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ $C(x,t)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก x ใดๆภายหลังจากเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา t ใดๆ (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, C_i คือปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, C_s คือปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, erf คือฟังก์ชันความผิดพลาด, D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตร/ปี), x คือความลึกจากผิวหน้า (เซนติเมตร) และ t คือระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)



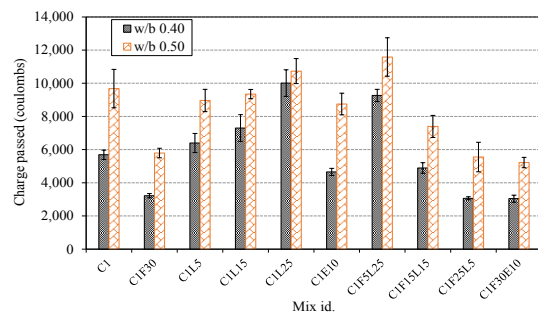
รูปที่ 4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์

3. ผลการทดลองและอภิปราย

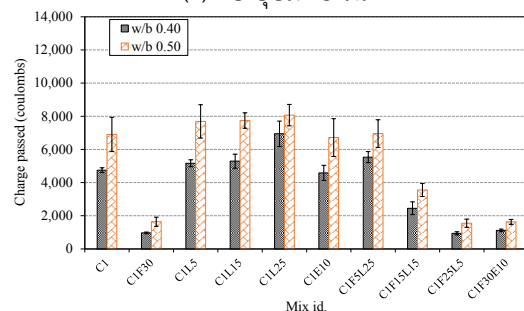
3.1. การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

รูปที่ 5 แสดงประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสม โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านยิ่งต่ำแสดงถึงมอร์ตาร์ซึ่งมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี จากการทดลอง พบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าลดลง มอร์ตาร์ที่ใช้ w/b สูง ๆ จะมีน้ำส่วนเกินในส่วนผสมมากส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงซึ่งทำให้มอร์ตาร์มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ [10] อย่างไรก็ตาม เมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอลิเมอร์เกิดได้มากขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากขึ้นเนื่องจากโพรงช่องว่างต่าง ๆ ภายในมอร์ตาร์ถูกเติมเต็มด้วยผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอลิเมอร์ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์จึงสูงขึ้นตามไปด้วย (ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านต่ำลง) เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่า

ของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอลิเมอร์และอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาเข้าไปอุดโพรงช่องว่างภายในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากขึ้นและมีการซึมผ่านที่ต่ำ [6] ในทางกลับกัน สำหรับประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น (เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 25) เนื่องมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ด้วยผงหินปูน (Dilution effect) นอกจากนี้ ผงหินปูนอาจทำหน้าที่เป็นวัสดุช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต (Filler effect) เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนอย่างเห็นได้ชัด ในขณะเดียวกัน ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์มอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมหินปูนแต่สูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย



(ก) ที่อายุบ่ม 28 วัน



(ข) ที่อายุบ่ม 91 วัน

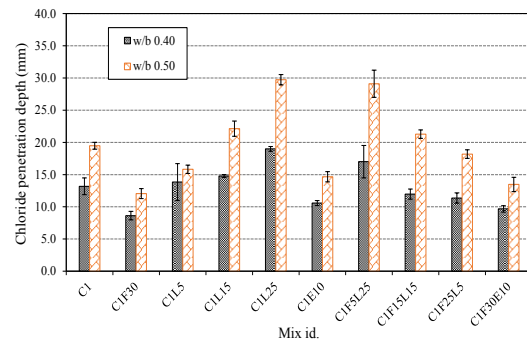
รูปที่ 5 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

เมื่อพิจารณาอัตราที่ผสมแล้วโดยรวมกับผงหินปูน (มอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อร้อยละ แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนลดลง ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนร้อยละ 15:15 (C1F15L15) และ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนร้อยละ 25:5 (C1F25L5) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ C1F25L5 ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว นอกจากนี้ ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่มีค่าใกล้เคียงกับของ C1F25L5 และของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว

3.2. ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์

รูปที่ 6 แสดงผลการทดลองการหาความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัว ที่อายุ 28 วัน พบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง เมื่อพิจารณาอัตราที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิดพบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (C1F30) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมตรงกันข้าม ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น โดยความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน ในขณะเดียวกัน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่สูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อพิจารณาอัตราที่ผสมแล้วโดยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ร้อยละแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนลดลง อย่างไรก็ตาม ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูนมีแนวโน้มสูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้ ค่าความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่าของ

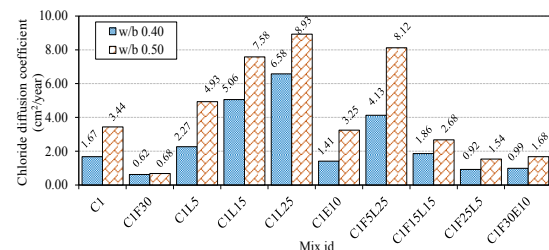
มอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนแต่มีค่าสูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว



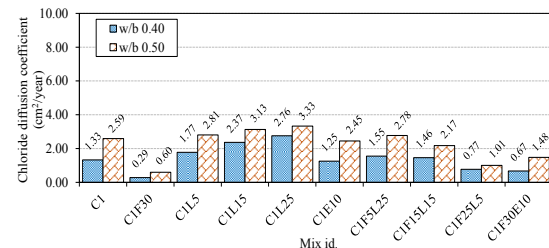
รูปที่ 6 ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์ในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูนและสารขยายตัว

3.3. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ถูกนำเสนอในรูปค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นคำตอบจากสมการกฎข้อที่สองของฟิคส์ที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองปริมาณคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 และ 182 วัน พบว่า ค่า D_a ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ลดลงและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์เพิ่มขึ้น



(ก) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน



(ข) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 182 วัน

รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์

D_u ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (C1F30) ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน โดย C1F30 มีค่า D_u ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ศึกษา อย่างไรก็ตาม มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่า D_u สูงกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้ ค่า D_u ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า D_u ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตาม ค่า D_u ของมอร์ตาร์ผสมสารขยายตัวสูงกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแต่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมหินปูน เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) พบว่า ค่า D_u ลดลงเมื่อร้อยละแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ยังคงแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนลดลง อย่างไรก็ตาม มีเพียงส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูนในสัดส่วนร้อยละ 25:5 (C1F25L5) ที่มีค่า D_u ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 182 วัน นอกจากนี้ ค่า D_u ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยรวมกับสารขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนทั้งที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 และ 182 วัน

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของระบบวัสดุประสานสองชนิดและสามชนิดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และสารขยายตัวต่อความต้านทานคลอไรด์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ตาร์ (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สามารถลดปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในมอร์ตาร์ได้ดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุดและสูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

2. ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน ความลึกการแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด) สูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน กล่าวคือ ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนต่ำกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ยิ่งลดลง

3. การใช้สารขยายตัวที่ร้อยละ 10 ในมอร์ตาร์ที่ใช้ระบบวัสดุประสาน 2 ชนิด และระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด ช่วยเพิ่มความต้านทานคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

4. ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน (ระบบวัสดุประสาน 3 ชนิด) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ใช้ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยลง

5. ผลการทดลองทั้งจากการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน) ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์และการแพร่คลอไรด์ (สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์) ของมอร์ตาร์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสามไปใช้ประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ได้เหมือนกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 17/2550 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system. *Materials and Structures*. 2004;37:387-96.
- [2] Angst U. Chloride induced reinforcement corrosion in concrete. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2011.

- [3] Rissardi CZ, de Souza CFN, Pacheco F, Christ R, Silveira LF. Chloride attack evaluation on concrete compositions according to Brazilian standard ABNT NBR 6118 specification. *J Build Rehabil.* 2016;1(19):1-12.
- [4] 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.
- [5] Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete Research.* 1996;26(4):513-19.
- [6] Jena T, Panda KC. Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz. *Advances in Concrete Construction.* 2018;6(1):47-68.
- [7] Zunino F, Boehm– Courjault E, Scrivener K. The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination. *Materials and Structures.* 2020;53(44):1-15.
- [8] Mehta PK. Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cement and Concrete Research.* 1981;11(4):507-18.
- [9] Mehta PK, Monterio P. J. M. *Concrete: Microstructure. Properties and Materials.* (3rd Edition), The McGraw-Hill Companies. 2006.
- [10] Massazza F. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites.* 1993;15(4):185-214.
- [11] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials.* 2007;21(4):1534-41.
- [12] Nguyen C.V, Lambert P, Bui V.N. Effect of locally sourced pozzolan on corrosion resistance of steel in reinforced concrete beams. *International Journal of Civil Engineering.* 2020;18:619-30.
- [13] 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)
- [14] Hussain K, Choktaweekarn P, Saengsoy W, Srichan T, Tangtermsirikul S. Effect of cement types, mineral admixtures, and bottom ash on the curing sensitivity of concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials.* 2013;20(1):94-105.
- [15] Deilami S, Aslani F, Elchalakani M. Durability assessment of self- compacting concrete with fly ash. *Advances in Concrete Construction.* 2017;19(5):489-99.
- [16] Sadrmomtazi A, Tahmouresi B, Amooie M. Permeability and mechanical properties of binary and ternary cementitious mixtures. *Advances in Concrete Construction.* 2017;5(5):423-36.
- [17] Naik TR, Singh SS, Hossain MM. Properties of high-performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash. *Construction and Building Materials.* 1995;9(4):195-204.
- [18] Praveen Kumar VV, Ravi Prasada D. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. *Advances in Concrete Construction.* 2019;7(2):75-85.

- [19] Juenger MCG, Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015;78(1):71-80.
- [20] Sunil BM, Manjunatha LS, Lolitha R, Subhash CY. Potential use of mine tailings and fly ash in concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2015;3(1):55-69.
- [21] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short term hydration. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(12):1939-47.
- [22] Lam NT, Sumranwanich T, Krammart P, Yodmalai D, Sahamitmongkol R, Tangtermsirikul S. Durability properties of concrete with expansive additive. *Research and Development Journal*. 2008;19(4):8-15.
- [23] Liu K, Shui Z, Sun T, Ling G, Li X, Cheng S. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;211:120-29.
- [24] American society for testing materials. ASTM 1202-97. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004; Vol. 4.02.
- [25] Tang L, Nilsson LO. Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages. *Nordic Concrete Research*. 1992;11(1):162-71.
- [26] Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of AgNO_3 solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *ACI Materials Journal*. 1992;89(6):587-92.
- [27] American Society for Testing and Materials. ASTM 1556. Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. *Annual Book of ASTM Standard*. 2004; Vol. 4.02.
- [28] 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; Vol. 4.02.

ผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว

สุนัน ปานสาคร^{1*} และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์¹

sunan.p@en.rmutt.ac.th^{1*}, jaturong.l@en.rmutt.ac.th¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 19-Mar-2020
Revised : 28-Aug-2020
Accepted : 14-Sep-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ -40°C ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ จากการทดลองพบว่าการแช่เยือกแข็งที่ -40°C ใช้เวลาระหว่าง 1-1.5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็ง -4 ถึง -5°C ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่ -18°C ใช้เวลาระหว่าง 2-2.5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็ง -0.2 ถึง -1°C ทั้งนี้พบความแตกต่างของเส้นกราฟการแช่เยือกแข็งระหว่างผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยเฉพาะช่วงหลังการลดอุณหภูมิไปยังเป้าหมายที่ -40°C และจากการตรวจวัดค่าสีข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนการแช่เยือกแข็งให้ค่า L^*, a^*, b^* เท่ากับ 38.05, 10.40, 23.74 และ 18.00, 5.56, 3.65 ตามลำดับ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ -40°C พบแนวโน้มการลดลงของค่าสีทั้งสามค่า (L^*, a^*, b^*) โดยที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็งที่ทำให้ค่าการลดลงที่สูงขึ้น เช่นเดียวค่าความแข็งซึ่งพบว่าการแช่เยือกแข็งข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ให้ค่าเท่ากับ 37.49 นิวตัน และ 46.47 นิวตัน หลังการทำละลายพบแนวโน้มการลดลงโดยที่ความแข็งของข้าวไรซ์เบอร์รี่น้อยกว่าข้าวเสาไห้ และค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่าง 56-65 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมของทุกสภาวะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัย และผู้บริโภคมีความชอบโดยรวมสูงสุดกับข้าวห่อใบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C

คำสำคัญ: ข้าว ใบบัว การแช่เยือกแข็ง ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวเสาไห้

Effect of Freezing Temperature on Quality of Rice Wrapped Lotus Left Product

Sunan Pamsakhom^{1*} and Jaturong Langkapin¹
sunan.p@en.rmutt.ac.th^{1*}, jaturong.l@en.rmutt.ac.th¹

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

Received	: 19-Mar-2020
Revised	: 28-Aug-2020
Accepted	: 14-Sep-2020

Abstract

The aim of this research was to study effect of freezing temperature at -18°C and -40°C on quality of lotus leaf wrapped rice from Sao Hai and Riceberry products. From the experiment, it was concluded that freezing at -40°C took between 1-1.5 hr to reach the initial freezing temperature from -4 to -5°C . While freezing at -18°C the process took was taken between 2-2.5 hr to reach the initial freezing temperature from -0.2 to -1°C . The differences in the freezing curve between the lotus leaf wrapped rice products from Sao Hai and Riceberry were found, especially after the temperature draw to the target at -40°C . Before freezing, rice wrapped in lotus leaf from Sao Hai rice and Riceberry were measured the color value with L^* , a^* , b^* and the results showed 38.05, 10.40, 23.74 and 18.00, 5.56, 3.65 respectively. After the products were freeze at -18°C and -40°C the trend was found of decreasing of the three color values (L^* , a^* , b^*) with low freezing temperatures providing a higher reduction. Likewise, the hardness values, which were found before freezing, rice wrapped in lotus leaf from Sao Hai and Riceberry, were equal to 37.49 N and 46.47 N. After the products were thawed the hardness value decreased, which the hardness value of Riceberry was less than Sao Hai rice. Moreover, moisture content of the products was presented between 56-65%wb and total microbial counts of all conditions were in the safe standard criteria. Moreover, consumers gave the higher satisfaction on lotus leaf wrapped rice from Riceberry frozen at -40°C than others.

Keywords: Rice, Lotus left, Freezing, Riceberry, Sao Hai

1. บทนำ

ข้าวหอมใบบัว เมนูที่หารับประทานได้ไม่ยากนัก เป็นอาหารสูตรโบราณมีมานานตั้งแต่สมัยราชวงศ์เหลียงทางตอนใต้ของจีน เป็นการนำข้าวมาผัดกับเครื่องเทศต่างๆ และผสมกับส่วนผสมหลากหลายชนิด เช่น เนื้อหมู กุนเชียง เห็ดหอม กุ้งแห้ง ไข่เค็ม เม็ดบัว จากนั้นนำไปห่อรวมกันในใบบัวแล้วนำไปนึ่งจนได้ออกมาเป็นข้าวอบใบบัวที่มีกลิ่นหอมของใบบัวช่วยเพิ่มความอร่อยอาหาร และมีคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากในข้าวหอมใบบัวมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตให้พลังงานแก่ร่างกาย [1] มีเนื้อสัตว์เป็นแหล่งโปรตีนช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ มีไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวให้พลังงานและความอบอุ่นแก่ร่างกาย [2] มีเห็ดหอมที่มีสรรพคุณทางยาช่วยป้องกันโรคกระดูกในเด็ก ถ้ารับประทานเป็นประจำจะช่วยป้องกันการอักเสบของผิวหนัง ช่วยป้องกันการเกิดอาการอักเสบและหลอดเลือดแข็งตัว มีเส้นใยช่วยทำให้ขับถ่ายได้ง่าย นอกจากนี้ยังช่วยจับสารเคมีที่เป็นพิษและทำให้ผ่านลำไส้ได้อย่างรวดเร็ว ลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ได้ [3] มีเม็ดบัวที่มีวิตามินซีสูง โปรตีนสูงและยังมีฟอสฟอรัส เหล็ก แต่ส่วนประกอบหลักจะเป็นคาร์โบไฮเดรตมากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีไขมัน จึงช่วยให้ไม่อ้วนและให้พลังงานมาก มีสรรพคุณเด่นช่วยในเรื่องของการบำรุงเลือดสำหรับสตรีที่ประจำเดือนมาไม่ปกติ อีกทั้งยังช่วยขับลม แก้อท้องผูก ท้องเฟ้อ [4,5] เป็นต้น

ในการผลิตข้าวหอมใบบัวพบว่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ได้แก่ “ข้าว” ซึ่งข้าวเป็นธัญพืชที่ประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย ข้าวเป็นธัญพืชสำคัญที่สุดในด้านโภชนาการ คนส่วนใหญ่นิยมบริโภคข้าวในลักษณะข้าวหุงสุกหรือการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงการแปรรูปในลักษณะข้าวแช่แข็ง ซึ่งพบว่าการแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกที่มีค่าอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่นข้าวมีค่าปริมาณของอะไมโลเพกตินสูงจะมีความคงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็งและการละลายได้มากกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง รวมถึงยังพบว่าเมื่อนำข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอกหุงสุกแช่เยือกแข็งสามารถช่วยเพิ่มความคงตัวของสารกาบาและแอนโทไซยานิน [6,7] ดังนั้นข้าวหอมใบบัวจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภค ถึงแม้ข้าวหอมใบบัวจะมี

คุณค่าทางโภชนาการสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ด้วยขั้นตอนการผลิตที่ค่อนข้างยุ่งยาก ส่วนผสมหลากหลายชนิดจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่หารับประทานได้ค่อนข้างยาก และเดิมทีผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวนิยมนำข้าวเสาไห้มาเป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากมีลักษณะการแยกตัวของเมล็ดข้าวค่อนข้างดีเป็นข้าวในกลุ่มอะไมโลสสูง [8] ซึ่งเนื้อสัมผัสค่อนข้างแข็งด้วยคนปัจจุบันหันมาใส่ใจสุขภาพกันมากขึ้นดังนั้นข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีและข้าวกลุ่มที่ไม่เมล็ดมีสีเขตน้ำตาลหรือม่วง เช่น ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่จึงเป็นที่นิยม ทั้งนี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีลักษณะเป็นข้าวเจ้าสีม่วงเข้ม รูปร่างเมล็ดเรียวยาว มีคุณสมบัติเด่นทางด้านโภชนาการ คือ มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ เบต้าแคโรทีน, แกมมาโอไรซานอล, วิตามินอี, มีดัชนีน้ำตาลต่ำถึงปานกลาง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีสาร “แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)” เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดอุดตันในสมอง ด้วยการยับยั้งไม่ให้เลือดจับตัวเป็นก้อน ชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร [9,10] ปัจจุบันยังไม่มีการวิจัยใดรายงานชัดเจนเกี่ยวกับการนำข้าวไรซ์เบอร์รี่มาผลิตข้าวหอมใบบัว ประกอบกับข้าวหอมใบบัวมีข้อเสียในแง่มีอายุการเก็บรักษาได้ในระยะเวลานานเนื่องจากเกิดการเน่าเสีย และปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร เช่น ปฏิกิริยาทางเคมี เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เอนไซม์ของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส การเกิดแก๊ส การไหลเยิ้มของของเหลว ดังนั้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นนักวิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้เทคนิคการแช่เยือกแข็งเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการถนอมรักษาอาหารประเภทหนึ่ง โดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วยการให้ความเย็นระดับเยือกแข็งจะสามารถเก็บรักษาได้ยาวนาน เพราะอุณหภูมิที่ต่ำจะสามารถยับยั้งและหยุดการเสื่อมเสียในอาหารอันเนื่องมาจากการเจริญของจุลินทรีย์ [11]

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนักวิจัยจึงมีแนวคิดในการผลิตข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่กึ่งสำเร็จรูป เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับผู้บริโภค ทั้งช่วยส่งเสริม

ให้ผู้บริโภคได้รับสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เป็นการส่งเสริมและรักษาภูมิปัญญาท้องถิ่นให้คงอยู่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมากขึ้น รวมถึงผลิตภัณฑ์ดังกล่าวนี้จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้ประกอบการในการนำไปขยายต่อเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

- **การเตรียมตัวอย่างข้าวห่อใบบัว :** จัดซื้อข้าวพันธุ์เสาไห้ และพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่คุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์สะอาด จากร้านค้าที่ได้มาตรฐาน ควบคุมความชื้นเริ่มต้นของข้าวที่ประมาณ 12-10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก นำมาบรรจุสถานะสูญญากาศถุงละ 1,000 กรัม เก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 4°C จนกว่าจะนำไปใช้ในการทดสอบ จากนั้นเตรียมส่วนผสมในการทำข้าวห่อใบบัว ประกอบด้วย น้ำซอสปรุงรส เห็ดหอม เม็ดบัว กุ้งแห้ง หมู กุนเชียง และไข่เค็ม

ขั้นตอนการเตรียมข้าวห่อใบบัวโดยซังตัวอย่างข้าวและน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:2 ใส่ลงในหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและทำการเปิดสวิตช์เพื่อทำการหุงสุกจนได้ตัวอย่างข้าวห่อใบบัว และนำใบบัวหลวงมาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 เซนติเมตร หนึ่งให้ความร้อนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างข้าวห่อใบบัวที่ได้เตรียมไว้ซังน้ำหนักตัวอย่างละ 150 กรัม ผสมกับน้ำซอสปรุงรสคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำส่วนผสมอื่นจัดเรียงในใบบัว แล้วนำข้าวห่อใบบัวผ่านการคลุกเคล้าใส่ลงในใบบัว ทำการห่อข้าวในใบบัวและนึ่งโดยใช้หม้อต้มน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ขั้นตอนนี้เป็นทำให้ให้ความร้อนกับข้าวห่อใบบัวในทุกตัวอย่างซึ่งตัวอย่างนี้ถือเป็นตัวอย่างควบคุม จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมทั้งทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ

- **กระบวนการแช่เยือกแข็งและการทำละลายข้าวห่อใบบัว :** จากขั้นตอนการการเตรียมตัวอย่างข้าวห่อใบบัวด้วยข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่และนึ่งให้ความร้อน จากนั้นนำไปใส่ภาชนะพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดพอดีกับข้าวห่อใบบัว 10x10x5 เซนติเมตร (กxยxส) ปิดด้วยกระดาษฟอยล์และติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด k ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างข้าวห่อใบบัวที่บรรจุในภาชนะเพื่อวัดอุณหภูมิ โดยบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ยี่ห้อ Fuke รุ่น 2625A ก่อนนำ

ภาชนะพร้อมสายเทอร์โมคัปเปิลวางในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอากาศนิ่ง (Still air freezer) ควบคุมอุณหภูมิที่ -18°C โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง จากนั้นทำเช่นเดิมปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น -40°C ทำการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นนำมาทำละลายโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทันทีหลังจากออกจากเครื่องแช่เยือกแข็งที่กำลังไฟ 1,100 วัตต์ เวลา 2.30 นาที ซึ่งกำลังไฟฟ้าและเวลาดังกล่าวนี้ได้ผ่านการทดสอบถึงความเหมาะสมในการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีหลังกระบวนการแช่เยือกแข็ง

- **การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี**
ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) : ทดสอบปริมาณความชื้นโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างจำนวน 10 กรัมอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Binder FD115, Germany) อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน [12] และหาค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Aqualab 3TE, USA)

ค่าสี (Color value) : วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (JC801, Japan) รายงานผลในรูปของ L^* , a^* , b^* ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่า เป็นการแสดงการวัดค่าสีโดยที่ค่าสี L^* คือ ค่าความสว่าง (lightness) มีค่าความสว่างมากเมื่อเข้าใกล้ 100 และมีความมืดเมื่อเข้าใกล้ 0 ค่า a^* คือค่าความเป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นลบและมีค่าความเป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่งก่อนทำการวัดค่าสีเครื่องวัดสีถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 98.11, -0.11 และ -ตามลำดับ 0.08

ค่าความแข็ง : ตัวอย่างข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวเสาไห้ห่อใบบัวนำไปทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Instron Universal Tester Machine) ตามวิธีการทดสอบ Back extrusion ค่าที่อ่านได้เป็นค่าที่แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวห่อใบบัวในหน่วยของนิวตัน [13]

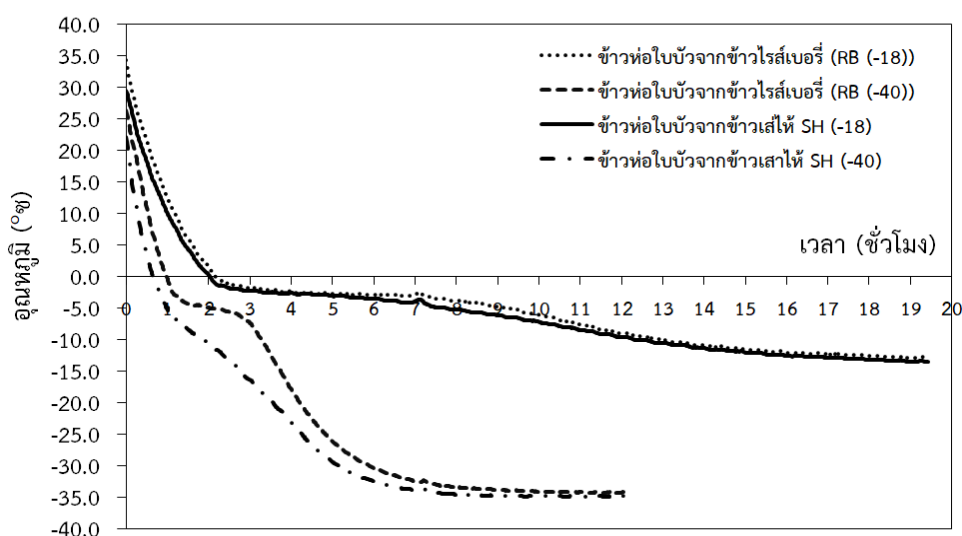
ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม (Total viable count) : อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก Maturin และ Peeler [14]

การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส : ทำการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคจำนวน 30 คน โดยวิธี Hedonic Scaling 9 point ซึ่งมี คะแนน 9 ได้แก่ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด 2 หมายถึง หมายถึงไม่ชอบมาก 3 หมายถึงไม่ชอบปานกลาง 4 หมายถึงไม่ชอบเล็กน้อย 5 หมายถึงเฉยๆ 6 หมายถึงชอบเล็กน้อย 7 หมายถึงชอบปานกลาง 8 หมายถึงชอบมาก 9 หมายถึงชอบมากที่สุด ในด้านสี ลักษณะปรากฏ การแยกตัวของเมล็ดข้าว กลิ่น ความนุ่ม ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม

• **การวิเคราะห์ทางสถิติ :** ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และ ทำ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัว ทำการศึกษาการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับที่อุณหภูมิ -18°C และ -40°C โดยเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีกับการใช้ข้าวสองชนิด ได้แก่ ข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ ในการผลิตข้าวหอมใบบัว สมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ค่าสี ค่าความแข็ง ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม และระดับความพึงพอใจของผู้บริโภค พร้อมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1-2 และตารางที่ 1-3



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง

3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิข้าวหอมใบบัวระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง

จากขั้นตอนการผลิตข้าวหอมใบบัวโดยใช้ข้าวเสาไห้ (SH (C)) จากนั้นนำไปผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C (SH (-18)) และอุณหภูมิ -40°C (SH (-40)) พร้อมทั้งผลิตข้าวหอมใบบัวโดยใช้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (RB (C)) จากนั้นนำไปผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C (RB (-18)) และอุณหภูมิ -40°C (RB (-40)) ตามลำดับ ก่อนการแช่เยือกแข็งข้าวหอมใบบัวทุกตัวอย่างได้ผ่านการนึ่งโดยใช้หม้อต้มน้ำ

ควบคุมอุณหภูมิที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งตามอุณหภูมิที่กำหนด พบลักษณะเส้นกราฟการแช่เยือกแข็ง (Freezing curve) ในแต่ละตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1 โดยอุณหภูมิตัวกลางและชนิดของข้าวมีผลต่ออัตราการลดลงของอุณหภูมิ ทั้งนี้การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C พบว่าจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30-35°C จะใช้เวลาระหว่าง 2-2.5 ชั่วโมง เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่มีอุณหภูมิถึงสภาวะที่เรียกว่าการเย็นยิ่งยวด (Super cooling) ก่อนที่น้ำในผลิตภัณฑ์จะมีการ

คายความร้อนแฝงเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นผลึกน้ำแข็ง [15] และพบจุดเยือกแข็งที่ประมาณ -0.2 ถึง -1°C จากนั้นแช่เยือกแข็งต่อเนื่องจนกระทั่งสามารถลดอุณหภูมิลงไปยังเป้าหมายที่ -18°C จึงจะมีแนวโน้มคงที่ของอุณหภูมิ ซึ่งลักษณะการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C พบแนวโน้มของการลดของอุณหภูมิที่เร็วกว่าโดยพบว่าจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30-35°C จะใช้เวลาระหว่าง 1-1.5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิจนถึงจุดเยือกแข็งที่ประมาณ -4 ถึง -5°C

และจากรูปที่ 1 พบว่าการใช้อุณหภูมิแช่เยือกแข็งที่ -40°C ส่งผลต่อลักษณะการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่วงหลังการลดอุณหภูมิไปยังเป้าหมายที่ -40°C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์และคุณสมบัติที่แตกต่างกันของข้าวทั้งสองชนิด เช่น ข้าวเสาไห้อยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณอะไมโลสสูง [16] และผ่านการขัดขาว ในขณะที่ข้าวไรซ์เบอร์รี่อยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณอะไมโลสปานกลาง [17] และไม่ผ่านการขัดขาว เป็นต้น

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ค่าสี			ค่าอเตอร์แอดคิตีวิตี้
	L*	a*	b*	(a _w)
SH (C)	38.05±0.49 ^a	10.40±0.15 ^a	23.74±0.26 ^a	0.91±0.01 ^a
SH (-18)	33.53±0.04 ^b	9.87±0.07 ^b	22.86±0.17 ^b	0.90±0.01 ^{bc}
SH (-40)	31.75±0.03 ^c	9.70±0.04 ^b	19.49±0.11 ^c	0.86±0.01 ^c
RB (C)	18.00±0.96 ^d	5.56±0.56 ^c	3.65±0.79 ^d	0.91±0.01 ^{ab}
RB (-18)	16.50±0.12 ^e	5.73±0.05 ^c	4.25±0.05 ^d	0.90±0.01 ^{bc}
RB (-40)	16.39±0.10 ^e	4.82±0.08 ^d	3.08±0.07 ^e	0.89±0.01 ^c

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

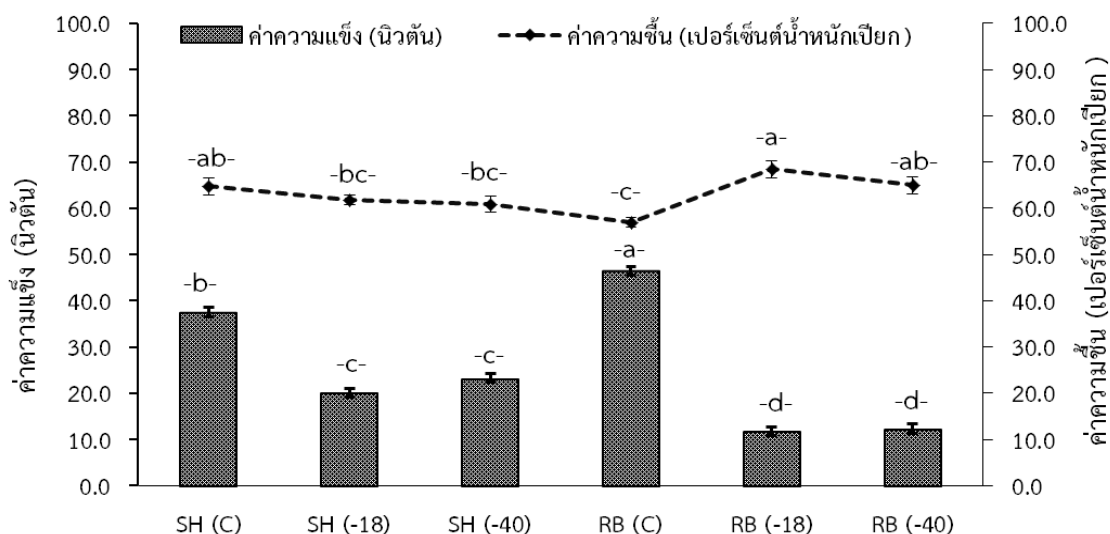
3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสีและค่าอเตอร์แอดคิตีวิตี้ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ค่าสีนับเป็นปัจจัยหนึ่งของการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์อาหารใดๆ จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยเรื่องสีของผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัยแรกๆ เสมอ ซึ่งจากตารางที่ 1 พบว่าค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของกลุ่มข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และกลุ่มข้าวห่อใบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้ก่อนการแช่เยือกแข็ง SH (C) ให้ค่า L*, a*, b* เท่ากับ 38.05, 10.40 และ 23.74 ตามลำดับ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ผ่านการแช่เยือก

แข็งที่ -18°C (SH (-18)) และ -40°C (SH (-40)) พบแนวโน้มการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของค่าสีทั้งสามค่า (L*, a*, b*) โดยที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็งที่ต่ำทำให้ค่าการลดลงที่สูงขึ้น ทั้งนี้ในข้าวห่อใบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่แสดงผลการวัดค่าสีในทิศทางเดียวกันนั่นคือ ก่อนการแช่เยือกแข็ง RB (C) ให้ค่า L*, a*, b* เท่ากับ 18.00, 5.56 และ 3.65 ตามลำดับ และลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็ง -18°C (RB (-18)) และ -40°C (RB (-40)) ค่า L* ระหว่าง 16.39-16.50, ค่า a* ระหว่าง 4.82-5.73 และ ค่า b* ระหว่าง 3.08-4.25 การลดลงของค่าสีหลังการแช่เยือกแข็งสอดคล้องกับค่าความชื้นที่ลดลงเนื่องมาจากการระเหยของน้ำจากผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดลักษณะสีคล้ำ ในส่วนค่าอเตอร์แอดคิตีวิตี้ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อม

เสียของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ ซึ่งส่งผลให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย ทั้งนี้ น้ำที่มีอยู่ในอาหารแต่ละชนิดมีการยึดติดอยู่ในโครงสร้าง หรือโมเลกุลของสารอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารในรูปแบบและความแข็งแรงต่างกัน รวมถึง

ปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่อการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญได้ดีในอาหารที่ความชื้นสูง จากตารางที่ 2 พบค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวจากข้าวทั้งสองชนิดอยู่ที่ประมาณ 0.86-0.91 ซึ่งถือว่าสูงและอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารสด [15]



รูปที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ชนิดของข้าวและอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าข้าวหอมใบบัวจากข้าวเสาไห้ SH (C) และข้าวไรซ์เบอร์รี่ RB (C) ก่อนการแช่เยือกแข็งให้ค่าความแข็ง 37.49 นิวตัน และ 46.47 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18°C และ -40°C พบแนวโน้มการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของทั้งสองชนิดพันธุ์ข้าว โดยที่จากผลการทดสอบการใช้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ในการผลิตข้าวหอมใบบัวแช่เยือกแข็งเมื่อนำมาผ่านการทำละลายและทดสอบค่าความแข็งพบว่าให้ค่าที่น้อยกว่าการใช้ข้าวเสาไห้ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้กับปริมาณความชื้น

พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงส่งผลต่อค่าความแข็งที่ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกันซึ่งโดยพื้นฐานจะมีโครงสร้างภายในเมล็ดที่แตกต่างกันจะมีผลต่อลักษณะการดูดซึมน้ำและเมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดข้าวเกิดการคลายตัว มีความสามารถในการดูดน้ำไว้ในโครงสร้าง เม็ดข้าวจึงมีความแข็งลดลง [18] ประกอบกับสูญเสียน้ำหลังการทำละลายน้ำแข็ง เกิดขึ้นเนื่องจากในระหว่างการแช่เยือกแข็งเซลล์ของผลิตภัณฑ์ถูกทำลายเนื่องจากผลึกน้ำแข็งรวมถึงน้ำบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ออกมาภายนอกเซลล์ เมื่อทำการละลายน้ำแข็งของเหลวบางส่วนในเซลล์จึงเกิดการสูญเสียออกจากชั้นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นหากเกิดการสูญเสียน้ำหลังการละลายน้ำแข็งย่อมสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของเซลล์ที่ลดลง ดังนั้นจึงอาจส่งผลต่อเนื้อสัมผัสที่ค่าความแข็งลดลง [19] ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหารโดยเฉพาะการเสื่อม

เสียเนื่องจากจุลินทรีย์ อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย เนื่องจากมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ทำให้อาหารเสื่อมเสีย อีกทั้งความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ ในส่วนกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัว พบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และส่งผลไปยังการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากหากความชื้นต่ำจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างแข็งและในทางตรงกันข้ามหากความชื้นสูงมากเกินไปจะทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นิ่มและแฉะไม่น่ารับประทาน ดังนั้นจากรูปที่ 2 พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัวจากข้าวเสาไห้ให้ค่าความชื้น 60-65 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ในขณะที่ข้าวหอโบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ให้ค่าความชื้นที่ 56-65 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ซึ่ง

หลังการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัวจากข้าวเสาไห้มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยของค่าความชื้นแต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในขณะที่หลังการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่อุณหภูมิ -18°C และ -40°C พบการเพิ่มขึ้นของความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของแป้งข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็ง ซึ่งเป็นการแช่เยือกแข็งแบบแช่ลึกลงน้ำแข็งจึงมีขนาดใหญ่ ไปดันหรือตีเมแทมเพนเซลล์ เป็นผลให้เมื่อนำมาทำละลายของเหลวในเซลล์ไหลออกมาจึงเกิดการชุ่มน้ำ [20] ส่งผลต่อค่าความชื้นที่วัดได้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมของผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังกระบวนการแช่เยือกแข็ง

สภาวะการทดสอบ	ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม (โคโลนีต่อกรัม)
SH (C)	10
SH (-18)	<10
SH (-40)	<10
RB (C)	10
RB (-18)	25
RB (-40)	20

*ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

3.4 ผลการทดสอบหาปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมของผลิตภัณฑ์ข้าวหอโบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

การปนเปื้อนจุลินทรีย์ในอาหารนับว่าเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมเสียที่เกิดขึ้นกับอาหาร รวมถึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ทำให้คุณภาพอาหารเปลี่ยนไปจนไม่เป็นที่ยอมรับ จากการทดสอบหาปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าข้าวหอโบบัวที่ผลิตจากข้าวเสาไห้ SH (C) และข้าวไรซ์เบอร์รี่ RB (C) ก่อนการแช่เยือกแข็งมีปริมาณจุลินทรีย์โดยเท่ากับ 10 โคโลนีต่อกรัม และเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C และ -40°C พบว่าข้าวหอโบบัวที่ผลิตจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่มีปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม <10 โคโลนีต่อกรัม ถึง 25 โคโลนี

ต่อกรัมแต่เมื่อมาพิจารณาตัวเลขก็อาจจะมองได้ว่าการแช่เยือกแข็ง RB (-18) มีปริมาณจุลินทรีย์สูงกว่า RB (-40) เล็กน้อยอาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิ -18°C ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งที่นานกว่า -40°C จึงอาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมเล็กน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมทั้งหมดที่กล่าวมาอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัย อ้างอิงได้จากมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข.746/2548 กำหนดมาตรฐานของข้าวหอม ให้มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อกรัม [21]

3.5 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่หลังการทำให้ละลายน้ำแข็ง

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ทางประสาทสัมผัสมีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ การบริโภคอาหารความรู้สึกที่ซับซ้อนที่เกิดจากการทดสอบทาง

ประสาทสัมผัสนี้ จะส่งผลให้เกิดการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค โดยทำการประเมินการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของอาหารใช้ประสาทสัมผัสของผู้ชิม คือ สี ลักษณะปรากฏ การแยกตัวของเมล็ดข้าว กลิ่น ความนุ่ม ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม ให้ผลแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่หลังการทำให้ละลายน้ำแข็ง

ปัจจัยการทดสอบ	ตัวอย่าง			
	SH (-18)	SH (-40)	RB (-18)	RB (-40)
สี	6.53±1.81 ^a	6.30±1.38 ^a	6.50±1.48 ^a	6.60±1.86 ^a
ลักษณะปรากฏ	6.80±1.39 ^a	6.70±1.30 ^a	6.77±1.37 ^a	6.93±1.53 ^a
การแยกตัวของเมล็ดข้าว	6.37±1.67 ^a	5.73±1.36 ^b	6.23±1.33 ^{ab}	6.40±1.22 ^a
กลิ่น	6.20±1.56 ^{ab}	5.50±1.57 ^b	6.07±1.49 ^{ab}	6.90±1.93 ^a
ความนุ่ม	6.33±1.72 ^a	6.60±1.47 ^a	6.30±1.49 ^a	6.53±1.61 ^a
ความเหนียว	5.77±1.60 ^a	6.17±1.49 ^a	5.80±1.59 ^a	6.00±1.60 ^a
รสชาติ	6.40±1.46 ^a	5.70±1.83 ^a	5.97±1.63 ^a	6.50±1.97 ^a
ความชอบโดยรวม	6.80±1.47 ^a	6.33±1.16 ^a	6.60±1.32 ^a	6.90±1.06 ^a

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในแถวแนวนอนเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์คือการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18°C (SH (-18)) และ -40°C (SH (-40)) กับข้าวห่อใบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18°C (RB (-18)) และ -40°C (RB (-40)) ทั้งนี้ก่อนการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภค ได้ทำการละลายน้ำแข็งโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 1,100 วัตต์ เวลา 2.30 นาที และทดสอบกับผู้บริโภคจำนวน 30 คน ที่ระดับคะแนนสูงสุด 9 คะแนน ให้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งทั้ง 4 ตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในทุกด้านของการทดสอบ แต่เมื่อพิจารณาในระดับคะแนนพบว่าข้าวห่อใบบัวจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -40°C (RB(-40)) ให้ค่าระดับความพึงพอใจด้าน สี ลักษณะปรากฏ การแยกตัว

ของเมล็ดข้าว กลิ่น และความชอบโดยรวมสูงกว่าผลิตภัณฑ์อื่นที่ 6.60 6.93 6.40 6.90 และ 6.90 ตามลำดับ ในขณะที่ด้านความนุ่มและรสชาติผู้บริโภคมีความพึงพอใจสูงที่สุดกับข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -40°C (SH (-40)) และ -18°C (SH (-18))

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ของการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับที่ -18°C และ -40°C เปรียบ เทียบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี ค่าความแข็ง ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม ระดับความพึงพอใจของผู้บริโภค กับการใช้ข้าวสองชนิด คือ ข้าวเสาไห้ และข้าวไรซ์เบอร์รี่ ในการผลิตข้าวห่อใบบัว จากการทดสอบพบว่า การแช่เยือกแข็งที่ -40°C

ซ ใช้เวลาระหว่าง 1-1.5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็งที่ประมาณ -4 ถึง -5°C ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่ -18°C ใช้เวลาระหว่าง 2-2.5 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็งที่ -0.2 ถึง -1°C ทั้งนี้ยังพบความแตกต่างของเส้นกราฟการแช่เยือกแข็งระหว่างผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวห่อใบบัวข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยเฉพาะช่วงหลังการลดอุณหภูมิไปยังเป้าหมายที่ -40°C และจากการตรวจวัดค่าสีข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนการแช่เยือกแข็งให้ค่า L^*, a^*, b^* เท่ากับ 38.05, 10.40, 23.74 และ 18.00, 5.56, 3.65 ตามลำดับ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ -40°C พบแนวโน้มการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของค่าสีทั้งสามค่าโดยที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็งที่ต่ำทำให้ค่าการลดลงที่สูงขึ้น และจากการตรวจวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตีให้ค่าระหว่าง 0.86-0.91 เช่นเดียวค่าความแข็งซึ่งพบว่าการแช่แข็งข้าวห่อใบบัวจากข้าวเสาไห้และข้าวไรซ์เบอร์รี่ให้ค่าเท่ากับ 37.49 นิวตัน และ 46.47 นิวตัน หลังการทำละลายพบแนวโน้มการลดลงโดยค่าความแข็งของข้าวไรซ์เบอร์รี่น้อยกว่าข้าวเสาไห้ และค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่าง 56-65 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมของผลิตภัณฑ์ทุกสภาวะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยสำหรับการบริโภค และจากการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในทุกด้านของการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อุดหนุนทุนวิจัย “ทุนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาพื้นที่ ประเพณีร่วมทุน” ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Palanasingh C, Thaweesuk D. Exercise and energy source. Journal of science and technology Mahasarakham University. 2013;31(3): 316-22. (in Thai)
- [2] Srijumroon A. Food and nutrition: prevention and treatment of diseases. 1st ed. Bangkok : Chulalongkorn University Press; 2013. p. 226. (in Thai)
- [3] Thananiveskul A. Food and nutrition (Mushroom, nutritional value). Villagers Doctor Magazine; 2006. Vol 327. (in Thai)
- [4] Kandikere R.S. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (Nelumbo nucifera) seeds. Food Chemistry. 2008; 107(1):174-84.
- [5] Anonymous. Medicinal properties of lotus seeds. 2019 [cited 2019 December 26]. Available from: <https://www.honestdocs.co/medicinal-properties-of-lotus-seeds> (in Thai)
- [6] Chuakaew A. Effect of chemical and physico-chemical properties of mixed rice on cooking quality and frozen fried rice. Master of Science (Food Technology), Faculty of Technology, Khon Kaen University. 159 pages. (in Thai)
- [7] Pamsakhom S, Langkapin J, Muangrat R. Effect of freezing on the stability of GABA and Anthocyanin content of cooked germinated. Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2019; 18(1):1-13. (in Thai)
- [8] Naiwikul A. Rice: Science and Technology. 1st ed. Bangkok : Kasetsart University Press; 2004. p. 366. (in Thai)
- [9] Singhasurasak H. Rice berry. 2019 [cited 2019 December 22]. Available from: <http://riceberry-rice.blogspot.com/2013/12/blog-post.html>.
- [10] Rice Science Center. Riceberry. 2019 [cited 2019 December 22]. Available from: <https://sites.google.com/site/baanmaklomp/khaw-risbe-xri> (in Thai)

- [11] Uttapichat B. Food microbiology. 5th ed. revised version. Thaksin University Bookstore Songkhla Province : Numsilp Advertising Company Limited, 2012. p. 427. (in Thai)
- [12] AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Arlington, Virginia, USA; 1990.
- [13] Reyes V.G, Jindal V.K. A small sample back extrusion test for measuring texture of cooked rice. *Journal of Food Quality*. 1989; 13(2):109-18.
- [14] Maturin L, Peeler J.T. Chapter 3. Aerobic Plate Count, In: Food and Drug Administration (FDA), *Bacteriological Analytical Manual Online*. 8th ed. Silver Spring, Berlin; 2001.
- [15] Rangsadthong W. Food processing technology. 5th ed. Bangkok : Tex and Journal Public Company Limited.; 2014. p. 500. (in Thai)
- [16] Innawong B, Mahayothee B. Research report Application of near infrared spectroscopy for amylose content determination in milled rice. Research and Development Institute Silapahom University; 2015. P. 98 (in Thai)
- [17] Bainak J, Wongpakdee R, Suksomboon A. Development of Dried Rice Noodle (Kanom-geen) from Riceberry. *Agricultural Science Journal*. 2015; 46(3)(Suppl.): 361-4. (in Thai)
- [18] Kerdpi boon S, Charoendee D, Chuntawong N, Asawachit P. Effect of Cooking Methods on Morphological and Physical Properties of Hang Rice during Cooking. *Agricultural Science journal*. 2012;46(3):41-4. (in Thai)
- [19] Sirijariyawat A, Phakul W, Arsanok A. Effect of freezing on quality of ripe mango flesh. *Khon Kane Agr. J*. 2015; 43(1)(Suppl.): 846-50. (in Thai)
- [20] Supawiriyakorn W. Effects of lactic acid and phosphate on quality of chilled-frozen fish fillets (*Pangasianodon gigas*). Research report. Maejo University. 2011. (in Thai)
- [21] Community Product Standards. Khao Lam Community Product Standard. 2005 [cited 2019 December 26]. Available from: http://tcps.tisi.go.th/pub /tcps1366_50.pdf (in Thai)

ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3

สุรินทร์ แห่มงาม^{1*}, จักรี รัชมีฉาย², ศศิวรรณ อินทรวงศ์³, ธนาวิทย์ โปริยเจริญ¹ และธนาภัทร์ เทศสวัสดิ์¹
surin.n@en.mutt.ac.th^{1*}, chakkree@mutt.ac.th², sasiwanin@mutt.ac.th³, projaroen@gmail.com¹,
thanapat1155@gmail.com¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 10-Mar-2021
Revised : 8-Apr-2021
Accepted : 9-Apr-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 ซึ่งระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนเติมเงินเข้าบัตรและส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งการทำงานของระบบนั้นจะใช้บัตร RFID เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยจะต้องทำการเติมเงินลงบัตร RFID และนำบัตรนี้มาทาบบกับส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อเปิดระบบให้เครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 5 ชนิด คือ พัดลม หลอดอินแคนเดสเซนต์ เครื่องเป่าผม กาต้มน้ำร้อน เตารีดไอน้ำ เป็นระยะเวลา 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมงต่อเนื่อง และทำการอ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์-ชั่วโมงมิเตอร์เปรียบเทียบกับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมา จากผลการทดสอบพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.58

คำสำคัญ: ระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า เติมเงิน อาศัยโน้ต-ชั่วโมงมิเตอร์ อาร์เอฟไอดี

Prepaid Electric Energy Consumption System via RFID Controlled By Arduino Uno R3

Surin Ngaemngam^{1*}, Chakkree Rat-sameechar², Sasiwan Intarawong³, Thanawit Projaroen¹, Thanapat Tessawat¹
surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, chakkree@rmutt.ac.th², sasiwanin@rmutt.ac.th², projaroen@gmail.com¹,
thanapat1155@gmail.com¹

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

² Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Institute of Research and Development, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received : 10-Mar-2021
Revised : 8-Apr-2021
Accepted : 9-Apr-2021

Abstract

This research presents a prepaid electric energy consumption system via RFID controlled by Arduino Uno R3. The system is composed of two parts: the prepaid machine and the electric power control machine. The operation of the system uses RFID cards as an intermediary for communication between the prepaid machine and the electric power control machine. However, it is necessary to top up money on the RFID card and to place this card on the electric power control machine to turn on the system to use the electrical appliances. Moreover, the efficiency of the system was tested using five electrical appliances namely: electric fan, incandescent lamp, hair dryer, hot kettle, and steam irons for the duration of 72 hours or three days. 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 0.58 %.

Keywords: Electric energy consumption control system, Top up money, Arduino, Kilowatt-hour meter, RFID

1. บทนำ

ปัจจุบันขั้นตอนการเรียกชำระค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ทั้งในส่วนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง หรือหอพัก ห้องเช่า ต่าง ๆ จะใช้วิธีการคือให้เจ้าหน้าที่ทำการจดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์-ชั้วโมมิเตอร์ ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ ยูนิิต และนำมาคำนวณหาค่าใช้จ่ายการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน และที่ผ่านมามีข้อร้องเรียนว่าบางครั้งเจ้าหน้าที่ไม่ได้ไปจดเองแต่ใช้วิธีการประมาณการจากเดือนที่ผ่านมาทำให้เกิดความเสียหายต่อการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า และในแต่ละเดือนมีผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมากไม่จ่ายค่าใช้ไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้า เจ้าของหอพัก บ้านเช่า ตามกำหนดเวลา ทำให้เกิดความเสียหายทั้งต่อการไฟฟ้า เจ้าของหอพัก ห้องเช่า ต่าง ๆ รวมถึงสร้างความลำบากให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าเอง ในกรณีที่การไฟฟ้าหยุดจ่ายไฟและเก็บกิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ไป ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สามารถใช้ไฟฟ้าได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกและแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น การเติมเงินผ่านบัตรเครดิตเพื่อใช้ไฟฟ้า จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการไฟฟ้า เจ้าของหอพัก ห้องเช่า รวมถึงผู้ใช้ไฟฟ้าด้วย ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอระบบการใช้ไฟแบบจ่ายก่อน ประดิษฐ์ ลักษณะฮาร์ดแวร์ [1] เสนอการพัฒนาโมเตอร์แบบจ่ายก่อน โดยใช้โปรแกรมภาษาซีในการติดต่อกับฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ส่วนมากเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพในการใช้งานกลางแจ้งและมีราคาในการสร้างค่อนข้างสูง บัณฑิต แก้วศรี [2] เสนอระบบชำระเงินค่าไฟฟ้าแบบล่วงหน้าด้วยเครื่องสมาร์ตการ์ดกิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์แบบรีโมทข้อมูลผ่านโครงข่ายคู่สายเช่า จากการศึกษาพบว่าระบบการใช้งานค่อนข้างซับซ้อน ต้องมีการทดสอบค่าความต้านทาน ค่าความเป็นฉนวนและค่าระยะทางความยาวของคู่สายโทรศัพท์ เพื่อที่จะกำหนดเลือกเส้นและคู่สายของโทรศัพท์ที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 โดยมีวัตถุประสงค์ของโครงการดังต่อไปนี้ 1) เพื่อศึกษาระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 2) เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างชุดควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า 3)

เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งาน Arduino Uno R3 กับการควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ เป็นเครื่องวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีหน่วยวัด เป็นเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง โครงสร้างของกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ ประกอบด้วยขดลวดกระแสต่ออนุกรมกับโหลด และขดลวดแรงดัน ต่อขนานกับโหลด ขดลวดทั้งสองขดจะพันอยู่บนแกนเหล็กที่ออกแบบโดยเฉพาะและมีจานอะลูมิเนียมบาง ๆ ยึดติดกับแกนหมุนวางอยู่ในช่องว่างระหว่างแกนลวดทั้งสอง [3] โดยกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ 1 เฟสของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [3]

ในงานวิจัยนี้กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ ใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ากับโมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือ PZEM

2.2 Arduino UNO R3

Arduino เป็นชื่อเรียกของ platform micro controller ชนิดหนึ่งเป็นชุดควบคุมขนาดเล็กที่สามารถนำไปเชื่อมต่อเพื่อสั่งการเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นโครงการที่นำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่างๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะ คือมีการเขียนไบบารีของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกัน สามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ โดยตัวโครงการได้ออกบอร์ดทดลองมาหลายรูปแบบ เพื่อใช้งานกับ IDE ของตนเอง สาเหตุหลักที่ทำให้

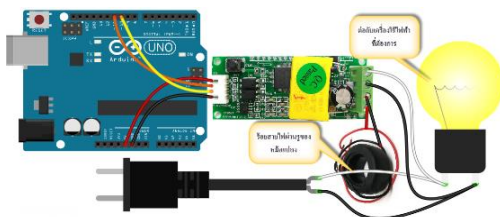
Arduino เป็นนิยมนมาก เป็นเพราะซอฟต์แวร์ที่ใช้กันร่วมกัน สามารถโหลดได้ฟรี และตัวบอร์ดทดลองมีราคาถูก [4] บอร์ด Arduino UNO R3 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บอร์ด Arduino UNO R3 [4]

2.3 โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า

โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า หรือ PZEM แสดงดังในรูปที่ 3 PZEM ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าของไฟบ้าน วัดค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ วัดค่ากำลังไฟฟ้า และวัดค่ากำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมง (Wh) ซึ่งสามารถนำค่าเหล่านี้ไปใช้คำนวณค่าไฟฟ้าได้ หรือวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิด [5]



รูปที่ 3 โมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า [5]

ในงานวิจัยนี้ PZEM ถูกนำไปใช้ในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และส่งข้อมูลเข้าโปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป

2.4 Radio Frequency Identification

ระบบ Radio Frequency Identification หรือ RFID จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน คือส่วนแรกคือทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก ที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการโดยแท็กจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ ส่วนที่สองคือเครื่องสำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลภายในแท็ก ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ในงานวิจัยนี้บัตร RFID นำมาใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและ

ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยจะต้องทำการเติมเงินลงบัตร RFID และนำบัตรที่มีจำนวนเงินมาทาบกับส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อเปิดระบบให้เครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ [6] บัตร RFID แสดงดังรูปที่ 4

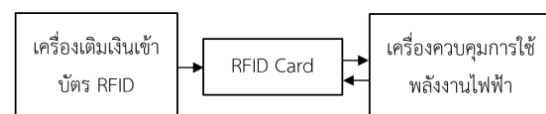


รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบ RFID [6]

3. การออกแบบระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า

3.1 ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID

แผนผังการควบคุมการรวมของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่านบัตร RFID แสดงดังรูปที่ 5 โดยระบบแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนเติมเงินเข้าบัตร และ ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 5 แผนผังการควบคุมการทำงานของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID



(ก)

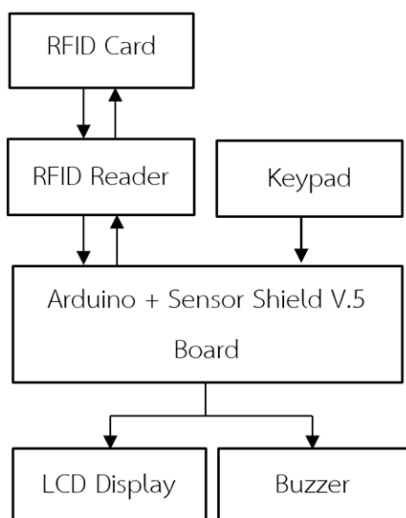


(ข)

รูปที่ 6 ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID

(ก) เครื่องเติมเงินเข้าบัตร (ข) เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

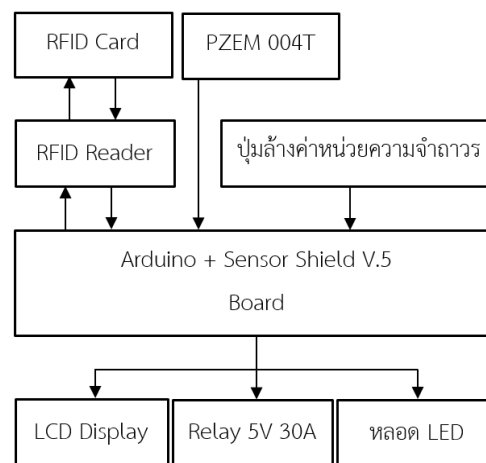
ส่วนที่ 1 ส่วนเติมเงินเข้าบัตร ดังแสดงใน รูปที่ 7 จะประกอบด้วยโมดูล RFID Reader เป็นอุปกรณ์ที่เปรียบเหมือนอินพุตและเอาต์พุต ทำหน้าที่อ่านบัตรและเขียนบัตร โดยรับค่าจากบอร์ด Arduino และในส่วนที่เป็นอินพุตนั้น ประกอบไปด้วย Keypad เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมการเติมเงินลงบัตร การอ่านบัตรและล้างข้อมูลในบัตร เป็นต้น ทางด้านของเอาต์พุตจะประกอบด้วยจอแสดงผล LCD (LCD Display) ซึ่งใช้แสดงผลจากการสั่งการของ Keypad ส่วนโมดูล Buzzer เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ผู้ใช้งานทราบการใช้งานผ่านเสียง เมื่อมีการกด Keypad หลักการทำงานของส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ต้องทำงานให้มีความสัมพันธ์โดยจะใช้ Arduino เป็นตัวควบคุมหลัก



รูปที่ 7 ส่วนเติมเงินเข้าบัตร

ส่วนที่ 2 ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นส่วนที่ใช้สำหรับอ่านบัตรและนำข้อมูลไปคิดคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า ในส่วนของการอ่านบัตรนี้ จะมีส่วนที่ทำหน้าที่เหมือนกับส่วนที่เติมเงินลงบัตรอยู่ก็คือ RFID Reader ซึ่งทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด Arduino โดยในด้านของอินพุตจะประกอบด้วย ปุ่มล้างค่าหน่วยความจำถาวร และ Module PZEM 004T ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้คำนวณ เป็นต้น ต่อมาในส่วนของเอาต์พุตจะประกอบไปด้วย จอแสดงผล LCD (LCD Display) ซึ่งใช้แสดงค่าพลังงานไฟฟ้า, ค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจากการใช้งานในส่วนของรีเลย์ (Relay) จะใช้สำหรับเปิด-ปิดระบบ และ

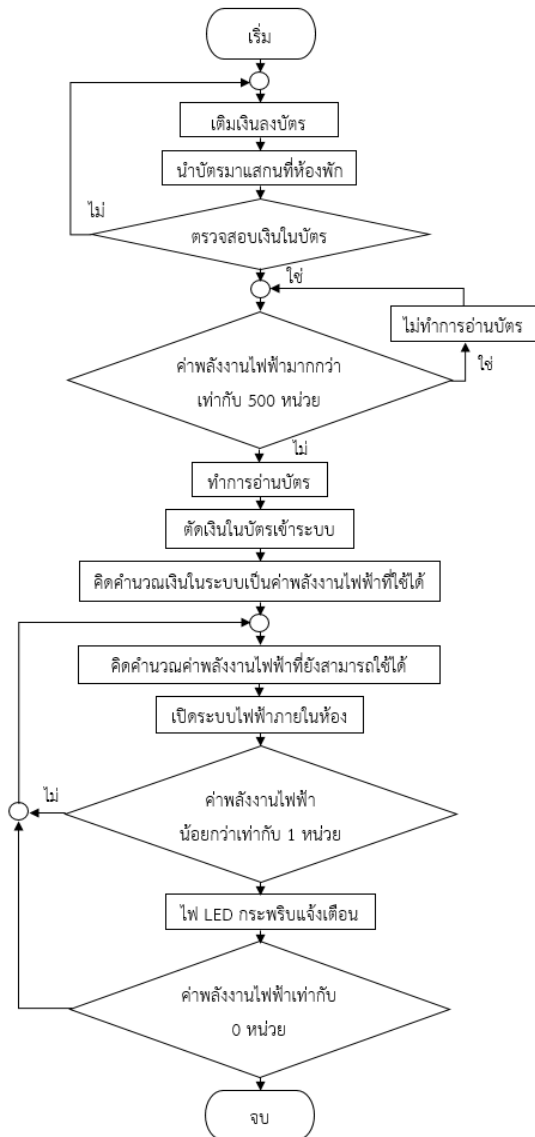
หลอด LED ใช้สำหรับแจ้งเตือนเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้เหลือต่ำกว่าที่กำหนด



รูปที่ 8 ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

3.2 ขั้นตอนการใช้งาน

ขั้นตอนการใช้งานระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า แบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 แสดงดังรูปที่ 9 โดยเจ้าของอาคารจะทำการเติมเงินเข้าบัตร จากนั้นผู้อาศัยจะนำบัตรมาเสกนที่ห้องพักเพื่อเปิดระบบ และใช้ไฟฟ้าภายในห้อง โดยการเติมเงินจะเติมขั้นต่ำหนึ่งบาท เมื่อผู้ใช้งานเติมเงินตามเงื่อนไขเรียบร้อยแล้ว ระบบจะคิดคำนวณเงินเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ แล้วทำการเปิดระบบภายในห้องพักโดยแสดงผลผ่านจอ จนกระทั่งค่าพลังงานไฟฟ้าเหลือน้อยกว่าหนึ่ง หน่วย จะทำให้หลอดไฟ LED แจ้งเตือนผู้ใช้ให้ทำการเติมเงิน ไม่เช่นนั้น จะไม่สามารถใช้ไฟฟ้าได้



รูปที่ 9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบการใช้พลังงานไฟฟ้า

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวน 5 ชนิด คือ พัดลม หลอดไฟ โตรี่เป่าผม กาต้มน้ำร้อน เตารีดไอน้ำ โดยมีการทดสอบดังนี้

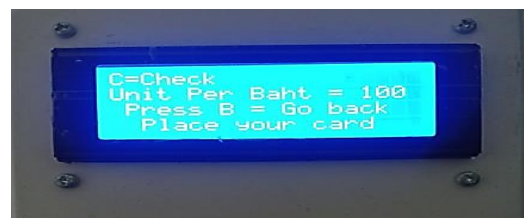
4.1 ทดสอบการเติมเงิน, การตรวจสอบยอดเงิน และการเคลียร์เงินภายในบัตร ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 – 14

ตารางที่1 ผลการทดสอบการเติมเงิน, การตรวจสอบยอดเงิน และการเคลียร์เงินภายในบัตร

ครั้งที่	จำนวนเงินที่เติม (บาท)	ผ่าน	จำนวนเงินในบัตร (บาท)	ผ่าน	จำนวนเงินหลังจากเคลียร์บัตร (บาท)	ผ่าน
1	300	✓	300	✓	0	✓
2	600	✓	600	✓	0	✓
3	900	✓	900	✓	0	✓
4	1200	✓	1200	✓	0	✓
5	1500	✓	1500	✓	0	✓
6	1800	✓	1800	✓	0	✓
7	2100	✓	2100	✓	0	✓
8	2400	✓	2400	✓	0	✓
9	2700	✓	2700	✓	0	✓
10	3000	✓	3000	✓	0	✓



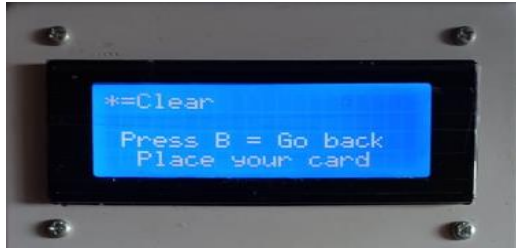
รูปที่ 10 ข้อความแสดงเมื่อทำการเติมเงินเข้าในบัตรจำนวน 300 บาท



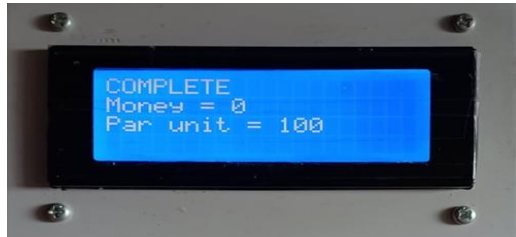
รูปที่ 11 การเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบจำนวนเงินในบัตร



รูปที่ 12 ข้อความแสดงเมื่อตรวจสอบจำนวนเงินในบัตรเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 13 การเข้าสู่ขั้นตอนการล้างจำนวนเงินในบัตร



รูปที่ 14 ล้างจำนวนเงินในบัตรเรียบร้อยแล้ว

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 10-14 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมเงินตามจำนวนเงินที่กำหนด จำนวนเงินที่เติมลงในบัตรมีค่าเท่ากับจำนวนเงินที่แสดงบนหน้าจอ และเมื่อทำการล้างข้อมูลในบัตร จำนวนเงินในบัตรจึงมีค่าเท่ากับ 0 บาท ดังนั้นการทดสอบจึงไม่มีความผิดพลาดแต่อย่างใด

4.2 ทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ครั้งที่	พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)	ระบบเปิด	LED กระพริบ	เติมเงินใหม่	LED ดับ	ระบบปิด
1	1	✓	✓	✓	✓	✓
2	1	✓	✓	✓	✓	✓
3	1	✓	✓	✓	✓	✓
4	1	✓	✓	✓	✓	✓
5	1	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ : ระบบเปิด หมายถึง สามารถใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าได้

LED กระพริบ แสดงถึง เงินในระบบใกล้หมดและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 1 หน่วย

เติมเงินใหม่ หมายถึง เติมเงินเข้าไปในบัตร RFID และนำบัตรนี้มาทาบกับส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 1 หน่วย

LED ดับ แสดงถึง ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับ 0

ระบบปิด หมายถึง ไม่สามารถใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าได้

จากผลการทดสอบจากตารางที่ 2 พบว่าระบบสามารถทำงานได้ถูกต้อง โดยตัวอย่างการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานไฟฟ้า จนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 15 – 19



รูปที่ 15 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่าเท่ากับ หนึ่งหน่วย ระบบเปิดอัตโนมัติ

รูปที่ 15 เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่าเท่ากับ หนึ่งหน่วยระบบเปิดอัตโนมัติ และเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 16 หลอดไฟ LED กระพริบเพื่อเป็นการแจ้งเตือน



รูปที่ 16 ค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วย หลอด LED กระพริบ

เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วย ให้ทำการเติมเงินเข้าระบบใหม่ โดยเมื่อเติมเงินเรียบร้อยแล้วจะขึ้นข้อความ “Complete” แสดงบนหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 การเติมเงินเข้าระบบขณะมีโหลดต่อใช้งาน

เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าตั้งแต่หนึ่งหน่วยขึ้นไป หลอดไฟ LED จะดับ ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้มีค่ามากกว่าหนึ่งหน่วย หลอด LED ดับ

เมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่าเป็น 0 หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 19 ระบบควบคุมจะทำการสั่งให้ระบบปิด



รูปที่ 19 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้มีค่า 0 หน่วย

4.3 ทดสอบและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจาก กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และจากระบบควบคุมการใช้พลังงาน

ไฟฟ้าที่สร้างขึ้น โดยทำการเติมเงินเข้าระบบ 100 บาท และกำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับหนึ่งบาท/หน่วย เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า และทดสอบการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น โดยทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง ด้วยวิธีการทดสอบและค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องวัดทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 20-23 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 20 ค่าพลังงานไฟฟ้าจากกิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ เริ่มต้นที่ 8.52 หน่วย



รูปที่ 21 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้จากระบบควบคุม ที่นำเสนอมีค่าเริ่มต้นที่ 100 หน่วย



รูปที่ 22 ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จาก กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ เมื่อครบกำหนดมีค่า 10.44 หน่วย



รูปที่ 23 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่และสามารถใช้งานได้ ที่อ่านได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอ เมื่อครบกำหนด 3 วัน คงเหลือ 98.06561270 หน่วย

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และจากระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

วันที่	ค่าที่ได้อ่านจากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (หน่วย)			ค่าที่อ่านได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอ (หน่วย)			ค่าผิดพลาด (ร้อยละ)
	หน่วยที่ เริ่มต้น	หน่วยที่ครบ กำหนด	ค่าพลังงานที่ ใช้ไป	หน่วยที่ เริ่มต้น	หน่วยที่ครบ กำหนด	ค่าพลังงานที่ ใช้ไป	
วันที่ 1	8.52	10.44	1.92	100	98.065	1.934	0.74
วันที่ 2	8.52	12.52	4	100	95.967	4.032	0.81
วันที่ 3	8.52	15.03	6.51	100	93.477	6.522	0.19
						ค่าเฉลี่ย	0.58

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ วันที่ 1 หน่วยที่เริ่มต้นคือ 8.52 หน่วย และทำการวัดต่อเนื่องจนถึงวันที่ 3 หน่วยที่ครบกำหนดมีค่า 15.03 หน่วย จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้ไปมีค่าทั้งหมด 6.51 หน่วย และค่าที่อ่านได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอ วันที่ 1 หน่วยที่เริ่มต้นคือ 100 หน่วย และทำการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 3 จะเหลือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ยังสามารถใช้ได้ 93.477 หน่วย จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้ไปมีค่าทั้งหมด 6.522 หน่วย จากการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์และค่าที่อ่านได้จากระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมามีค่าต่างกันคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.58 และจากการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 วัน 72 ชั่วโมง ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ไม่พบปัญหาจากการทำงานของระบบ

5. วิเคราะห์และสรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยผ่าน RFID ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 ที่สะดวกต่อการใช้งานและต้นทุนต่ำ โดยระบบแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเติมเงินเข้าบัตร และ ส่วนควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน ทำการทดสอบตั้งแต่การเติมเงินเข้าบัตร RFID การนำบัตร RFID ไปใช้ในการเปิดระบบเพื่อใช้ไฟฟ้า การล้างข้อมูลในบัตร RFID การทดสอบเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วยและเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่สามารถใช้ได้มีค่าเป็นศูนย์ รวมถึงการทดสอบการต่อระบบที่นำเสนอเพื่อ

ควบคุมการใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 5 ชนิดโดยแยกเป็น เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดทำงานต่อเนื่องได้แก่ พัดลม หลอดอินแคนเดสเซนต์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดทำงานไม่ต่อเนื่อง (มีการตัดต่อตามอุณหภูมิที่ใช้งาน) ได้แก่ เครื่องเป่าผม กาต้มน้ำร้อน และเตารีดไอน้ำ โดยทำการทดสอบ โดยต่อใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมงต่อเนื่อง พบว่าระบบสามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์กับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากระบบควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมามีค่าต่างกันคิดเป็นร้อยละ 0.58 และสำหรับต้นทุนการสร้างระบบควบคุมต้นแบบนี้ประมาณ 3,500 บาท

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายกัณฑ์เอนก ทุ่มแก้ว และ นายประวี ภู่อินทร์ นักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยตรวจสอบข้อมูลและจัดการข้อมูลผลการทดสอบ และ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

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] W. Jantin, Kilowatt-Hour Meter. [Internet]. 2008 [cited 2020 Nov 10]. Available from: <http://watcharin2121.blogspot.com/2016/05/kilowatt-hour-meter.html> (in Thai)
- [4] Pirohmki A. Arduino UNO R3. [Internet] 2017 [cited 2020 Nov 10]. Available from: <http://dd4toew.blogspot.com/2017/05/arduino-uno-r3.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] Nhootong W. et al, 2004, Radio Frequency Identification (RFID). [Internet] 2020 [cited 2020 Aug 12]. Available from: <http://www.lampangtc.ac.th/mnfile/branch5/file/knowledge/RFID.pdf> (in Thai)

การพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาสำหรับวิสาหกิจชุมชน

กิตติพันธ์ บุญโตสิตรกุล^{1*} ปราโมทย์ วีรานุกูล¹ วิหาร ดีปัญญา² และกิตติพงษ์ สุวีโร³

kittiphan.b@mutp.ac.th¹, pramot.w@mutp.ac.th¹, wiham.d@mutp.ac.th², kittipong.s@en.mutt.ac.th³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received : 16-Dec-2020

Revised : 17-May-2021

Accepted : 24-May-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวา ทำการออกแบบส่วนผสมของแผ่นยิปซัม จำนวน 9 อัตราส่วน ประกอบด้วย แผ่นยิปซัมผสมเส้นใยผักตบชวา จำนวน 3 อัตราส่วน แผ่นยิปซัมผสมเส้นใยผักตบชวาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำนวน 3 อัตราส่วน แผ่นยิปซัมผสมเส้นใยผักตบชวา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ จำนวน 3 อัตราส่วน ขึ้นรูปด้วยการเทหล่อในแบบ ทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก.219-2552 (ประเภทไม้ทนความชื้น) จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการผสมผักตบชวาในปริมาณที่เหมาะสมลงในแผ่นยิปซัมมีผลทำให้สมบัติด้านความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง และทำให้สมบัติด้านแรงกดแตก และแรงต้านทานการดึงตะปูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาที่เหมาะสมและมีสมบัติผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด คือ แผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาที่มีส่วนผสมของยิปซัมปาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 เส้นใยผักตบชวา น้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ สารลดแรงดึงผิวชนิดไม่มีประจุ และน้ำประปา ในอัตราส่วนเท่ากับ 0.75: 0.25: 0.0075: 0.05: 0.003: 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีสมบัติ ได้แก่ ความหนาแน่น 896.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดซึมน้ำร้อยละ 51.70 การดูดซึมน้ำที่ผิว 219.58 กรัมต่อตารางเมตร แรงกดแตกตามยาว 653.50 นิวตัน แรงกดแตกตามขวาง 384.41 นิวตัน แรงต้านการดึงตะปู 422.37 นิวตัน การแ่นตัว 4.48 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.195 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน แผ่นยิปซัมดังกล่าวสามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผ่นยิปซัมทั่วไปและวิสาหกิจชุมชนสามารถผลิตได้

คำสำคัญ: แผ่นยิปซัม ผักตบชวา การดูดซึมน้ำ ฉนวนป้องกันความร้อน น้ำยางพารา

Development of Water Hyacinth Gypsum Broad for Community Enterprise

Kittiphan Boontositrakul ^{1*} Pramot Weeranukul ¹ Wiham Deepanya ² and Kittipong Suweero ³
kittiphan.b@mutp.ac.th ¹, pramot.w@mutp.ac.th ¹, wiham.d@mutp.ac.th ², kittipong.s@en.mutt.ac.th ³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

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

Received	: 16-Dec-2020
Revised	: 17-May-2021
Accepted	: 24-May-2021

Abstract

This research aims to develop the gypsum broads from water hyacinth for community enterprise. The 9 ratios of mixture were design which included 3 ratios of water hyacinth gypsum broads, 3 ratios of water hyacinth gypsum broads mixed with Portland cement type 1, 3 ratios of water hyacinth gypsum broads mixed with Portland cement type 1 and pre vulcanized latex. These gypsum broads were casted in molds and were tested by using the TIS.219-2009 (No moisture resistant property type). According to the results, the proper volume of water hyacinth in gypsum broads effected to decrease the density, water absorption, and thermal conductivity properties of gypsum broads and also increase the breaking strength, and nail withdrawal properties of gypsum broads. The 0.75: 0.25: 0.0075: 0.05: 0.003: 1 by weight of gypsum plaster: Portland cement type 1: water hyacinth: pre vulcanized latex: non-ionic surface active agent: water ratio was the suitable ratio and passed the standard. It had the properties included 896.30 kg/m³ of density, 51.70 % of water absorption, 219.58 g/m² of surface water absorption, 653.50 N of longitudinal breaking strength, 384.41 N of transverse breaking strength, 4.48 mm of deflection, and 0.195 watt/m.K of thermal conductivity. And this gypsum board was used as same as the common gypsum board and was able to produce by local communities.

Keywords: gypsum board, water hyacinth, water absorption, thermal insulation, Para latex

1. บทนำ

แผ่นยิปซัม หรือแผ่นยิปซัมบอร์ด (gypsum board) เป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมนำไปกั้นผนังห้องและติดตั้งเป็นแผ่นฝ้าเพดานภายในอาคาร เนื่องจากน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ ติดและติดตั้งง่าย และผลิตได้ภายในชุมชนท้องถิ่น (local community) แผ่นยิปซัมบอร์ดนี้มีปัญหาการทนความชื้นที่ไม่ดีของเนื้อยิปซัมและกระดาษ รวมทั้งการฟุ้งกระจายของเส้นใยแก้ว (glass fiber) เมื่อแผ่นยิปซัมเกิดการชำรุด [1] ผู้บริโภคจึงหันมาเลือกใช้งานแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีการดูดซึมน้ำต่ำ แต่มีราคาแพง น้ำหนักมาก และเจาะตัดยากกว่าแผ่นยิปซัมบอร์ดแทน อย่างไรก็ตามแผ่นซีเมนต์บอร์ดเป็นวัสดุที่ไม่สามารถผลิตได้ภายในชุมชนท้องถิ่น เนื่องจากต้องผลิตด้วยเครื่องจักรขนาดใหญ่ ทำให้แผ่นยิปซัมบอร์ดเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับวิสาหกิจชุมชนมากกว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ด

การแก้ไขปัญหาของแผ่นยิปซัมบอร์ดให้ทนความชื้นมากขึ้น สามารถทำได้โดยการปรับปรุงส่วนผสมด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 และยางพาราที่มีความทึบน้ำ [2-5] ลงในส่วนผสม และเปลี่ยนเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยผักตบชวา (water hyacinth fiber) ซึ่งเป็นวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว และสร้างปัญหาด้านน้ำเสียให้แหล่งน้ำ โดยผักตบชวา 1 ต้น อาจขยายพันธุ์ได้มากถึง 1,000 ต้น ภายในระยะ 1 เดือน [6] เส้นใยผักตบชวานี้เป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) ที่มีโมเลกุลสายยาวซ้ำ ยึดเกาะด้วยพันธะ C-O-C ในหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จับกับหมู่ธาตุอื่นๆ เรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline) และระหว่างสายโมเลกุลมีการยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน เป็นระยะๆ จึงมีความเหนียว แข็งแรง และน้ำหนักเบา [7]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาสำหรับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งจะช่วยลดปัญหาปริมาณผักตบชวาที่แพร่พันธุ์อยู่ในแหล่งน้ำต่างๆ รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่า ทั้งนี้แผ่นยิปซัมบอร์ดที่พัฒนาจะต้องผลิตได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ ทำให้สามารถผลิตได้ในวิสาหกิจชุมชน ช่วยสร้างงานและรายได้ให้แก่ชุมชน

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย ปูนยิปซัมปาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 ก้านผักตบชวาแห้ง น้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 1 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ น้ำประปา กระดาษเหนียว เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องบดย่อยเส้นใย เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหล่อ ขนาด 60 x 60 x 1.5 เซนติเมตร ชุดทดสอบความหนาแน่น ความชื้น และการดูดซึมน้ำที่ผิว เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine, UTM) เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์

ส่วนผสม	ส่วนโดยน้ำหนักเปียก
น้ำยางธรรมชาติชั้น ร้อยละ 60 รักษาด้วยแอมโมเนียสูง	167.0
สารละลายเคซีน (casein) (10%)	5.0
สารช่วยความเสถียร (nonionic stabiliser) (25%)	2.0
โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (10%)	2.5
ซิงค์ออกไซด์ (50%)	2.0
เตตระเมทิลไทอยูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD) (33%)	9.0
ซิงไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDBC) (50%)	2.0
สารละลายไทโอยูเรีย (10%)	10.0

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมของแผ่นยิปซัมประเภททั่วไป ประกอบด้วย ยิปซัมปาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เส้นใยผักตบชวา น้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และน้ำประปา จำนวน 9 อัตราส่วน ดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 การย่อยและคัดขนาดเส้นใยจากก้านผักตบชวา



รูปที่ 2 เส้นใยจากก้านผักตบชวาที่ผ่านการบดย่อยแล้ว



รูปที่ 3 กระดาษเหนียว



รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบการดูดซึมน้ำที่ผิว

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของแผ่นยิปซัมบอร์ดผสมปิดเส้นใยผักตบชวา (โดยน้ำหนัก)

สัญลักษณ์	ยิปซัม	ปูนซีเมนต์	ผักตบชวา	น้ำยางพารา	สารลดแรงตึงผิว	น้ำประปา
G-0	1	-	-	-	-	1
G-75	1	-	0.0075	-	-	1
G-150	1	-	0.0150	-	-	1
GC-0	0.75	0.25	-	-	-	1
GC-75	0.75	0.25	0.0075	-	-	1
GC-150	0.75	0.25	0.0150	-	-	1
GCP-0	0.75	0.25	-	0.05	0.003	1
GCP-75	0.75	0.25	0.0075	0.05	0.003	1
GCP-150	0.75	0.25	0.0150	0.05	0.003	1

4. การขึ้นรูปตัวอย่างแผ่นยิปซัมบอร์ด

เริ่มจากการนำก้านผักตบชวาแห้ง (ความชื้นไม่เกินร้อยละ 10) มาย่อยขนาดผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว และมีความยาวไม่เกิน 5 เซนติเมตร ได้เส้นใยผักตบชวา ทำการตวงส่วนผสมทั้งหมดตามที่ออกแบบในตารางที่ 2 แล้วทำการผสมของเหลวให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่ออกแบบ เช่น น้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และน้ำประปา จากนั้นจึงผสมปูนยิปซัมปาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ประเภท 1 และเส้นใยผักตบชวาให้เข้ากัน พร้อมทั้งเติมของเหลวลงในส่วนผสมตามอัตราส่วนที่ออกแบบ ผสมจนส่วนผสมเข้ากัน เตรียมแบบหล่อให้สะอาดอยู่ในแนวระนาบ และทาน้ำมันหล่อลื่น ทำการเทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อ และแต่งผิวหน้าของแผ่นยิปซัมให้เรียบ ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมจนถึงเทส่วนผสมที่ผสมจนเข้ากันแล้วลงในแบบหล่อและแต่งผิวหน้าของแผ่นยิปซัมควรใช้ระยะเวลาไม่เกิน 10 นาที เนื่องจากส่วนผสมจะเริ่มมีการก่อ

ตัว จากนั้นบ่มแผ่นยิปซัมในอากาศตามระยะเวลาที่กำหนด ได้แก่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ก่อนนำไปติดแผ่นกระดาษ เหนียวเช่นเดียวกับแผ่นยิปซัมบอร์ดทั่วไป



รูปที่ 5 การเทส่วนผสมทั้งหมดให้เต็มแบบหล่อ

5. การทดสอบสมบัติของตัวอย่างแผ่นยิปซัมบอร์ด

ทดสอบสมบัติของแผ่นยิปซัมตามมาตรฐาน มอก. 219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [8] และมาตรฐาน ASTM C 177 [9] ประกอบด้วย แรงกดแตกตามยาวและขวาง แรงต้านการ ดึงตะปู การแอ่นตัว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำที่ผิว การ ดูดซึมน้ำ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยใช้จำนวน ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างต่อค่าการทดสอบแต่ละค่า



รูปที่ 6 การทดสอบแรงกดแตกของแผ่นยิปซัม



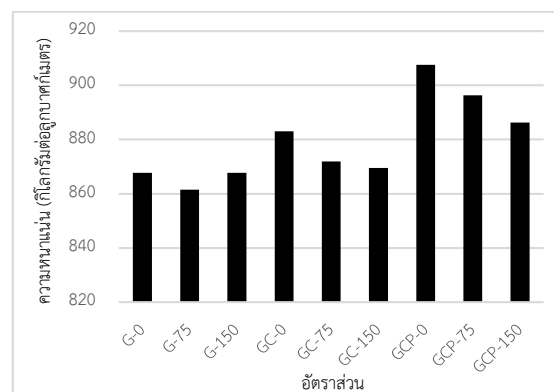
รูปที่ 7 การทดสอบแรงต้านการดึงตะปูของแผ่นยิปซัม

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการทดสอบสมบัติของแผ่นยิปซัมบอร์ดที่ พัฒนา ตามมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [8] และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปผลการทดสอบ ได้ดังต่อไปนี้

6.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นยิปซัม บอร์ดทั้ง 9 อัตราส่วน สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 8



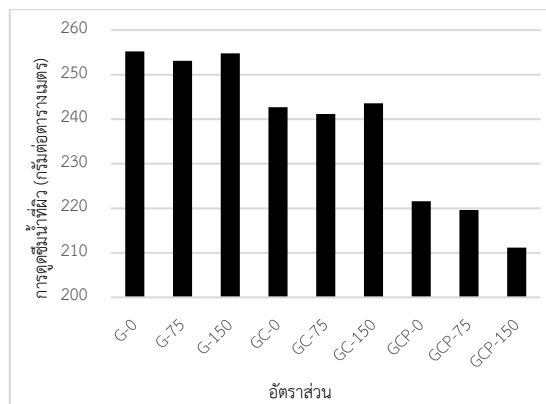
รูปที่ 8 ความหนาแน่นของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นยิปซัม บอร์ดในรูปที่ 8 พบว่า แผ่นยิปซัมบอร์ดที่ผสมน้ำยาพารา และไม่ผสมเส้นใยผักตบชวา (อัตราส่วน GCP-0) เป็นแผ่น ยิปซัมอัตราส่วนที่มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด (907.52 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองลงมาคือ อัตราส่วน GCP-75 (896.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน GCP-150 (886.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน GC-0

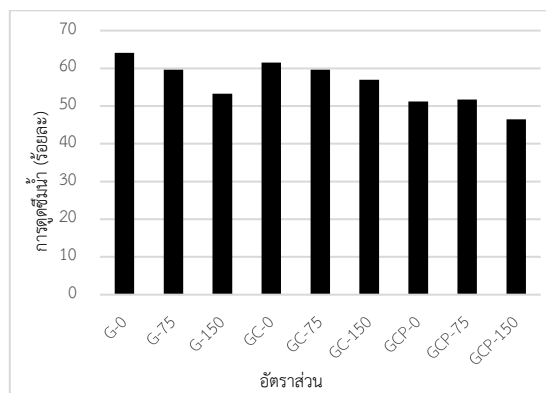
(883.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน GC-75 (871.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน GC-150 (869.52 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน G-0 (867.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วน G-150 (867.69 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอัตราส่วน G-75 (861.45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เป็นอัตราส่วนแผ่นยิปซัมที่มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด ตามลำดับ จากความหนาแน่นดังกล่าวทำให้เห็นได้ว่าการผสมเส้นใยผักตบชวาลงในแผ่นยิปซัมเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นที่ลดลง เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยผักตบชวาที่ผสมลงในแผ่นยิปซัมเป็นวัสดุจำพวกเซลลูโลสซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเพียง 0.6 ในขณะที่เนื้อของแผ่นยิปซัมที่เป็นยิปซัมปาสเตอร์มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.2 – 2.4 [1, 10-11] ส่วนการปรับปรุงเนื้อของแผ่นยิปซัมปกติ (อัตราส่วน G) ด้วยปูนซีเมนต์ประเภท1 (อัตราส่วน GC) และด้วยปูนซีเมนต์ประเภท1 และน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ (อัตราส่วน GCP) พบว่า การปรับปรุงเนื้อของแผ่นยิปซัมโดยแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 ส่งผลให้ความหนาแน่นของแผ่นยิปซัมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภท1 เป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งสูงกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยิปซัมปาสเตอร์ [2, 12] ส่วนการปรับปรุงเนื้อของแผ่นยิปซัมด้วยปูนซีเมนต์ประเภท1 ร่วมกับผสมน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ (อัตราส่วน GCP) ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นยิปซัมที่เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด เป็นผลมาจากการการแทรกตัวของน้ำยางพาราในเนื้อของแผ่นยิปซัมที่ช่วยทำให้เนื้อยิปซัมมีความแน่นมากขึ้น นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของยางพารามีค่า 900 ถึง 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของแผ่นยิปซัมปกติ (อัตราส่วน G-0) [3, 13]

6.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่ผิวและการดูดซึมน้ำ

จากการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่ผิวและการดูดซึมน้ำของแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชว้อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำที่ผิวของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน



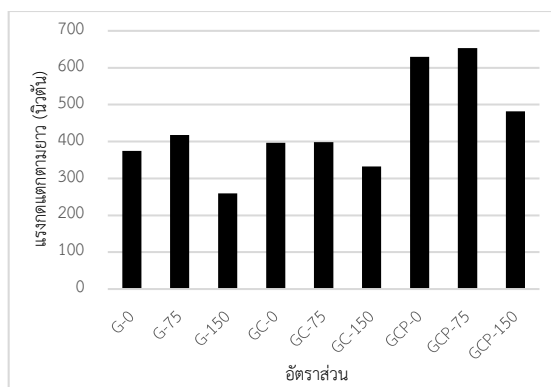
รูปที่ 10 การดูดซึมน้ำของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่ผิวและการดูดซึมน้ำในรูปที่ 9 และ 10 พบว่า แผ่นยิปซัมบอร์ดที่ไม่ผสมเส้นใยผักตบชว้อัตราส่วน G-0 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด (ร้อยละ 64.10) รองลงมาคือ อัตราส่วน GC-0 (ร้อยละ 61.49) อัตราส่วน G-75 (ร้อยละ 59.67) อัตราส่วน GC-75 (ร้อยละ 59.64) อัตราส่วน GC-150 (ร้อยละ 56.95) อัตราส่วน G-150 (ร้อยละ 53.30) อัตราส่วน GCP-75 (ร้อยละ 51.70) อัตราส่วน GCP-0 (ร้อยละ 51.21) และอัตราส่วน GCP-150 เป็นอัตราส่วนแผ่นยิปซัมที่มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด (ร้อยละ 46.48) ตามลำดับ จากผลการดูดซึมน้ำดังกล่าวทำให้เห็นว่าการผสมเส้นใยผักตบชวาสามารถลดค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นยิปซัมลง เนื่องจากการเตรียมเส้นใยผักตบชว้ใช้การบดย่อยทางกล ทำให้เส้นใยยังคงมีการจับตัวกันอยู่ค่อนข้างแน่น เมื่อนำมาแช่น้ำเส้นใยที่แทรกอยู่ใน

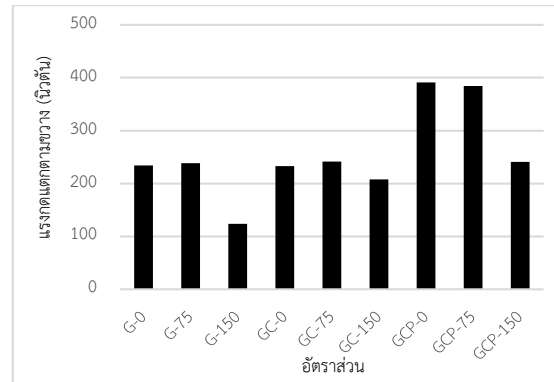
เนื้อของแผ่นยิปซัมจึงอาจช่วยลดการดูดซึมน้ำเข้าภายในเนื้อของแผ่นยิปซัมที่มีความพรุนของเนื้อค่อนข้างมากได้ หากพิจารณาในภาพรวมทำให้เห็นได้ว่าแผ่นยิปซัมผสมเส้นใยผักตบชวาที่มีการเพิ่มน้ำยางพาราลงไปในส่วนผสม (อัตราส่วน GCP) มีแนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด เนื่องจากยางพาราเป็นวัสดุที่มีความทึบน้ำ ทำให้การแทรกตัวของยางพาราดังกล่าวสามารถลดการดูดซึมน้ำได้ดี [3-5, 13] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำที่เกิดขึ้นกับมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม ซึ่งกำหนดให้แผ่นยิปซัม (เฉพาะประเภททนความชื้น) ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำที่ผิวไม่เกิน 160 กรัมต่อตารางเมตร และการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 5 [8] โดยพบว่าแผ่นยิปซัมทุกอัตราส่วนยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำที่ผิวเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ทำให้แผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวานี้ไม่สามารถผ่านมาตรฐานแผ่นยิปซัมประเภททนความชื้น แต่สามารถผ่านมาตรฐานแผ่นยิปซัมประเภทไม่ทนความชื้นได้แทน เนื่องจากไม่มีการกำหนดเกณฑ์ของค่าการดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำที่ผิวดังกล่าว

6.3 ผลการทดสอบแรงกดแตก

จากการทดสอบแรงกดแตกของแผ่นยิปซัมบอร์ดทั้ง 9 อัตราส่วน ทั้งแนวตามยาวและแนวตามขวาง สามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 แรงกดแตกตามยาวของแผ่นยิปซัมบอร์ดที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 12 แรงกดแตกตามขวางของแผ่นยิปซัมบอร์ดที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากผลการทดสอบแรงกดแตกตามยาวและตามขวางในรูปที่ 11 และ 12 พบว่า แผ่นยิปซัมบอร์ดผสมผักตบชวาและน้ำยางพาราอัตราส่วน GCP-75 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีค่าแรงกดแตกตามยาวสูงที่สุด (653.50 นิวตัน) รองลงมาคืออัตราส่วน GCP-0 (629.47 นิวตัน) อัตราส่วน GCP-150 (482.20 นิวตัน) อัตราส่วน G-75 (417.55 นิวตัน) อัตราส่วน GC-75 (397.98 นิวตัน) อัตราส่วน GC-0 (396.45 นิวตัน) อัตราส่วน G-0 (374.56 นิวตัน) อัตราส่วน GC-150 (329.45 นิวตัน) และอัตราส่วน G-150 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีค่าแรงกดแตกตามยาวต่ำที่สุด (259.45 นิวตัน) ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบแรงกดแตกตามขวางก็มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบแรงกดแตกตามยาว ทั้งนี้จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้เห็นได้ว่า การผสมน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ลงในแผ่นยิปซัมนอกจากช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้แก่แผ่นยิปซัมแล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้านแรงกดแตกหรือความต้านทานแรงดัดได้ ซึ่งเป็นผลมาจากยางพาราเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงดึงและแรงดัดได้ดี [3, 13] ส่วนการผสมเส้นใยผักตบชวาซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่สามารถช่วยรับแรงดึงหรือแรงดัดได้ดีนั้น หากทำการผสมในปริมาณที่เหมาะสมมีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่าแรงกดแตกให้มากขึ้นได้ แต่การผสมเส้นใยผักตบชวาให้ปริมาณมากเกินไปทำให้ค่าการรับแรงกดลดลงอย่างชัดเจน [1, 14-15] เมื่อเทียบผลการทดสอบดังกล่าวกับมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [8] ซึ่งกำหนดให้แรงกดตามยาว ต้องไม่น้อยกว่า 620 นิวตัน (ความหนาแผ่นยิปซัม 15 มิลลิเมตร) และแรงกดตามขวาง ต้องไม่น้อยกว่า 260 นิวตัน (ความหนาแผ่นยิปซัม 15 มิลลิเมตร) พบว่ามีเพียงแผ่นยิปซัมบอร์ดจาก

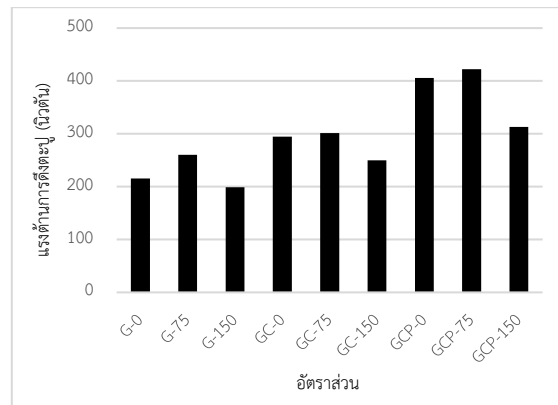
ผักตบชวาที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วน GCP-75 และ GCP-0 เท่านั้น ที่สามารถผ่านมาตรฐานดังกล่าวได้

6.4 ผลการทดสอบแรงต้านทานการดึงตะปู

จากผลการทดสอบแรงต้านทานการดึงตะปูของแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวา ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 13 และมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [8] ซึ่งกำหนดให้แผ่นยิปซัมต้องรับแรงต้านทานการดึงตะปู ไม่ต่ำกว่า 400 นิวตัน (ความหนาแผ่นยิปซัม 15 มิลลิเมตร) ได้นั้น พบว่า แผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วน GCP-75 และ GCP-0 เพียง 2 อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์ของสมบัตินี้ ซึ่งเป็นผลมาจากยางพาราที่แทรกในเนื้อของแผ่นยิปซัม และทำให้แผ่นยิปซัมมีเนื้อที่แน่นมากขึ้น และมีค่าแรงต้านทานการดึงตะปูที่เพิ่มขึ้น [1, 11] ส่วนการผสมเส้นใยผักตบชวาในปริมาณที่เหมาะสมก็มีแนวโน้มในการช่วยเพิ่มแรงต้านทานการดึงตะปูได้เช่นกัน โดยเห็นได้จากแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาอัตราส่วน GCP-75 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีค่าแรงต้านทานการดึงตะปูสูงที่สุด (422.37 นิวตัน) รองลงมาคือ อัตราส่วน GCP-0 (405.60 นิวตัน) อัตราส่วน GCP-150 (312.90 นิวตัน) อัตราส่วน GC-75 (301.63 นิวตัน) อัตราส่วน GC-0 (294.61 นิวตัน) อัตราส่วน G-75 (260.00 นิวตัน) อัตราส่วน GC-150 (249.75 นิวตัน) อัตราส่วน G-0 (215.50 นิวตัน) และอัตราส่วน G-150 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีค่าแรงต้านทานการดึงตะปูต่ำที่สุด (198.66 นิวตัน) ตามลำดับ

6.5 ผลการทดสอบการแอ่นตัว

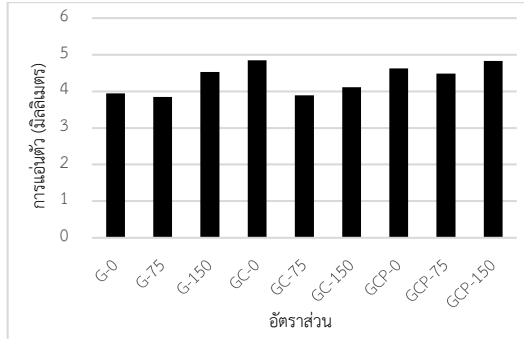
สำหรับผลการทดสอบการแอ่นตัวของแผ่นยิปซัมบอร์ดในรูปที่ 14 พบว่า ค่าการแอ่นตัวของแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาทั้ง 9 อัตราส่วน มีค่าใกล้เคียงกัน และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.219-2552 ซึ่งกำหนดให้การแอ่นตัวของแผ่นยิปซัมหนา 15 มิลลิเมตร ต้องมีการแอ่นตัวไม่เกิน 10 มิลลิเมตร โดยแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาทั้งหมดมีค่าระหว่าง 3.60 ถึง 4.85 มิลลิเมตร [8]



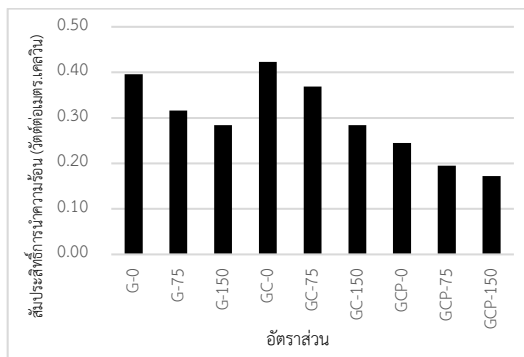
รูปที่ 13 แรงต้านทานการดึงตะปูของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.6 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ส่วนของผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นยิปซัมบอร์ดทั้ง 9 อัตราส่วน ในรูปที่ 15 พบว่า แผ่นยิปซัมที่มีการผสมเส้นใยผักตบชวาและมีการปรับปรุงเนื้อยิปซัมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ (อัตราส่วน GCP-150) เป็นอัตราส่วนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด (0.172 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) รองลงมาคือ อัตราส่วน GCP-75 (0.195 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน GCP-0 (0.245 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน G-150 (0.284 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน GC-150 (0.284 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน G-75 (0.316 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน GC-75 (0.369 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) อัตราส่วน G-0 (0.396 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) และอัตราส่วน GC-0 เป็นแผ่นยิปซัมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด (0.423 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าของวัสดุจำพวกเส้นใยเซลลูโลส (0.02-0.07 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) และยางพารา (0.15 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) [1, 16-18] ซึ่งต่ำกว่าแผ่นยิปซัมทั่วไป

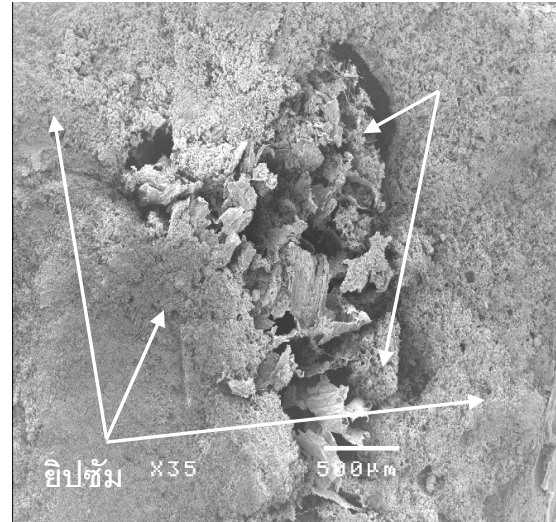


รูปที่ 14 การหนาตัวของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน

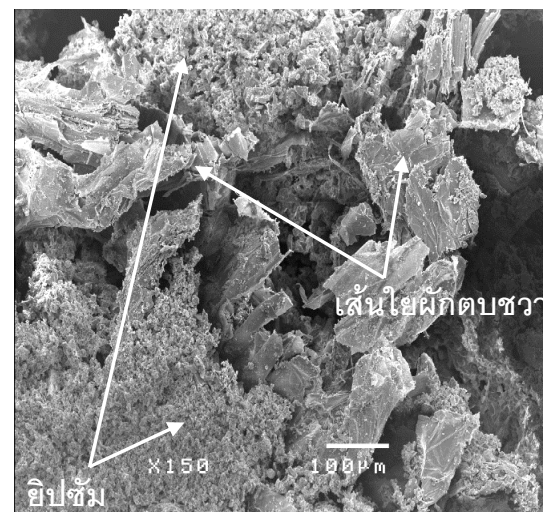


รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นยิปซัมบอร์ด ที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อนำแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาอัตราส่วน G-75 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยผักตบชวาและเนื้อยิปซัมดังรูปที่ 16 และ 17 พบว่า เนื้อยิปซัมสามารถไหลและแข็งตัวหุ้มผิวเส้นใยของผักตบชวาได้ ทำให้เส้นใยผักตบชวาสามารถแทรกอยู่ในแผ่นยิปซัมได้โดยไม่เกิดการหลุดออก โดยเนื้อยิปซัมมีรูพรุนขนาดประมาณ 10 – 20 ไมโครเมตร จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งมีผลต่อสมบัติด้านความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ หรือความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนของแผ่นยิปซัม [1, 11]



รูปที่ 16 แผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวา ที่กำลังขยาย 35 เท่า



รูปที่ 17 การยึดเกาะระหว่างเนื้อยิปซัมและผักตบชวา ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ทั้งนี้แผ่นยิปซัมบอร์ดทั้งหมดสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับแผ่นยิปซัมหรือแผ่นฝ้าเพดานยิปซัมทั่วไป โดยสามารถตัดแผ่นยิปซัมบอร์ดให้มีขนาดตามต้องการด้วยเลื่อยหรือเลื่อยไฟฟ้าได้โดยที่ตัวแผ่นยิปซัมทั้งหมดไม่เสียหาย (รูปที่ 18) อย่างไรก็ตามด้วยน้ำหนักของแผ่นยิปซัมผสมเส้นใยผักตบชวาบางอัตราส่วนที่มาก ควรทำการยึดตรึงอลูมิเนียมให้แข็งแรง พร้อมทั้งทำการติดตั้งลวดขนาดไม่เล็กกว่า 1.2 มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่าเบอร์ 18 เพื่อรองรับน้ำหนักของแผ่นยิปซัมบอร์ดดังกล่าว



รูปที่ 18 การทดสอบตัดแผ่นยิปซัมด้วยเลื่อยไฟฟ้า

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ผลจากการพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวา สำหรับวิสาหกิจชุมชน สามารถสรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะได้ ดังนี้

7.1 สรุปผล

จากการพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การผสมผักตบชวาในปริมาณที่เหมาะสมลงในแผ่นยิปซัมบอร์ดมีผลทำให้สมบัติด้านความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง และทำให้สมบัติด้านแรงกดแตก และแรงต้านทานการดึงตะปูของแผ่นยิปซัมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาที่เหมาะสมที่สุด และมีสมบัติผ่านตามที่มาตรฐาน 219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัมประเภทไม่ทนความชื้น คือ แผ่นยิปซัมบอร์ดอัตราส่วน GCP-75 ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วย อัตราส่วนของยิปซัมปาสเตอร์ ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 ต่อผักตบชวา ต่อน้ำยางพาราชนิด ฟรีวัลคาไนซ์ ต่อสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ต่อน้ำประปา เท่ากับ 0.75: 0.25: 0.0075: 0.05: 0.003: 1 ส่วนโดยน้ำหนัก แผ่นยิปซัมที่พัฒนานี้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป ทำให้ผู้ประกอบการขนาดเล็กและขนาดย่อม ตลอดจนวิสาหกิจชุมชนสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้ง่ายและลงทุนต่ำ

7.2 ข้อเสนอแนะ

ควรพัฒนาแผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาให้มีสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัมประเภททนความชื้น และทนไฟ โดยการเพิ่มสารตัวเติมต่างๆ

เข้าไป เพื่อให้ได้แผ่นยิปซัมบอร์ดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และประหยัดพลังงานมากขึ้นได้

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2563 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Coconut coir ceiling board product with thermal insulation property. Journal of Engineering, RMUTT. 2018.;16(2):129-38. (in Thai)
- [2] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, Pozzolan, and Concrete. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [3] Ohama Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. ACI Materials Journal. 1987; 84(45):511-8.
- [4] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Coconut coir ceiling board product with water resistance and thermal insulation property for local communities. Proceedings of the 11th National Conference of Rajamangala University of Technology; 2019 Jul 24-26; Chiang Mai: Chiang Mai International Convention and Exhibition Centre. Chiang Mai: Rajamangala University of Technology Lanna; 2019. p.244-59. (in Thai)
- [5] Khamput P. Study of physical and mechanical of concrete block mixed with Para latex. Full Report. Bangkok: Thailand Research Fund; 2007. (in Thai)

- [6] The Secretariat of the Prime Minister. Water Hyacinth [Internet]. Bangkok: The Secretariat of the Prime Minister. 2020 May 20 [cited 2020 Oct 1]. Available from: <https://spm.thaigov.go.th/CRTPRS/spm-sp-layout6.asp?i=31111%2E13614702112113121111311>. (in Thai)
- [7] Ghosh SR, Saikia DC, Goswami T, Chaliha BP, Baruah JN. Utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for paper and board making. Proceedings of the International Conference on Water Hyacinth; 1984 Feb. 7-11; Nairobi: UNEP: UNEP; 1984. p.436-60.
- [8] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai Industrial Standard No.219-2009: Gypsum Board. Bangkok: TISI; 2009. (in Thai)
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: ASTM; 2012.
- [10] Davies RM, Mohammed US. Moisture-dependent Engineering Properties of Water Hyacinth Parts. Singapore Journal of Scientific Research. 2011;1:253-63.
- [11] Faherty KF, Williamson TG. Wood Engineering and Construction Handbook. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [12] Young HD. Hyper Physics. Addison Wesley: University Physics.; 1992.
- [13] Barlow FW. Rubber Compounding: Principles, Materials, and Techniques. New York: M. Dekker; 1993.
- [14] Sair S, Mandili B, Taqi M, Bouari AE. Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation. Composites Communications. 2019;16:20-4.
- [15] Bledzki AK, Gassan J. Composites Reinforced with Cellulose based Fibers. Progress in Polymer Science. 1999;24:221-74.
- [16] Park JH, Kang Y, Lee J, Wi S, Chang JD, Kim S. Analysis of walls of functional gypsum board added with porous material and phase change material to improve hygrothermal performance. Energy and Buildings. 2019;183(1):803-16.
- [17] Clemens JML. Design, Materials, Compounds, Adhesives, and Substrates [Internet]. PA: Lectrix. 2001 Nov 1 [cited 2020 Oct 1]. Available from: <https://www.electronics-cooling.com/2001/11/the-thermal-conductivity-of-rubbers-elastomers/#>.
- [18] Pakunworakij T, Puthipiroj P, Oonjittichai W, Tisavipat, P. Thermal resistance efficiency of building insulation material from agricultural waste. Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 2006;3(4):119-26. (in Thai)

การพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์เพื่อใช้ในงานวัสดุตกแต่ง

ภควัต เกษะประสิทธิ์^{1*} ปราโมทย์ วีรานุกุล² กิตติพร ม่วงพริบ³ อธิธิ วีรานุกุล⁴ และกิตติพงษ์ สุวีโร⁵

pakawat.k@mutp.ac.th¹, pramot.w@mutp.ac.th², kittiworn.m@ovec.moe.go.th³,

itthi.w@mutsb.ac.th⁴, kittipong.s@en.mutt.ac.th⁵

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

³ สาขาเทคนิคเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีช่างฝีมือปัญญวิทยา

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 16-Dec-2020
Revised	: 17-May-2021
Accepted	: 24-May-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์สำหรับใช้ในงานวัสดุตกแต่ง ออกแบบส่วนผสมของเปลือกไม้กระถินณรงค์และกาวชนิดไอโซไซยานต (pMDI) จำนวน 12 อัตราส่วน ได้แก่ ปริมาณกาวชนิดไอโซไซยานตร้อยละ 3 และ 7 ความหนาแน่น 450 และ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขนาดของเปลือกไม้ผ่านตะแกรง 6 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และ 6 และ 10 มิลลิเมตรผสมกัน อัดขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดด้วยแรงดัน 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความร้อน 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 นาที ทดสอบตามมาตรฐาน มอก.876-2547 ผลการทดสอบพบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานคือ แผ่นขึ้นไม้อัดที่ควบคุมความหนาแน่นที่ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผสมกาวชนิดไอโซไซยานตร้อยละ 7 ใช้ขนาดเปลือกไม้ผ่านตะแกรง 6 และ 10 มิลลิเมตรผสมกัน หรือขนาดผ่านตะแกรง 10 มิลลิเมตร แผ่นขึ้นไม้อัดดังกล่าวจะมีค่าความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้า ผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.876-2547 แต่ค่าความต้านทานแรงดึง และมอดุลัสยืดหยุ่นยังคงต่ำกว่ามาตรฐาน ทั้งนี้แผ่นขึ้นไม้อัดนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำเพียง 0.120 ถึง 0.131 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ นอกจากนี้แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่พัฒนาสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาคารได้ดี โดยสามารถเลื่อยและเจาะได้เช่นเดียวกับแผ่นขึ้นไม้อัดทั่วไปในท้องตลาด

คำสำคัญ: แผ่นขึ้นไม้อัด เปลือกไม้กระถินณรงค์ วัสดุตกแต่ง กาวชนิดไอโซไซยานต

Development of Particleboard from Northern Black Wattle Tree Bark for Using as Decorative Materials

Pakawat Kerprasit ^{1*} Pramot Weeranukul ² Kittiworn Muangprab ³ Itthi Weeranukul ⁴ Kittipong Suweero ⁵
pakawat.k@rmutp.ac.th ¹, pramot.w@rmutp.ac.th ², kittiworn.m@ovec.moe.go.th ³,
itthi.w@rmutsb.ac.th ⁴, kittipong.s@en.rmutt.ac.th ⁵

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

³ Department of Mechanical Techniques, Panjavidhya Technological College

⁴ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

⁵ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 16-Dec-2020
Revised	: 17-May-2021
Accepted	: 24-May-2021

Abstract

This research aims to develop the particleboard from northern black wattle tree bark for using as decorative materials. The ratios of northern black wattle tree bark to polymeric diphenyl methane diisocyanate (pMDI) were designed into 12 ratios which differed in pMDI amount (3% and 5%), density (450 and 700 kg/m³), and bark size (6 mm, 10 mm, and 6 and 10 mm). The developed particleboard samples were casted by using the compression 280 ksc and heat 150 °C for 7 minutes and tested by following the TIS.876-2004 standard. According to the results, the proper ratios of particleboard for decoration work were the particleboards which used the 700 kg/m³ of density, 7% of pMDI amount, and 10 mm or 6 and 10 mm of bark sizes. These particleboards had the properties which can meet the TIS.876-2004 standard including: density, moisture content, thickness swelling, tensile strength perpendicular to surface, and adhesive surface. However, some properties of particleboards cannot meet the standard including: bending strength, and elastic modulus. The developed particleboards had low thermal conductivity coefficient (0.120 - 0.131 w/m.K), especially when comparing to the other construction materials. Moreover, these developed particleboards can use as the decoration materials which can cut and drill as same as the particleboards in the market.

Keywords: particleboard, northern black wattle bark, decoration material, polymeric diphenyl methane diisocyanate

1. บทนำ

แผ่นขึ้นไม้อัด (Particleboards) เป็นวัสดุทดแทนไม้เทียมที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตกแต่งทั้งฝ้าเพดาน ผนัง และเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคาร วัสดุเหล่านี้ใช้การเป็นสารเชื่อมประสานสำหรับยึดเส้นใยชนิดต่างๆ ให้เข้ากัน ส่วนใหญ่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดราบ (Flat Pressed Particleboards) มีความสวยงาม คงทน รับแรงได้ น้ำหนักเบา และเป็นฉนวนป้องกันความร้อน แต่จากปัญหาด้านทรัพยากรป่าไม้ที่ลดจำนวนลงอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดจึงประสบปัญหาขาดแคลนวัตถุดิบ ทำให้จะต้องมีการหาวัตถุดิบมาทดแทนในอนาคต [1] โดยวัตถุดิบที่นำมาทดแทนสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มวัตถุดิบไม้ (Wood Material) ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ยางพารา และไม้โตเร็วอื่นๆ และกลุ่มวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood Material) คือ พืชที่ไม่มีลักษณะต้นไม้ ได้แก่ พืชเส้นใยทางเกษตรอื่นๆ เมื่อพิจารณาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจ ได้แก่ ราคา ปริมาณที่มีอยู่ แหล่งของวัตถุดิบ ระยะเวลา และปริมาณ พบว่า วัตถุดิบไม้ยังคงมีแนวโน้มในการนำมาใช้ทดแทนได้มากกว่าวัสดุที่ไม่ใช่ไม้ อย่างไรก็ตามปัจจุบัน วัตถุดิบไม้ก็เริ่มหายากมากขึ้นโดยเฉพาะส่วนของเนื้อไม้ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย จึงต้องมีการนำส่วนอื่นของไม้ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ เปลือกไม้ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ถัดจากวาสคิวลาร์แคมเบียม ออกไปข้างนอก โดยชนิดของเปลือกไม้ที่นำมาใช้คือ เปลือกไม้กระถินณรงค์ เนื่องจากกระถินณรงค์เป็นไม้โตเร็วที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย และการนำไม้กระถินณรงค์ไปใช้งานส่วนใหญ่จะมีการลอกเปลือกไม้ออกทำให้โรงไม้ต่างๆ มีเปลือกไม้กระถินณรงค์เหลือจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ ซึ่งจะส่งผลดีทั้งการช่วยลดปัญหาขาดดุลการค้า ปัญหาสิ่งแวดล้อม และปัญหาการเพิ่มขึ้นของต้นทุนวัสดุก่อสร้าง รวมทั้งตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดในปัจจุบันได้

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย เปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีอายุประมาณ 6-7 ปี กาวชนิดไอโซไซยานต (Polymeric Diphenylmethane Diisocyanate; pMDI) ซึ่ง

เป็นกาวชนิดที่ไม่มีสารฟอร์มาลดีไฮด์ทำให้ปลอดภัยต่อการนำไปใช้งาน เครื่องผสม ปากกาพ่นกาว ถังลม เครื่องบดย่อยเส้นใย พร้อมตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบหล่อขนาด 30 x 30 x 1 เซนติเมตร แผ่นเทพลอน เครื่องขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ เตาอบไฟฟ้า เครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง (Universal Testing Machine; UTM) เครื่องทดสอบสภาพนำความร้อน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3. การออกแบบส่วนผสม

ดำเนินการออกแบบส่วนผสมโดยศึกษาความเหมาะสมของปริมาณกาวชนิดไอโซไซยานต (pMDI) ต่อน้ำหนักแห้งของเปลือกไม้กระถินณรงค์ และความหนาแน่นที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกไม้กระถินณรงค์ดังนี้



รูปที่ 1 ลักษณะเปลือกไม้กระถินณรงค์



รูปที่ 2 เปลือกไม้กระถินณรงค์ที่บดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 เปลือกไม้กระถินณรงค์ที่บดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกไม้กระถินณรงค์โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	เปลือกไม้กระถินณรงค์		กาว pMDI	ความหนาแน่น (กก./ม.³)
	6 มม.	10 มม.		
K-F3-450	100	-	3	450
K-F3-700	100	-	3	700
K-F7-450	100	-	7	450
K-F7-700	100	-	7	700
K-C3-450	-	100	3	450
K-C3-700	-	100	3	700
K-C7-450	-	100	7	450
K-C7-700	-	100	7	700
K-M3-450	50	50	3	450
K-M3-700	50	50	3	700
K-M7-450	50	50	7	450
K-M7-700	50	50	7	700

4. การขึ้นรูปตัวอย่าง

เริ่มจากนำเปลือกไม้กระถินณรงค์มาบดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 และ 10 มิลลิเมตร และควบคุมความชื้นของเปลือกไม้ให้ไม่เกินร้อยละ 10 ทำการชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามที่ออกแบบ จากนั้นฉีดพ่นกาวชนิดไอโซไซยาเนตลงในเปลือกไม้ที่บดย่อยแล้วด้วยกาพ่นสีและถังลม แล้วจึงนำเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่ฉีดพ่นกาวแล้วไปชั่งน้ำหนักตามความหนาแน่นที่ต้องการโดยเพิ่มความหนาแน่นประมาณร้อยละ 10 ของความหนาแน่นที่ต้องการ เช่น ความหนาแน่น 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหากอัด

ขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดขนาด $0.30 \times 0.30 \times 0.01$ เมตร จะต้องใช้เปลือกไม้กระถินณรงค์ผสมกาวน้ำหนัก เท่ากับ $450 \times 0.30 \times 0.30 \times 0.01 = 0.405$ กิโลกรัม ดังนั้นให้ชั่งน้ำหนักเปลือกไม้กระถินณรงค์ผสมกาว เท่ากับ $0.405 \times 1.1 = 0.4455$ กิโลกรัม เป็นต้น นำส่วนผสมดังกล่าวมาเทใส่แบบหล่อที่มีการเตรียมพื้นผิวด้วยแผ่นเทพล่อน โดยการนำท่อเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิด 2 ด้าน ขนาดตามต้องการมาช่วยในการเรียงเปลือกไม้ให้เรียบสม่ำเสมอ นำแผ่นเหล็กปิดทับด้านบนและนำท่อเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมออก จากนั้นนำส่วนผสมไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน และใส่แท่งเหล็กเพื่อควบคุมความหนาของแผ่นขึ้นไม้อัด ทำการโยกปั๊มไฮดรอลิก ของเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยควบคุมแรงดันของปั๊มไฮดรอลิกให้อยู่ที่ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยตั้งอุณหภูมิความร้อนไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส ทั้งด้านบนและด้านล่าง เป็นเวลาประมาณ 7 นาที จากนั้นสวมถุงมือป้องกันความร้อนและนำแผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูปออกมาเพื่อถอดแบบโดยนำแผ่นเหล็กและแผ่นเทพล่อนออกจากแผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูป รอให้อุณหภูมิลดลงจนสามารถถือด้วยมือเปล่า ทำการตัดขอบของแผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูปได้ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกไม้กระถินณรงค์

5. การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่าง

ทดสอบตัวอย่างแผ่นขึ้นไม้อัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ (มอก. 876- 2547) [2] และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน ประกอบด้วย ลักษณะทั่วไป ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความยึดแน่นของผิวหน้า และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [3] โดยใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างต่อค่าการทดสอบแต่ละค่า



รูปที่ 4 การนำเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่ผ่านการเรียงตัวแล้ว ไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน



รูปที่ 7 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด



รูปที่ 5 นำแผ่นเทฟลอนออกจากแผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูป



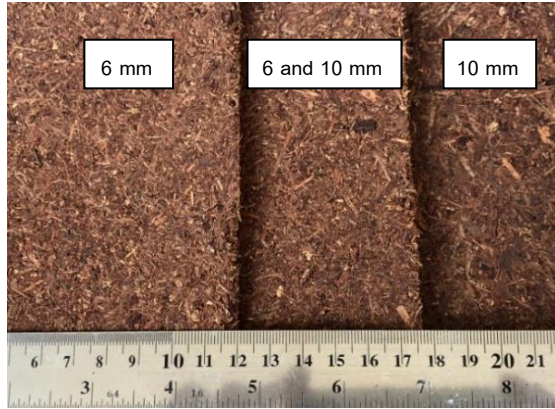
รูปที่ 6 การทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นขึ้นไม้อัด

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ (มอก.876- 2547) [2] สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ลักษณะทั่วไป

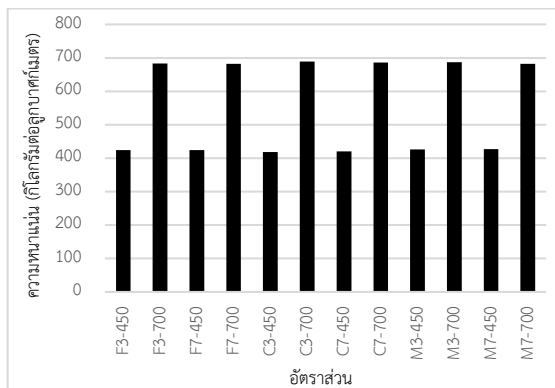
จากผลการตรวจพินิจลักษณะทั่วไปของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ทั้ง 12 อัตราส่วนพบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดทั้งหมดมีขอบที่ได้ฉากกับระนาบผิว และมีเนื้อผิวหน้าที่ค่อนข้างเรียบเนียนละเอียด แต่ส่วนที่แตกต่างกันของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์แต่ละอัตราส่วนจะขึ้นอยู่กับปัจจัย ได้แก่ เปลือกไม้กระถินณรงค์ที่บดย่อยแต่ละขนาด จะส่งผลต่อลักษณะผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด โดยเปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร จะมีเนื้อที่เรียบเนียนมากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร ผสมกับเศษเปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร อย่างละครึ่ง และแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ขนาดหยาบ ผ่านตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร มีเนื้อที่หยาบมากที่สุด ตามลำดับ [4] ส่วนปริมาณกาวไอโซไซยาเนตที่ผสมลงในแผ่นขึ้นไม้อัดมากกว่า จะมีเนื้อที่แน่นและมีขอบที่คมและแข็งแรงกว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่ผสมกาวน้อย นอกจากนี้แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า จะมีเนื้อที่แน่นและมีขอบที่คมและแข็งแรงกว่าแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีความหนาแน่นน้อย



รูปที่ 8 ผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถิน
 ผนังขนาด 6 มิลลิเมตร (ซ้าย) ขนาด 6 มิลลิเมตร ผสม 10
 มิลลิเมตรอย่างละครึ่ง (กลาง) และขนาด 10 มิลลิเมตร (ขวา)

6.2 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัด
 จากเศษเปลือกไม้กระถินผนังที่ขึ้นรูปทั้ง 12 อัตราส่วน ใน
 รูปที่ 9 พบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูปด้วยความหนาแน่นที่
 กำหนดทั้ง 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 700
 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียง
 กับที่ต้องการ

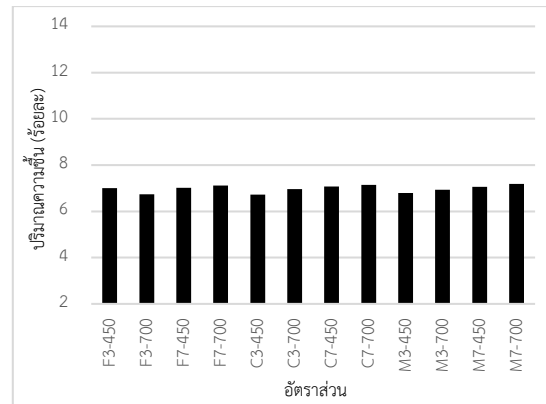


รูปที่ 9 ความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้
 กระถินผนังอัตราส่วนต่างๆ

6.3 ปริมาณความชื้น

สำหรับปริมาณความชื้นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษ
 เปลือกไม้กระถินผนังที่ขึ้นรูปทั้ง 12 อัตราส่วน พบว่า
 แผ่นขึ้นไม้อัดทั้งหมดมีค่าปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน โดย
 มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6.72 ถึง 7.19 และอยู่ในช่วงที่

มาตรฐาน มอก.876-2547 กำหนด คือ มีค่าระหว่างร้อยละ
 4 ถึง 13 [2] ดังรูปที่ 10

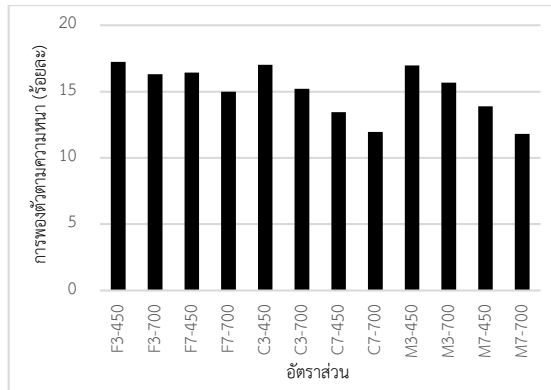


รูปที่ 10 ปริมาณความชื้นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือก
 ไม้กระถินผนังอัตราส่วนต่างๆ

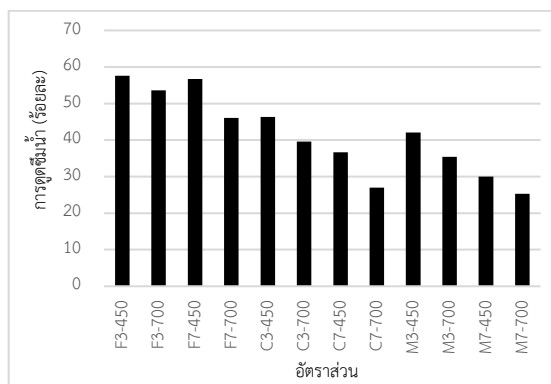
6.4 การพองตัวตามความหนา และ การดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบการพองตัวตามความหนาของแผ่น
 ขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินผนังทั้ง 12 อัตราส่วน
 ในรูปที่ 11 พบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ขนาด
 ละเอียดและหยาบ (เศษเปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่าน
 ตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร ผสมกับเศษเปลือกไม้ขนาดหยาบ
 ผ่านตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร อย่างละครึ่ง) ที่กำหนดให้
 มีค่าความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้
 กาวร้อยละ 7 (อัตราส่วน M7-700) จะมีค่าการพองตัวต่ำ
 ที่สุด รองลงมาคือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ขนาด
 หยาบ (เศษเปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 10
 มิลลิเมตร) ที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อ
 ลูกบาศก์เมตร และใช้กาวร้อยละ 7 (อัตราส่วน C7-700)
 ส่วนแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ขนาดละเอียด (เศษ
 เปลือกไม้ขนาดละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 6 มิลลิเมตร) ที่
 กำหนดให้มีค่าความหนาแน่น 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์
 เมตร และใช้กาวร้อยละ 3 (อัตราส่วน F3-450) จะมีค่าการ
 พองตัวสูงที่สุด จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงชัดเจนว่า
 การเพิ่มปริมาณกาวมีผลต่อการลดลงของการพองตัวตาม
 ความหนา [1, 5] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าการพอง
 ตัวทั้งหมดกับมาตรฐาน มอก.876-2547 ซึ่งกำหนดให้ต้องมี
 ค่าไม่เกินร้อยละ 12 [2] พบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือก
 ไม้กระถินผนัง จำนวน 2 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน K-

M7-700 และอัตราส่วน K-C7-700 มีค่าการพองตัวผ่านมาตรฐาน นอกจากนี้เมื่อน้ำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้ทั้งหมดไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำในรูปที่ 12 พบว่า การดูดซึมน้ำเป็นคุณสมบัติที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการพองตัวตามความหนา



รูปที่ 11 การพองตัวตามความหนาของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

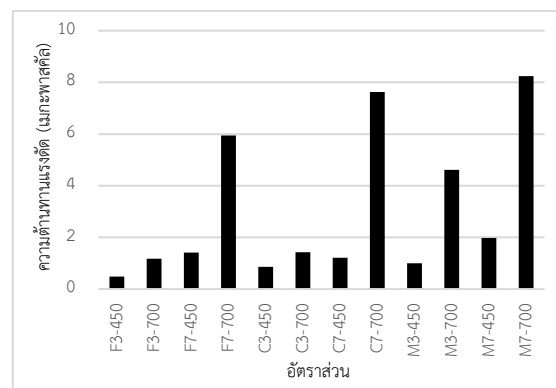


รูปที่ 12 การดูดซึมน้ำของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

6.5 ความต้านทานแรงดัด

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่ขึ้นรูปทั้ง 12 อัตราส่วน ในรูปที่ 13 พบว่า ขนาดของเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ ความหนาแน่น และปริมาณกาวมีผลต่อความต้านทานแรงดัดของแผ่นขึ้นไม้อัดอย่างมาก [1, 6-8] โดยแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์เป็นอัตราส่วน M7-700 ที่มีค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน C7-700 อัตราส่วน F7-700 อัตราส่วน M3-700

อัตราส่วน M7-450 อัตราส่วน C3-700 อัตราส่วน F7-450 อัตราส่วน C7-450 อัตราส่วน F3-700 อัตราส่วน M3-450 อัตราส่วน C3-450 และอัตราส่วน F3-450 เป็นแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีค่าความต้านทานแรงดัดต่ำที่สุด ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความต้านทานแรงดัดดังกล่าว จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์มีผลต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดัดมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณกาวที่ใช้ และขนาดของเศษเปลือกไม้มีผลต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดัดน้อยที่สุดตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.876-2547 ซึ่งกำหนดให้แผ่นขึ้นไม้อัดมีความต้านทานแรงดัดสูงกว่า 14 เมกะพาสคัล [2] จะเห็นได้ว่าแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ทั้งหมดยังคงมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

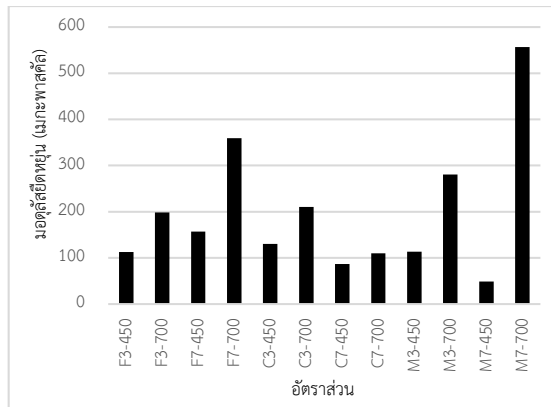


รูปที่ 13 ความต้านทานแรงดัดของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

6.6 มอดุลัสยืดหยุ่น

ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติด้านมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ทั้ง 12 อัตราส่วน ดังรูปที่ 14 พบว่า มอดุลัสยืดหยุ่น เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงดัด [4, 6-7] โดยแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงดัดสูงก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.876-2547 ซึ่งกำหนดให้แผ่นขึ้นไม้อัดมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงกว่า 1,800 เมกะพาสคัล [2] พบว่าแผ่นขึ้นไม้อัด

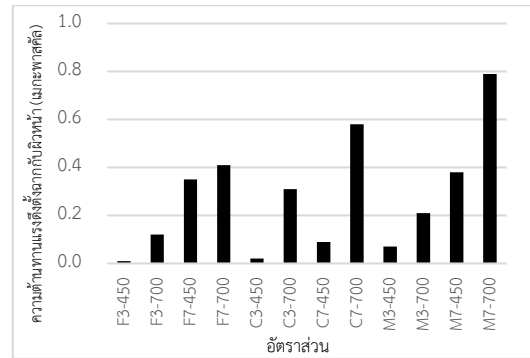
จากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ทั้งหมดมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นต่ำกว่ามาตรฐานเช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงดัด



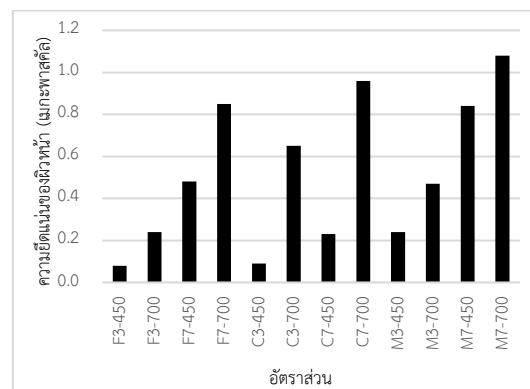
รูปที่ 14 มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

6.7 ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า และความยืดหยุ่นของผิวหน้า

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า และความยืดหยุ่นของผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ในรูปที่ 15 และ 16 ทำให้เห็นว่าความหนาแน่น ปริมาณกาว และขนาดของเศษเปลือกไม้มีผลต่อความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าและความยืดหยุ่นของผิวหน้าเช่นเดียวกับคุณสมบัติอื่น [1, 7-8] โดยแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วน M7-700 เป็นแผ่นขึ้นไม้อัดที่มีค่าความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าและความยืดหยุ่นของผิวหน้าที่สูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน C7-700 อัตราส่วน F7-700 ไกลเรียงลงมาจนกระทั่งอัตราส่วน F3-450 เป็นแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีค่าความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าและความยืดหยุ่นของผิวหน้าที่ต่ำที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.876-2547 [2] ซึ่งกำหนดให้แผ่นขึ้นไม้อัดต้องมีความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าสูงกว่า 0.4 เมกะพาสคัล และความยืดหยุ่นของผิวหน้าต้องสูงกว่า 0.8 เมกะพาสคัล พบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดอัตราส่วนต่างๆ จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน M7-700 อัตราส่วน C7-700 และอัตราส่วน F7-700 ที่สามารถผ่านมาตรฐานดังกล่าวได้



รูปที่ 15 ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

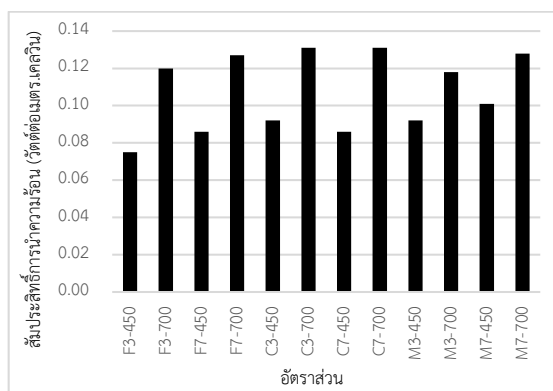


รูปที่ 16 ความยืดหยุ่นของผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

6.8 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ในรูปที่ 17 สรุปได้ว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่กำหนดความหนาแน่นเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่กำหนดความหนาแน่นเท่ากับ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในทุกอัตราส่วน ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นขึ้นไม้อัดที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีช่องว่างมากกว่าและมีความเป็นฉนวนมากกว่าแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีความหนาแน่นสูงและมีช่องว่างน้อย [9-11] ทั้งนี้แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วน F3-450 จะเป็นแผ่นขึ้นไม้

อัตราส่วน F7-450 อัตราส่วน C7-450 อัตราส่วน C3-450 อัตราส่วน M3-450 อัตราส่วน M7-450 อัตราส่วน M3-700 อัตราส่วน F3-700 อัตราส่วน F7-700 อัตราส่วน M7-700 อัตราส่วน C3-700 และอัตราส่วน C7-700 เป็นแผ่นขึ้นไม้ อัตราส่วนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด ตามลำดับ

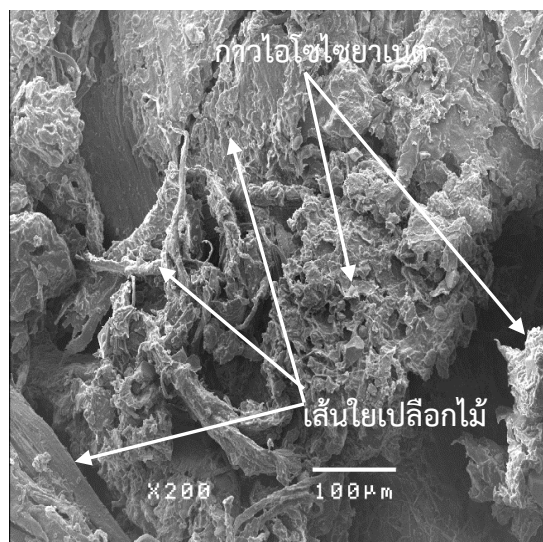


รูปที่ 17 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนต่างๆ

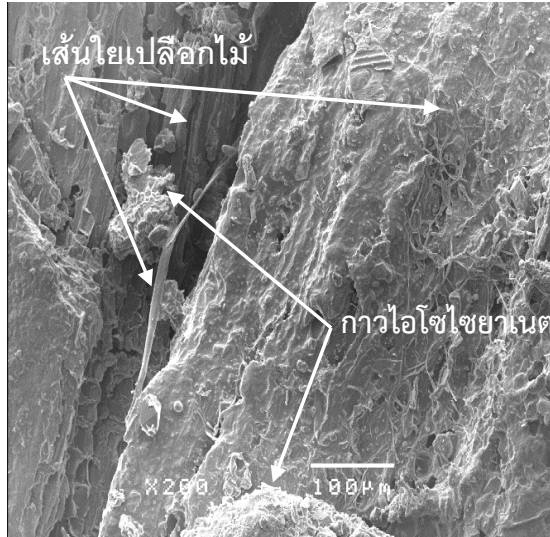
เมื่อนำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วน M7-700 มาถ่ายภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 18 และ 19 ทำให้สามารถอธิบายถึงลักษณะของเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยึดติดกันเป็นก้อนอย่างแน่นหนา นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตขนาดและลักษณะของเส้นใยเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีขนาดประมาณ 5 – 15 ไมโครเมตร ส่วนกาวยูรีเทนจะกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวและช่องว่างต่างๆ คล้ายใยแมงมุมจับตัวกันเป็นก้อน เพื่อช่วยยึดเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ให้ติดกัน

ส่วนการนำแผ่นขึ้นไม้อัดที่พัฒนาไปทดสอบใช้งานจริง พบว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความยืดหยุ่นของผิวหน้าที่สูง จะมีแนวโน้มการนำมาใช้งานเป็นวัสดุตกแต่งอาคารหรือผนังอาคารได้ดี โดยสามารถติดตั้งด้วยเลื่อยและเลื่อยไฟฟ้าได้ดี (รูปที่ 20) รวมทั้งจะยึดกับโครงสร้างหลักรูปพรรณโดยใช้สว่านไฟฟ้าหรือตะปูเกลียวคลายปล่อยได้

แต่แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์อัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความยืดหยุ่นของผิวหน้าที่ต่ำ โดยเฉพาะแผ่นขึ้นไม้อัดที่กำหนดความหนาแน่น 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะมีปัญหาในการนำมาใช้งานจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากตัวแผ่นจะเกิดการหลุดร่อนทั้งจากการตัดด้วยเลื่อยหรือเลื่อยไฟฟ้า และการเจาะรูด้วยสว่านไฟฟ้า ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 21 ทำให้สรุปได้ว่า แผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่มีความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้ตกแต่งอาคารได้ดีเช่นเดียวกับแผ่นขึ้นไม้อัดทั่วไป แม้ว่าแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์ทั้งหมดจะมีความต้านทานแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 18 ลักษณะกาวยูรีเทนที่ติดอยู่บนเศษเปลือกไม้กระถินณรงค์จากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 19 การเคลือบเส้นใยเปลือกไม้กระถินณรงค์ด้วยกาวจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 20 การตัดแผ่นขึ้นไม้อัดด้วยเลื่อยไฟฟ้า



รูปที่ 21 การเจาะแผ่นขึ้นไม้อัดด้วยสว่านไฟฟ้า

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินงานข้างต้น สามารถเป็นสรุปผล และข้อเสนอแนะได้ดังนี้

7.1 สรุปผล

จากผลการดำเนินโครงการสามารถสรุปได้ว่า เมื่อ นำเปลือกไม้กระถินณรงค์ มาผสมกับกาวชนิดไอโซไซยานาต (pMDI) และอัดขึ้นรูปให้มีความหนา 10 มิลลิเมตร โดยใช้ ความร้อน 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จะได้แผ่น ขึ้นไม้อัดที่สามารถนำไปใช้ในงานวัสดุตกแต่งได้ดี โดยเฉพาะ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกไม้กระถินณรงค์ที่ควบคุมความ หนาแน่นที่ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณการร้อยละ 7 และใช้เปลือกไม้กระถินณรงค์ที่บดย่อยให้มีขนาดผ่าน ตะแกรง 6 มิลลิเมตร ผสมกับขนาดผ่านตะแกรง 10 มิลลิเมตร หรือขนาดผ่านตะแกรง 10 มิลลิเมตร เพียงขนาด เดียว โดยแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมที่ได้ดังกล่าว จะมีค่าความ หนาแน่น ความชื้น การพองตัวตามความหนา ความต้านทาน แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้าที่ผ่าน ตามที่มาตรฐาน มอก.876-2547 กำหนด แต่ยังคงมีค่าความ ต้านทานแรงดัด และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่ง จากผลการทดสอบสามารถสรุปปัจจัยที่ทำให้แผ่นขึ้นไม้อัด เทียมมีความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำดังกล่าว ว่าเป็นผลมาจากความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัด ปริมาณ กาวที่ใช้ และขนาดของเศษเปลือกไม้ที่ยังไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามแผ่นขึ้นไม้อัดนี้ยังมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะ นำไปใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาคารได้ดีโดยสามารถเลื่อย เจาะ และยึดด้วยตะปูเกลียวได้เช่นเดียวกับแผ่นขึ้นไม้อัดทั่วไปใน ท้องตลาด นอกจากนี้แผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้ กระถินณรงค์ที่พัฒนายังมีจุดเด่นอยู่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อนที่ค่อนข้างต่ำเพียง 0.120 ถึง 0.131 วัตต์ต่อเมตร. เคลวิน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เช่น แผ่นยิปซัมที่มีค่าเท่ากับ 0.191 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ผนังอิฐ มอญที่มีค่าเท่ากับ 0.473 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน อิฐมวลเบา มี ค่าเท่ากับ 0.180 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน เป็นต้น และมีต้นทุน การผลิตที่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับแผ่นขึ้นไม้อัดทั่วไป โดยเฉพาะหากผู้ผลิตที่มีเปลือกกระถินณรงค์เหลือทิ้ง เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการจัดซื้อเศษไม้มาใช้ในการ ผลิตได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาต่อไป ควรพัฒนาแผ่นขึ้นไม้อัดเทียมจากเปลือกไม้กระถินณรงค์เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพิ่มเติม เช่น ของที่ระลึก หรือเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น เพื่อช่วยในการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ รวมทั้งพัฒนาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงให้ผ่านมาตรฐาน มอก.846-2547

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2563 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yenjai P, Jarusombuti S, Veenin T. Particleboard manufacturing from waste of cajuput (Melaleuca cajuputi Powell). VRU Research and Development Journal Science and Technology. 2016;11(2):131-40. (in Thai)
- [2] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.876-2004: particleboard product. Bangkok: TISI; 2004. (in Thai)
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177). Philadelphia: ASTM; 2010.
- [4] Cheng X, He X, Xie J, Quan P, Xu K, Li X, Cai Z. Effect of the particle geometry and adhesive mass percentage on the physical and mechanical properties of particleboard made from peanut hull. Bio Resources. 2016;11(3):7271-81.
- [5] Nemli G, Örs Y, Kalaycıoğlu H. The choosing of suitable decorative surface coating material types for interior end use applications of particleboard. Construction and Building Materials. 2005;19(4):307-12.
- [6] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in Polymer Science. 1999;24(2):221-74.
- [7] Lin CJS, Hiziroglu SMK, Lai HW. Manufacturing particleboard panels from betel palm (Areca catechu Linn.). Journal of materials processing technology. 2008;197(1-3):445-8.
- [8] Sekaluvu L, Tumutegyeze P, Kiggundu N. Investigation of factors affecting the production and properties of maize cob-particleboards. Waste Biomass Valor. 2014; 5(1):27-32.
- [9] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Coconut coir ceiling board product with thermal insulation property. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(2):129-38. (in Thai)
- [10] Faherty KF, Williamson TG. Wood Engineering and Construction Handbook. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [11] Hazrat BM, Zarea HH, Daliri SM, Abginechi Z, Hemmati A. Mechanical and insulating performances of ultralight thick particleboard from sugarcane residues and woods planer shaving. Eur. J. Wood Prod. 2016;74(2):161-8.

การศึกษาเปรียบเทียบผลการตกแต่งด้วยกระบวนการพ่นบนผ้าแบบสองขั้นตอนของ สารย้อมติดพอลิยูรีเทนพ่นทับด้วยสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย และ อนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี บนผ้าฝ้ายทอลายขัด

สุกฤษฎี กริมสูงเนิน^{1*} และอภิชาติ สนธิสมบัติ¹
sukrit_k@mail.mutt.ac.th^{1*}, apichart.s@en.mutt.ac.th¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 23-Mar-2021
Revised	: 24-May-2021
Accepted	: 25-May-2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการตกแต่งด้วยกระบวนการพ่นบนผ้าแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกพ่นผ้าด้วยสารย้อมติดพอลิยูรีเทน พ่นทับด้วยสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย และอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด 2,250 x 2,320 และ 1,080 x 2,140 นาโนเมตร ตามลำดับ) บนผ้าฝ้ายทอลายขัด ผ้าถูกทดสอบความคงทนต่อการขัดถูแบบแห้งและเปียก การทดสอบความคงทนต่อการซักล้าง การทดสอบการซีมน้ำ และการทดสอบต่อต้านแบคทีเรียของสิ่งทอผ้าที่พ่นสารย้อมติดและพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย ร้อยละ 10 พบว่าการซีมน้ำสูงสุด รองลงมาคือผ้าที่พ่นสารย้อมติดและพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี ร้อยละ 10 สำหรับการทดสอบต่อต้านแบคทีเรีย ผ้าที่พ่นสารย้อมติดและพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย ร้อยละ 8 สามารถต่อต้านแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมลบ (เอสเชอริเชีย โคไล) และแบคทีเรียแกรมบวก (สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส) ได้ ในทางกลับกันผ้าที่พ่นสารย้อมติดและพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี ร้อยละ 6 สามารถต่อต้านแบคทีเรียแกรมลบได้ และผ้าที่พ่นสารย้อมติดและพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี ร้อยละ 4 8 และ 10 สามารถต่อต้านแบคทีเรียแกรมบวกได้ สรุปว่าผลลัพธ์ของสูตรที่กล่าวข้างต้นเหมาะสำหรับการตกแต่งบนผ้าทอฝ้ายหรือผ้าที่ต้องการต้านทานแบคทีเรียอื่น ๆ ที่เช่น ผ้าสำหรับเฟอร์นิเจอร์ เครื่องนอน ผ้าปูที่นอน เป็นต้น

คำสำคัญ: อนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย อนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อิตาลี ผ้าฝ้ายทอลายขัด กระบวนการพ่นเคลือบ

A Comparative Study on Finishing Process Results using Two Steps Spraying Method by Coating Polyurethane Binder Sprayed Over with Micro-Thai Silk Particle Solutions and Micro-Eri Silk Particle Solutions on Plain Cotton Woven Fabrics.

Sukrit Krumsoongnem^{1*} and Apichart Sonthisombat¹
sukrit_k@mail.mutt.ac.th^{1*}, apichart.s@en.mutt.ac.th¹

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

Received	: 23-Mar-2021
Revised	: 24-May-2021
Accepted	: 25-May-2021

Abstract

The objective of this research was to compare the results of finishing processes applied by the two-steps spraying method. The step was spraying fabrics with polyurethane binder and then spray over with solutions of micro-Thai and micro-Eri silk particles (the smallest single particle of 2,250 x 2,320 and 1,080 x 2,140 nm respectively) on plain cotton woven fabrics. The fabrics were tested with rubbing fastness testing in dry and wet conditions, washing fastness testing, wicking testing, and anti-bacterial testing of textiles. The fabric coated with the binder and sprayed with 10% micro-Thai silk particles solutions was found to have the highest water absorption followed by fabric coated with the binder and sprayed with 10% micro-Eri silk particle solutions. As for antibacterial testing, fabric coated with the binder and sprayed with 8% of micro-Thai silk solutions could resist gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria and gram-positive (*Staphylococcus aureus*) bacteria. On the other hand, fabric coated with the binder and sprayed with 6% of micro-Eri silk particles solutions could resist gram-negative bacteria and the fabric coated with the binder and sprayed with 4%, 8% and 10% micro-Eri silk particle solutions were resistant to gram-positive bacteria. It could be concluded that the fabric coated with the binder and sprayed with 8% of micro-Thai silk particle solutions was resistant to gram-positive and gram-negative bacteria. In conclusion, the results of the above formula are suitable for finishing on the cotton woven fabrics or other antibacterial required fabrics such as fabrics for furniture, bedding, curtains, etc.

Key words: Micro-Thai Silk particles, Micro-Eri Silk Particles, Plain Cotton Woven Fabrics, Spraying Process.

1. บทนำ

เส้นไหมเป็นเส้นใยจากธรรมชาติ ชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับเป็น “ราชินีของเส้นใย” ผลิตมาจากตัวหนอนไหม ซึ่งเพาะเลี้ยง หรือเจริญเติบโตตามธรรมชาติ เส้นไหมประกอบด้วยกรดอะมิโน ซึ่งไหมจัดเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (ตามสภาพการเพาะเลี้ยง) คือ ไหมเลี้ยง (Mulberry Silk: ไหมบอมบิกซ์ มอริ (Bombyx mori) ซึ่งเป็นไหมที่กินใบหม่อน และไหมป่า (Wild Silk) ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ โดยมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และประเทศอินเดีย ในปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงไหมป่าอีกชนิดหนึ่ง ที่มีชื่อว่าไหมเอรี่ (Eri Silk) ไหมเอรี่เป็นพันธุ์ไหมป่าชนิดหนึ่งที่มีกระจายอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศอินเดีย เนปาล จีน และญี่ปุ่น ถูกนำมาทดลองเลี้ยงในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2517 โดยกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้ศึกษาวิจัย จนถึงปี พ.ศ. 2533 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้มีการส่งเสริมการเลี้ยงไหมเอรี่ให้กับเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งปลูกต้นมันสำปะหลังจำนวนมาก เพื่อให้เกษตรกรนำเอาใบมันสำปะหลังมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงตัวหนอนไหมเอรี่ แทนการตัดใบทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ โดยตัวหนอนไหมเอรี่ สามารถกินใบมันสำปะหลัง หรือใบละหุ่งได้ สภาพของเส้นใยจากหนอนไหมเอรี่ มีสีขาวนวล ให้ผลผลิตที่มีความยาวมากกว่าหนอนไหมไทย (สีเหลือง) เนื่องจากตัวหนอนไหมเอรี่มีขนาดใหญ่ (บางแห่งเรียกว่าจับไ้รังไหม) เมื่อเทียบกับหนอนไหมไทย (สีเหลือง) ที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ตัวดักแด้ของไหมเอรี่ มีโปรตีนร้อยละ 66-67 เมื่อเทียบกับตัวดักแด้ของไหมบ้าน จะมีโปรตีนประมาณร้อยละ 54-55 [1-3]

คณะนักวิจัย [4-6] พบว่าไหมไทย (สีเหลืองทอง) มีส่วนประกอบที่เป็นกาไหมปริมาณสูงสุดร้อยละ 38 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ มักมีปริมาณกาไหมร้อยละ 20-25 เท่านั้น กระบวนการปั่นเส้นไหมจากตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัย จะกลายเป็นตัวดักแด้ จะเริ่มพันของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอนไหม สารละลายนี้จะถูกอัดผ่านท่อสองท่อในหัวของตัวหนอนไหมไปสู่บริเวณที่เป็นแวนกดเส้นใย สารที่ออกมานั้นมีความหนืดสูง เรียกว่าเส้นใย หรือ ไฟโบรอิน (Fibroin) จำนวน 2 เส้น แล้วถูกห่อหรือเคลือบด้วยกาไหม

หรือเซรีซิน (Sericin) เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดฟอรั่มตัวเป็นของแข็ง ยึดติดกัน ก่อให้เกิดเส้นใยยาวต่อเนื่อง

ส่วนประกอบเส้นไหมจะประกอบด้วยกรด อะมิโนอย่างน้อย 18 ชนิด มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และมีสารกำจัดเชื้อจุลินทรีย์บางอย่าง (สารต่อต้านไวรัส (โรคเรื้อรัง และงูสวัด) ที่เป็นเหตุให้เกิดโรคผิวหนังของมนุษย์ได้ และมีสมบัติที่สำคัญ เช่น เป็นสารควบคุมระดับคอเลสเตอรอล เป็นสลายแอลกอฮอล์ในร่างกาย เป็นสารทำให้แผลหายเร็วขึ้น เป็นสารรักษาปริมาณน้ำในผิวหนัง สารกำจัดสิ่งสกปรกในเซลล์ และสารยืดอายุเซลล์ผิวหนัง เป็นต้น [7-8]

ในประเทศไทย มีคณะนักวิจัย [9] ได้รับอนุสิทธิบัตรเกี่ยวกับนำเอาเส้นไหมดิบ เศษเส้นไหมดิบ หรือรังไหมดิบ มาผลิตเป็นอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ที่ผลิตได้มีสมบัติเป็นสารทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น (Moisturizing agent) สารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Protecting) หรือการนำเอาอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์มาเคลือบวัสดุด้านสิ่งทอเพื่อทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น ดูดความชื้นในอากาศได้ดี ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Protecting) และลดริ้วรอยบนผิวหนังผู้สวมใส่ได้ อีกทั้งนำไปผสมในเครื่องสำอางทำให้ผิวหนังนุ่มนวลชุ่มชื้น ลดรอยเหี่ยวย่นบนผิวหนัง

จากเอกสารอ้างอิง [10] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการพ่นเคลือบสเปรย์บนผิวหนังผ้ากระบวนกรพ่นเคลือบผ้าแบบขั้นตอนเดียว (One Step Spraying Method) (พ่นสารยึดติดพอลิยูรีเทนผสมกับสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์) พ่นบนผิวหนังผ้าฝ้ายทอหลายชุดเปรียบเทียบกับกระบวนกรพ่นเคลือบผ้าแบบสองขั้นตอน (Two Steps Spraying Method) (ครั้งแรกเป็นการพ่นเคลือบด้วยสารยึดติดก่อน จากนั้นพ่นครั้งที่สองด้วยสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์) บนผิวหนังผ้าฝ้ายทอหลายชุด) พบว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยกระบวนกรพ่นเคลือบผ้าแบบสองขั้นตอน แสดงให้เห็นว่าการยึดติดที่ดีกว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยกระบวนกรพ่นเคลือบผ้าแบบขั้นตอนเดียว จึงเลือกใช้กระบวนกรตกแต่งกระบวนกรพ่นเคลือบผ้าแบบสองขั้นตอน ในงานวิจัยครั้งนี้กระบวนกรตกแต่งสำเร็จสามารถทำได้ด้วยวิธีการดูดซึม การจุ่มและบีบอัด หรือการพ่นเคลือบ อย่างไรก็ตามการพ่นเคลือบอาจมีปัญหาเรื่องของความไม่สม่ำเสมอของการพ่น

สเปรย์ ดังนั้นจึงต้องควบคุมขั้นตอนการพ่นสเปรย์เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ลดการสูญเสียสารเคมีเนื่องจากละอองกระจายตัว แล้วสะท้อนออกไปโดยไม่สัมผัสกับผิวหน้าสิ่งทอมีน้อยที่สุดเท่าที่จะควบคุมได้ [11-14]

2. วัตถุประสงค์

ศึกษากรรมวิธีการผลิตอนุภาคไมโครซิลค์เส้นไหมไทย (พันธุ์พื้นบ้านนางน้อยศรีสะเกษ-1) และ ไมโครซิลค์เส้นไหมอีรี่ (พันธุ์ไทย) ด้วยสภาวะที่เหมาะสม และ ตกแต่งเชิงเคมี ด้วยการพ่นเคลือบด้วยกระบวนการพ่นเคลือบผ้าแบบสองขั้นตอน ของอนุภาคไมโครซิลค์จากไหมไทย กับอนุภาคไมโครซิลค์จากไหมอีรี่ บนผ้าฝ้ายทอลายขัด เปรียบเทียบผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคและสัณฐานที่ปรากฏด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ความแตกต่างของน้ำหนักผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่ง การทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียก การทดสอบการชักล้าง การทดสอบเวลาในการซึมน้ำ (Wicking Test) การประเมินผลการต้านแบคทีเรีย(แบคทีเรียแกรมลบ เอสเชอริเชีย โคไล และแบคทีเรียแกรมบวก สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส) ของสิ่งทอ (วิธีเชิงคุณภาพ) และการตรวจสอบขนาดอนุภาคและสัณฐานที่ปรากฏด้วยกล้อง SEM บนผ้าตัวอย่าง ก่อน และหลังชักล้าง

3. วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ-สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เส้นไหมไทย (พันธุ์พื้นบ้านนางน้อยศรีสะเกษ-1) และ เส้นไหมอีรี่ (พันธุ์ไทย) ใช้สารโซเดียม ไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide for analysis; NaOH (Merck, Germany) เป็นตัวทำละลายไหมทั้ง 2 ชนิด จากนั้นนำมาปรับสภาพด้วย กรดไฮโดรคลอริก 37% (Hydrochloric Acid 37% for analysis; HCl (CARLO ERBA Reagents SAS, France) กรองโดย ผ้าซิงสกรีนขนาด 180-200 Mesh (รู/นิ้ว) นำมาอบด้วยตู้อบลมร้อน บดด้วยเครื่องบดจากนั้น นำอนุภาคไมโครซิลค์ของไหมทั้ง 2 ชนิด และ สารยีสติดิฟอลิ ยูรี เทน (บริษัท Performance Science Company Limited) ผสมน้ำกลั่น แยกแต่ละตัวอย่าง เพื่อเตรียมพ่นกระบวนการเตรียมผ้าฝ้าย ชักผ้าด้วยน้ำยาชักผ้า แบบไม่มีประจุ กระบวนการพ่นบนผ้าฝ้ายทอลายขัด (เบอร์เส้นด้าย

40 (ด้ายยืน) เบอร์เส้นด้าย 40 (ด้ายพุ่ง) แบบ 2 ขั้นตอน (พ่นสารละลายสารยีสติดิฟอลิ ก่อน แล้วจึงพ่นสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ภายหลัง)

3.2 กระบวนการเตรียมอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย และ อนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่ และกรรมวิธีการตรวจสอบสัณฐาน และขนาดอนุภาคด้วยกล้อง SEM

3.2.1 กรรมวิธีการเตรียมอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย และ อนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่

นำเส้นไหมไทย จำนวน 1 กิโลกรัม มาตัดด้วยกรรไกรให้มีขนาดประมาณ 2 x 2 เซนติเมตร จากนั้นละลายเส้นไหมที่ตัดแล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2-5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ด้วยอัตราส่วนเส้นไหมต่อน้ำกลั่น เท่ากับ 1:5 จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิหม้อต้มอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 95-98 องศาเซลเซียส พร้อมกับการคนให้สม่ำเสมอจนเส้นไหมละลายเป็นสารละลายทั้งหมด ปลอ่ยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิปกติ เมื่อสารละลายไหมเย็นตัวแล้ว ปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก 37% ความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) จนสารละลายมีค่า pH เป็นกลาง (6.5-7.5) ในตู้ดูดควัน คนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองสิ่งสกปรกออกด้วยผ้าซิงสกรีนขนาด 180-200 Mesh (รู/นิ้ว) นำสารละลายที่เป็นน้ำใสที่ผ่านการกรองมาลงในภาชนะเบี่ยง แล้วนำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-10 ชั่วโมง จนได้ผงไหม เมื่อแห้งสนิท นำไปบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ (Ball Mill Grinding Machine) ด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 3 ครั้ง นำอนุภาคที่ผ่านการบดแล้ว มาผ่านตะแกรงกรองขนาด 180-200 Mesh เก็บเฉพาะผงที่ละเอียดใส่ถุงพลาสติกซีลด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ

สำหรับกรรมวิธีการเตรียมอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่ ดำเนินการตามสูตรและกระบวนการดังกล่าวข้างต้น

3.2.2 กรรมวิธีการตรวจสอบสัณฐาน และขนาดอนุภาคด้วยกล้อง SEM

กรรมวิธีการตรวจสอบสัณฐาน และขนาดอนุภาคด้วยกล้อง SEM เตรียมตัวอย่าง และดำเนินการที่บริษัทธาราปิสิกส์เนส จำกัด (Do SEM: ดูเข้ม) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ด้วยกล้อง SEM JSM-5410LV ที่ 20 kV

กำลังขยาย 1,000-5,000 เท่า และวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ด้วยโปรแกรม SemAfore 5.2 [15]

3.3 กระบวนการตกแต่งด้วยการฟ้นเคลือบสาร ยึดติดพอลิยูรีเทนพ่นทับด้วยสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย บนผ้าฝ้ายทอลายขัด (ผ้าฝ้าย)

3.3.1 วิธีการเตรียมผ้าตัวอย่าง

ตัดผ้าฝ้าย ขนาด 40 x 40 ซม. น้ำหนักผ้า 20 กรัม โดยนำไปซักด้วยน้ำยาซักผ้า ชนิดไม่มีประจุ ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ล้างน้ำกลั่น 3 รอบ แล้วนำมาอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ซึ่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง

3.3.2 วิธีเตรียมสารละลายสารยึดติด พอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก)

เตรียมสารละลายสารยึดติดพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยชั่งสารยึดติดพอลิยูรีเทนน้ำหนัก 150 กรัม ละลายในน้ำกลั่นน้ำหนัก 1,500 กรัม ใส่บีกเกอร์ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน เตรียมไว้ 2 ชุด รอพ่นเคลือบขั้นตอนต่อไป

3.3.3 วิธีเตรียมสารละลายอนุภาค ไมโครซิลค์ใหม่ไทย และ ไมโครซิลค์ใหม่อีรี ความเข้มข้นร้อยละ 4 6 8 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

เตรียมสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย และ ไมโครซิลค์ใหม่อีรี ความเข้มข้น ร้อยละ 4 6 8 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) โดยชั่งอนุภาคไมโครซิลค์เส้นใหม่ไทย และอีรี น้ำหนัก 12, 18, 24 และ 30 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร แยกตามบีกเกอร์ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร รวม 8 บีกเกอร์ (ตามลำดับ) คนให้เข้ากัน รอพ่นเคลือบขั้นตอนต่อไป

3.3.4 วิธีพ่นเคลือบสารละลายสาร ยึดติดพอลิยูรีเทน ความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก)

นำสารละลายที่เตรียมจากกระบวนการ 3.3.2 จำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี (กระป๋องพ่น) ปริมาณการพ่นสูงสุด 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ความดันลมอัดไม่เกิน 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หัวพ่นขนาด 1.8 มม. (เหมาะกับงานพ่นทั่วไป) พ่นสารด้วยระยะห่างจากผ้า

30 ซม. โดยมีแท่นยึดผ้าฝ้ายให้ตั้ง ตั้งมุม 125-130 องศา (เฉียงกับพื้น) และมุมในการพ่นขนานกับพื้น โดยพ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืนด้านหน้า

สำหรับด้านหลัง นำสารละลายที่เตรียมจากกระบวนการ 3.3.2 จำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี ดังกล่าวข้างต้น พ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน

เมื่อพ่นเคลือบเสร็จ นำผ้าฝ้าย ที่เปียกมาชั่ง น้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง

3.3.5 วิธีพ่นเคลือบสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย และไมโครซิลค์ใหม่อีรี ความเข้มข้นร้อยละ 4 6 8 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

นำสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทย และ ไมโครซิลค์ใหม่อีรี ความเข้มข้นร้อยละ 4 ที่เตรียมจากกระบวนการ 3.3.3 จำนวน 25 กรัม ตามลำดับ พ่นเคลือบด้านหน้าผ้าตามกระบวนการ 3.3.4

สำหรับด้านหลังผ้า นำสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 4 (เท่ากับด้านหน้า) ที่เตรียมจากกระบวนการ 3.3.3 จำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี ดังกล่าวข้างต้น พ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน

เมื่อพ่นเคลือบเสร็จ นำผ้าฝ้ายที่เปียกมาชั่ง น้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง จากนั้นดำเนินการพ่นสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 6 8 และ 10 (ตามลำดับ) เรียงกันตามข้ออธิบายข้างต้น ครั้งละความเข้มข้นจนครบทุกตัวอย่าง (หมายเหตุ สารละลายอนุภาคไมโครซิลค์จะต้องเป็นชนิดเดียวกัน และความเข้มข้นด้านหน้าและหลังผ้า ต้องเป็นความเข้มข้นเดียวกัน ในแต่ละตัวอย่างผ้า ตามลำดับ)

3.3.6 กระบวนการอบแห้ง/ทำปฏิกิริยาร่างแห

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการพ่นเคลือบเรียบร้อยแล้วตามข้อ 3.3.5 เข้าเครื่องอบแห้งและทำปฏิกิริยาร่างแหบนผ้าฝ้าย ณ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที ทำแบบนี้จนกว่าน้ำหนักจะคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อผ่านเครื่องดังกล่าวแล้วนำผ้าฝ้าย ที่ให้เย็น แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ซึ่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผล

การทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง เก็บผ้าฝ้าย ใส่ถุงพลาสติกแล้ว ซักปากถุง รอตบซับขั้นตอนต่อไป

3.4 กระบวนการทดสอบสมบัติผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่ง

3.4.1 การทดสอบการขัดถูแบบแห้ง และเปียก (ISO 105-X12:2016) ดำเนินการที่บริษัท อินเทอร์เน็ต เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ ด้วยเครื่องขัดถู COMETECH รุ่น QC-319

3.4.2 การทดสอบหลังการซักล้าง (ISO 105 C06) Test No.C2S 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วย สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 0.4 ECE Reference Detergent และ สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 0.1 Sodium Perborate พร้อมลูกบอลเหล็ก 25 ลูก (ปรับสภาพ pH เท่ากับ 10.5) จำนวน 20 ครั้ง ดำเนินการที่บริษัท อินเทอร์เน็ต เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ ด้วยเครื่อง DURAWASH

3.4.3 การทดสอบเวลาในการซึมน้ำ (Wicking Test) (AATCC 197:2017) ดำเนินการที่บริษัท อินเทอร์เน็ต เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ

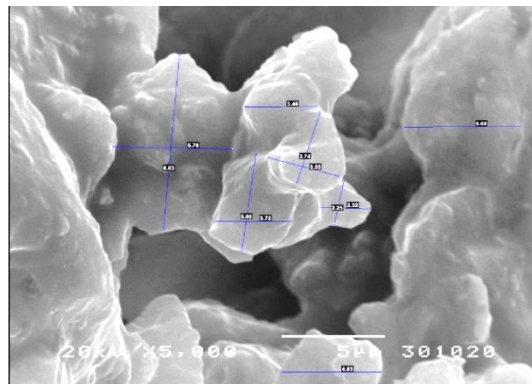
3.4.4 การทดสอบความคงทนต่อเหงื่อ ISO 105-E04:2013) ดำเนินการที่บริษัท อินเทอร์เน็ต เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ

3.4.5 การวิเคราะห์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้า ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีทดสอบสิ่งทอ เล่ม 29 การประเมินการต้านแบคทีเรียของสิ่งทอ (วิธีเชิงคุณภาพ) มาตรฐานเลขที่ มอก.121 เล่ม 29-2554 ดำเนินการที่ศูนย์ COE ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

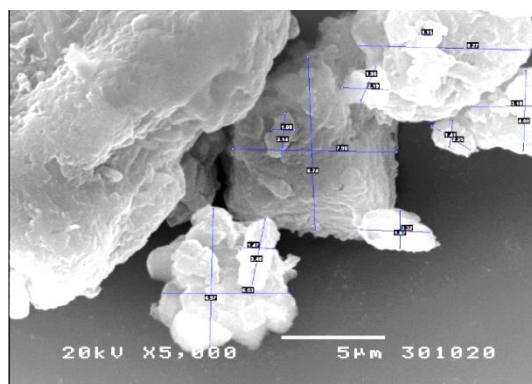
3.4.6 กรรมวิธีการตรวจสอบสัณฐานและขนาดอนุภาคบนผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่ง ด้วยกล้อง SEM การตรวจสอบสัณฐาน และขนาดอนุภาคบนผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่ง ด้วยกล้อง SEM ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.2

4. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

4.1 การตรวจสอบสัณฐาน และขนาดอนุภาค ด้วยกล้อง SEM



รูปที่ 1 สัณฐานและขนาดของอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย ด้วยกล้อง SEM



รูปที่ 2 สัณฐานและขนาดของอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่ ด้วยกล้อง SEM

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาคของไมโครซิลค์ไหมไทย และ ไมโครซิลค์ไหมอีรี่ ด้วยกล้อง SEM

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค เล็กสุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาค ใหญ่ (ไมโครเมตร)
อนุภาคไหมไทย	2.25 × 2.32	5.78 × 8.83
อนุภาคไหมอีรี่	1.08 × 2.14	6.03 × 6.97

จากการทดลองพบว่า ขนาดอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย มีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วงกว้าง 2,250 นาโนเมตร และยาว 2,320 นาโนเมตร (อนุภาคเดี่ยว) และมีขนาดใหญ่

ที่สุดในช่วงกว้าง 5,780 นาโนเมตร และยาว 8,830 นาโนเมตร (เนื่องจากอนุภาคไมโครซิลค์ทั้งสองชนิด เมื่อถูกความชื้นในอากาศจะจับตัวเป็นก้อน)

ส่วนขนาดอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี่ มีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วงกว้าง 1,080 นาโนเมตร และยาว $\times$ 2,140 นาโนเมตร (อนุภาคเดี่ยว) และมีขนาดใหญ่ที่สุดในช่วงกว้าง 6,030 นาโนเมตร และยาว 6,970 นาโนเมตร

4.2 ความแตกต่างของน้ำหนักผ้าที่ผ่าน

กระบวนการตกแต่งทั้งสองแบบ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักผ้าก่อนตกแต่ง (กรัม) และร้อยละค่าเฉลี่ยน้ำหนักผ้า (เพิ่มขึ้น) หลัง ฟันเคลือบ สำหรับผ้าที่ตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย และตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ผ้าก่อนตกแต่ง (กรัม)	ร้อยละ ค่าเฉลี่ย น้ำหนัก ผ้า (เพิ่มขึ้น) หลัง ฟัน เคลือบ
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 4	20.28	16.49
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 6	20.25	17.56
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 8	20.28	19.17
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10	20.18	20.69
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 4	20.64	17.51
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 6	20.47	18.90
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 8	20.14	19.72
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 10	20.40	20.81

จากตารางที่ 2 พบว่าผ้าตัวอย่างที่ฟันมีปริมาณสารเพิ่มขึ้นมาทุกฟัน แสดงว่าผ้าตัวอย่างมีการซึมซับสารที่ฟันเข้าไปในเนื้อผ้า เมื่อวิเคราะห์จากข้อมูลดิบ (น้ำหนักผ้าก่อน-หลังตกแต่ง) พบว่าความแปรปรวนของการฟันสเปรย์สารละลายสารย้อมติด และสารละลายอนุภาคไมโครซิลค์ทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นข้อเสียของกระบวนการตกแต่งด้วยการฟันสเปรย์ เนื่องจากการฟุ้งกระจาย หรือสะท้อนของสารละลายเมื่อฟันกระทบกับผ้า

4.3 ทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียก (ISO 105-X12: 2016)

ตารางที่ 3 การประเมินการเปื้อนสีโดยใช้เกรย์สเกล หลังการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวตั้ง/แนวนอน

ตัวอย่าง	แนวตั้ง		แนวนอน	
	แห้ง	เปียก	แห้ง	เปียก
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	4-5	4	4-5	4
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 6 (มีสารย้อมติด)	4	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	3-4	4	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	3-4	4	4	4
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	4-5	4	4-5	4
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 6 (มีสารย้อมติด)	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	4-5	4	4-5	4
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	4-5	4	4-5	4

จากตารางที่ 3 การทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียกพบว่าผ้าเคลือบสารย้อมติดและอนุภาคไหมไทยความเข้มข้นร้อยละ 8 และ 10 มีค่าเปื้อนสีแบบแห้งต่ำที่สุด (3-4) กว่าค่าเปื้อนสีแบบเปียก (4) เมื่อเทียบกับผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี่ มีค่าเปื้อนสีแบบแห้ง และแบบเปียกค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งหมด

4.4 ผลการทดสอบหลังการซักล้าง (ISO 105 C06) Test No.C2S

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของสี และการประเมินการเปื้อนสีโดยใช้เกรย์สเกล หลังซักล้าง (20 ครั้ง)

ตัวอย่าง	การเปลี่ยนแปลงของสี	อะซิด	ฟาย	ไนด์น	พอลิเอสเทอร์	อะคริลิก	ขนสัตว์
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 6% (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 6 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ผ้าตกแต่งด้วย อนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	1*	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ * คือ Ground Colour was Washed off Totally.

ตารางที่ 4 การประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่าผ้าเคลือบด้วยอนุภาคไหมไทย และอนุภาคไหมอีรีทุกตัวอย่าง ถูกซักล้างออกหมด ทำให้สีเปลี่ยนแปลงมาก (1) และการประเมินการเปื้อนสีโดยใช้เกรย์สเกล บนผ้าขาวชนิดอื่นๆ หลังจากการซักล้าง จำนวน 20 ครั้ง พบว่ามีการเปื้อนสีน้อยมาก (4-5)

4.5 ผลการทดสอบระยะทางการซึมน้ำ (Wicking Test) (AATCC 197:2011) (หน่วย: มิลลิเมตร) (เวลา 30 นาที)

ตารางที่ 5 ระยะทางการซึมน้ำ (มิลลิเมตร) ของผ้าตัวอย่างตามแนวตั้ง และแนวนอน

ตัวอย่าง	แนวตั้ง (มม.)	แนวนอน (มม.)
ผ้าดิบ	57	58
ผ้าตกแต่งสารย้อมติดอย่างเดียวย	11	15
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	87	79
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	0.3	0.3
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 6 (มีสารย้อมติด)	0.7	0.8
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	0.3	0.2
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมไทย ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	10	0.5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 10 (ไม่มีสารย้อมติด)	83	74
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 4 (มีสารย้อมติด)	0.9	0.5
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 6 (มีสารย้อมติด)	1.3	1.0
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 8 (มีสารย้อมติด)	0.5	0.3
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคไหมอีรี ร้อยละ 10 (มีสารย้อมติด)	10	0.7

ตารางที่ 5 พบว่าผ้าตัวอย่างที่เคลือบด้วยอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทยความเข้มข้นร้อยละ 10 มีระยะทางการซึมน้ำ (มิลลิเมตร) สูงสุด (ด้านแนวตั้ง 87 มิลลิเมตร ด้านแนวนอน 79 มิลลิเมตร) รองลงมาเป็นผ้าตัวอย่างที่เคลือบด้วยอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 มีระยะทางการซึมน้ำ (มิลลิเมตร) (ด้านแนวตั้ง 83 มิลลิเมตร ด้านแนวนอน 74 มิลลิเมตร) ซึ่งตรงกับสมบัติการดูดความชื้นของไหม (ประมาณร้อยละ 11) แต่เมื่อนำสารย้อมติด

มาพบนบนผ้า จะพบว่าระยะทางการซึมน้ำน้อยลง (เหลือเพียงด้านแนวตั้ง 11 มิลลิเมตร ด้านแนวนอน 15 มิลลิเมตร) แสดงว่าสารยืติดทำให้ระยะทางการซึมน้ำ (มิลลิเมตร) ลดลง อย่างไรก็ตามหากใช้ผ้าเคลือบสารยืติดและอนุภาคใหม่ไทย ความเข้มข้นร้อยละ 10 หรือผ้าเคลือบสารยืติดและอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 ทำให้ผ้าที่ผ่านการตกแต่งมีความสามารถในการ ระยะทางการซึมน้ำลดลง เนื่องจากสารยืติดเคลือบบริเวณผิวหน้าผ้า จึงทำให้ความสามารถซึมน้ำลดลงมาก

4.6 การประเมินผลการต้านแบคทีเรียของสิ่งทอ (วิธีเชิงคุณภาพ)

4.6.1 แบคทีเรียแกรมลบ เอสเชอริเชีย โคไล (Escherichia coli)

ตารางที่ 6 การประเมินผลการต้านแบคทีเรียของสิ่งทอ ต่อแบคทีเรียแกรมลบ บนผ้าตัวอย่าง

ตัวอย่าง	เฉลี่ย (มม.)	บริเวณยับยั้งเฉลี่ย (มม.)	ประสิทธิภาพ
ผ้าดิบ	47.1	0.0	ไม่เพียงพอ
ผ้าตกแต่งสารยืติดอย่างเดียว	46.7	0.0	ไม่เพียงพอ
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 10 (ไม่มีสารยืติด)	45.8	45.8	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 4 (มีสารยืติด)	46.1	45.8	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 6 (มีสารยืติด)	45.4	41.6	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 8 (มีสารยืติด)	45.7	45.7	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 10 (มีสารยืติด)	46.4	45.5	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 10 (ไม่มีสารยืติด)	47.7	47.7	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 4 (มีสารยืติด)	46.2	46.0	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 6 (มีสารยืติด)	45.9	45.9	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 8 (มีสารยืติด)	47.0	46.8	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 10 (มีสารยืติด)	45.8	45.4	จำกัด

ตารางที่ 6 พบว่า ผ้าเคลือบอนุภาคใหม่ไทย ความเข้มข้นร้อยละ 10 และผ้าเคลือบอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 มีความสามารถในการต่อต้านแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมลบ เอสเชอริเชีย โคไล ได้ดี เมื่อนำผ้าที่พ่นสารยืติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่ไทยความเข้มข้นร้อยละ 8 และผ้าที่พ่นสารยืติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 6 ให้ผลการต่อต้านแบคทีเรียชนิดนี้ดี

4.6.2 แบคทีเรียแกรมบวก สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส (Staphylococcus aureus)

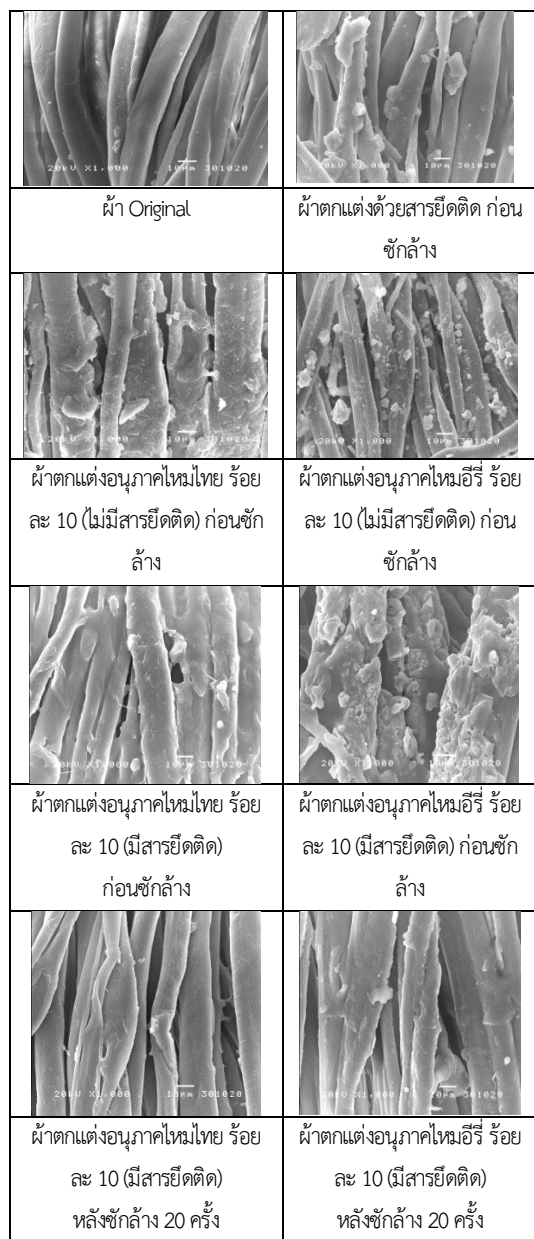
ตารางที่ 7 การต้านแบคทีเรียของสิ่งทอ ต่อแบคทีเรียแกรมบวก บนผ้าตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ผ้าเฉลี่ย (มม.)	บริเวณยับยั้งเฉลี่ย (มม.)	การประเมินประสิทธิภาพ
ผ้าดิบ	47.2	29.2	ไม่เพียงพอ
ผ้าตกแต่งสารยืติดอย่างเดียว	46.7	23.2	ไม่เพียงพอ
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 10 (ไม่มีสารยืติด)	45.9	45.2	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 4 (มีสารยืติด)	46.2	45.6	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 6 (มีสารยืติด)	45.5	45.2	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 8 (มีสารยืติด)	45.7	45.7	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่ไทยร้อยละ 10 (มีสารยืติด)	46.4	46.3	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 10 (ไม่มีสารยืติด)	47.7	47.4	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 4 (มีสารยืติด)	46.1	46.1	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 6 (มีสารยืติด)	46.0	45.4	จำกัด
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 8 (มีสารยืติด)	47.1	47.1	ดี
ผ้าตกแต่งด้วยอนุภาคใหม่อีรีร้อยละ 10 (มีสารยืติด)	45.8	45.8	ดี

ตารางที่ 7 พบว่า ผ้าเคลือบอนุภาคใหม่ไทยความเข้มข้นร้อยละ 10 และผ้าเคลือบอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 มีความสามารถในการต่อต้านแบคทีเรียแบคทีเรียแกรมบวก สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส จำกัด แต่เมื่อนำผ้าที่พ่นสารยืติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่ไทยความ

เข้มข้นร้อยละ 8 และผ้าที่พันสารยึดติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคไหมอีรีความเข้มข้นร้อยละ 4.8 และ 10 ตามลำดับ ให้ผลการต่อต้านแบคทีเรียชนิดนี้

4.7 ผลตรวจสอบขนาดอนุภาค และสัณฐานที่ปรากฏด้วยกล้อง SEM



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของผ้าตัวอย่าง

รูปที่ 3 พบว่าภาพจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นว่า เมื่อเคลือบด้วยสารยึดติด ลักษณะของผ้าจะมีลักษณะเหมือนการเคลือบบนเส้นใย และเมื่อผ้าที่พันสารยึดติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคไหมไทยความเข้มข้นร้อยละ 10 (ก่อนช้

ล้าง) และผ้าที่พันสารยึดติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคไหมอีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 (ก่อนช้กล้าง) พบว่ามีอนุภาคไมโครซิลค์เกาะติดบนเส้นใยจำนวนมาก อย่างไรก็ตามภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของผ้าเคลือบสารยึดติด และอนุภาคไหมไทยความเข้มข้นร้อยละ 10 (หลังช้กล้าง 20 ครั้ง) และผ้าเคลือบสารยึดติด และอนุภาคไหมอีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 (หลังช้กล้าง 20 ครั้ง) พบว่าอนุภาคเล็กๆ ที่เกาะบนผิวหน้าผ้าหายไปเกือบหมด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากตารางที่ 5 การประเมินการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่าผ้าเคลือบสารยึดติด และอนุภาคไหมไทย และผ้าเคลือบสารยึดติด และอนุภาคไหมอีรีทุกตัวอย่าง ถูกช้กล้างออกหมด ทำให้สีเปลี่ยนแปลงมาก (ค่าเท่ากับ 1 จาก 5)

5. บทสรุป

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปว่า

5.1 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ขนาดอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย พบว่ามีขนาดอนุภาคเดี่ยวเล็กที่สุด (กว้าง 2,250 ยาว 2,320 นาโนเมตร) และขนาดของอนุภาคไมโครซิลค์ไหมอีรี อนุภาคเดี่ยวเล็กที่สุด (กว้าง 1,080 ยาว 2,140 นาโนเมตร) จึงจัดว่าเป็น “อนุภาคขนาดไมโครเมตร”

5.2 ทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียก พบว่าผ้าเคลือบสารยึดติดและอนุภาคไหมไทยความเข้มข้นร้อยละ 8 และ 10 มีค่าเปื้อนสีแบบแห้งต่ำที่สุด (ค่าเท่ากับ 3-4 จาก 5) กว่าค่าเปื้อนสีแบบเปียก (ค่าเท่ากับ 4 จาก 5) อาจเป็นเพราะงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการพันเคลือบผ้าแบบสองขั้นตอน (พันสารยึดติดก่อน แล้วจึงพันอนุภาคไมโครซิลค์ไหมไทย) จึงทำให้อนุภาคไหมไทย (ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคไหมอีรี) ไหลออกมานอกผ้า จึงทำให้อนุภาคไหมไทยหลุดออกได้ง่ายกว่า เนื่องจากผ้าเคลือบสารยึดติด และอนุภาคไหมไทยมีสีเหลืองเข้ม ทำให้ค่าการเปื้อนสีโดยใช้เกรย์สเกล หลังการทดลองการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวตั้ง/แนวนอน จึงมีค่าประเมินที่ต่ำกว่า ผ้าเคลือบสารยึดติด และผงไหมอีรี ซึ่งมีสีขาวนวล (สีจางกว่า)

5.3 การประเมินการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่าผ้าเคลือบด้วยอนุภาคไหมไทย และอนุภาคไหมอีรีทุกตัวอย่าง ถูกช้กล้างออกหมด (หลังช้กล้าง 20 ครั้ง) พบว่ามีการเปื้อนสีน้อยมาก (4-5) อาจเป็นเพราะสารยึดติดไม่สามารถยึดอนุภาคไมโครซิลค์ทั้งสองชนิด (หลังช้กล้าง 20 ครั้ง) ในการ

วิจัยครั้งต่อไปควรเลือกสารย้อมติดใหม่ที่ย้อมติดได้ดีกว่าสารย้อมติดตัวเดิมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.4 จากผลการทดลองพบว่าผ้าตัวอย่างที่เคลือบด้วยอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่ไทยความเข้มข้นร้อยละ 10 มีระยะทางการซึมน้ำสูงสุด รองลงมาเป็นผ้าตัวอย่างที่เคลือบด้วยอนุภาคไมโครซิลค์ใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 10 ซึ่งตรงกับสมบัติของไหมสามารถดูดความชื้นได้ดี แต่เมื่อนำสารย้อมติดมาพ่นบนผ้า จะพบว่าระยะทางการซึมน้ำน้อยมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารย้อมติดเข้าไปปิดช่องว่างระหว่างเส้นด้ายยืน และเส้นด้ายพุ่งบนผืนผ้า หรือเคลือบเส้นใยจนทำให้เส้นใยไม่สามารถส่งผ่านน้ำได้

5.5 ผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่ไทยความเข้มข้นร้อยละ 8 มีความสามารถในการต่อต้านแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมลบ เอสเชอริเชีย โคไล และแบคทีเรียแกรมบวก สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ได้ดี และผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่อีรี ความเข้มข้นร้อยละ 6 มีความสามารถในการต่อต้านแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมลบ เอสเชอริเชีย โคไล และผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 4 8 และ 10 ตามลำดับ มีความสามารถในการต่อต้านแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมบวก สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ได้ดี

5.6 สารย้อมติดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่คงทนต่อการซักล้าง หลังซักล้าง 20 ครั้ง สอดคล้องกับการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีหลังการซักล้าง พบว่าสีเปลี่ยนแปลงมาก (ค่าเท่ากับ 1 จาก 5) สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้อง SEM พบว่าผ้ามีอนุภาคหลงเหลืออยู่น้อยมาก (หลังซักล้าง 20 ครั้ง) เมื่อเทียบกับผ้าก่อนซักล้าง

สำหรับผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่ไทยความเข้มข้นร้อยละ 8 สามารถต่อต้านแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้ดี ส่วนผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 6 สามารถต่อต้านแบคทีเรียแกรมลบ และสำหรับผ้าที่พ่นสารย้อมติดแล้วเคลือบด้วยอนุภาคใหม่อีรีความเข้มข้นร้อยละ 8 สามารถต่อต้านแบคทีเรียแกรมบวกได้ดี จึงควรเลือกสูตรดังกล่าวมาตกแต่งบนผ้าฝ้าย หรือผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ต้องการสมบัติการต่อต้านแบคทีเรีย เช่น ผ้าชุดเครื่องนอน ผ้าบุเฟอร์นิเจอร์ ผ้าปูโต๊ะ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนวิจัยโดยสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประจำปีงบประมาณ 2550 (สำหรับทุนวิจัยขั้นต้นการศึกษากระบวนการผลิตอนุภาคนาโนเซรีซินและไฟโบรอิน) และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ครุภัณฑ์ต่างๆ ที่นำมาศึกษาค้นคว้าวิจัยต่อยอดสู่กระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ตั้งแต่ปี 2551 จนถึงปัจจุบัน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] The support arts and crafts international centre of Thailand. [Internet].[cited 2020 Jan 25]: [13].Availability From:https://www.sacict.or.th/uploads/items/attachments/956936879f66f5cf4ffbf3aeffd56ca/_d9c828d53e9a176bb883c0ee1d35378a.pdf
- [2] Photchanaprasert N. Guidelines to promote the industrial potential of Eri farmers: Final research report. Bangkok (Thailand): Thailand Research Fund, Bangkok (Thailand); 2018:190-204.
- [3] Sonthisombat A, Speakman P. Silk: Queen of Fibres-The Concise Story. Journal of Engineering, RMUTT. 2003;2(4):84-97.
- [4] Sonthisombat, A. 1993, M.Sc.Dissertation, The University of Leeds, UK.
- [5] Sonthisombat, A. 1997, Ph.D.Thesis, The University of Leeds, UK.
- [6] Sonthisombat A, Sungnoo, S, Sakulkhemruthai S, Asawasupharuk P, Phromhitathorn C. A Production of sericin and fibroin nanoparticles for finishing on sportswear. funded by the Thailand Textile Institute. Rajamangala University of Technology, Thanyaburi, Pathum Thani. 2007:1-278.
- [7] Khum Si Wai P, Trakulphua Y. 6th National Hatyai Academic Conference Hat Yai University. 2015:1524-34.

- [8] Robson R.M., Lewin M, Pearce E.M., Marcel Dekker Inc. Silk Compositio, Structure and Properties in Handbook of Fiber Science and Technology. New York. 1985:647-700.
- [9] Sonthisombat A. Silk (Fibroin and Sericin) powder production process for applications in textile, medical and cosmetic, Thailand Petty Patent No. 9418. Jan. 6, 2015
- [10] Nuengchomphu N, Sungnoo S, Sonthisombat A. A Finishing Process of a Mixture of Polyurethane Binder and Micro/Nano Silk Particles Coated on Plain 100% Cotton Woven Fabrics Using One and Two Steps Spraying Method. Journal of Engineering, RMUTT. 2019;15(2):7-18.
- [11] Sonthisombat A. Textile Chemical Processing, Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology, Pathumtani, 2002: 1-327.
- [12] Pontuk S, Thongban N, Chaipreecha J. A finishing chitosan extracted from shrimp farmers prizes by coating polyester 100% with anti-bacterial properties. The bachelor's degree of Engineering Project Department of Textile Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2015;1(1):14-23
- [13] Spray Gun. [Internet]. [Cited 2020 Feb 19]. Available From:[http:// anestiwata.com/wp-content/uploads/2011/12/manual-catalog.pdf](http://anestiwata.com/wp-content/uploads/2011/12/manual-catalog.pdf)
- [14] Painting technique [Internet]. [Cited 2020 Mar 13]. Available From: <https://goo.gl/uSWrfv>
- [15] SemAfore 5.2 [Internet]. [Cited 2020 Mar 29]. Available From:<http://semafore.software.informer.com/5.2/>

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกษ ลิริสุวัฒน์^{1*}, สุนนมาลย์ 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

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 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

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

³ Department 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. บทย่อคัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ 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
บทย่อคัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อหัวข้อ, หัวข้อย่อย	14	ชิดซ้าย	ตัวหนา
เนื้อความ	14	กระจายแบบไทย	ปกติ
สมการต่างๆ	14	กึ่งกลาง	ตัวเอียง
คำบรรยายประกอบรูปและตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและ
ขวาวางสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ
หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

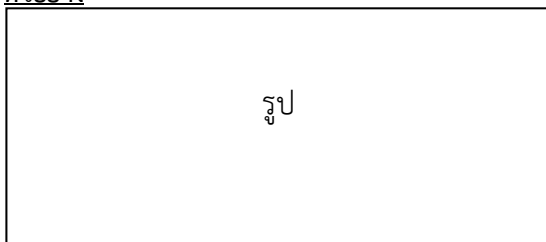
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้
ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษา
รายละเอียดในภาพ อาจยอมมิให้ความกว้างได้เต็ม
หน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่
สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยาย
ใต้ภาพ

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

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่าย
ควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้
รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น 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

$$a + b = c \quad (1)$$

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 กรณียบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณา
คำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์
ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี
www.engineer.mutt.ac.th/journal/



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิก
วารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

- Word
- PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ
ทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราช
ชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล enjournal@en.mutt.ac.th หรือ
จัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชชมงคลธัญบุรี 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)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา 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] Halpem 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

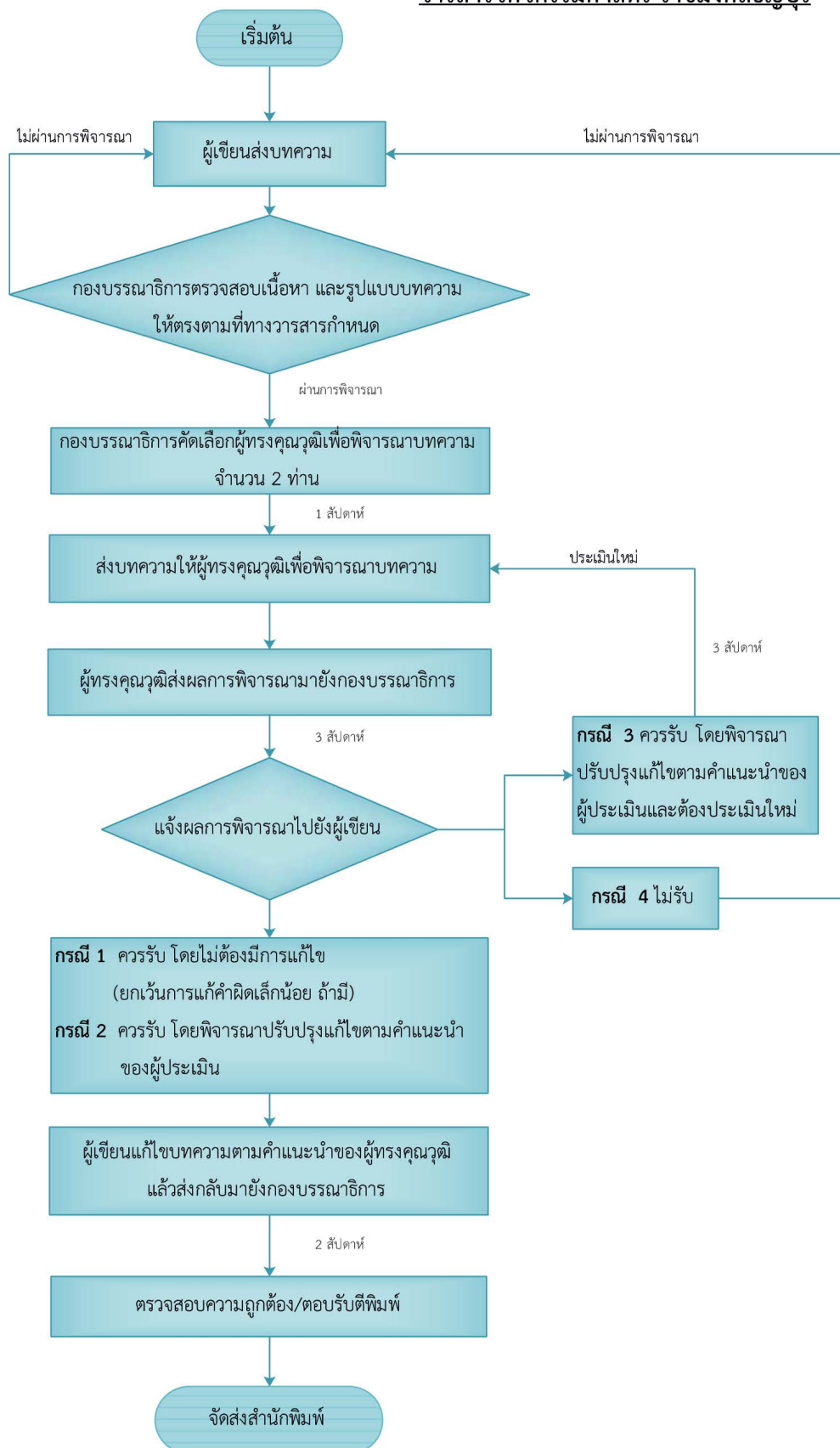
ตัวอย่าง(Example)

- [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>

**ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี**



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

หมายเหตุ : รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขตอำเภอ 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)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก 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 กรุณาส่งสำเนารับัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

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 ราชมนักลัญบุรี

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 เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 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

(.....)

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

วิสัยทัศน์

“องค์กรผลิตวิศวกรเชิงปฏิบัติการ ในระดับมาตรฐานสากล”

พันธกิจ

1. จัดการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่มีคุณภาพ
2. สร้างงานวิจัย สิ่งประดิษฐ์ และนวัตกรรม ส่งเสริมการผลิตเชิงพาณิชย์ และการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ
3. ให้บริการงานวิชาการและบูรณาการองค์ความรู้จากผลงานวิชาการสู่สังคม อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรมและรักษาสิ่งแวดล้อม
5. จัดระบบบริหารจัดการให้มีประสิทธิภาพด้วยหลักธรรมาภิบาล



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12100

โทร. 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493

www.engineer.rmutt.ac.th/journal