

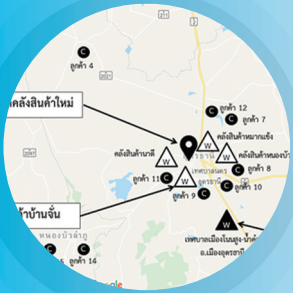
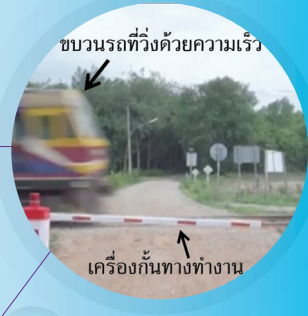
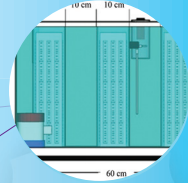


วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2563



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เป็นสาขาที่ศึกษาแนวความคิด ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่ระดับอนุภาค ระดับโมเลกุลไปจนถึงทั้งจักรวาล ปฏิกริยาทางเคมี ระหว่างอะตอมและโมเลกุล อันเชื่อมโยงถึงองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต และวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต รวมถึงแนวความคิดพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีความสำคัญและมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ตลอดจนศึกษาถึงประเด็นของการลงเลี้ยงที่สำคัญๆ เกี่ยวกับพรมแดนแห่งความรู้ ระหว่างวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับสังคม และสิ่งแวดล้อม

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป

ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป

เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวัรรต ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณอำรง	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมณะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมน์รัฐ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลมภ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกัตถุญ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชานีประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เกษงา	ธารีนุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
รองศาสตราจารย์ กาญจนา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสุดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ชาคริต
ดร.เยาวพา
ดร.สุกัญญา
ดร.เดือนเพ็ญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์

นางสาวอรุณรักษ์

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

แพ่งคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
ชัยจันทร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
สิงห์ทะนุศย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
เคชะปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา
คุณย์จินดาชบาพร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ไชยะ 94/7 หมู่บ้านนาแลนด์ ซอย 5 ถนนสุวินทวงศ์
อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อัครวิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ตันสุวรรณรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สาริบุตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
วสุเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมณา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธำรงวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมณา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สุทธาวาส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อุ๋นเรือน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
บรรเทา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นวลฉิมพลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำทล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

วงศ์ไตรรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

ตีราชมัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมทในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	1
<i>มานพ ยิ่งรัมย์</i>	
การเพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	18
<i>ปณยสิริ บุญแข็ง, ชวโรจน์ ใจสิน และกฤษดา ยิ่งขยัน</i>	
วิธีการกำหนดขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดโดยคำนึงถึงความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า	39
<i>กิตติคุปต์ คุณโท และคุณุย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์</i>	
การคัดเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสมของคลังสินค้าด้วยการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับคลังสินค้าควบคุมพิเศษ	56
<i>เอกวิทย์ พิมพ์ปัจฉิม, นราธิป สุพัฒน์ธนานนท์ และรศกัญญา อัครรุ่งเรืองกุล</i>	
สายอากาศกะทัดรัดที่ครอบคลุมสามย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย	72
<i>สุธาสนี ละมุลศรี, สุภาดา ศรีสุโคตร, ไกรสุรย์ สุขเพ็ญพะเนา และเชษฐา กุละวงศ์</i>	
ตัวตรวจจับรฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิถีโอสสำหรับเครื่องกันทางอัตโนมัติ	86
<i>ชูไฮต์ สนิ, ธิรพงษ์ นิมเพชร, นราธร สังข์ประเสริฐ และจรรยา เจริญเนตรกุล</i>	
ผลของสารสกัดด้วยน้ำต่อปริมาณสารฟุกุซเคมีและกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายสีแดง (<i>Caloglossa beccarii</i> De Toni)	100
<i>วัลภา เหลือแหล่, เพ็ญศรี เพ็ญประไพ และวรรณิณี จันทร์แก้ว</i>	
การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำและชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลต่อคุณภาพของสังขยาดำ	113
<i>กฤติน ชุมแก้ว, ไชยสิทธิ์ พันธุ์พูนจินดา และอรุณวรรณ อรรถธรรม</i>	
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและการยับยั้งเอนไซม์แองจิโอเทนซินของปลาสมันในระหว่างการหมัก	127
<i>ชมกฤษ ม่วงลา, สุมาลี มุลิกา, อารยา รานอก, ชนิตา กุประคิษฐ์, และเสกสรร มังคลานันท์</i>	
การประยุกต์ใช้แป้งเมล็ดขนุนเพื่อทดแทนสารกันสีในการเขียนผ้าบาติก	145
<i>โสภภาพรรณ ขอทะขันธ์, สาคร ชลสาคร และรัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์</i>	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์แปรรูปขนมปังเพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งออกสารรายงานตัว และการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	159
<i>ปญญรัตน์ รังสูงเนิน และสิริกานต์ ไชยสิทธิ์</i>	
ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยต่อผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเปลือกข้าวโพด	172
<i>วัลภา แด่มทอง, สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ และชจีจรัส ภิมรัมย์ธรรมศิริ</i>	

Table of Contents

Research Articles

Remote Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation	1
<i>Manop Yingram</i>	
<i>Chlorella</i> sp. Cultivation Using Carbon Dioxide Concentration Control System	18
<i>Poonyasiri Boonpeng, Chawaroj Jaisin and Krisda Yingkayun</i>	
A Method for Sizing and Siting of an Energy Storage System in Microgrid Concerning Generation Adequacy	39
<i>Kittikhup Khuntho and Dulpichet Rerkpreedapong</i>	
Warehouse Location Selection Using Analytic Hierarchy Process for Special Controlled Warehouse	56
<i>Aekkawit Pimpatchim, Naratip Supattananon, and Raknoi Akararungrunngkul</i>	
A Compact Tri-Band Antenna for Wireless Communications	72
<i>Suthasinee Lamultree, Supada Srisukhot, Kraison Sukphengphanao, and Chaetsada Kulawong</i>	
Trains Detection Using Video Processing Method for Automation Railroad Crossing	86
<i>Suhaidee Sani, Teerapong Chimphet, Naratorn Sangprasert, and Charoon Charoennatkul</i>	
Effect of Water Extraction on Phytochemicals and Antioxidant Activities of Red Algae (<i>Caloglossa beccarii</i> De Toni)	100
<i>Wanlapa Luealae, Pensri Penprapai, and Wanninee Chankaew</i>	
The Study of the Appropriate Proportion of Black Sesame and Types of Sweetener for the Quality of Black Sesame Egg Custard Sauce	113
<i>Krittin Chumkaew, Chaiyasit Punfujinda, and Aroonwan Atthatham</i>	
Changes in Antioxidant Activity and Angiotensin I-Converting Enzyme Inhibition of <i>Plaa-som</i> During Fermentation	127
<i>Chompoonuch Khongla, Sumalee Musika, Araya Ranok, Chanida Kupradit, and Seksan Mangkalan</i>	
Application of Jackfruit Seed Flour for Substitution of Color - Resist Substance in Batik Painting	145
<i>Sophaphan Sorhasan, Sakorn Chonsakorn, and Rattanaphol Mongkholrattanasit</i>	
The Development of Interactive Multimedia for Learning how to Send Documents and Registration as a Student of Rajamangala University of Technology Isan	159
<i>Punyarat Rungsoongnern and Sirikan Chaiyasit</i>	
The Effects of Corn Varieties, Layers of Corn Husks, and Fiber Extraction Methods on Yields and Physical Properties of Corn Husk Fibers	172
<i>Walapa Tamthong, Suteeluk Kraisuwan, and Kajjarus Piromthamsiri</i>	

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมทในการต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อนหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

Remote Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation

มานพ ยิงรัมย์^{1*}

Manop Yingram^{1*}

Received: June 20, 2019; Revised: December 2, 2019; Accepted: December 12, 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอรายละเอียดของเทคนิคการตรวจจับแบบรีโมท และนำเสนอเทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อเพื่อเป็นตัวแทนเทคนิคแบบรีโมท จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างทันทีทันใดและการรับส่งสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุมกลุ่มขนาดใหญ่ของกริดได้ สำหรับการใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็ก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำมีความเหมาะสม โดยสามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายใน 0.08 วินาที

คำสำคัญ : การตรวจจับการแยกตัวอิสระ; หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว; เชื่อมต่อกริด

¹ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

¹ Establishment Project of the Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: manopyin@hotmail.com

Abstract

The research paper presents the details of remote techniques. Specifically, the paper presents a signal produced by disconnect technique to present the remote techniques. The simulation results show that the proposed technique could achieve a sudden anti-islanding condition and it is possible to use only one transmitter to cover a big part of the grid. The research results show that an over/under-voltage and under voltage shift islanding detection technique is suitable to use with a small distributed generation, in which the anti-islanding condition within 0.08 s is achieved.

Keywords: Islanding Detection; Distributed Generation; Grid-Connected

บทนำ

ไฟฟ้าเป็นพลังที่สำคัญ การผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตได้จากหลากหลายวัตถุดิบนอกจากการผลิตด้วยพลังงานจากฟอสซิล โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานทดแทน อาทิ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลม เพราะเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ลดปัญหาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าอันเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน ซึ่งไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานเหล่านี้ส่วนมากเป็นรูปแบบของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation; DG) ที่ได้รับความนิยมในการดำเนินการติดตั้งเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้นเรื่อย ๆ [1] แต่การต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวก็สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้ากำลังเช่นกัน หนึ่งในปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นคือ สภาวะการแยกตัวอิสระ (Islanding Condition) ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าอยู่

การแก้ปัญหานี้ต้องทำการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระเพื่อทำการต่อต้านสภาวะนี้ไม่ให้เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งเทคนิคเพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้หลัก ๆ คือ 1) เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท เทคนิคแบบรีโมทนี้ใช้วิธีการในการตรวจจับผ่านระบบสื่อสาร ซึ่งเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูงมากและไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ แต่จุดด้อยคือมีราคาแพงมากจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (หน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 kW) [2] 2) เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กเพราะราคาไม่แพง โดยที่เทคนิคแบบโลคอลยังสามารถแบ่งได้เป็นเทคนิคแบบพาสซีฟ เทคนิคนี้จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังสภาวะการแยกตัวอิสระได้เกิดขึ้น อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์มอนิก อื่น ๆ ข้อดีคือ ไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปรบกวนระบบแต่ข้อเสียคือ มีพื้นที่ไร้การตรวจจับกว้าง [3] - [6] เทคนิคแบบแอคทีฟ เทคนิคนี้จะฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่ โดยเทคนิคกลุ่มนี้มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือ มีสัญญาณเข้าไปรบกวน

คุณภาพไฟฟ้าของระบบ [7] - [8] และเทคนิคแบบไฮบริด เป็นการนำคุณลักษณะของทั้งแบบพาสซีฟ และแบบแอกทีฟมารวมกัน [9] - [10]

ปัจจุบันหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีขนาดใหญ่คือ ขนาดมากกว่า 10 kW ยังคงได้รับความนิยมในการต่อเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น โซลาร์ฟาร์ม รวมทั้งขนาดที่น้อยกว่า 10 kW ด้วย เช่น โซลาร์รูฟท็อป ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระ มีโอกาสที่จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้กลุ่มเทคนิคแบบรีโมทมีความน่าสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น บทความวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าเทคนิคแบบรีโมทมีความเหมาะสมกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดใหญ่ โดยเลือกเทคนิคการสื่อสารพาทะผ่านสายไฟในการนำเสนอเพราะเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและมีแนวโน้มที่จะใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดใหญ่ รวมทั้งเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นว่าเทคนิคแบบโลคอลมีความเหมาะสมในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กโดยเลือกเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำเพราะเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและมีแนวโน้มที่จะใช้งานกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็ก รายละเอียดที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท



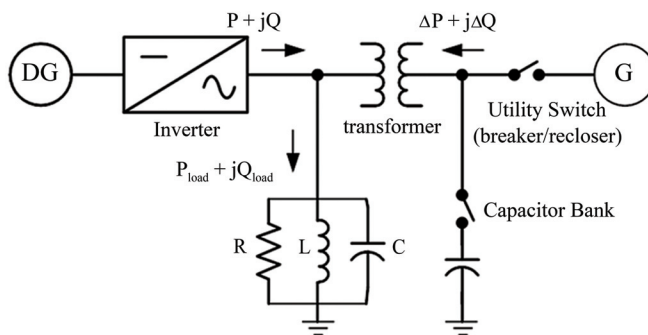
รูปที่ 1 สรุปเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระ

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Detection Techniques) เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ และต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระไม่ให้เกิดขึ้นนั้นมีอยู่หลากหลายเทคนิคซึ่งแต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียต่าง ๆ กันไป โดยสามารถที่จะแบ่งเทคนิคในการตรวจจับการแยกตัวอิสระได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล (Local Islanding Detection Techniques) และเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟ

แบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท (Remote Islanding Detection Techniques) โดยเทคนิคแบบโลคอลนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบพาสซีฟ (Passive Islanding Detection Techniques) เทคนิคนี้จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์มอนิก อื่น ๆ ข้อดีคือ เทคนิคนี้จะไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปรบกวนระบบแต่ข้อเสียคือ มีพื้นที่รับการตรวจจับกว้าง เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแอคทีฟ (Active Islanding Detection Techniques) เทคนิคนี้จะฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่โดยเทคนิคนี้มีพื้นที่รับการตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือ มีสัญญาณเข้าไปรบกวนคุณภาพไฟฟ้าของระบบ และเทคนิคสุดท้ายคือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบไฮบริด (Hybrid Islanding Detection Techniques) เป็นการนำคุณลักษณะของทั้งแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟมารวมกัน โดยเทคนิคทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1 ในส่วนนี้จะให้รายละเอียดของเทคนิคในกลุ่มเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบรีโมท โดยเนื้อหาในกลุ่มเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบโลคอลและรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้นำเสนอไว้แล้ว [4] - [6], [8]

1. เทคนิคการสอดแทรกอิมพีแดนซ์ (Impedance Insertion Technique)

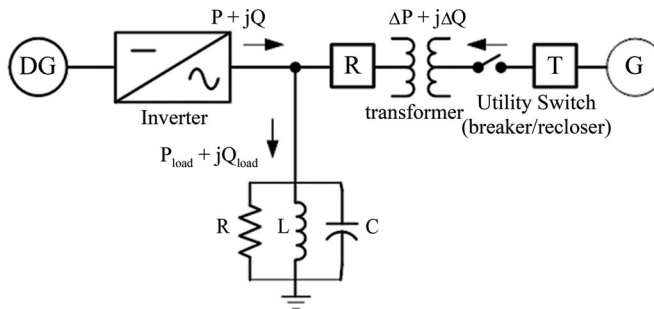
วิธีการนี้เป็นการต่อโหลดอิมพีแดนซ์ขนาดต่ำ (โดยทั่วไปใช้คาปาซิเตอร์เบงค์) เข้ากับจุด PCC ในจังหวะที่เบรกเกอร์ของการไฟฟ้าเปิดออก ผลที่เกิดขึ้นคือ ความสมดุลระหว่างการกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดจะถูกปรับเปลี่ยนไป การรบกวนนี้ทำให้เฟสเปลี่ยนแปลง และเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีของความถี่รีโซแนนซ์ซึ่งสามารถตรวจได้จากความถี่เกินหรือความถี่ต่ำ การต่ออิมพีแดนซ์เข้ามาต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อความเหมาะสมในการตรวจจับความเบี่ยงเบนของความถี่ที่เกิดขึ้น [11] - [13] ลักษณะของวิธีการแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของวิธีการสอดแทรกอิมพีแดนซ์

วิธีการนี้ใช้เวลาตอบสนองต่ำ อย่างไรก็ตามมีราคาแพงในการนำไปใช้และเวลาที่ใส่อิมพีแดนซ์เข้าไปหลังกริดหลุดไปไม่พบว่ามีความมาตรฐานที่แน่ชัด ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้วิธีการนี้ อิมพีแดนซ์ที่ใส่เข้าไปควรมีค่าต่ำสุดเท่าที่เพียงพอต่อการหาค่าความเบี่ยงเบนของความถี่ที่จะเกิดขึ้น ภายหลังจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังขาดการเชื่อมต่อกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2. เทคนิคการสื่อสารพหุผ่านสายไฟฟ้า (Power Line Carrier Communications Technique; PLCC Technique)



รูปที่ 3 ลักษณะของวิธีการการสื่อสารพหุผ่านสายไฟฟ้า

เทคนิคนี้จะอาศัยสายไฟฟ้าเป็นช่องทางในการสื่อสาร แนวคิดพื้นฐานก็คือการส่งสัญญาณพลังงานต่ำอย่างต่อเนื่องระหว่างตัวส่งสัญญาณ (Transmitter; T) ที่อยู่ในฝั่งของกริดกับตัวรับสัญญาณ (Receiver; R) ที่อยู่ในฝั่งของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อการสื่อสารนี้หยุดลง ตัวรับสัญญาณจะตรวจจับได้ว่าสัญญาณได้หยุดลงและจะส่งสัญญาณไปที่อินเวอร์เตอร์หรือสวิตช์เพื่อให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหนด ลักษณะการทำงานของวิธีการนี้แสดงดังในรูปที่ 3 ข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้ได้กับพื้นที่ที่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมาก ไม่มีพื้นที่ไรกริดตรวจจับ ไม่ลดทอนคุณภาพไฟฟ้า โดยการตอบสนองขึ้นอยู่กับสัญญาณที่จะส่งและเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวส่งเพียงหนึ่งตัวเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่หนึ่งของกริด ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของตัวรับและตัวส่งสัญญาณซึ่งอาจจะสูงมาก รวมทั้งอาจมีการส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ของเทคนิค PLCC ทำให้ไม่สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ [12], [14] - [16]

3. เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ (Signal Produced by Disconnect Technique; SPD Technique)

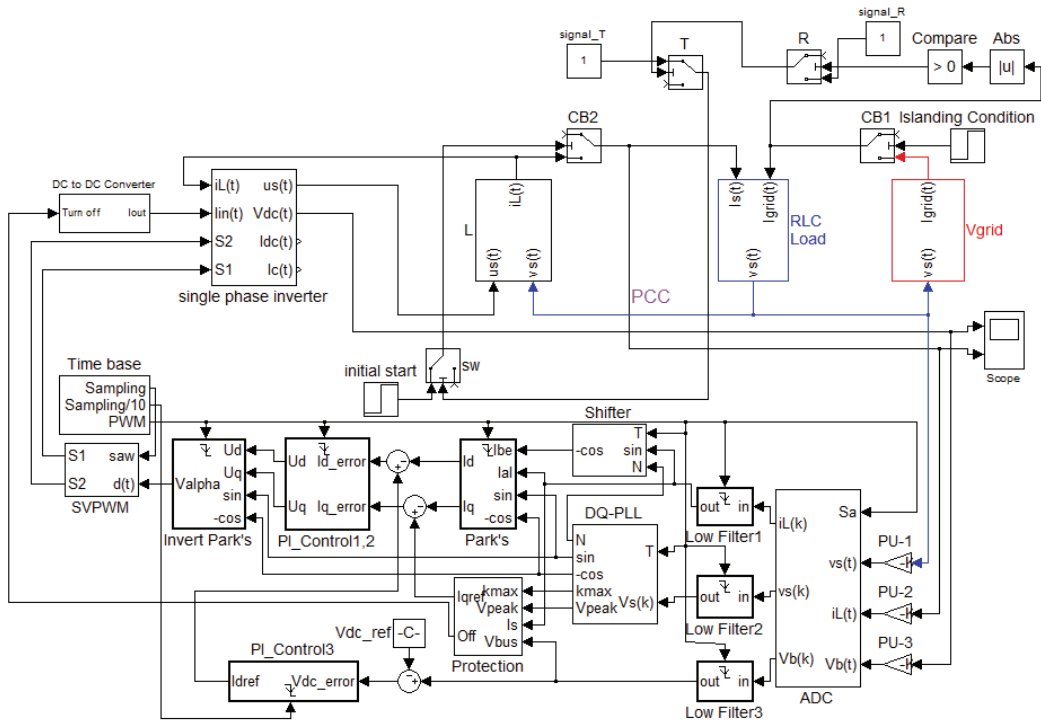
เทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับเทคนิค PLCC เทคนิค SPD นี้จะใช้การสื่อสารระหว่างโครงข่ายกับอินเวอร์เตอร์ โดยที่วิธีการ SPD จะแตกต่างกับวิธีการ PLCC ตรงที่ชนิดของสัญญาณที่ส่งผ่าน โดยอาจเป็นการเชื่อมโยงผ่าน ไมโครเวฟ ทรานส์มิท หรืออื่น ๆ โดยที่วิธีการนี้มีข้อดีในการกำกับดูแลเพิ่มเติมและการควบคุมได้ทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับกริด แต่วิธีการนี้มีข้อเสียอย่างมากในเรื่องค่าใช้จ่ายที่จะสูงมาก และค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น [12], [14]

4. เทคนิคการควบคุมกำกับดูแลและเก็บข้อมูล (Supervisory Control and Data Acquisition Technique; SCADA Technique)

การรวมกันของอินเวอร์เตอร์ระบบ SCADA เป็นทางเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลสำหรับการป้องกันการแยกตัวอิสระ โดยระบบ SCADA จะใช้เครือข่ายการสื่อสารที่กว้าง ร่วมกับเซนเซอร์เพื่อควบคุมและตรวจสอบอุปกรณ์เชื่อมต่อกับกริด ช่วยให้สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้นในกริดได้อย่างรวดเร็ว ลดการตรวจจับการแยกตัวอิสระเมื่อกริดไม่ได้เชื่อมต่อกับโหนดแล้ว และขุดสัญญาณเตือน

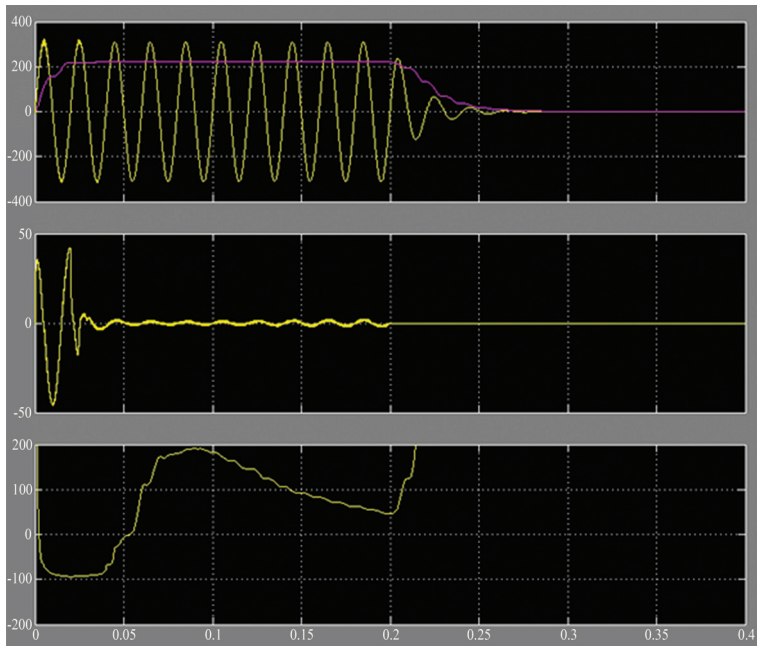
จะเปิดใช้งานเมื่อตัดการเชื่อมต่อกับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแล้ว วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับการแยกตัวอิสระ และไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียคือมีราคาแพงเกินไป ต้องมีเซนเซอร์จำนวนมาก และต้องการคุณสมบัติเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังไม่สามารถทำได้กับการติดตั้งขนาดเล็ก [12], [14], [17]

เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ

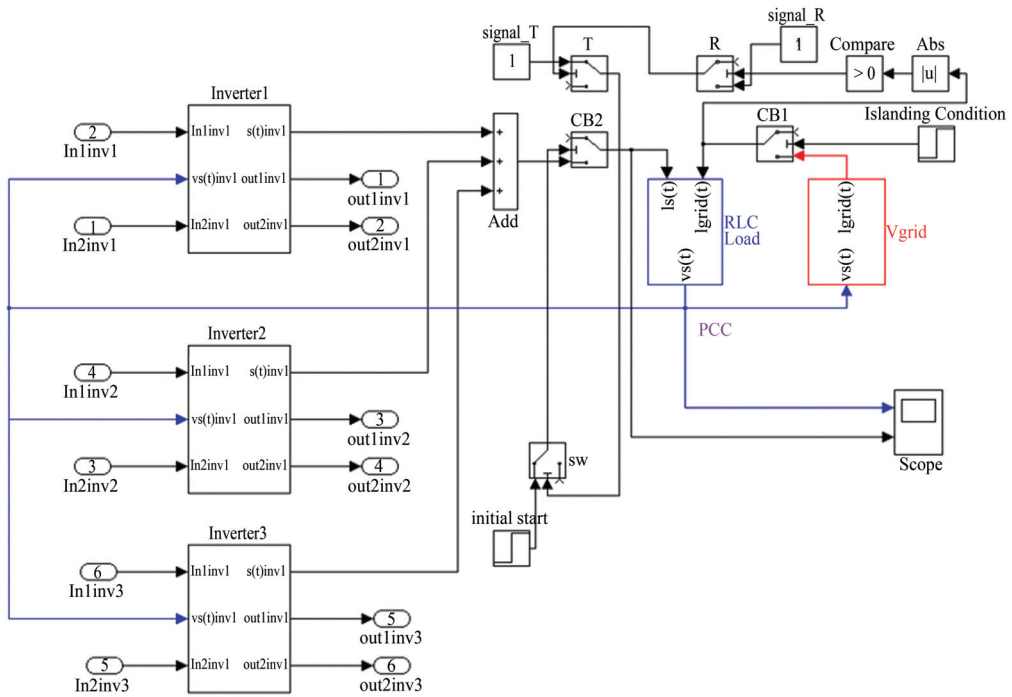


รูปที่ 4 วิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ

เทคนิคนี้เป็นการเชื่อมโยงผ่านไมโครเวฟ โทรศัพท์ หรืออื่น ๆ โดยที่วิธีการนี้มีข้อดีในการกำกับดูแลเพิ่มเติมและการควบคุมได้ทั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับกริดช่องทางในการสื่อสาร แนวคิดพื้นฐานก็คือการส่งสัญญาณ ตัวส่งสัญญาณที่อยู่ในฝั่งของกริดกับตัวรับสัญญาณที่อยู่ในฝั่งของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อการสื่อสารนี้หยุดลง ตัวรับสัญญาณจะตรวจจับได้ว่าสัญญาณได้หยุดลงและจะส่งสัญญาณไปที่อินเวอร์เตอร์หรือสวิตช์เพื่อให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายหยุดการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหลด ลักษณะการทำงานของเทคนิคนี้คล้ายคลึงกับเทคนิคการสื่อสารพหุผ่านสายไฟฟ้าในรูปที่ 3 และแนวคิดของเทคนิคนี้สามารถสร้างแบบจำลองดังในรูปที่ 4

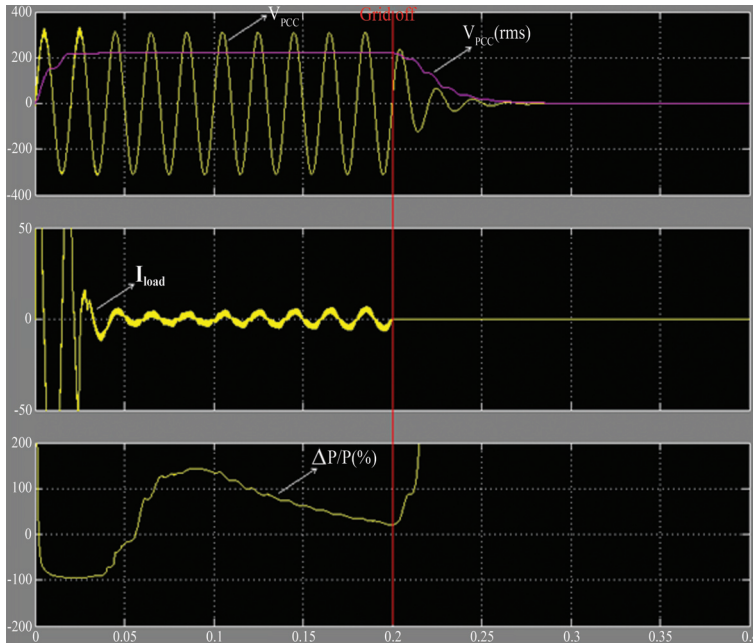


รูปที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของวิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ



รูปที่ 6 วิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5 จะไม่ขึ้นกับสภาพของโหลดหรือปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นจึงสามารถแทนทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากรูปจะเห็นได้ว่าทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันที ในที่นี้ถือว่าสัญญาณที่ส่งไปเป็นสัญญาณโทรศัพท์ ทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที จุดด้อยของวิธีการนี้คือ หากเกิดเหตุการณ์ที่ระบบสัญญาณโทรศัพท์ไม่สามารถใช้งานได้ในจังหวัดนั้น จะไม่สามารถตรวจจับได้นับเป็นข้อเสียที่สำคัญของวิธีการนี้ ส่วนในเรื่องค่าใช้จ่ายการออกแบบระบบสามารถใช้ร่วมกับอินเวอร์เตอร์หลายตัวได้ดังแสดงให้เห็นในการใช้งานแบบเป็นกลุ่มอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6 และผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 สามารถแสดงทุกเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถตัดหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเช่นกัน ดังนั้นหากมีการออกแบบระบบที่ดี วิธีการนี้ไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ และรวดเร็วในการตรวจจับ รวมทั้งหากใช้งานกับกลุ่มอินเวอร์เตอร์จำนวนมากวิธีการนี้จะมีราคาไม่แพง แต่มีข้อเสียคือ หากสัญญาณที่รับและส่งไม่สามารถใช้งานได้

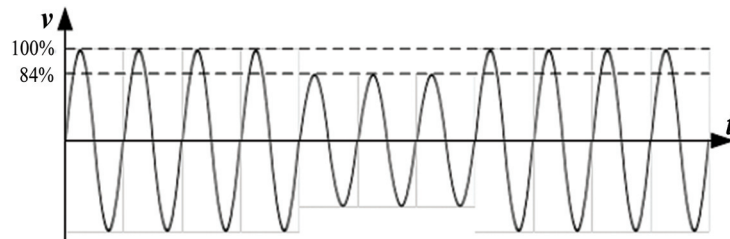


รูปที่ 7 ผลการจำลองการทำงานของวิธีการสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

ขั้นตอนเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ [9] - [10] เริ่มจากวัดแรงดันทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแล้วใช้การตรวจจับแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ โดยใช้

มาตรฐานสากล IEC 62116 แรงดันเกินคือมากกว่า 115 % และแรงดันต่ำน้อยกว่า 85 % ในการตรวจสอบ ซึ่งเป็นลักษณะของเทคนิคในกลุ่มแบบพาสซีฟ ถ้ายังไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ DG จะยังไม่หยุดทำงาน ก็จะทำการตรวจสอบอีกครั้งว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระหรือไม่โดยเปลี่ยนแรงดันต่ำ 84 % 3 รูปคลื่น ลักษณะดังรูปที่ 8 เข้าสู่ระบบเพื่อทำการตรวจสอบอีกครั้งหากแรงดันยังคงไม่น้อยกว่าเกณฑ์แสดงว่า สภาวะแยกตัวอิสระไม่ได้เกิดขึ้น



รูปที่ 8 ลักษณะของรูปคลื่นที่ฉีดเข้าสู่ระบบ

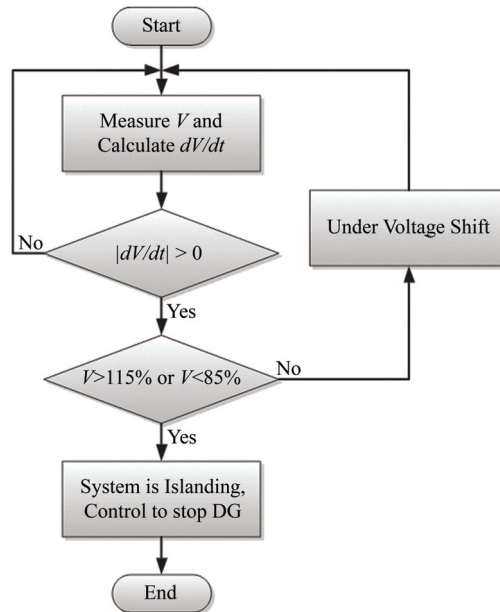
ดังนั้นสามารถวาดผังงาน (Flowchart) รวมทั้งให้รายละเอียดต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระโดยใช้เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 9 และสามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

เริ่มจากระบบจะทำการวัดแรงดัน ณ จุด PCC (V_{PCC}) ในทุก ๆ คาบเวลา และทำการคำนวณ dV/dt ของ V_{PCC}

ต่อมาเปรียบเทียบ $|dV/dt| > 0$ หรือไม่ หากมากกว่าจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป แต่หากไม่มากกว่า จะเป็นการกลับไปเริ่มต้นใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก (ในทางปฏิบัติเนื่องจากระดับของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่เสมอ ดังนั้นการกำหนดการเปรียบเทียบค่าอาจไม่ใช่ศูนย์ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่าศูนย์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความถี่แทนที่แรงดันในการเปรียบเทียบ)

ขั้นตอนต่อมาจะทำการเปรียบเทียบ $V > 115\%$ (ถ้ากำหนดแรงดันก่อนการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระให้คงที่เท่ากับ 220 V จะได้ $220 \times 115\% = 253$ V) หรือ $V < 85\%$ ($220 \times 85\% = 187$ V) หรือไม่ ถ้ามากกว่าหรือน้อยกว่าตามเงื่อนไข จะกระทำในขั้นตอนต่อไปคือ ระบบควบคุมจะทำการปลด DG ออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ถ้าไม่เป็นจริงจะเริ่มชบวนการต่อไป

โดยระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดัน $V = 84\%$ หรือ $V = 184.8$ V (แรงดัน $V = 84\%$ เมื่อแรงดันปกติเท่ากับ 220 V ดังนั้นจะได้ $V = 0.84 \times 220 = 184.8$ V) เข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง บทความวิจัยนี้กำหนดการฉีดแรงดัน 184.8 V 3 รูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 9 ขั้นตอนของเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

จากนั้นระบบจะเริ่มกลับเข้าสู่ขบวนการตั้งแต่นั้น นั่นคือวัดแรงดัน V_{PCC} ซึ่งผลจากการฉีดแรงดัน 184.8 V 3 รูปคลื่น เข้าไปจะทำให้ $V_{PCC} < 187$ V ถ้าสถานะที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสถานะการแยกตัวอิสระ จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ แต่ถ้าไม่ใช่แสดงว่าสถานะนั้นไม่ใช่สถานะการแยกตัวอิสระ โดยผลจากการที่ฉีดแรงดันเข้าไปแต่ไม่เป็นสถานะการแยกตัวอิสระนั้น V_{PCC} จะยังคงเท่าเดิม แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคือ P (กำลังไฟฟ้าจริงของ DG) จะลดลง ส่วน ΔP (กำลังไฟฟ้าจริงของ Grid) จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้คือ

ในสถานะปกติกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดจะเป็นการร่วมกันจ่ายให้โดยกำลังไฟฟ้าจริงของ DG และกำลังไฟฟ้าจริงของ Grid สิ่งแรกที่จุด PCC ที่สามารถวิเคราะห์และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1) - (3)

$$P_{load} = P_{DG} + P_{Grid} = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{R \cdot (P_{DG} + P_{Grid})} \quad (2)$$

ทำการเคอสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3) - (5)

$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{V}{R} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{\sqrt{R \cdot (P_{DG} + P_{Grid})}}{R} \quad (4)$$

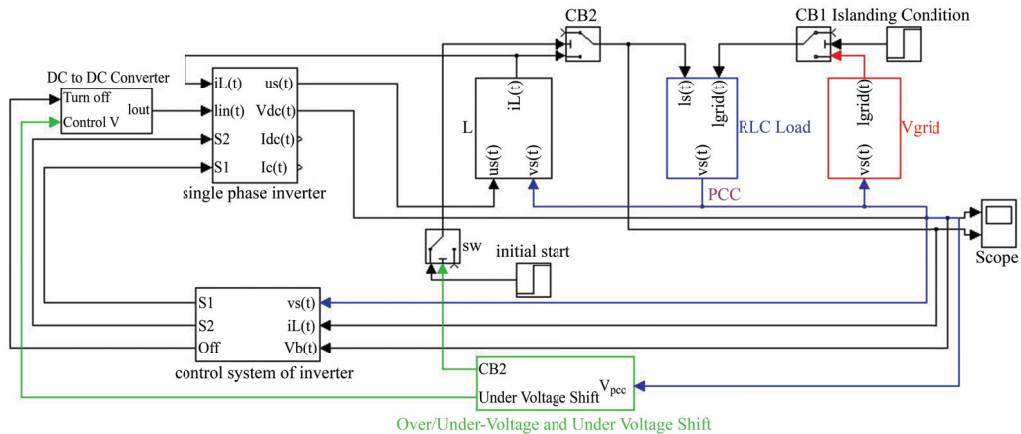
$$\frac{\partial(P_{DG} + P_{Grid})}{\partial V} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(P_{DG} + P_{Grid})}}{R} \tag{5}$$

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงจะแสดงได้ตามสมการที่ (6)

$$\Delta P_{DG} + \Delta P_{Grid} = 2 \cdot \Delta V \cdot \sqrt{\frac{P_{load}}{R}} \tag{6}$$

จากสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่า R และ P_{load} มีค่าคงที่ เมื่อระบบควบคุมฉีดแรงดัน 184.8 V (84 %) 3 รูปคลื่นเข้าสู่ระบบ หากสภาวะที่เกิดขึ้นไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระจะทำให้แรงดัน V_{PCC} (ΔV) จะเท่าเดิม แต่ ΔP_{DG} ลดลงซึ่งกลับกันกับ ΔP_{Grid} เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อเป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อโหลดที่ยังคงต้องการกำลังไฟฟ้าเท่าเดิม

โดยสามารถสร้างแบบจำลองดังรูปที่ 10 แสดงแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ในกรณีใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 1 ตัว ส่วนรายละเอียดภายในบล็อกต่อต้านสภาวะแสดงในรูปที่ 11



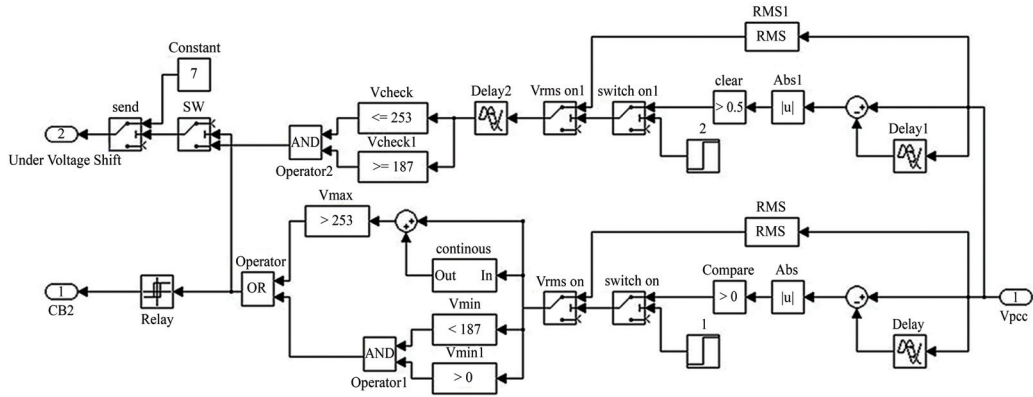
รูปที่ 10 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

โดยการนำเสนอจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกับการนำเสนอเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ [6] กรณีของ $\Delta P/P > 38.41\%$ กรณีของ $\Delta P/P < -24.39\%$ และกรณีของ $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$

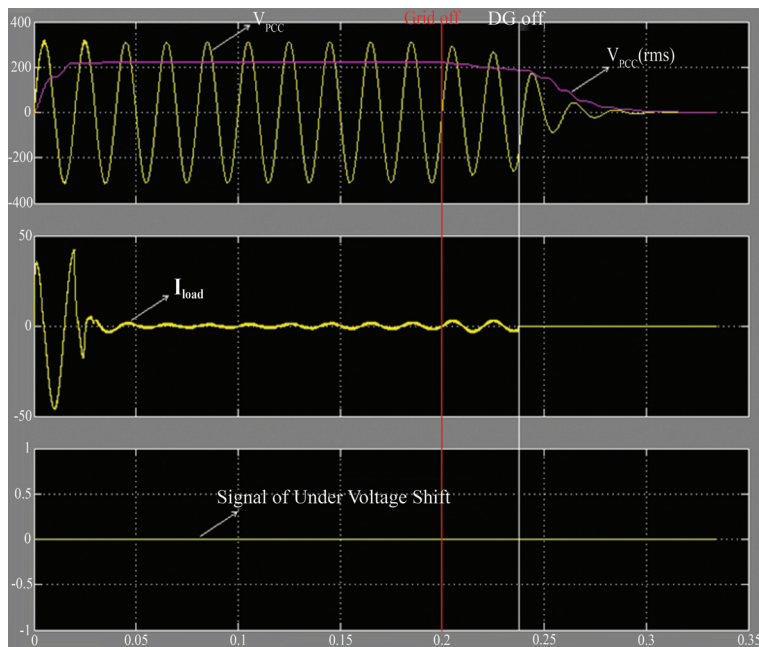
1) กรณีของ $\Delta P/P > 38.41\%$

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P < P_{load}$ โดยจะต้องมีขนาด $\Delta P/P > 38.41\%$ ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} น้อยกว่า 187 V ในการนำเสนอเทคนิคนี้สร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 12 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัว

อิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} มีการลดลงมาเรื่อยๆ ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้หยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ณ จุดที่แรงดัน $V_{PCC}(rms) < 187$ V นั่นคือ ณ เวลา 0.24 s ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ในกรณีของ $\Delta P/P > 38.41$ %



รูปที่ 11 บล็อกของเทคนิคการตรวจจัดการการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

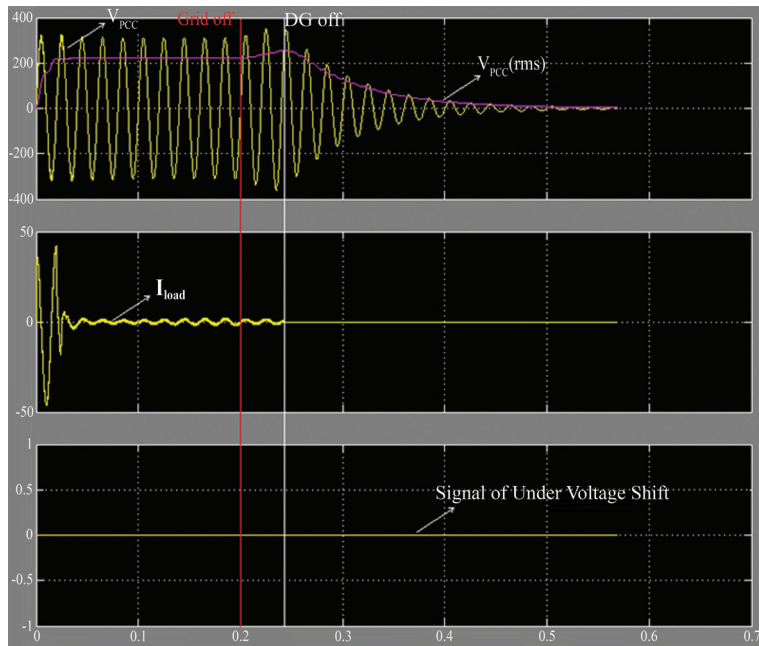


รูปที่ 12 V_{PCC} ในช่วงแรงดันต่ำ

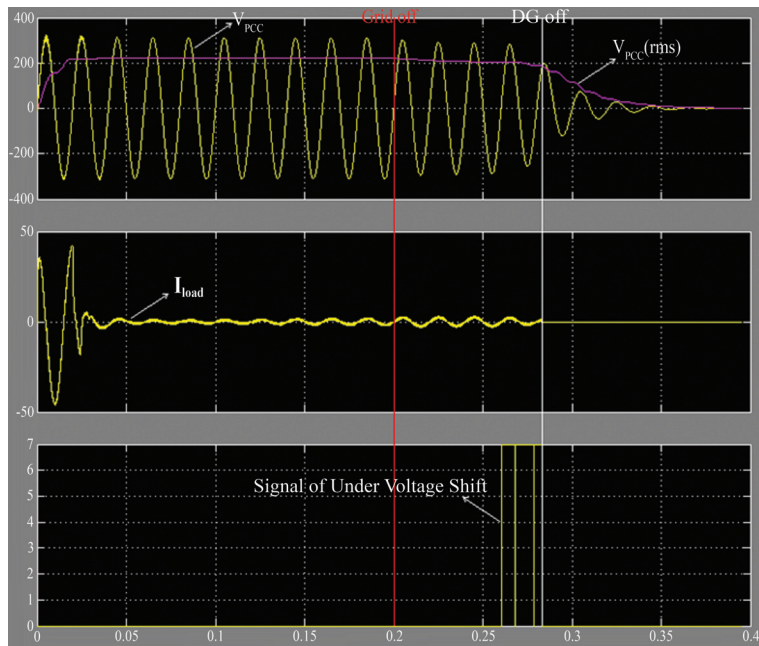
2) กรณีของ $\Delta P/P < -24.39$ %

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P > P_{load}$ โดยต้องมีขนาด $\Delta P/P < -24.39$ % ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} มากกว่า 253 V โดยสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} มีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้หยุดจ่าย

ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ณ จุดที่แรงดัน $V_{PCC}(rms) > 253 \text{ V}$ นั่นคือ ณ เวลา 0.24 s ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s



รูปที่ 13 V_{PCC} ในช่วงแรงดันเกิน

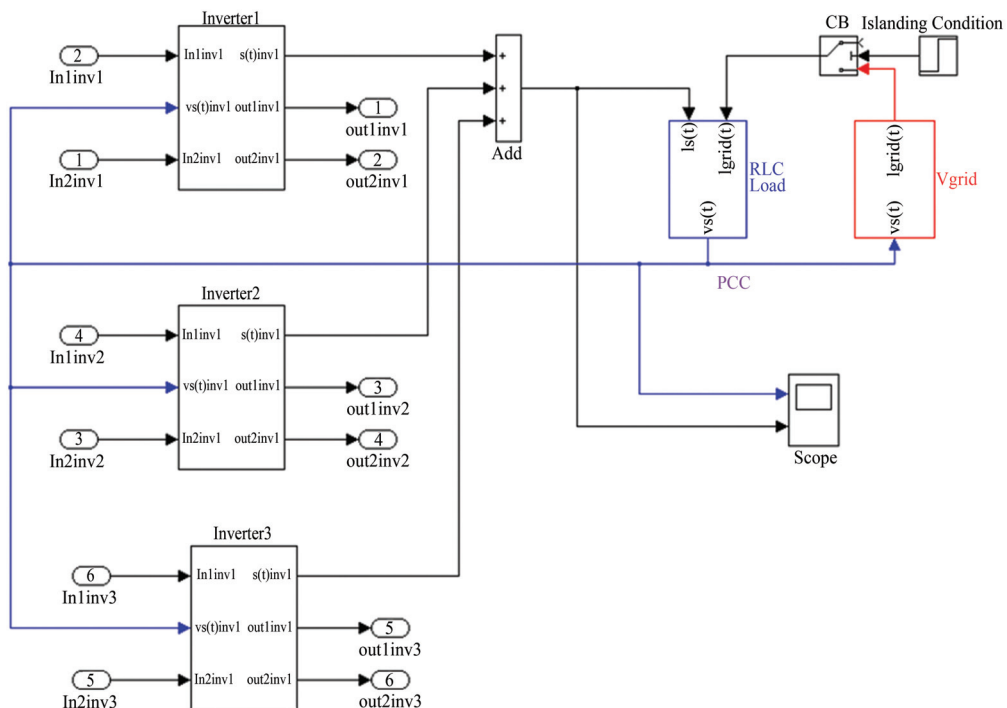


รูปที่ 14 V_{PCC} ในช่วงแรงดันอยู่ในขอบเขตปกติ

3) กรณีของ $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$

กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $P \approx P_{load}$ โดยจะต้องมีขนาด $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$ ซึ่งเมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นจะทำให้ V_{PCC} ไม่น้อยกว่า 187 V และไม่มากกว่า 253 V โดยสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s ผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 14 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 s แรงดัน V_{PCC} จะไม่น้อยกว่า 187 V และจะไม่มากกว่า 253 V ต่อมาระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ทำการสั่งให้ฉีดสัญญาณเป็นแรงดันคงที่ 184.4 V (84 %) 3 รูปคลื่นเข้าสู่โหลด ถ้าสภาวะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จะทำการหยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่โหลดเพราะว่าเมื่อระบบควบคุมวัดแรงดันที่ V_{PCC} จะพบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่า 187 V เมื่อสังเกตในรูปที่ 14 สามารถเห็นได้ว่า DG หยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.28 s แสดงว่าเทคนิคนี้สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระภายในเวลา 0.08 s

เมื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์แบบกลุ่ม เทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ สามารถสร้างแบบจำลองได้ดังในรูปที่ 15 ส่วนรายละเอียดภายในบล็อกต่อต้านสภาวะแสดงในรูปที่ 11 เช่นเดียวกัน และการนำเสนอผลการจำลองการทำงานแบ่งออกเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกัน ในบทความนี้นำเสนอเฉพาะข้อสรุป จากผลการจำลองการทำงานพบว่า ในกรณีของ $\Delta P/P > 38.41 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.06 s ในกรณีของ $\Delta P/P < -24.39 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s และในกรณีของ $-24.39 \% \leq \Delta P/P \leq 38.41 \%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.01 s



รูปที่ 15 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ในกรณีกลุ่มอินเวอร์เตอร์

วิเคราะห์ผล

จากผลจำลองการทำงานพบว่าเมื่อแบ่งการพิจารณาการใช้งานเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเดี่ยว และแบบกลุ่ม โดยแบบเดี่ยวหมายถึง การผลิตอินเวอร์เตอร์เพื่อการจำหน่ายเป็นสินค้า เพราะหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายที่ต่อเข้ากับโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะระบบที่ต่อผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อการแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ ส่วนแบบกลุ่มคือ การใช้งานอินเวอร์เตอร์จำนวนมากเป็นกลุ่มหรือรูปแบบของผู้ผลิตไฟฟ้าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพื่อการจำหน่าย เช่น โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถออกแบบจัดสร้างแต่ละส่วนได้เองทั้งหมด

เทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้งานในการจัดสร้างอินเวอร์เตอร์แบบเดี่ยวนี้ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าควรเป็นเทคนิคในกลุ่มโลคอลเพราะจะเห็นได้ว่าเทคนิคแบบรีโมท เช่น เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตอินเวอร์เตอร์เพื่อจำหน่ายเนื่องจากเทคนิคในกลุ่มนี้ทั้งหมดต้องมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับในส่วนฝั่งของการไฟฟ้า เช่น ติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณในฝั่งของการไฟฟ้า จึงจะเห็นได้ว่าไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับผู้ใช้รายบุคคล เช่น เมื่อนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในระบบโซลาร์รูฟท็อป ที่ได้รับการส่งเสริมให้บุคคลทั่วไปผลิตและขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้า โดยเทคนิคการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ สามารถตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว และไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ ในกรณี $\Delta P/P > 38.41\%$ และในกรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ส่วนในกรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s

เมื่อพิจารณาการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระในหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหลายตัวหรือสามารถผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ซึ่งนับว่าเป็นแบบกลุ่มพบว่าเทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อ เป็นเทคนิคที่เหมาะสม เพราะทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันทีทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที (หรือกล่าวได้ว่า สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระใช้เวลาน้อยกว่า 0.01 s) รวมทั้งการส่งสัญญาณและรับสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุมหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ได้ โดยเฉพาะ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ที่สามารถออกแบบและจัดสร้างระบบต่าง ๆ ได้เองทั้งหมด เช่น โซลาร์ฟาร์ม เป็นต้น ในส่วนของจุดอ่อนของวิธีการนี้เช่น การใช้สัญญาณโทรศัพท์เป็นจุดรับส่งสัญญาณ ถ้าหากว่าระบบสัญญาณโทรศัพท์เกิดล่มในขณะที่ระบบจะต้องทำการตรวจจับการแยกตัวอิสระในช่วงเวลานั้นพอดี สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการอื่นร่วม เช่น ในช่วงเวลานั้นผู้ดูแลระบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น จัดหาอินเวอร์เตอร์ 1 ตัวแยกอิสระจากแบบกลุ่มทั้งหมดแล้วใช้วิธีการแบบโลคอลในอินเวอร์เตอร์ตัวนี้ เป็นต้น

สรุป

เทคนิคที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบเดี่ยวคือ วิธีการตรวจจับการแยกตัวอิสระแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นเทคนิคในกลุ่มแบบไฮบริด เพราะสามารถตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเมื่อพิจารณาแล้ว ในกรณี $\Delta P/P > 38.41\%$

และในกรณี $\Delta P/P < -24.39\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.04 s ส่วนในกรณี $-24.39\% \leq \Delta P/P \leq 38.41\%$ สามารถต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.08 s เพียงแต่มีการรบกวนระบบเพราะต้องฉีดยุทธศาสตร์เปลี่ยนแรงดันต่ำเข้าไปตรวจสอบว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระในกรณีนี้เท่านั้น

ส่วนเทคนิคที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์แบบกลุ่มคือ วิธีการที่เหมาะสมเป็นวิธีการแบบรีโมท เพราะวิธีการนี้ไม่มีพื้นที่ไร้การตรวจจับ รวดเร็ว แม่นยำ มีประสิทธิภาพสูง ในโครงการวิจัยนี้พบว่า เทคนิคสัญญาณที่ผลิตขึ้นด้วยการตัดการเชื่อมต่อเป็นเทคนิคที่เหมาะสมเพราะทันทีที่สภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น ระบบสามารถตรวจจับได้ทันที ทำให้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถตัดตัวเองออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันที รวมทั้งการส่งสัญญาณและรับสัญญาณเพียง 1 จุดสามารถครอบคลุม หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ได้โดยเฉพาะ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ ที่สามารถออกแบบและจัดสร้างระบบต่าง ๆ ได้เองทั้งหมด เช่น โซลาร์ฟาร์ม เป็นต้น ในส่วนของจุดอ่อนของวิธีการนี้เช่นการใช้สัญญาณโทรศัพท์เป็นจุดรับส่งสัญญาณและหากว่าระบบสัญญาณโทรศัพท์เกิดล้มในขณะที่ระบบจะต้องทำการตรวจจับการแยกตัวอิสระในช่วงเวลานั้นพอดี สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการอื่นร่วม เช่น ในช่วงเวลานี้ผู้ดูแลระบบจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น จัดหาอินเวอร์เตอร์ 1 ตัวแยกอิสระจากแบบกลุ่มทั้งหมดแล้วใช้วิธีการแบบโลคอลในอินเวอร์เตอร์ตัวนี้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

References

- [1] REN21. (2018). **Renewables 2018 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
- [2] IEEE Std. 1547. (2003). **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. SASB/SCC21 - SCC21 - Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage
- [3] Yingram, M. (2013). Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 30, No. 3, pp. 19-24
- [4] Yingram, M. and Soonrat, S. (2017). Active Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 1, pp. 11-21
- [5] Yingram, M. (2014). **Passive Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink**. Research Report, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University

- [6] Yingram, M. (2015). Over/Under-Voltage Islanding Detection Technique of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation on Matlab/Simulink. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 32, No. 1, pp. 67-72
- [7] Yingram, M. (2015). **Development of Anti-Islanding Detection Technique in Grid-Connected Distributed Generation on Computer Program**. Research Report, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University
- [8] Yingram, M. (2015). Active Islanding Detection Techniques of Anti-Islanding for Grid-Connected Distributed Generation: Part 1. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 33, No. 2, pp. 1-7
- [9] Yingram, M. (2015). **Development of Anti-Islanding Hybrid Detection Technique in Grid-Connected Distributed Generation**. Ph.D. Dissertation Chiang Mai University
- [10] Yingram, M. and Premrudeepreechacharn, S. (2015). Over/Undervoltage and Undervoltage Shift of Hybrid Islanding Detection Method of Distributed Generation. **The Scientific World Journal**. DOI: 10.1155/2015/654942
- [11] Kitamura, A., Okamoto, M., Yamamoto, F., Nakaji, K., Matsuda, H., and Hotta, K. (1994). **Islanding Phenomenon Elimination Study at Rokko Test Center**. United States: N
- [12] Velasco, D., Trujillo, C. L., Garcera, G., and Figueres, E. (2010). Review of Anti-Islanding Techniques in Distributed Generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. pp. 1608-1614
- [13] Hotta, K., Kitamura, A., Okamoto, M., Takigawa, K., Kobayashi, H., and Ariga, Y. (1993). Islanding Prevention Measures: Demonstration Testing at Rokko Test Center for Advanced Energy Systems. In **Proceedings of the 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, Spain**. pp. 1063-1067
- [14] Yu, B., Matsui, M., and Yu, G. (2010). A Review of Current Anti-Islanding Methods for Photovoltaic Power System. **Solar Energy**. Vol. 84, Issue 5, pp. 745-754. DOI: 10.1016/j.solener.2010.01.018
- [15] Ropp, M., Aaker, K., Haigh, J., and Sabhah, N. (2000). Using Power Line Carrier Communications to Prevent Islanding. In **Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference**. pp. 1675-1678. DOI: 10.1109/PVSC.2000.916224
- [16] Xu, W., Zhang, G., Li, C., Wang, W., Wang, G., and Kliber, J. (2007). A Power Line Signaling Based Technique for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators-Part I: Scheme and Analysis. **IEEE Transaction on Power Delivery**. Vol. 22, No. 3, pp. 1758-1766. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899618
- [17] Funabashi, T., Koyanagi, K., and Yokoyama, R. (2003). A Review of Islanding Detection Methods for Distributed Resources. In **2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings**. Vol. 2, pp. 608-613. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304617

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Chlorella sp. Cultivation Using Carbon Dioxide Concentration Control System

ปุณยสิริ บุญเป็ง^{1*} ชวโรจน์ ใจสิน² และกฤษดา ยิงขยัน¹

Poonyasiri Boonpeng^{1*} Chawaroj Jaisin² and Krisda Yingkayun¹

Received: July 30, 2019; Revised: November 21, 2019; Accepted: November 28, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp. รวมถึงการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตภายใต้ระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งระบบสามารถควบคุมค่า pH ของน้ำเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้อยู่ในช่วงระหว่าง 6.7 และ 6.9 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดของน้ำ ดังนั้นการปรับค่า pH ของน้ำในระบบเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือการเติมน้ำที่มีค่าความเป็นกลาง ผลการทดลองพบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ในระบบปิดสำหรับการทดลองซึ่งควบคุมและปรับค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงทุก 10 นาทีมีจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายในช่วงสุดท้ายของระยะการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นได้ถึง 2.3 เท่า จาก $1,015 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร เพิ่มขึ้นเป็น $2,322.5 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงระบบเปิดแบบธรรมชาติ และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นได้ถึง 1.7 เท่า จาก 195×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน เพิ่มขึ้นเป็น 333.47×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถขยายขอบเขตการเจริญเติบโตในระยะเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งแสดงถึงการมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp.

คำสำคัญ : สาหร่ายพันธุ์คลอเรลล่า; การควบคุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; การเพาะเลี้ยงแบบระบบปิด

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

² วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

² School of Renewable Energy, Maejo University

* Corresponding Author E - mail Address: p_boonpeng@hotmail.com

Abstract

The research aims to develop *Chlorella* sp. cultivation using a carbon dioxide concentration control system including to investigate the cultivation system of *Chlorella* sp. effecting on the growth rate. The cultivation system could control a pH range of cultivation between 6.7 and 6.9 leading to be appropriate with *Chlorella* sp.'s growth. In addition, the carbon dioxide concentration in water of cultivation correlates with acidity. Therefore, pH value in the cultivation system is regulated by filling the carbon dioxide concentration or the neutral water. The experimental result shows that the *Chlorella* sp. cultivation for the procedure, using the carbon dioxide concentration control system improving a pH value every 10 minutes, displays the 2.3 times of algal number density at last range of exponential phase. The algal number density under open-system is $1,015 \times 10^3$ cells/mL increasing to $2,322.5 \times 10^3$ cells/mL under the control system. In addition, an average growth rate increases to 1.7 times. The average growth rate under open-system is 195×10^3 cells/mL/day increasing to 333.47×10^3 cells/mL/day under the control system. Moreover, the cultivation with the carbon dioxide concentration control system could expand the range of growth in exponential phase explaining the appropriate environment for the *Chlorella* sp. cultivation.

Keywords: *Chlorella* sp.; Carbon Dioxide Control; Closed-System Bioreactor Plants

บทนำ

วิกฤตการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบันมีแนวโน้มที่ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ทั้งในด้านการขาดแคลนแหล่งพลังงานธรรมชาติประเภทสร้างทดแทนใหม่ไม่ได้ และผลกระทบจากการใช้พลังงานธรรมชาติที่มีต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมโลก หนึ่งในหนทางของการแก้ไขวิกฤตการณ์ดังกล่าวคือ การใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล ซึ่งเป็นผลผลิตจากสิ่งมีชีวิตหรือผลิตผลจากการสร้างและสลายของสิ่งมีชีวิต สาหร่ายน้ำมันถือเป็นพืชวัตถุดิบชีวมวลชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียม พันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมัน ได้แก่ *Botryococcus braunii* *Dunaliella tertiolecta* และ *Chlorella* เป็นต้น [1]

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายน้ำมันเหล่านี้ให้ผลตอบแทนต่อหน่วยของพื้นที่การปลูกในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับพืชที่ขึ้นบนดิน สาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้ระยะเวลาอันสั้น [2] และพบว่าภายใน 2 - 3 สัปดาห์ สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ น้ำเลี้ยงสาหร่ายยังสามารถนำกลับมาเลี้ยงสาหร่ายรุ่นต่อไปได้อีกหลายครั้ง และที่สำคัญประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน จึงเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายอาศัยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานเคมี

พลังงานเคมีเหล่านี้ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิต ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงคือ ไขมันหรือน้ำมัน ซึ่งสามารถสกัดและนำมาผ่านกระบวนการทำให้ได้ผลผลิตเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน [3] การเจริญเติบโตของสาหร่ายจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น สารอาหาร อุณหภูมิ ความเข้มแสง เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์จะต้องการปัจจัยแต่ละตัวที่มีค่าแตกต่างกัน คาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กจะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม [4] รวมถึงค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากมีอิทธิพลต่อความหลากหลายของสารอนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic Carbon) ในรูปต่าง ๆ เช่น เมื่อค่าความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 5 รูปของ DIC (Dissolved Inorganic Carbon) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ละลายน้ำ เมื่อค่าความเป็นกรดด่าง 6.6 จะมี DIC ในรูปของ CO_2 และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ในปริมาณเท่า ๆ กัน และเมื่อค่าความเป็นกรดด่างสูงถึง 8.3 รูปของ DIC เกือบทั้งหมดจะเป็นคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ดังนั้นการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง จึงมีความสำคัญในการเพาะเลี้ยงเพื่อให้สาหร่ายขนาดเล็กสามารถดูดซึมและนำ CO_2 มาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น [5]

ในปัจจุบันวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบปิด (Closed-System Bioreactor Plants) ที่ใช้สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและแสงเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน [6] เป็นระบบที่ได้รับความนิยมในการวิจัยและพัฒนาอย่างมาก เนื่องจากการเพาะเลี้ยงในลักษณะนี้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมและสิ่งปนเปื้อนได้ง่าย ทำให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพและผลผลิตต่อพื้นที่สูง ด้วยหลักการและเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการพัฒนาระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp. และศึกษาผลการเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp. ในช่วงระยะการเจริญเติบโต ระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำงานโดยรับค่าอินพุตมาจากชุดวัดค่า pH ประมวลผล และควบคุมค่า pH ของน้ำเพาะเลี้ยงสาหร่าย ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดของน้ำ ดังนั้นการปรับค่า pH ของน้ำในระบบเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นการเติมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือการเติมน้ำที่มีค่าความเป็นกลาง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์นำองค์ความรู้หลากหลายเพื่อนำมาพัฒนาและใช้ในกระบวนการวิจัย ประกอบด้วย การประยุกต์การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp. รวมถึงการประยุกต์ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุต เอาต์พุต และอุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อสร้างระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบปิด ซึ่งได้มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สำคัญดังนี้

1. สาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp.

Chlorella sp. เป็นสาหร่ายสีเขียวจัดอยู่ในหมวด *Chlorophyta* ชั้น *Chlorophyceae* อันดับ *Chlorellales* วงศ์ *Chlorellaceae* สกุล *Chlorella* ซึ่งมีลักษณะสำคัญ คือ เป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยว มีขนาดเล็กประมาณ 1 - 10 ไมครอน อาจอยู่เป็นเซลล์เดี่ยว ๆ หรือรวมกันเป็นกลุ่มก้อน

ลักษณะของเซลล์มีรูปร่างหลายแบบ เช่น ทรงกลม รูปไข่ และรูปรี เซลล์มีหลายขนาดในสภาพแวดล้อมเดียวกัน *Chlorella* sp. มีคลอโรพลาสรูปร่างคล้ายถ้วยหรือระฆัง หรือเป็นแบบแถบข้าง (Parietal) อาจมีหรือไม่มีเม็ดแป้ง ไม่มีรยางค์และคอนแทรกไทค์แวคิวโอล (Contractile Vacuole) [7] ผนังเซลล์หนาและแข็งมี 3 ชั้น ผนังเซลล์ชั้นกลางหนาที่สุดประกอบด้วย เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ผนังเซลล์ชั้นนอกเป็นสารประกอบโพลีเมอร์ซึ่งจะทำหน้าที่จับกับโลหะหนักหรือสารพิษในร่างกายได้อย่างรวดเร็ว และชั้นในสุดเป็นชั้นของเยื่อหุ้มเซลล์ [8] การสืบพันธุ์เป็นแบบไม่อาศัยเพศโดยการสร้าง *Autospore* ภายในเซลล์ที่เจริญเต็มวัย เซลล์ของ *Chlorella* sp. เติบโตได้ในแหล่งที่มีความเข้มข้นของสารอาหารในช่วงกว้าง ในธรรมชาติจึงพบ *Chlorella* sp. ทั้งในสภาพน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำเสีย [9] โดยทั่วไป *Chlorella* sp. มีทั้งที่อยู่อย่างอิสระและบางชนิดก็อาศัยอยู่ภายในตัวของสัตว์อื่น เช่น ฟองน้ำ ไฮดรา โปรโตซัว เป็นต้น บางครั้งเรียก *Chlorella* sp. ชนิดนี้ว่า *Zoochlorella* [9] ซึ่งประโยชน์ของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. สามารถสรุปได้ดังนี้

- ใช้ผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล [10] เซลล์สาหร่าย *Chlorella* sp. ในสายพันธุ์ที่มีความเข้มข้นของลิพิดและปริมาณลิพิดในเซลล์ที่มีความเหมาะสม สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้
- เป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย [11] สารสกัดหยาบจากสาหร่าย *Chlorella* spp. 5 สายพันธุ์ คือ *Chlorella* sp. A0505, *Chlorella* sp. B2, *Chlorella ellipsoidea* TISTR 8260, *Chlorella vulgaris* TISTR 8261 และ *Chlorella* sp. TISTR 8445 ที่สกัดด้วยสารละลายไดคลอโรมีเทนมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก่อโรค 6 ชนิด
- เป็นแหล่งอาหารโปรตีน [12] *Chlorella* sp. มีปริมาณโปรตีนในเซลล์สูงปริมาณร้อยละ 55 - 60 ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิดในปริมาณค่อนข้างมาก จึงเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญ รวมทั้งยังมีธาตุอาหารอื่นที่จำเป็น เมื่อทำให้แห้งจะมีโปรตีนประมาณร้อยละ 45 ไขมันร้อยละ 20 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 20 เส้นใยร้อยละ 5 แร่ธาตุและวิตามินร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุผลที่มันมีขนาดเล็กทำให้เก็บเกี่ยวได้ยาก ส่งผลให้การนำมาเป็นแหล่งอาหารต้องทำการเพาะเลี้ยงในพื้นที่ขนาดใหญ่
- ภายในเซลล์ของ *Chlorella* sp. มีสารเร่งการเจริญที่เรียกว่า *Chlorella Growth Factor* (CGF) ซึ่งประกอบด้วย กรดอะมิโน เปปไทด์ โปรตีน วิตามิน น้ำตาล และกรดนิวคลีอิก มีคุณสมบัติต่อต้านมะเร็งที่เรียกว่า "*SARCONA180*" โรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวในหนู และระงับการเจริญของเนื้องอกในหนูได้ปริมาณร้อยละ 52.9 จึงถูกนำมาใช้ในวงการแพทย์ [13] นอกจากนี้ CGF มีผลต่อระบบย่อยอาหารโดยจะเข้าไปช่วยทำให้เชื้อแลคโตบาซิลลัสในลำไส้เพิ่มจำนวนมากขึ้น และมีบทบาทในการล้างพิษในลำไส้ อีกทั้ง [9] มีรายงานว่า *Chlorella* sp. สามารถผลิตสารปฏิชีวนะชื่อคลอเรลลิน (*Chlorellin*) ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย *Pseudomonas* sp. และ *Mycobacterium* sp.
- ใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ [14] โดยการเลี้ยง *Chlorella* sp. K3 ในน้ำทิ้งโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองเป็นเวลา 3 วัน แล้วนำมาเป็นอาหารสำหรับการเลี้ยงไรแดง

- ใช้น้ำบาดน้ำเสียและของเหลือทิ้ง [15] สำหรับของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตปลาป่น หรือของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ต่าง ๆ พบว่า ในของเหลือทิ้งหรือของเสียเหล่านี้ ยังคงมีสารอาหารหรือแร่ธาตุอยู่ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยง *Chlorella* sp. ได้

2. ระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่าย (Algal Cultivation)

สาหร่ายต้องการน้ำ แสงแดด และคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตเหมือนพืชชนิดอื่น ๆ สาหร่ายสามารถโตได้ดีในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนและมีแสงแดดมาก การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเพาะเลี้ยงในระบบเปิด และการเพาะเลี้ยงระบบปิด

2.1 การเพาะเลี้ยงในระบบเปิด [16] สามารถแบ่งได้ออกเป็นสองลักษณะดังนี้ ระบบการเพาะเลี้ยงตามแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น การเพาะเลี้ยงในบ่อน้ำ คลอง เป็นต้น และระบบการเพาะเลี้ยงในบ่อเทียม (Artificial Ponds) หรือภาชนะบรรจุ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้เพาะเลี้ยงกันโดยทั่วไป ได้แก่ การเพาะเลี้ยงในบ่อตื้นเขินขนาดใหญ่ ถึง บ่อกลม และบ่อร่องน้ำ เป็นต้น การเพาะเลี้ยงในระบบแบบนี้มีความเสียเปรียบในด้านการควบคุมคุณภาพของผลผลิตและผลผลิตต่อพื้นที่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากความยากของการควบคุมสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงให้มีความเหมาะสมและมีสภาวะที่เหมือนกัน

2.2 การเพาะเลี้ยงในระบบปิด เป็นวิธีการเพาะเลี้ยงที่มีการวิจัยและพัฒนามากในปัจจุบัน เนื่องจากการเพาะเลี้ยงในลักษณะนี้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมและสิ่งปนเปื้อนได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น การเพาะเลี้ยงในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Photobioreactors) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบท่อ (Tubular Photobioreactors) หรือถังปฏิกรณ์ชีวภาพแผ่นราบ (Flat-Plate Photobioreactors) เป็นต้น การเพาะเลี้ยงในระบบปิดมีข้อเสียเปรียบในด้านต้นทุนในการผลิตซึ่งใช้ค่อนข้างสูง [17] เนื่องจากระบบดังกล่าวอาจใช้แสงเทียมจากเครื่องกำเนิดแสงในรูปแบบต่าง ๆ และอาจมีระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน นอกจากนี้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดสามารถแบ่งรูปแบบของการเพาะเลี้ยงออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

- แบบออโตโทรฟิก (Autotrophic Cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้แสงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากธรรมชาติเป็นหลัก
- แบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic Cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น กลูโคส ซูโครส หรือกากน้ำตาล เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน ซึ่งจะเพาะเลี้ยงในที่ที่ไม่มีแสงหรือในที่มืดตลอดเวลา
- แบบมิคโซโทรฟิก (Mixotrophic Cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและแสงเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยแสงที่ใช้อาจเป็นแสงจากธรรมชาติหรือจากแหล่งกำเนิดแสงเทียมภายในระยะที่เหมาะสม

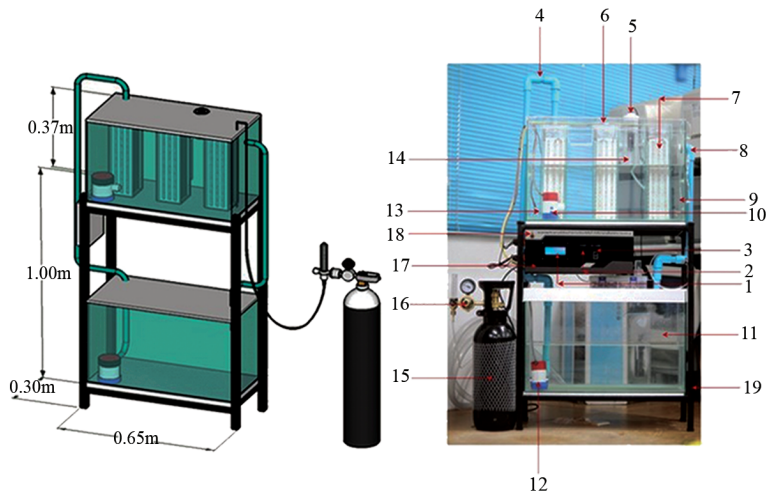
วิธีดำเนินการวิจัย

การสร้างระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp. รวมถึงการศึกษาผลการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายใต้ระบบควบคุมปริมาณ

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหลักการและทฤษฎีที่ได้กล่าวมาในตอนต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ซึ่งแบ่งเป็น

1. โครงสร้างระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) โครงสร้างแบบจำลอง

(ข) โครงสร้างจริง

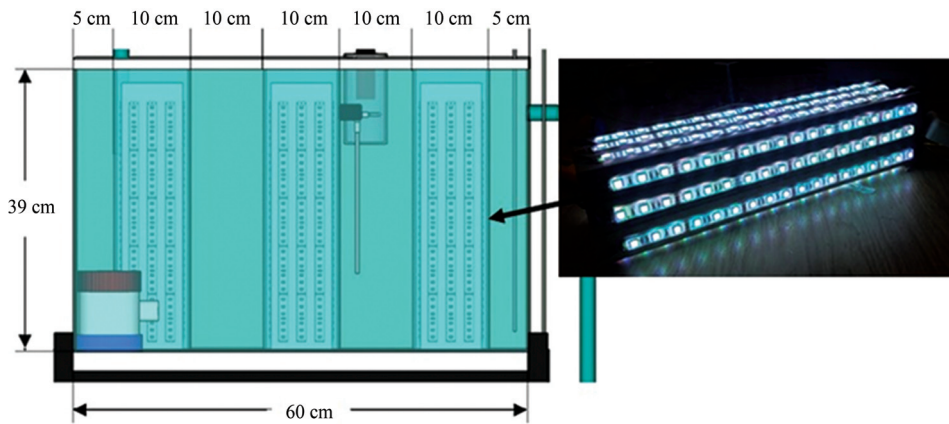
รูปที่ 1 โครงสร้างระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

มีรายละเอียดประกอบด้วย

- 1.1 จอ LCD แสดงผลขนาด 20 ตัวอักษร 4 บรรทัด
- 1.2 สวิตช์ START เป็นสวิตช์ เปิด - ปิด
- 1.3 ช่องใส่ SD CARD
- 1.4 ท่อส่งน้ำจากตู้ด้านล่างไปตู้ด้านบน
- 1.5 ชุดเซนเซอร์วัดค่า pH
- 1.6 พัดลมระบายอากาศสำหรับชุดแสงสว่างไฟ LED
- 1.7 ช่องสำหรับใส่แท่งชุดให้แสงสว่างไฟ ซึ่งใช้ SMDs LED ที่มีจำนวน LED เท่ากับ 216 ตัวต่อแท่ง
- 1.8 ท่อระบายน้ำล้นจากตู้ด้านบน
- 1.9 ตู้กระจกด้านบนขนาด 61 x 39 เซนติเมตร
- 1.10 ปั๊มน้ำวน (Pump Loop)
- 1.11 ตู้กระจกด้านล่าง ขนาด 61 x 39 เซนติเมตร
- 1.12 ปั๊มน้ำเติม (Pump Up) สำหรับปั๊มน้ำขึ้นเติมตู้ด้านบน
- 1.13 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
- 1.14 ปั๊มน้ำสำหรับการวัดค่า pH

- 1.15 ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.16 เรกูเลเตอร์คาร์บอนไดออกไซด์
- 1.17 โซลินอยด์วาล์ว
- 1.18 Connector pH Sensor
- 1.19 โครงสร้างชิ้นงาน

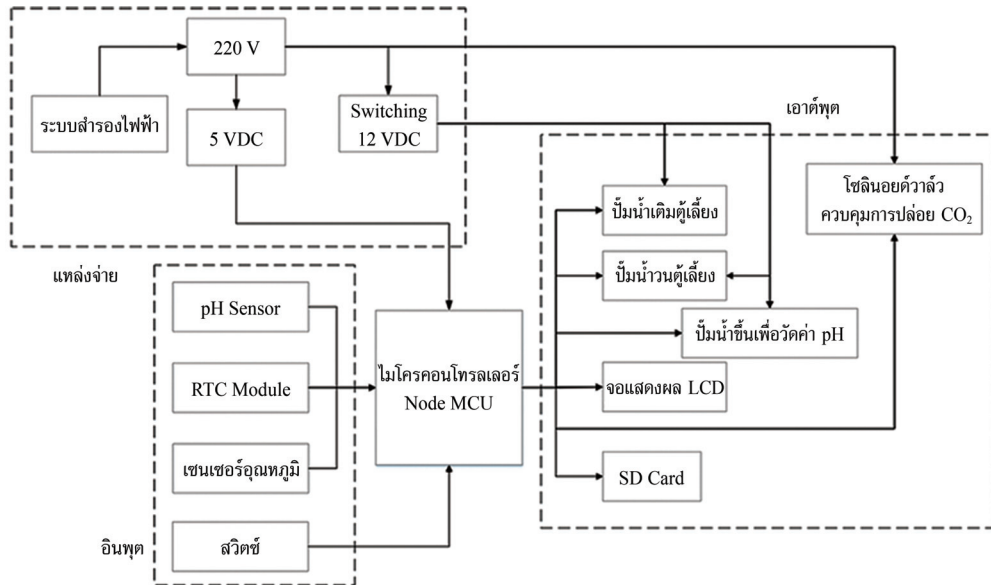
2. โครงสร้างชุดให้แสงสว่างสีขาวจากหลอดไฟ Surface Mounted Devices LED (SMDs LED) (รูปที่ 2) ในงานวิจัยนี้ใช้หลอดไฟ SMDs LED ชนิด Super bright 5050 SMDs ยี่ห้อ Taiwan Epistar มีลักษณะเป็นแถบยาวทึมด้วยวัสดุซิลิโคนโปร่งใสสามารถกันน้ำได้ (IP65) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ ซึ่ง SMDs LED ชนิดนี้สามารถตัดแปลงและนำไปติดตั้งให้เข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ง่าย โดยชุดให้แสงสว่างมีจำนวนหลอดไฟ SMDs LED ทั้งสิ้น จำนวน 648 ตัว ซึ่งได้แยกแถบหลอดไฟ SMDs LED ออกเป็นหลายแถบ แต่ละแถบใช้หลอดไฟ SMDs LED จำนวน 18 ตัว นำไปติดตั้งกับแท่งสี่เหลี่ยมอลูมิเนียมทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 3 แถบ เพื่อจัดลักษณะรูปแบบของแสงให้กระจายโดยรอบ ดังนั้นหนึ่งชุดให้แสงสว่างมีหลอดไฟ SMDs LED จำนวน 216 ตัว ทั้งหมด 3 ชุด โดยวางตรงกลางห้องเพาะเลี้ยงให้ห่างกันในแต่ละชุด 10 เซนติเมตร เพื่อให้สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงสามารถไหลวนรับแสงได้อย่างทั่วถึง การติดตั้งชุดให้แสงสว่างดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเรื่องอิทธิพลของแสงแอลอีดีที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. [18] พบว่าการใช้แสง SMDs LED สีขาวที่ระดับความเข้มแสง 20 ถึง 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (SMDs LED จำนวน 180 ถึง 420 ตัว) ให้การเจริญเติบโตที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแสงสีอื่นที่ระดับความเข้มแสงเดียวกัน



รูปที่ 2 โครงสร้างชุดให้แสงสว่างจากหลอด LED

3. บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. แสดงดังรูปที่ 3 โดยแบ่งการทำงานออกได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.1 ส่วนของแหล่งจ่าย เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้กับโซลินอยด์วาล์วเพื่อควบคุมการปล่อยก๊าซ CO₂ และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดยผ่านวงจรสวิตซ์ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับปั้มน้ำวน ปั้มน้ำเดิม และปั้มน้ำสำหรับการวัดค่า pH และแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และอุปกรณ์เซนเซอร์ เป็นต้น

3.2 ส่วนของอินพุต เป็นส่วนที่แสดงถึงอุปกรณ์จำพวกเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ได้แก่ pH เซนเซอร์ เซนเซอร์อุณหภูมิ และโมดูลนาฬิกา โดยเมื่อวัดค่าพารามิเตอร์แล้วจะทำการส่งค่าไปยังส่วนของชุดควบคุมเพื่อให้ชุดควบคุมทำการประมวลผล และแสดงค่าต่อไป

3.3 ส่วนของเอาต์พุต เป็นส่วนที่รับคำสั่งจากชุดควบคุมเพื่อสั่งงานให้มีการเปิดหรือปิดวงจร โดยประกอบด้วยวงจร Relay ในการควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์วเพื่อควบคุมการปล่อยก๊าซ CO₂ ควบคุมการเปิดหรือปิดปั้มน้ำเดิมเพื่อเติมน้ำในส่วนของคุณ้เพาะเลี้ยง ควบคุมการเปิดหรือปิดปั้มน้ำวนในส่วนของคุณ้เพาะเลี้ยง และควบคุมการทำงานของปั้มน้ำสำหรับการวัดค่า pH เพื่อให้ชุดวัดค่า pH สามารถวัดค่าและส่งข้อมูลไปประมวลผลเพื่อควบคุมค่า pH ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย มีส่วนของการแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD และมีการบันทึกค่าอุณหภูมิ ค่า pH และค่าเวลาไว้ใน SD Card ซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำค่าที่บันทึกไว้ไปพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์หรือเปรียบเทียบผลสำหรับการศึกษาวิจัยในเรื่องการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ต่อไป

3.4 ส่วนชุดควบคุม โดยชุดควบคุมทำหน้าที่รับค่าจากเซนเซอร์ในส่วนของอินพุต และส่งค่าที่ทำการประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปควบคุมส่วนของเอาต์พุต ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในส่วนชุดควบคุม คือบอร์ด NodeMCU (ESP8266-12F)

โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. สามารถอธิบายได้จากแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการตรวจสอบการกดสวิทช์ หากมีการกดเปิดสวิทช์ โปรแกรมจะสั่งให้ปั้มน้ำภายในตู้เพาะเลี้ยงเริ่มทำงานพร้อมด้วยจอแสดงผล LCD เริ่มแสดงวัน เวลา และค่าอุณหภูมิของน้ำ หลังจากนั้นโปรแกรมจะสั่งให้เริ่มทำการวัดค่า pH และแสดงผลค่า pH ซึ่งวัดค่าทุก 10 วินาที และเวลาบันทึกใน SD Card หลังจากนั้นโปรแกรมจะสั่งให้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยจากจำนวนครั้งของการวัดค่า pH ในเวลา 5 นาที เพื่อนำไปสู่โปรแกรมควบคุมค่า pH ให้อยู่ระหว่าง pH 6.7 และ 6.9 หากค่าเฉลี่ย pH มีค่ามากกว่า 6.9 โปรแกรมจะสั่งให้ระบบทำการเติมก๊าซ CO₂ เพื่อปรับเพิ่มความเป็นกรดให้กับน้ำในตู้เพาะเลี้ยง และหากค่าเฉลี่ย pH มีค่าน้อยกว่า 6.7 โปรแกรมจะสั่งให้ปั้มน้ำจากตู้เก็บน้ำที่มีค่า pH ของน้ำเป็นกลางให้เติมน้ำเพื่อปรับลดความเป็นกรดให้กับน้ำในตู้เพาะเลี้ยง ซึ่งในระหว่างกระบวนการควบคุมค่า pH อยู่นั้น ระบบยังคงวัดค่า pH และบันทึกลงใน SD Card ทุก 10 วินาที

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบและการสอบเทียบ (Calibration) ระบบวัดและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบไปด้วย

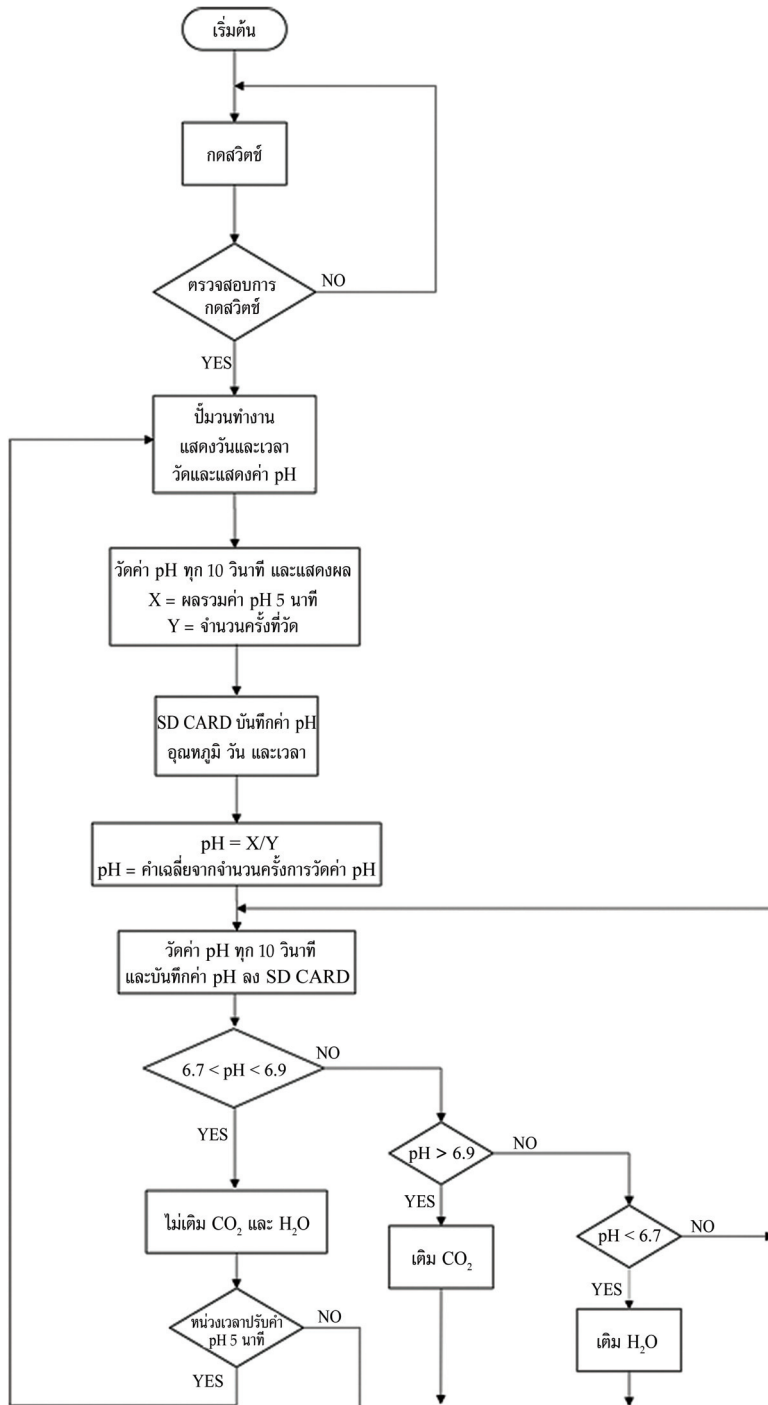
1. การสอบเทียบโพรบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH

งานวิจัยนี้ใช้โพรบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH ของ Industrial pH electrode (SKU:FIT0348) ซึ่งมีคุณสมบัติย่านการวัดค่า pH อยู่ในช่วง 0 ถึง 14 pH และมีค่าความเที่ยงตรงสำหรับการวัดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.02 pH ใช้ร่วมกับวงจรอินเทอร์เฟส (pH probe module BNC connector) สำหรับการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการส่งข้อมูลค่า pH ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ จากทฤษฎีและหลักการที่ได้กล่าวมาในตอนต้น ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าความเป็นกรดของน้ำ (สำหรับช่วงค่า pH ที่เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย) การสอบเทียบชุดตรวจวัดค่า pH เพื่อทำการปรับชดเชยค่า pH ที่ได้จากโพรบเซนเซอร์ให้มีค่าเป็นมาตรฐานนั้น ทำให้สามารถวัดค่าและควบคุมค่า pH ที่ใช้ในการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงทำการสอบเทียบและปรับค่าของโพรบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่ามาตรฐาน pH 6.86 ซึ่งอยู่ในช่วงค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงเป็นตัวทดสอบ

2. การทดลองหาความสัมพันธ์ของอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในน้ำกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในน้ำ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถละลายน้ำได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิของน้ำ เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) ดังนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในน้ำ จากการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำที่ปริมาณ 40 ลิตร อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้ 1 ลิตรต่อนาที 5 ลิตรต่อนาที และ 15 ลิตรต่อนาที

3. ทดสอบโปรแกรมและทดลองเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างในน้ำเพื่อทดสอบระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยกำหนดสถานการณ์เป็น 5 ช่วงดังนี้



รูปที่ 4 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม

ชั่วโมงที่ 1 ทดสอบการทำงานของระบบ โดยเริ่มจากน้ำที่มีค่า pH เป็นกลาง
 ชั่วโมงที่ 2 ทดสอบการทำงานของระบบ โดยให้ระบบทำงานต่อจากชั่วโมงที่ 1

ชั่วโมงที่ 3 ทดสอบการทำงานของระบบ โดยเปลี่ยนสภาพน้ำให้เป็นกรดโดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

ชั่วโมงที่ 4 ทดสอบการทำงานของระบบ โดยให้ระบบทำงานต่อจากชั่วโมงที่ 3

ชั่วโมงที่ 5 ทดสอบการทำงานของระบบ โดยเปลี่ยนสภาพน้ำให้เป็นด่างโดยการเติมน้ำปูนขาว

ในการออกแบบโปรแกรมกำหนดเงื่อนไขให้หยุดการเติมก๊าซ CO₂ เมื่อค่า pH เท่ากับ 6.88 (เลือกใช้อัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 ลิตรต่อนาที) และกำหนดเงื่อนไขการเติมน้ำที่เป็นกลางให้กับระบบโดยให้หยุดปั้มน้ำเติมเมื่อค่า pH เท่ากับ 6.8 (อัตราการเติมน้ำอยู่ที่ 18.13 ลิตรต่อนาที) โดยระบบใช้เวลา 5 นาที เพื่อการประมวลผลค่าข้อมูล pH ที่ได้จากการวัดค่าทุก 10 วินาที และใช้เวลาอีก 5 นาทีต่อมาเพื่อการปรับสภาพค่า pH ในน้ำให้อยู่ในช่วง 6.7 ถึง 6.9

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. และการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. ในช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโตของสาหร่าย ระหว่างการเพาะเลี้ยงแบบเปิดและการเพาะเลี้ยงแบบระบบปิดที่มีการควบคุมเวลาในการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน การทดลองได้กำหนดและควบคุมปัจจัยเริ่มต้นต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนน้ำหัวเชื้อสาหร่ายและอัตราส่วนผสมอาหารของสาหร่าย ฯลฯ ในอัตราส่วนเดียวกันทุกการทดลอง ในขณะที่ปัจจัยสภาพแวดล้อมของระบบเปิดและระบบปิด (เช่น การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของ CO₂ ในน้ำเพาะเลี้ยงและการให้แสงสีขาจาก SMDs LED ในระบบปิด) เป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

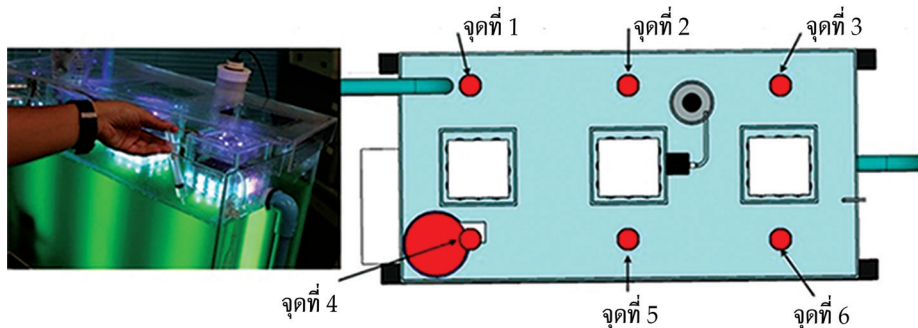
1. ทดลองเพาะเลี้ยงแบบเปิดใช้แสงแดดตามธรรมชาติ ภายใต้สภาพแวดล้อมตามฤดูกาล โดยไม่มีการควบคุมการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

การทดลองเพาะเลี้ยงระบบเปิดในภาชนะบรรจุซึ่งเป็นถังพลาสติกใส่น้ำเพาะเลี้ยง 30 ลิตร ภายใต้แสงแดดตามธรรมชาติและสภาพแวดล้อมตามฤดูกาล โดยการให้อาหารเป็นปุ๋ยยูเรียอัตราส่วน 2 ช้อนชา และปุ๋ยนาอัตราส่วน 1 ช้อนชา ต่อน้ำ 20 ลิตร และอัตราส่วนน้ำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. 1 ลิตรต่อน้ำ 7 ลิตร เก็บตัวอย่างสาหร่าย วัดค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยง และวัดอุณหภูมิในน้ำทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน ไม่มีการควบคุมการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

2. ทดลองเพาะเลี้ยงแบบระบบปิดด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงระหว่างค่า pH 6.7 และ 6.9 ทุก 1 ชั่วโมง และทดลองปรับลดเวลาการควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้เป็นการควบคุม ทุก ๆ 10 นาที

การทดลองเพาะเลี้ยงแบบระบบปิดด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยง 40 ลิตร ให้อยู่ในช่วงระหว่างค่า pH 6.7 และ 6.9 ทำการวัดค่า pH เพื่อการควบคุมให้ค่า pH อยู่ในช่วงตามเงื่อนไขและเวลาที่ถูกกำหนด โดยการทดลองเริ่มต้นจากการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพาะเลี้ยงให้มีค่าเท่ากับ 6.7 ให้อาหารเป็นปุ๋ยยูเรียอัตราส่วน 2 ช้อนชา และปุ๋ยนาอัตราส่วน 1 ช้อนชาต่อน้ำ 20 ลิตร อัตราส่วนน้ำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. 1 ลิตรต่อน้ำ 7 ลิตร ทำการเพาะเลี้ยงภายใต้แสงสีขาที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงต่อวันที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างสาหร่ายจาก 6 พื้นที่ภายในระบบตู้เพาะเลี้ยง และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน

การศึกษ้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นการนับจำนวนประชากรของเซลล์สาหร่ายจากการมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ โดยสู่ม้วนน้ำในตู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้ง 6 พื้นที่มาหยดลงบนแผ่นฮีมาไซโตมิเตอร์ (Hemocytometer Counting Chamber) แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของจำนวนเซลล์สาหร่ายทั้ง 6 พื้นที่ ดังรูปที่ 5 วิธีการนี้สามารถคำนวณผลออกมาได้เป็นจำนวนเซลล์สาหร่ายต่อปริมาตร (เซลล์/มิลลิลิตร)



(ก) มุมมองด้านบนของตู้เพาะเลี้ยงที่แสดงพื้นที่ที่สู่ม้วนเก็บตัวอย่างสาหร่าย เพื่อคำนวณหาจำนวนเซลล์สาหร่ายต่อปริมาตร



(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อนับจำนวนของเซลล์สาหร่ายบนแผ่นฮีมาไซโตมิเตอร์ รูปที่ 5 การนับจำนวนเซลล์สาหร่ายต่อปริมาตรโดยใช้วิธีการนับจำนวนเซลล์สาหร่ายบนแผ่นฮีมาไซโตมิเตอร์

ผลการทดลองและวิจารณ์

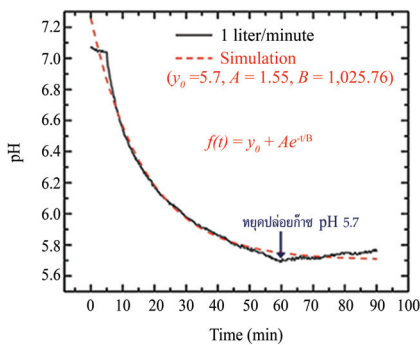
1. ผลการทดสอบระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.1 ผลการทดสอบและการสอบเทียบโพรบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH

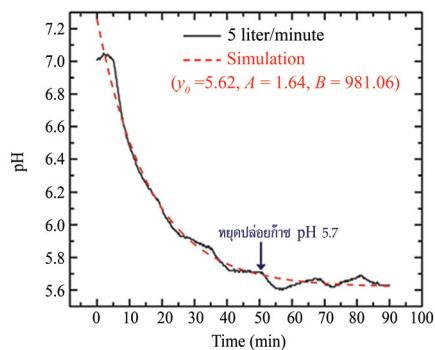
จากผลการสอบเทียบโพรบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า pH กับสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่ามาตรฐาน pH 6.86 ซึ่งทำการตรวจวัดค่า pH ต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที และนำค่า pH ที่ตรวจวัดได้มาหาค่าเฉลี่ย พบว่าค่า pH ที่โพรบเซนเซอร์วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า pH 6.86 อยู่ 0.3 จึงได้ทำการปรับชดเชยในโปรแกรมเพื่อให้ได้ค่า pH ที่ตรงกับค่ามาตรฐาน

1.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในน้ำ กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในน้ำ

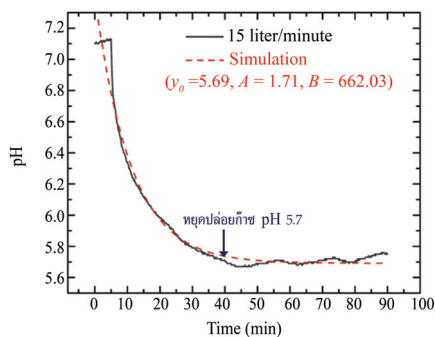
จากผลการทดสอบการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำพบว่า อัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 ลิตรต่อนาที ใช้เวลา 60 นาที สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ 7.1 จนถึงค่า 5.7 อัตราการลดลงของค่า pH สามารถอธิบายได้โดยฟังก์ชัน $f(t) = y_0 + Ae^{-t/B}$ ซึ่งในกรณีนี้เมื่อทำการจำลองด้วยฟังก์ชัน *Exponential Decay* จะมีค่า $y_0 = 5.7$, $A = 1.55$, $B = 1,025.76$ ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) กรณีอัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 5 ลิตรต่อนาที ใช้เวลา 50 นาที ในการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ 7.1 จนถึงค่า 5.7 และมีค่า $y_0 = 5.62$, $A = 1.64$, $B = 981.06$ ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) และกรณีอัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 15 ลิตรต่อนาที ใช้เวลา 40 นาที ในการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ 7.1 จนถึงค่า 5.7 และมีค่า $y_0 = 5.69$, $A = 1.71$, $B = 662.03$ ดังแสดงในรูปที่ 6(ค) การจำลองด้วยฟังก์ชัน *Exponential Decay* เทียบกับผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี พบความสัมพันธ์แบบแปรผกผันระหว่างพารามิเตอร์ B กับอัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งพิจารณาในช่วงหลังจากการหยุดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ในกรณีที่ใช้อัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 ลิตรต่อนาที มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่ให้ค่าความเป็นกรดเกินกว่าค่า 5.7 น้อยที่สุด (Minimum Overshoot)



(ก) 1 ลิตรต่อนาที



(ข) 5 ลิตรต่อนาที

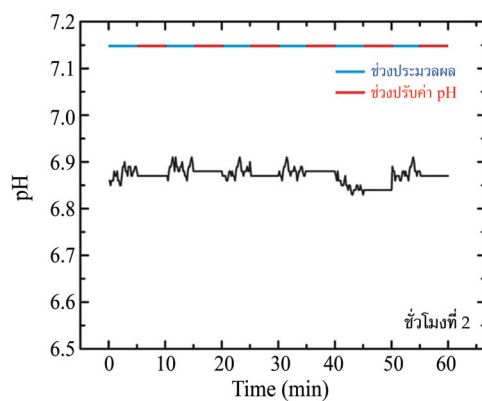
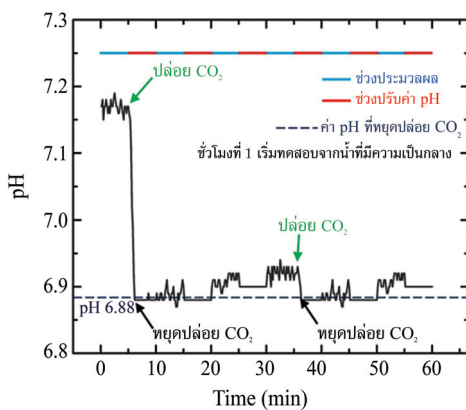


(ค) 15 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 6 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในน้ำเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.3 ผลทดสอบโปรแกรมและทดลองเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างในน้ำ เพื่อทดสอบระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

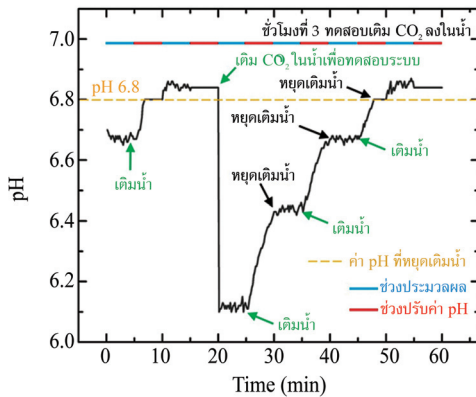
จากการทดสอบระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ สำหรับการเพาะเลี้ยงโดยการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างพบว่า ในช่วงชั่วโมงที่ 1 จากน้ำที่มีสภาวะค่า pH เป็นกลาง ระบบสามารถทำการปรับให้ค่า pH ของน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วง 6.7 ถึง 6.9 ภายในเวลาประมาณ 5 นาที โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ในชั่วโมงที่ 2 ทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงต่อเนื่องจากชั่วโมงที่ 1 ซึ่งพบว่า ระบบสามารถรักษาสภาวะการเปลี่ยนค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ช่วง 6.7 ถึง 6.9 ไว้ได้โดยไม่มีการเติม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือน้ำที่มีความเป็นกลางให้กับน้ำเพาะเลี้ยง ดังแสดงในรูปที่ 7(ข) ในชั่วโมงที่ 3 ทดสอบเปลี่ยนสภาพน้ำให้เป็นกรดโดยใช้การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทำให้ค่า pH ลดลงเป็น 6.1 ซึ่งระบบสามารถทำการปรับให้ค่า pH ของน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วง 6.7 ถึง 6.9 ภายในเวลาประมาณ 30 นาที โดยการปั๊มเติมน้ำที่มีความเป็นกลางให้กับน้ำเพาะเลี้ยง ดังแสดงในรูปที่ 7(ค) ชั่วโมงที่ 4 ทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงต่อจากชั่วโมงที่ 3 ซึ่งพบว่าระบบสามารถรักษาสภาวะค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ช่วง 6.7 ถึง 6.9 ไว้ได้โดยมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้กับน้ำเพาะเลี้ยงในช่วงนาที่ที่ 55 ดังแสดงในรูปที่ 7(ง) และในช่วงเวลาชั่วโมงที่ 5 เปลี่ยนสภาพน้ำ เพาะเลี้ยงให้เป็นด่างโดยใช้การเติมน้ำปูนขาวทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 7.88 ซึ่งระบบสามารถปรับให้ค่า pH ของน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วง 6.7 ถึง 6.9 ภายในเวลาประมาณ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 7(จ)



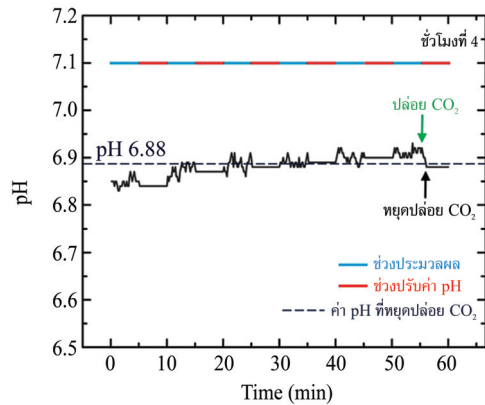
(ก) ชั่วโมงที่ 1 เริ่มจากน้ำที่มีค่า pH เป็นกลาง

(ข) ชั่วโมงที่ 2

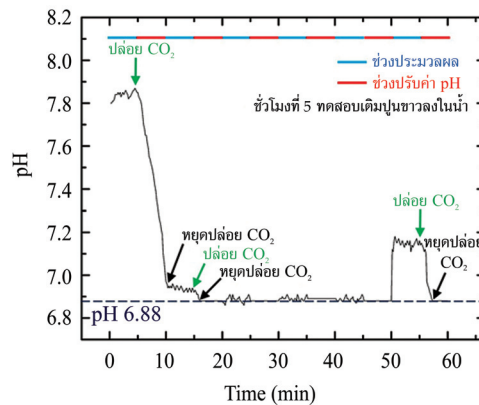
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เมื่อทำการทดสอบเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำ



(ค) ชั่วโมงที่ 3 ทดสอบทำให้น้ำในระบบมีความเป็นกรด



(ง) ชั่วโมงที่ 4



(จ) ชั่วโมงที่ 5 ทดสอบทำให้น้ำในระบบมีความเป็นด่าง

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เมื่อทำการทดสอบเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำ (ต่อ)

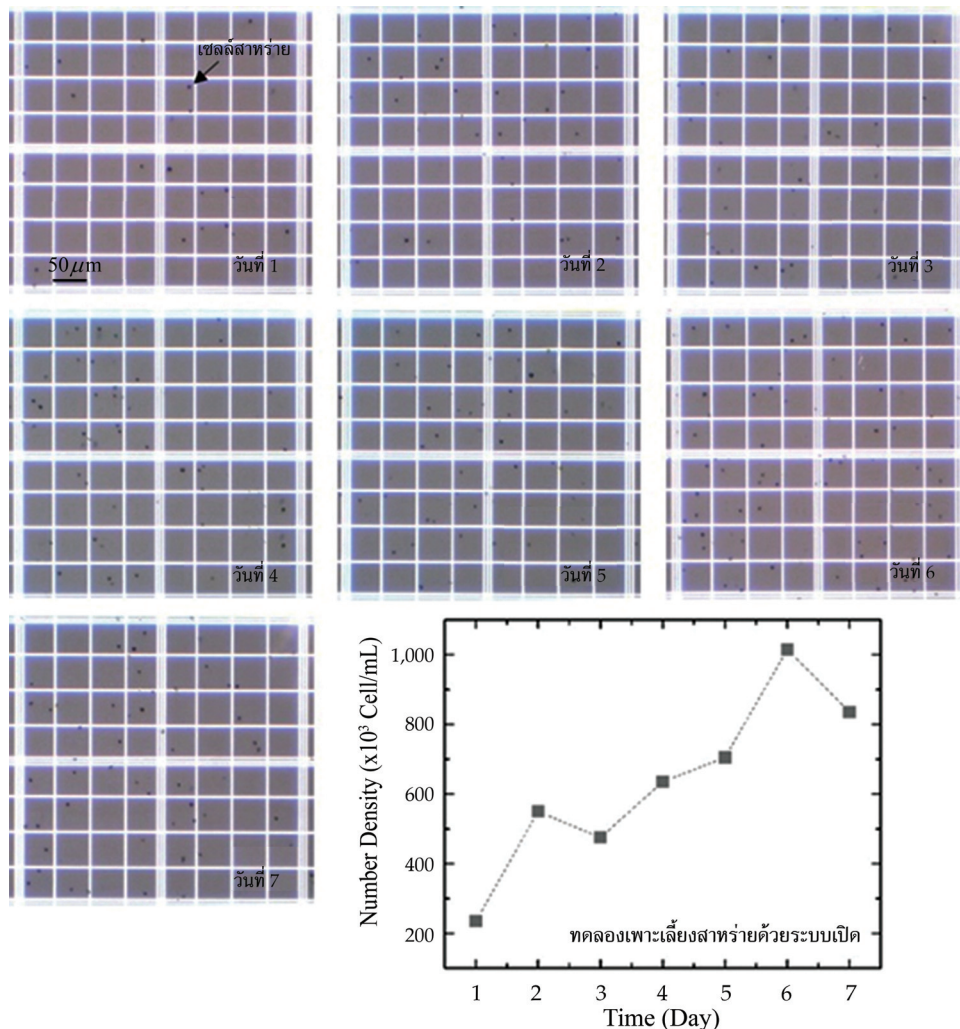
2. ผลการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย

2.1 ผลการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยแบบเปิด

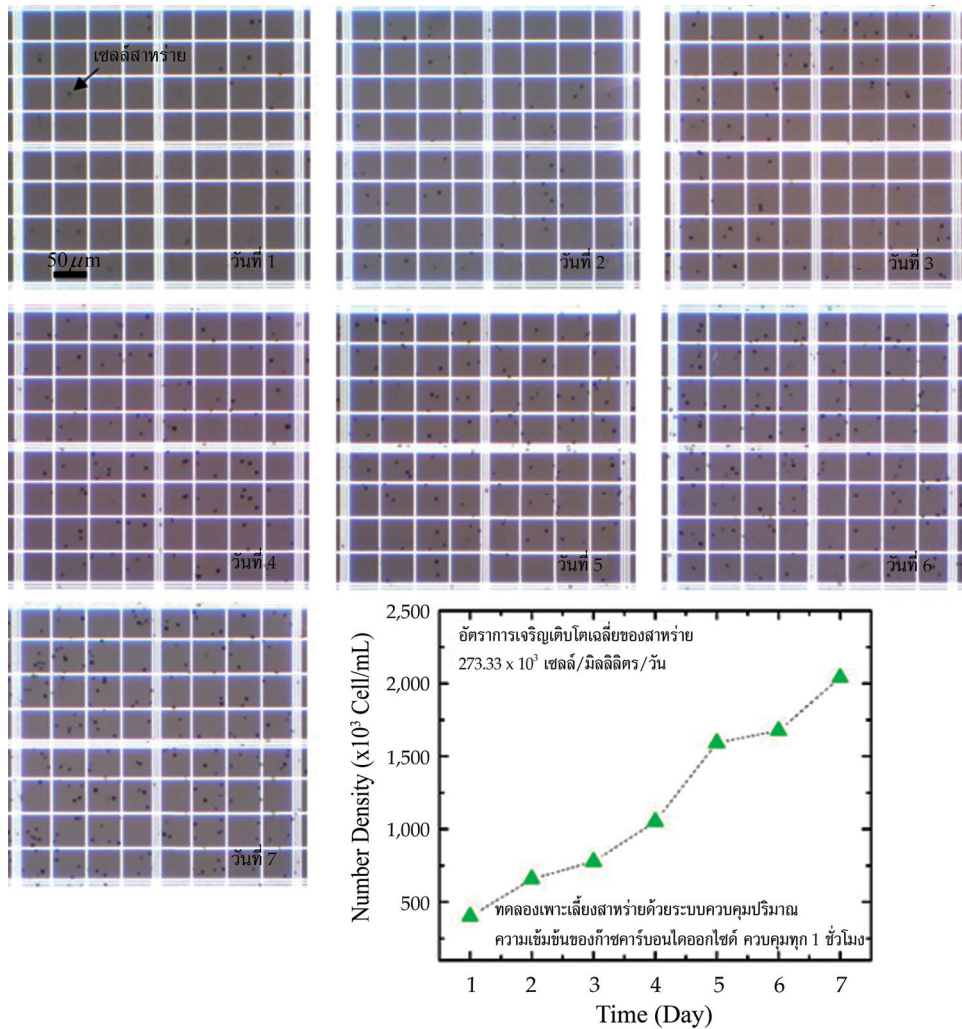
การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยแบบเปิดใช้แสงแดดตามธรรมชาติ ภายใต้สภาพแวดล้อมตามฤดูกาล โดยไม่มีการควบคุมการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ผลการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายในช่วงวันที่ 1 ถึง 6 มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 195×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน เริ่มจากจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย 235×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร จนถึง $1,015 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร และลดลงเป็น 835×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร ในวันที่ 7 ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของระยะการตาย (Death Phase) ของสาหร่าย และเป็นระยะที่มีการหยุดการเจริญเติบโตและเริ่มมีอัตราการตายเนื่องจากธาตุอาหารหมด และมีของเสียเกิดขึ้นทำให้สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต [19] โดยภาพแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และกราฟแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย สำหรับการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบเปิดแสดงดังรูปที่ 8

2.2 ผลการทดลองเพาะเลี้ยงแบบระบบปิดด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงระหว่างค่า pH 6.7 และ 6.9 ทุก 1 ชั่วโมง และ 10 นาที

การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงระหว่างค่า pH 6.7 และ 6.9 ทุก 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายในช่วงวันที่ 1 ถึง 7 มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 277.33×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน เริ่มจากจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย 400×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร จนถึง $2,040 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร โดยภาพแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และกราฟแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายสำหรับการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 9

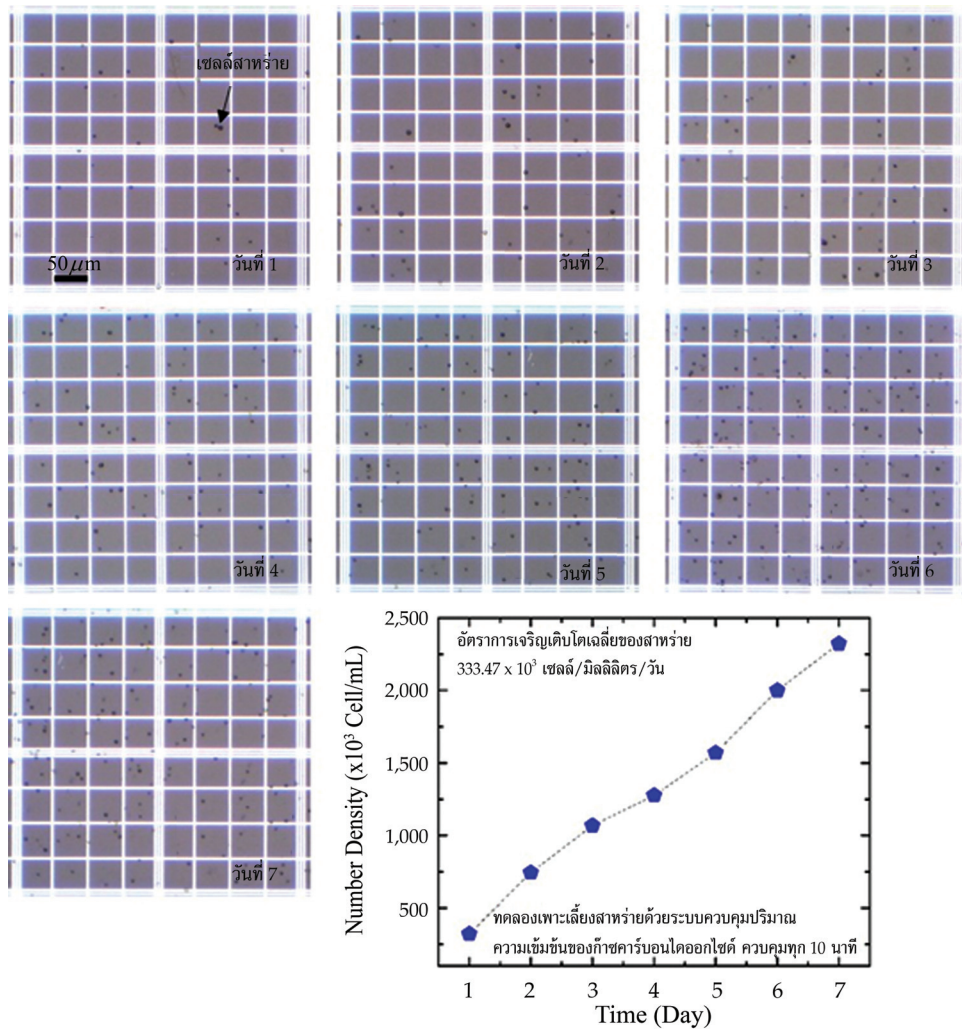


รูปที่ 8 จำนวนความหนาแน่นสาหร่ายบนแผ่นฮีมาไซโตมิเตอร์ที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สำหรับการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยแบบเปิด



รูปที่ 9 จำนวนความหนาแน่นสาหร่ายบนแผ่นซีมาไซโตมิเตอร์ที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สำหรับการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงทุก 1 ชั่วโมง

การทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงระหว่างค่า pH 6.7 และ 6.9 ทุก 10 นาที ผลการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายในช่วงวันที่ 1 ถึง 7 มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 333.47×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน เริ่มจากจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย 321.67×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร จนถึง $2,322.5 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร โดยภาพแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และกราฟแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย สำหรับการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 จำนวนความหนาแน่นสาหร่ายบนแผ่นซีมาไฮโดมิเตอร์ที่ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สำหรับการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงทุก 10 นาที

จากกราฟแสดงจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย *Chlorella* sp. สำหรับการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยแบบเปิดและระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบคุมค่า pH ในน้ำเพาะเลี้ยงที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 - 10 แสดงให้เห็นช่วงระยะการเจริญเติบโตของสาหร่ายในช่วงระยะเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Phase) [19] ซึ่งเป็นระยะที่สาหร่ายมีการเพิ่มจำนวนเซลล์และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบผลจำนวนความหนาแน่นสาหร่าย ระหว่างการเลี้ยงแบบเปิดและการเลี้ยงด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายในช่วงสิ้นสุดระยะการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นได้ถึง 2 เท่า และ 2.3 เท่า จาก $1,015 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร เพิ่มขึ้นเป็น $2,040 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร และ $2,322.5 \times 10^3$ เซลล์/มิลลิลิตร

อีกทั้งอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นได้ถึง 1.4 เท่า และ 1.7 เท่า จากอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย 195×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน เพิ่มขึ้นเป็น 277.33×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน และ 333.47×10^3 เซลล์/มิลลิลิตร/วัน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการควบคุมและการเติมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำเพาะเลี้ยงให้อยู่ในช่วงประมาณค่า pH 6.7 ถึง 6.9 ให้ได้มากที่สุดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างในช่วงดังกล่าวจะมี Dissolved Inorganic Carbon ในรูปของ CO_2 และ HCO_3^- ในปริมาณใกล้เคียงกัน การควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง จึงมีความสำคัญในการเพาะเลี้ยง เพื่อให้สาหร่ายขนาดเล็กสามารถดูดซึมและนำ CO_2 มาใช้ประโยชน์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เพิ่มขึ้น [20] จึงส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นเพิ่มขึ้น อีกทั้งในการพิจารณาจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายในช่วงวันที่ 6 และ 7 ของการเลี้ยงแบบเปิดที่แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของสาหร่ายเริ่มเข้าสู่ช่วงระยะการตาย (Death Phase) เปรียบเทียบกับจำนวนความหนาแน่นสาหร่ายในช่วงวันที่ 6 และ 7 ของการเลี้ยงด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบคุมค่า pH ที่แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของสาหร่ายยังอยู่ในช่วงระยะเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นการเลี้ยงด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยังมีผลทำให้เกิดการขยายช่วงการเจริญเติบโตของสาหร่าย แสดงให้เห็นถึงการมีสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงที่เหมาะสม ในด้านของค่าความเป็นกรดต่าง คาร์บอนไดออกไซด์ แสง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง และเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการศึกษาอิทธิพลของแสงแอลอีดีที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายคลอเรลล่า [18] พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกันในการณีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ในระบบปิดภายใต้แสงสีขาวจาก SMDs LED ที่ระดับความเข้มแสง 20 ถึง $60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ให้การเจริญเติบโตที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแสงสีอื่นที่ระดับความเข้มแสงเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถนำจำนวนความหนาแน่นและอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายจากผลการศึกษาดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากมีความแตกต่างกันในโครงสร้างของระบบเพาะเลี้ยง โครงสร้างชุดให้แสงสว่าง ปัจจัยเริ่มต้นในการทดลอง และค่า pH ที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งเวลาและวิธีการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของ CO_2 ในน้ำเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน

บทสรุป

ผลการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปัจจัยที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในด้านการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และจำนวนความหนาแน่นของสาหร่าย การเพาะเลี้ยงด้วยระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ได้จำนวนความหนาแน่นสาหร่ายในช่วงสุดท้ายของระยะการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นได้ถึง 2.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงระบบเปิดแบบธรรมชาติ และได้อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นได้ถึง 1.7 เท่า รวมทั้งมีผลต่อการช่วยขยายช่วงระยะการเจริญเติบโตให้ยาวขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณอาจารย์โชคมงคล นาคี ที่สนับสนุนให้คำปรึกษาด้านเทคนิค นายพีรพงษ์ ทับทิม นางสาวชนิสรา เสมมหาศักดิ์ และนางสาวมัลลิกา ถาคำดีบ สนับสนุนการปฏิบัติการด้านเทคนิค และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ทำงานวิจัยและเก็บข้อมูล และงานวิจัยนี้ขอขอบคุณ สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

References

- [1] Sumriddetchkajorn, O. (2010). Fuel from Algae. **Materials Technology Journal (National Metal and Materials Technology Center)**. Vol. 61, pp. 29-35
- [2] Leesing, R. and Nontaso, N. (2013). **Biodiesel Production from High Lipid Green Microalgae Isolated from Treshwater in the Area of Khon Kaen Province**. Research Report, Faculty of Science, Khon Kaen University
- [3] Ruangsomboon, S., Choochote, S., Taveekijakarn, P., and Ganmanee, M. (2012). **Strain Selection and Mass Culture of High Lipid Content Algae for the Feasibility of Biofuel Production**. Research Report, Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- [4] Chamchoi, N. (2014). Microalgae: Cultivation and Utilization. **HCU Journal**. Vol. 34, pp. 169-183
- [5] Fleischer, C., Becker, S., and Eigenberger, G. (1996). Detailed Modeling of the Chemisorption of CO₂ into NaOH in a Bubble Column. **Chemical Engineering Science**. Vol. 51, No. 10, pp. 1715-1724. DOI: 10.1016/0009-2509(96)00030-9
- [6] Singh, R. N. and Sharma, S. (2012). Development of Suitable Photobioreactor for Algae Production - A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 16, Issue 4, pp. 2347-2353. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.026
- [7] Richmond, A. (2004). **Handbook of Microalgal Mass Culture**. Iowa: Iowa State Press
- [8] Becker, E. W. and Venkatanaman, L. V. (1982). **Biotechnology and Exploitation of Algae: The Indian Approach**. Eschborn: German Agency for Technical Cooperation (GTZ). p. 216
- [9] Kumar, H. D. and Singh, H. N. (1979). **A Textbook on Algae**. London: The Macmillan Press Ltd
- [10] Choi, C. S., Choi, W. Y., Kang, D. H., and Lee, H. Y. (2014). Production of Biodiesel from *Chlorella* sp. Enriched with Oyster Shell Extracts. **BioMed Research International**. Vol. 2014, No. 105728, pp. 1-8. DOI: 10.1155/2014/105728
- [11] Choochote, W. (2013). Antibacterial Activity of *Chlorella* spp. Extract against Pathogenic Bacteria. **Journal of Science Ladkrabang**. Vol. 22, No. 2, pp. 102-114

- [12] Sri-uam, P., Linthong, C., Powtongsook, S., Kungvansaichol, K., and Pavasant, P. (2015). Manipulation of Biochemical Compositions of *Chlorella* sp. **Engineering Journal**. Vol. 19, No. 4, pp. 13-24. DOI: 10.4186/ej.2015.19.4.13
- [13] Steenblock, D. (1987). **Chlorella Natural Medicinal Algal**. California: Aging Research Institute
- [14] Yamali, Y., Phoopat, S., Sutjaritvongsanon, K., Yongmanitchai, W., and Patarakulpong, P. (1984). Utilization of *Chlorella* sp. from Waste Water in Soy-Milk Plant for Feeding on *Moina* Macrocopa. In **Proceedings of the 22nd Conference: Fisheries Section**. Bangkok, Kasetsart University. pp. 396-402
- [15] Shi, J., Podola, B., and Melkonian, M. (2007). Removal of Nitrogen and Phosphorus from Wastewater Using Microalgae Immobilized on Twin Layers: An Experimental Study. **Journal of Applied Phycology**. Vol. 19, pp. 417-423. DOI: 10.1007/s10811-006-9148-1
- [16] Borowitzka, M. A. (1999). Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters. **Journal of Biotechnology**. Vol. 70, pp. 313-321
- [17] Bošnjaković, M. (2013). Biodiesel from Algae. **Journal of Mechanics Engineering and Automation**. Vol. 3, Number 3, pp. 179-188
- [18] Kaikha, S. (2016). **The Effect of LED Lighting on the Growth Rate of *Chlorella* sp.** B.Sc. Dissertation School of Renewable Energy, Maejo University
- [19] Wisansuwannakorn, R. (2005). **Optimal Conditions for Growth of *Chlorella* sp. by Using Carron Dioxide as a Carbon Source in Photobioreactor**. M.Sc. Dissertation, Faculty of Science, Chulalongkorn University
- [20] Raksasak, W., Pichiansoontorn, Y., Panyapinyopol, B., Malakul, P., and Pavasant, P. (2012). Accelerating Microalgal Growth with CO₂ Transformation. **Engineering Journal**. Vol. 4, pp. 15-26

วิธีการกำหนดขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดโดยคำนึงถึงความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า

A Method for Sizing and Siting of an Energy Storage System in Microgrid Concerning Generation Adequacy

กิตติคุปต์ คุณโท¹ และดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์^{1*}

Kittikhup Khuntho¹ and Dulpichet Rerkpreedapong^{1*}

Received: October 21, 2019; Revised: October 31, 2019; Accepted: November 7, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด โดยคำนึงถึงมูลค่าความเสียหายเมื่อโหลดถูกปลดออก เนื่องจากค่ากำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอ ค่าใช้จ่ายส่วนนี้ถูกนำมาพิจารณาร่วมกับค่าใช้จ่ายรวมที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของไมโครกริด ผลการวิจัยพบว่าขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการคำนวณแบบเดิมสำหรับทุกตำแหน่งบัส เพราะขนาดที่ใหญ่ขึ้นช่วยลดมูลค่าความเสียหายเมื่อโหลดถูกปลดออก ขณะที่วิธีการแบบเดิมไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายส่วนนี้ จึงปรากฏขนาดที่เหมาะสมเล็กกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดเป็นอย่างมาก ในช่วงที่ระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะประจุ หากตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ มาก จะทำให้ไมโครกริดมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสูง และจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะคายประจุ หากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดที่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากกริดจะถูกส่งไปยังกลุ่มโหลดดังกล่าวลดลง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดมีค่าลดลง และยังช่วยลดปริมาณโหลดที่ถูกปลดออกอันเนื่องมาจากกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพออีกด้วย สุดท้ายนี้ประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบเดิม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าต่ำกว่าค่าใช้จ่ายรวมที่ได้จากวิธีการแบบเดิม

คำสำคัญ : การหาขนาด; การหาตำแหน่ง; ระบบกักเก็บพลังงาน; ไมโครกริด; ความเชื่อถือได้; พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

* Corresponding Author E - mail Address: dulpichet.r@ku.ac.th

Abstract

This paper presents a method for sizing and siting of an Energy Storage System (ESS) in microgrid concerning the cost of lost load due to generation inadequacy. This cost is considered together with the typical total cost of microgrid, usually including the investment cost of ESS and all operation costs of microgrid. From the study results, the suitable size of an ESS resulted from the proposed method is larger than that given by the conventional approach for any selected bus of microgrid because it helps to decrease the cost of lost load. On the other hand, existing methods commonly overlook the generation adequacy issue, and result in a smaller size than it should be. In addition, it has been found that the location of an ESS significantly affects distribution power losses in microgrid. During a charging period, the ESS located far from the energy sources tends to increase the energy losses of microgrid. This can be more severe when its size is larger because an increased amount of generated power will be fed to the ESS over long distribution lines. In contrast, when the ESS is placed close to major load areas distant from their energy sources, less amount of electrical power from the main grid will be transferred through the distribution lines during a discharging period. It results in a decrease in energy losses, and also reduces the amount of lost load due to generation inadequacy. Finally, the effectiveness of the presented method is assessed by a comparison of the total costs resulted from the proposed method against the conventional method. The results demonstrate that the total cost of microgrid resulted from this method is lower than that given by the traditional approach.

Keywords: Sizing; Placement; Energy Storage System; Microgrid; Reliability; Energy Loss

บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังแบบเดิมดำเนินการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟผ่านโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน โดยมุ่งเน้นไปที่การรักษาสมดุลระหว่างกำลังผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งการไฟฟ้าเองได้มีการปรับปรุงและพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าเรื่อยมา เพื่อสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและให้บริการคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น ผลจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้านี้เองส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ และทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย โดยเฉพาะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระยะทางไกล [1]

อีกทั้งในปัจจุบันมีการนำเอาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Source) มาใช้งานกันมากขึ้น เนื่องจากการลดลงอย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงฟอสซิล และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความไม่ต่อเนื่องในการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากความไม่แน่นอนของสภาพแวดล้อมนั้น ๆ [2]

จากปัญหาข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดเกี่ยวกับไมโครกริด (Microgrid) ขึ้น ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่สามารถทำงานโดยเชื่อมต่อกับกริด หรือแยกตัวเป็นอิสระได้ [3] องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของไมโครกริด คือ ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System, ESS) เป็นระบบที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเก็บสะสมไว้ และสามารถเปลี่ยนกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าจ่ายคืนแก่ไมโครกริดได้ ถูกนำมาใช้งานเพื่อสร้างความยืดหยุ่นให้แก่ไมโครกริด โดยการรักษาสถิตของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการเสริมความมั่นคงให้แก่ระบบและสนับสนุนไมโครกริดให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4]

งานวิจัยที่ผ่านมา การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันออกไป แต่มีวัตถุประสงค์คล้ายกัน คือ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานเพื่อทำให้สมรรถนะด้านหนึ่งด้านใดของระบบมีค่าที่ดีที่สุด เช่น งานวิจัย [5] นำเสนอการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด และยังคงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม อนึ่งจากงานวิจัย [6] พบว่า เมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของไมโครกริดให้ดีขึ้น แต่ต้นทุนและค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน จึงเป็นเรื่องท้าทายที่จะกำหนดขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างสมรรถนะและต้นทุนของระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานโดยพิจารณาสมรรถนะด้านต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ความเชื่อถือได้ รวมถึงต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานของไมโครกริด ทั้งนี้ได้แปลงปริมาณทั้งหมดข้างต้นให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน นั่นคือ ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด (บาท/ปี) และได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธีการแบบเดิม [7] ที่พิจารณาค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดโดยมิได้รวมผลกระทบด้านความเชื่อถือได้เข้าไปด้วย ในการนี้วิธีการที่นำเสนอได้ประเมินผลกระทบด้านความเชื่อถือได้ในรูปของมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงในไมโครกริด เพราะความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่นำเสนอทำให้ได้ระบบกักเก็บพลังงานที่มีขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมอย่างแท้จริง โดยค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ทั้งนี้รายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ได้อธิบายไว้ในระเบียบวิธีวิจัยและผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับไมโครกริด เนื่องจากการเลือกขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสามารถส่งเสริมให้ไมโครกริดทำงานได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุด [4] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบของระบบกักเก็บพลังงานที่มีต่อไมโครกริด

1.1 การประเมินความเชื่อถือได้ของไมโครกริด

งานวิจัยนี้ประเมินความเชื่อถือได้ของไมโครกริดจากตารางความน่าจะเป็นของการสูญเสียกำลังการผลิต (Capacity Outage Probability Table, COPT) ซึ่งเป็นตารางที่แสดงค่าความเป็นไปได้ของกำลังการผลิตจากหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในไมโครกริด โดยทั่วไปแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้าจะมีสถานะการทำงาน 2 สถานะ คือ สถานะเดินเครื่องและหยุดทำงาน ดังนั้น สำหรับไมโครกริดที่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมด M หน่วย ทำให้ตารางความน่าจะเป็นของการสูญเสียกำลังการผลิตของไมโครกริดนั้น ๆ มีสถานะทั้งหมด 2^M สถานะ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญสำหรับสร้างตารางนี้ คือ ค่ากำลังการผลิต (Capacity) และค่าอัตราการขาดข้อง (Forced Outage Rate, FOR) ของแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้าของไมโครกริด

จากผลลัพธ์ที่ได้จากตาราง COPT สามารถนำไปวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของไมโครกริด โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ดัชนีความเชื่อถือได้ 2 ดัชนี คือ ดัชนีความเชื่อถือได้ในแง่ของจำนวนชั่วโมงและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไมโครกริดไม่สามารถจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟได้ใน 1 ปี ซึ่งเกิดจากความต้องการโหลดมีค่ามากกว่ากำลังผลิตในระบบ เรียกว่า ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลด (Loss of Load Expectation, $LOLE$) และพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ (Energy Not Supplied, ENS) มีหน่วยเป็นชั่วโมง/ปี และเมกะวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ [8] แสดงดังสมการที่ (1) - (2)

$$LOLE = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} p_{k,t} (O_k) \quad (1)$$

$$ENS = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} p_{k,t} (O_k) \cdot LS_{k,t} \cdot \Delta t \quad (2)$$

เมื่อ

O_k	คือ	สถานะกำลังผลิต k ของตาราง COPT ซึ่งทำให้ไมโครกริดเกิดเหตุการณ์ไฟดับ (มีค่าเป็น 1 เมื่อกำลังผลิตมีค่าต่ำกว่าโหลด และเป็น 0 เมื่ออยู่ในสภาวะปกติ)
$p_{k,t}$	คือ	ความน่าจะเป็นของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t
$LS_{k,t}$	คือ	โหลดที่ถูกปลดออกเนื่องจากกำลังผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า สำหรับสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)
Δt	คือ	เป็นค่าผลต่างช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา ในกรณีนี้จะพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 1 ชั่วโมง
nK	คือ	จำนวนสถานะของตาราง COPT
nT	คือ	ระยะเวลาทั้งหมด (ชั่วโมง)

การประเมินผลประโยชน์จากความเชื่อถือได้ที่เพิ่มขึ้นของไมโครกริดอันเนื่องมาจากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน จำเป็นต้องพิจารณามูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟกรณีโหลดถูกปลดออกเนื่องจากกำลังการผลิตไม่เพียงพอทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง และแปลงให้อยู่ในรูปของเงิน แล้วจึงนำไป

พิจารณาร่วมกับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่น ๆ เพื่อหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน ตัวแปรตัวนี้ถูกเรียกว่า มูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีไหลดลถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) เป็นผลกระทบที่ไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงกับไมโครกริด แต่สะท้อนถึงความเสียหายทางด้านเศรษฐศาสตร์ของผู้ใช้ไฟในไมโครกริด มีหน่วยเป็นบาท/ปี โดยการคำนวณจำเป็นต้องทราบอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับ (*Interrupted Energy Rate, IER*) ของไมโครกริดเป็นดัชนีที่บ่งบอกว่า หนึ่งหน่วยพลังงานที่หายไปผู้ใช้ไฟมีมูลค่าความเสียหายเท่าไร มีหน่วยเป็นบาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ (3)

$$ECOST = ENS \cdot IER \tag{3}$$

1.2 สมการวัตถุประสงค์สำหรับหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน

การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการวัตถุประสงค์ กล่าวคือ เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดต่ำที่สุด ซึ่งค่าใช้จ่ายรวมดังกล่าวประกอบด้วยต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงาน (*Total Investment Cost of ESS, TIC*) และค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานทั้งหมดของไมโครกริด (*Total Operating Cost of Microgrid, TOC*) [7], [9] - [10] นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังได้เพิ่มมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีไหลดลถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) มาคำนวณรวมด้วย แสดงดังสมการที่ (4)

$$Min \ Total \ cost = TIC + TOC + ECOST \tag{4}$$

TIC คือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงาน มีหน่วยเป็นบาท/ปี เป็นค่าใช้จ่ายจากการลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแก่ไมโครกริด โดย *TIC* ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดกำลัง (*Power Rating, P_{ES,r}*) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ และพิกัดพลังงาน (*Energy Rating, E_{ES,r}*) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์-ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ (5)

$$TIC = \left(\frac{PIC + PCC + DC}{L} + OMC \right) P_{ES,r} + \left(\frac{EIC + BOPC}{L} \right) E_{ES,r} \tag{5}$$

เมื่อ

- PIC* คือ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นพิกัดกำลังไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์)
- PCC* คือ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์)
- DC* คือ ค่าใช้จ่ายในการกำจัด (บาท/เมกะวัตต์)
- OMC* คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (บาท/เมกะวัตต์)
- EIC* คือ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นพิกัดพลังงานไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
- BOPC* คือ ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
- L* คือ อายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน (ปี)

ระบบกักเก็บพลังงานนอกจากในส่วนของอุปกรณ์สำหรับเก็บสะสมพลังงานแล้วนั้น ยังต้องมีระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power Conversion Systems) ซึ่งเป็นอีกองค์ประกอบสำคัญสำหรับแปลงกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบกักเก็บพลังงาน

สำหรับค่าใช้จ่ายในการกำจัด (Disposal Cost, DC) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการกำจัดหรือปลดระบบกักเก็บพลังงานออกจากไมโครกริด เมื่อระบบกักเก็บพลังงานหมดอายุการใช้งานมีหน่วยเป็นบาท/เมกะวัตต์ [10] - [11]

ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (Balance of Plant Cost, $BOPC$) เป็นค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์และระบบสนับสนุนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกักระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันและสวิตช์เกียร์ [10], [12] มีหน่วยเป็นบาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง

TOC คือ ค่าใช้จ่ายรวมที่ครอบคลุมการดำเนินงานทั้งหมดของไมโครกริด ไม่ว่าจะเป็ค่าเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือการรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าจากกริด มีหน่วยเป็นบาท/ปีคำนวณได้จากสมการที่ (6) - (8)

$$TOC = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} P_{k,t} \left(\sum_{PV=1}^{nPV} F_{PV} P_{PV,k,t} + \sum_{WT=1}^{nWT} F_{WT} P_{WT,k,t} + \sum_{g=1}^{nG} F_g P_{g,k,t} I_{g,k,t} + \rho_t P_{Grid,k,t} UY_{k,t} \right) \quad (6)$$

$$P_{g,\min} \cdot I_{g,k,t} \leq P_{g,k,t} \leq P_{g,\max} \cdot I_{g,k,t} \quad (7)$$

$$|P_{Grid,k,t}| \leq P_{Grid,\max} \quad (8)$$

เมื่อ

$P_{PV,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{WT,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{g,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{Grid,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากกริดของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็นบวกเมื่อไมโครกริดนำเข้าไฟฟ้าจากกริด กลับกันมีค่าเป็นลบเมื่อไมโครกริดส่งออกไฟฟ้าคืนกริด, เมกะวัตต์)

F_{PV} คือ ฟังก์ชันต้นทุนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (บาท/เมกะวัตต์)

F_{WT} คือ ฟังก์ชันต้นทุนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (บาท/เมกะวัตต์)

F_g คือ ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (บาท/เมกะวัตต์)

- $I_{g,k,t}$ คือ สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็น 1 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสถานะเดินเครื่อง และมีค่าเป็น 0 เมื่อหยุดทำงาน)
- ρ_t คือ อัตราค่าไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง) ในช่วงเวลา t
- $UY_{k,t}$ คือ สภาวะเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึงของสายจำหน่ายที่เชื่อมต่อกันระหว่างไมโครกริดกับกริดของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็น 1 เมื่อสายจำหน่ายเป็นปกติ และมีค่าเป็น 0 เมื่อเกิดเหตุขัดข้อง)
- $P_{g,max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (เมกะวัตต์)
- $P_{g,min}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (เมกะวัตต์)
- $P_{Grid,max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ทนรับได้ของสายจำหน่ายที่เชื่อมระหว่างไมโครกริดกับกริด (เมกะวัตต์)

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน 2 ชนิด ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง และมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) และกังหันลม (Wind Turbine) สำหรับกำลังไฟฟ้าขาออกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และกังหันลม ณ ช่วงเวลา t สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) - (10) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ [7], [13]

$$P_{PV,k,t} = P_{STC} \frac{G_{k,t}}{G_{STC}} (1 + c(T_{k,t} - T_{STC})) \tag{9}$$

$$P_{WT,k,t} = \begin{cases} 0 & v_{k,t} < v_{CI} \text{ or } v_{k,t} > v_{CO} \\ P_{WT,max} \frac{v_{k,t} - v_{CI}}{v_r - v_{CI}} & v_{CI} \leq v_{k,t} < v_r \\ P_{WT,max} & v_r \leq v_{k,t} \leq v_{CO} \end{cases} \tag{10}$$

เมื่อ

- P_{STC} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition, STC) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (เมกะวัตต์)
- $G_{k,t}$ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (วัตต์/ตารางเมตร)
- G_{STC} คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐานมีค่า 1,000 วัตต์/ตารางเมตร
- $T_{k,t}$ คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (องศาเซลเซียส)
- T_{STC} คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐานมีค่า 25 องศาเซลเซียส

c	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิมีค่าประมาณ 0.0047 วัตต์/ องศาเซลเซียส
$P_{WT,max}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลม (เมกะวัตต์)
$v_{k,t}$	คือ	ความเร็วลมของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมตร/วินาที)
v_{CI}	คือ	ความเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (เมตร/วินาที)
v_r	คือ	พิกัดความเร็วลมของกังหันลม (เมตร/วินาที)
v_{CO}	คือ	ความเร็วลมหยุดทำงานของกังหันลม (เมตร/วินาที)

การประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการติดตั้ง [2] งานวิจัยนี้นำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้งานรูปแบบการตัดโหลดค่ายอด (Peak Shaving) โดยจะมองระบบกักเก็บพลังงานเป็นโหลดเมื่อไมโครกริดมีกำลังผลิตรวมมากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า และมองระบบกักเก็บพลังงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อไมโครกริดมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง ซึ่งสมการสำหรับจำลองระบบกักเก็บพลังงาน เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายกำลังไฟฟ้า และระดับพลังงานสะสมคงเหลือภายในระบบกักเก็บพลังงาน แสดงดังสมการที่ (11) - (13)

$$-P_{ES,r} \leq P_{ES,k,t} \leq k_0 \cdot P_{ES,r} \quad (11)$$

$$SOC_{k,t} = SOC_{k,t-1} - P_{ES,k,t} \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{k,t} \leq SOC_{\max} \quad (13)$$

เมื่อ

$P_{ES,k,t}$	คือ	กำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)
k_0	คือ	ความลึกของการคายประจุ
$SOC_{k,t}$	คือ	ระดับพลังงานสะสมคงเหลือของระบบกักเก็บพลังงานของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
SOC_{\min}	คือ	ระดับพลังงานสะสมคงเหลือต่ำสุดที่ระบบกักเก็บพลังงานต้องรักษาไว้ (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
SOC_{\max}	คือ	ระดับพลังงานสะสมคงเหลือสูงสุดที่ระบบกักเก็บพลังงานรับได้ (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)

กำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงาน ($P_{ES,k,t}$) มีค่าเป็นบวกเมื่อระบบกักเก็บพลังงานอยู่ในสถานะคายประจุ (Discharging Mode) ในทางกลับกันมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ในสถานะคายประจุ (Charging Mode) และมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (Idle Mode)

1.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริด

งานวิจัยนี้ใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) เพื่อหากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) ของไมโครกริด ซึ่งวิธีนี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน [14] สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายที่เชื่อมต่อระหว่างบัส a และบัส b ($P_{loss,ab}$) ได้ ดังสมการที่ (14)

$$P_{loss,ab,k,t} = P_{ab,k,t} + P_{ba,k,t} \quad (14)$$

เมื่อ

$P_{ab,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส a ไปยังบัส b ที่สถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{ba,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส b ไปยังบัส a ที่สถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่สถานะกำลังผลิต k ณ ช่วงเวลา t ($P_{loss,k,t}$) คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายทั้งหมดของไมโครกริดมีหน่วยเป็นเมกะวัตต์แทนด้วยสมการที่ (15)

$$P_{loss,k,t} = \sum_{all\ ab} P_{loss,ab,k,t} \quad (15)$$

2. ขั้นตอนการหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน

- กระบวนการเริ่มต้นจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า โดยป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของไมโครกริด อินพุตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง ความเร็วลม และความต้องการใช้ไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 8,760 ชั่วโมง (1 ปี) ผ่านโปรแกรม MATLAB ทั้งกรณีก่อนและหลังการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งมีขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่แตกต่างกันในไมโครกริด

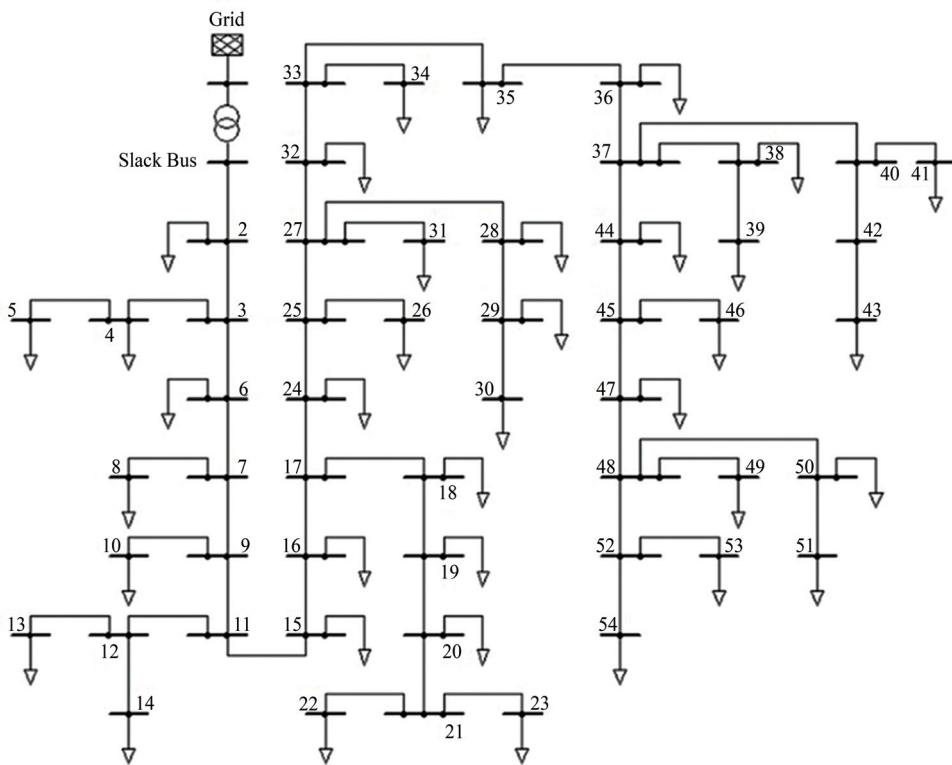
- ในการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน ให้เลือกติดตั้งที่บัสใดบัสหนึ่งในไมโครกริดก่อน ซึ่งขนาดของระบบกักเก็บพลังงานประกอบด้วย 2 ค่าพิกัด คือ พิกัดพลังงานและพิกัดกำลัง โดยเริ่มปรับค่าจากขนาด 1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และ 1 เมกะวัตต์ ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนปรากฏขนาดที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งบัสนั้น ๆ โดยขนาดที่เหมาะสมนั้น คือ ค่าพิกัดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นให้ทำกระบวนการนี้ซ้ำ โดยเลือกติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่บัสอื่นจนครบทุกบัสของไมโครกริด

- เมื่อได้ค่าขนาดที่เหมาะสมสำหรับทุกตำแหน่งบัสติดตั้งแล้วจึงนำค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาว่าขนาดที่เหมาะสม ณ ตำแหน่งบัสใด ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดมีค่าต่ำที่สุด แล้วจึงเลือกขนาดและตำแหน่งบัสนั้นเป็นขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด

ผลการศึกษา

ไมโครกริดที่นำมาใช้ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้เป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 54 บัส ดังรูปที่ 1 มีระบบผลิตไฟฟ้าภายในประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยค่าพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ในการศึกษานี้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 1 เมกะวัตต์ แรงดันไฟฟ้าฐาน 22 กิโลโวลต์ สายจำหน่ายที่เชื่อมระหว่างไมโครกริดกับกริดสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ 6.47 เมกะวัตต์ และมีค่าอัตราการชดช้อง (FOR) เท่ากับ 0.0081527 กำหนดให้ผู้ใช้ไฟของไมโครกริดนี้มีค่า *IER* เท่ากับ 91,700 บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง [11]



รูปที่ 1 โครงสร้างของไมโครกริดที่ใช้ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงาน [9], [11]

<i>PIC</i>	<i>EIC</i>	<i>PCC</i>	<i>OMC</i>	<i>DC</i>	<i>BOPC</i>	<i>L</i>
(ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	(ล้านบาท/ เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	(ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	(ล้านบาท/ เมกะวัตต์/ปี)	(ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	(ล้านบาท/ เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	(ปี)
10.69	11.03	5.87	0.82	0.05	0.98	30

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ ในไมโครกริด [8]

ประเภท	เครื่องกำเนิด	เครื่องกำเนิด	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า
	ไฟฟ้า 1	ไฟฟ้า 2	พลังงานแสงอาทิตย์	พลังงานลม
ต้นทุนการผลิต (บาท/หน่วย)	2.08	2.23	-	-
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)	3	1	6	1
กำลังไฟฟ้าต่ำสุด (เมกะวัตต์)	1	0.3	0	0
Ramp Up Rate (เมกะวัตต์)	3	1	-	-
Ramp Down Rate (เมกะวัตต์)	3	1	-	-
Minimum Up Time (ชั่วโมง)	1	1	-	-
Minimum Down Time (ชั่วโมง)	1	1	-	-
FOR	0.06	0.06	0.03	0.04
ตำแหน่งบัสติดตั้ง	3	6	14	44

ตารางที่ 3 ตัวอย่างขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อติดตั้งที่บัสต่าง ๆ ของไมโครกริด

บัส	พิกัด	พิกัด	พลังงาน	LOLE	ENS	ECOST	ค่าใช้จ่ายรวม	ค่าใช้จ่าย
	กำลัง	พลังงาน	ไฟฟ้าสูญเสีย					
	(เมกะวัตต์)	(เมกะวัตต์- ชั่วโมง)	(เมกะวัตต์- ชั่วโมง)	ปี)	ชั่วโมง)	ปี)	(ล้านบาท/ ปี)	(ล้านบาท/ ปี)
ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน			2189.63	39.47	58.84	5.40	146.25	151.64
กรณีพิจารณาความเชื่อถือได้ร่วมด้วย								
11	2.20	10.10	2124.13	21.02	26.77	2.46	146.53	148.99
25	2.00	9.90	2121.56	21.57	27.24	2.50	146.28	148.78
37	1.70	9.00	2222.79	22.34	27.47	2.52	145.82	148.33
44	1.70	9.00	2238.28	22.31	27.41	2.51	145.83	148.34
54	1.70	8.90	2365.02	22.61	27.67	2.54	145.93	148.47
การคำนวณแบบเดิม (กรณีไม่พิจารณาความเชื่อถือได้)								
11	0.70	3.70	2157.24	31.26	45.01	4.13	145.90	150.03
25	0.70	3.90	2143.85	30.98	43.68	4.01	145.76	149.77
37	0.90	5.00	2142.90	29.21	39.72	3.64	145.38	149.02
44	0.80	4.40	2141.24	29.97	40.45	3.71	145.40	149.11
54	0.80	4.40	2171.81	29.96	41.25	3.78	145.42	149.20

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อไมโครกริดไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน มีค่าคาดการณ์ที่ จะสูญเสียโหลด 39.47 ชั่วโมง/ปี และมีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ 58.84 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นมูลค่าความเสียหายเท่ากับ 5,395,911.89 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นตลอดปี

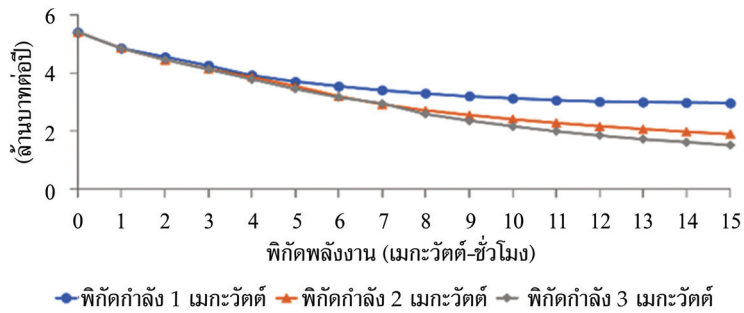
2,189.63 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 146,245,347.48 บาท/ปี ดังนั้น เมื่อนำมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟ ซึ่งสะท้อนถึงความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า มารวมกับค่าใช้จ่ายเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจะได้ค่าใช้จ่ายรวมเพิ่มเป็น 151,641,259.37 บาท/ปี

เมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอเพื่อหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดนี้ ได้ผลลัพธ์ดังนี้ คือ พิกัดกำลัง 1.7 เมกะวัตต์/พิกัดพลังงาน 9.0 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ติดตั้งที่บัส 37 ซึ่งทำให้ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลดลดลงเหลือเพียง 22.34 ชั่วโมง/ปี ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ลดลงเหลือ 27.47 เมกะวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นความเสียหายเท่ากับ 2,518,591.94 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 2,222.79 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เมื่อรวมต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแล้ว คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 145,816,193.13 บาท/ปี ทั้งนี้เมื่อนำมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟมารวมด้วย ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 148,334,785.07 บาท/ปี มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 2.18

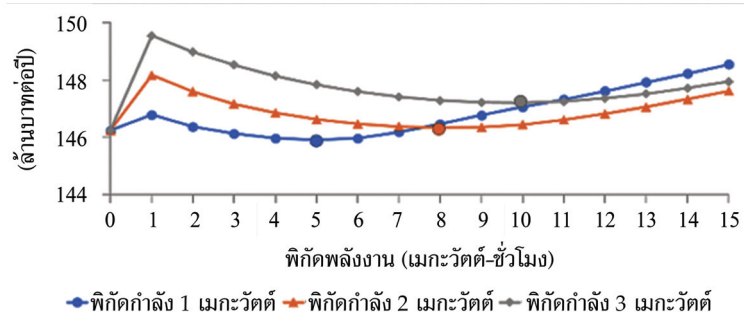
เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการทดลองหาขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงาน โดยไม่พิจารณามูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นแนวทางที่งานวิจัยในอดีตใช้ปฏิบัติพบว่าขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดในกรณีนี้ คือ พิกัดกำลัง 0.9 เมกะวัตต์/พิกัดพลังงาน 5.0 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ติดตั้งที่บัส 37 ซึ่งทำให้ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลดลดลงเหลือ 29.21 ชั่วโมง/ปี มีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ 39.72 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และมูลค่าความเสียหายคิดเป็น 3,642,063.65 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงเล็กน้อยเหลือ 2,142.90 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เมื่อรวมต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแล้ว คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 145,377,373.94 บาท/ปี และหากรวมกับมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟด้วย จะทำให้ค่าใช้จ่ายรวมใหม่มีค่าเท่ากับ 149,019,437.59 บาท/ปี มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 1.73

จากผลลัพธ์ในตารางที่ 3 เห็นได้ว่า ขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ไม่ว่าจะติดตั้งที่ตำแหน่งบัสใด นอกจากนั้นงานวิจัยยังได้ทดลองใช้ระบบกักเก็บพลังงานที่ขนาดต่าง ๆ กันกับไมโครกริดข้างต้น โดยได้คำนวณค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออก (*ECOST*) ดังรูปที่ 2(ก) ค่าใช้จ่ายรวม (แบบเดิม) โดยยังไม่ได้รวม *ECOST* ดังรูปที่ 2(ข) และค่าใช้จ่ายรวมที่ได้แนะนำในวิธีการนี้ดังรูปที่ 2(ค) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของกราฟรูปที่ 2(ก) และ 2(ข)

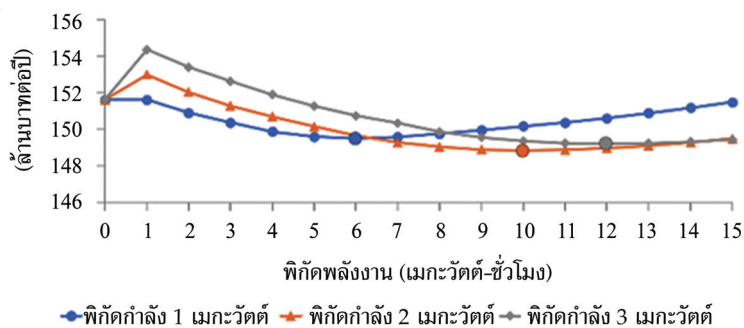
จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟดังกล่าว พบว่าเมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีค่าพิกัดพลังงานที่สูงขึ้นจะช่วยลดค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) ให้ต่ำลงตามไปด้วย ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2(ก) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายของไมโครกริด (แบบเดิม) ดังรูปที่ 2(ข) พบว่า ค่าพิกัดที่เหมาะสมที่สุดไม่ใช่ค่าที่มากที่สุด แต่เป็นค่าที่ทำให้กราฟต่ำที่สุด ยกตัวอย่างเช่น กรณีพิกัดกำลัง 1 เมกะวัตต์ ควรเลือกใช้ค่าพิกัดพลังงาน 5 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ในการนี้เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด (แบบใหม่) ดังรูปที่ 2(ค) ค่าพิกัดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดควรเป็น 6 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ที่พิกัดกำลัง 1 เมกะวัตต์ ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการเลือกขนาดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานที่สูงกว่าแบบเดิม ขณะที่ค่าใช้จ่ายรวมมีค่าต่ำลง



(ก) ค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีไหลล้นถังปลดออก



(ข) ค่าใช้จ่ายรวมจากการคำนวณแบบเดิม



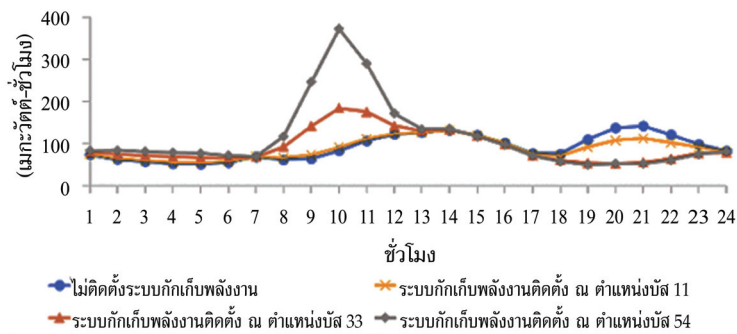
(ค) ค่าใช้จ่ายรวมโดยพิจารณาความเชื่อถือได้ร่วมด้วย

รูปที่ 2 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีค่าพิกัดต่าง ๆ กัน

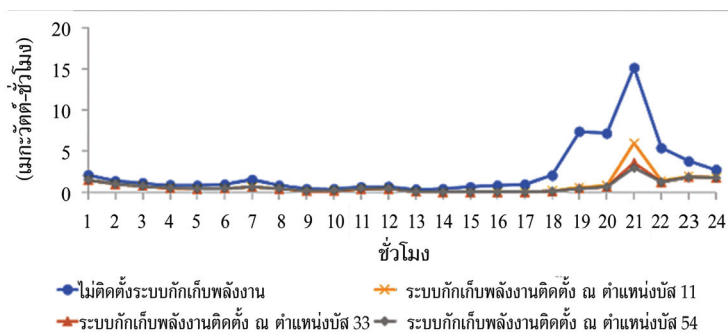
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์อีกประการหนึ่งในงานวิจัยนี้ คือ ตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดเป็นอย่างมาก และยังส่งผลทางอ้อมต่อความเชื่อถือได้ของไมโครกริดอีกด้วยรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากกรณีไหลล้นถังปลดออกที่เกิดขึ้นเมื่อทดลองติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่ตำแหน่งต่างกัน โดยแสดงค่าเป็นแบบรายชั่วโมงตลอดวัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ประเด็นตามสถานะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน ดังนี้

- ขณะที่ไมโครกริดมีกำลังผลิตสูงกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งในกรณีศึกษานี้เป็นช่วงเวลากลางวันดังรูปที่ 3(ก) ระบบกักเก็บพลังงานจะอยู่ในสถานะประจุ และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ จะไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บพลังงาน ดังนั้นหากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ กำลังไฟฟ้าส่วนนี้จะไหลไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานในระยะทางอันสั้น ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำ ในทางกลับกันเมื่อตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

- เมื่อไมโครกริดมีกำลังผลิตต่ำกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาค่ำสำหรับกรณีศึกษานี้ดังรูปที่ 3(ข) ระบบกักเก็บพลังงานจะอยู่ในสถานะคายประจุเพื่อช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด หากระบบกักเก็บพลังงานถูกติดตั้งใกล้กลุ่มโหลดในตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะช่วยลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไหลจากกริดไปสู่กลุ่มโหลดผ่านสายจำหน่ายที่มีระยะทางไกลได้ค่อนข้างมาก ซึ่งนอกจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลงแล้ว ยังช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย



(ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

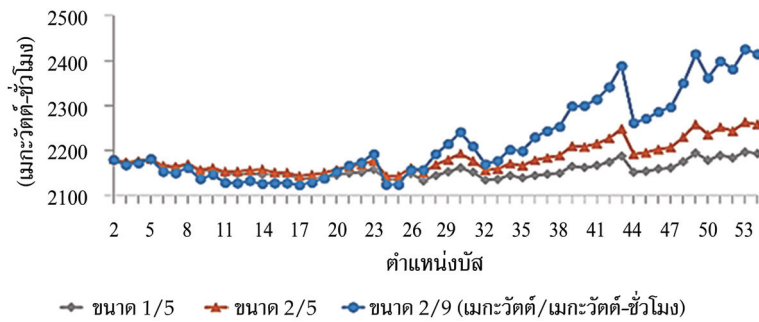


(ข) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้

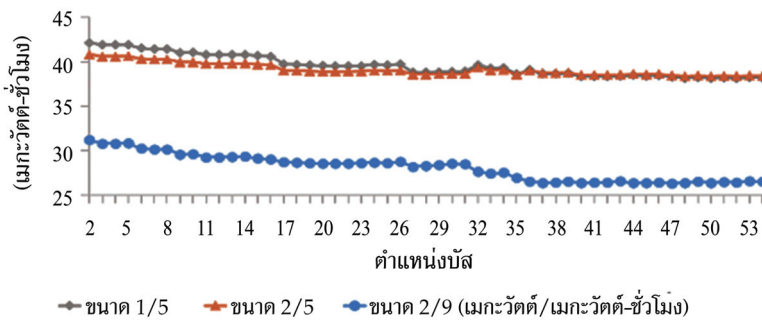
รูปที่ 3 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ (แบบรายชั่วโมงตลอดวัน)

ต่อมาได้เปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานที่มีพิกัดต่างกัน 3 ขนาด โดยทดลองติดตั้งที่บัสต่าง ๆ ของไมโครกริด และคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นตลอดปี และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถ

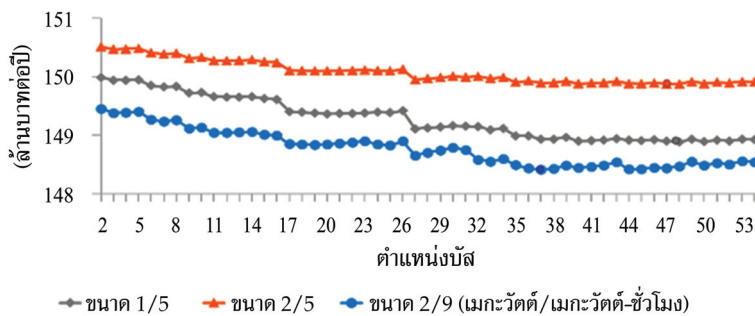
จ่ายได้ตลอดปี ซึ่งได้แสดงค่าไว้ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ห่างออกไปจากกริด ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกลุ่มโหลดขนาดใหญ่ในระบบด้วย โดยขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้กลับมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานควรเลือกตำแหน่งที่ให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด ในการนี้ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในวิธีการที่น่าเสนอ ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายที่คำนวณได้จากหน่วยพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้น หน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ ต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและอุปกรณ์ร่วม และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา โดยคิดเฉลี่ยเป็นค่าใช้จ่ายรวม/ปี ดังแสดงในรูปที่ 4(ค)



(ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย



(ข) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้



(ค) ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด

รูปที่ 4 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ (โดยคิดสะสมตลอดปี)

สรุปผลและการอภิปราย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด โดยพิจารณาสมรรถนะด้านต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ความเชื่อถือได้ รวมถึงต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานของไมโครกริด จากนั้นแปลงปริมาณทั้งหมดข้างต้นให้อยู่ในหน่วยเงิน เพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยต่อปีในหน่วยบาท/ปี และเลือกขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานจากทางเลือกที่ให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการแบบเดิมที่ไม่ได้รวมผลกระทบด้านความเชื่อถือได้เข้าไปด้วย ในการนี้วิธีการที่นำเสนอได้ประเมินผลกระทบด้านความเชื่อถือได้ในรูปของมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงในไมโครกริด เพราะความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน

จากผลการทดลอง พบว่าขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ มีพิกัดใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการแบบเดิม เพื่อช่วยลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออก ขณะที่วิธีการแบบเดิมไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายส่วนนี้ จึงปรากฏขนาดที่เหมาะสมเล็กกว่าที่ควรจะเป็นโดยยืนยันได้จากค่าใช้จ่ายรวมที่ปรากฏมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้วิธีการที่นำเสนอ นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงที่ระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะประจุ หากตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ มากจะทำให้ไมโครกริดมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสูง และมีความรุนแรงขึ้นเมื่อระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานมากขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อระบบกักเก็บพลังงานอยู่ในสถานะคายประจุ เพื่อสนับสนุนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในไมโครกริดให้แก่โหลด หากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะช่วยลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไหลจากกริดไปสู่กลุ่มโหลดผ่านสายจำหน่ายที่มีระยะทางไกลได้ค่อนข้างมาก นอกจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลงแล้ว ยังช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งส่งผลให้ไมโครกริดมีระดับความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้น

ผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ให้ครอบคลุมทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประเมินผลกระทบเหล่านี้ในรูปของค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด ดังนั้นการเลือกขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมนี้มีค่าต่ำสุด จึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและสามารถกำหนดขนาดพิกัดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานได้อย่างแท้จริง

References

- [1] Kajorndech, A. (2014). **Optimal Energy Storage System Design for Energy Management of Electric Power Distribution Systems**. M.E. Thesis, Dept. Electrical Eng., Kasetsart University

- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2014). **Development and Investment Guide to Renewable Energy Vol. 2, Solar Energy**. Bangkok
- [3] Kajorndech, A. and Rerkpreedapong, D. (2014). Energy Storage System Control Strategies for Power Distribution Systems. **KKU Engineering Journal**. Vol. 42, No. 1, pp. 9-19
- [4] Kerdphol, T., Tripathi, R.N., Hanamoto, T., Khairudin, Qudaih, Y., and Mitani, Y. (2015). ANN Based Optimized Battery Energy Storage System Size and Loss Analysis for Distributed Energy Storage Location in PV-Microgrid. In **Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative**, Bangkok. pp. 1-6
- [5] Sok, V. and Tayjasant, T. (2017). Determination of Optimal Siting and Sizing of Energy Storage System in PV-connected Distribution Systems Considering Minimum Energy Losses. In **2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. Phuket, Thailand. pp. 451-454. DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096271
- [6] Dong, J., Gao, F., Guan, X., Zhai, Q., and Wu, J. (2016). Storage-Reserve Sizing with Qualified Reliability for Connected High Renewable Penetration Micro-Grid. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**. Vol. 7, Issue 2, pp. 732-743. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2498599
- [7] Bahramirad, S., Reder, W., and Khodaei, A. (2012). Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**. Vol. 3, Issue 4, pp. 2056-2062. DOI: 10.1109/TSG.2012.2217991
- [8] Zafir, S. R. M., Razali, N. M. M., and Hashim, T. J. T. (2016). Relationship Between Loss of Load Expectation and Reserve Margen for Optimal Generation Planning. **Jurnal Teknologi**. Vol. 78, Issue 5-9, pp. 27-33. DOI: 10.11113/jt.v78.8783
- [9] Adefarati, T., Bansal, R. C., and Junto, J. J. (2017). Reliability and Economic Evaluation of a Microgrid Power System. **Energy Procedia**. Vol. 142, pp. 43-48. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.008
- [10] Marchi, B., Pasetti, M., and Zanoni, S. (2016). Life Cycle Cost Analysis for BESS Optimal Sizing. In **2016 International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2016)**. At Riga, Latvia. pp. 127-134. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.04.034
- [11] Ross, M., Hidalgo, R., Abbey, C., and Joos, G. (2010). Analysis of Energy Storage Sizing and Technologies. In **2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference**. Halifax, NS, Canada. pp. 1-6. DOI: 10.1109/EPEC.2010.5697212
- [12] Sukchom, K. (2018). **Energy Storage**. Access (20 July 2019). Available (<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A3996&LanguageCode=th&DocumentPartId=&Action=Launch>)
- [13] Tuffaha, T. and Almuahini, M. (2015). Reliability Assessment of a Microgrid Distribution System with PV and Storage. In **2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)**. pp. 195-199. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315206
- [14] Wang, X. F. (2008). **Load Flow Analysis**. Access (19 January 2019). Available (https://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1220/document/Load_Flow_Analysis.pdf)

การคัดเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสมของคลังสินค้าด้วยการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น
สำหรับคลังสินค้าควบคุมพิเศษ

Warehouse Location Selection Using Analytic Hierarchy Process for Special Controlled Warehouse

เอกวิทย์ พิมพ์ปจฉิม¹ นราธิป สุพัฒน์ธนานันท์* และรักน้อย อัครรุ่งเรืองกุล¹
Aekkawit Pimpatchim¹ Naratip Supattananon^{2*} and Raknoi Akarungrunngkul¹

Received: October 2, 2019; Revised: January 6, 2020; Accepted: January 7, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกสถานที่ตั้งคลังสินค้าควบคุมพิเศษที่เหมาะสมในจังหวัดอุดรธานี โดยการประยุกต์ใช้การหาจุดศูนย์กลางพิกัดที่ตั้งร่วมกับกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ผลการหาพิกัดจุดศูนย์กลางไม่สามารถกำหนดเป็นที่ตั้งคลังสินค้าได้ เนื่องจากพิกัดดังกล่าวเป็นพื้นที่ส่วนราชการ จึงมีความผิดตามพระราชบัญญัติควบคุมเครื่องคัมแอลกอฮอล์มาตราที่ 27 (3) ทำให้ผู้วิจัยต้องกำหนดพื้นที่ใกล้เคียงค่าพิกัดนั้น จากการพิจารณาพื้นที่ใกล้เคียงพบว่าพิกัดที่สามารถจัดตั้งคลังสินค้าได้ 4 แห่ง คือ คลังสินค้าบ้านจั่น คลังสินค้านาดิ คลังสินค้าหมากแข้ง และคลังสินค้าหนองบัว ซึ่งผู้วิจัยได้คัดเลือกสถานที่ตั้งด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น โดยพิจารณาปัจจัยหลัก ได้แก่ ต้นทุน โครงสร้างพื้นฐาน รวมไปถึงสังคมและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้พิจารณาปัจจัยรอง ได้แก่ ต้นทุนคลังสินค้า ต้นทุนขนส่งสินค้า ต้นทุนแรงงาน ต้นทุนภาษี การเข้าถึงถนนหลัก ระบบสารสนเทศ ระบบสาธารณูปโภค ผลกระทบจากชุมชน ผลกระทบต่อเยาวชน มลพิษทางอากาศ และมลพิษทางเสียง ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ตั้งคลังสินค้าเครื่องคัมแอลกอฮอล์พบว่า ปัจจัยหลักด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.5136 ปัจจัยรองด้านผลกระทบจากชุมชนมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.2180 ดังนั้นที่ตั้งคลังสินค้าบ้านจั่นจึงเป็นที่ตั้งที่มีความเหมาะสม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.3122

คำสำคัญ : การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น; การคัดเลือก; ที่ตั้งคลังสินค้า; ปัจจัย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² College of Logistics and Supply Chain, Sripatum Khon Kaen University, Khon Kaen

* Corresponding Author E - mail Address: naratip.su@spu.ac.th

Abstract

The objective of this research is to select the appropriate specially controlled warehouse location in Udon Thani Province related with the examining of the center of gravity coordinates with the hierarchical analysis process. From the outcome, it cannot be determined the location of the warehouse because the coordinates are government areas, which are guilty under the Alcoholic Beverage Control Act, Article 27 (3). Therefore, it must identify the local area to that coordinate. It is found that there are 4 locations that can be set up at Ban Chan Warehouse, Nadi warehouse, Mak Khaeng warehouse, and Nong Bua warehouse. The major factors in location selection through the analysis hierarchical process are cost, infrastructure, society and environment. The secondary factors are the warehouse costs, freight costs, labor costs, tax costs, access to the main roads, information systems, utilities community impact on youth air pollution and noise pollution. From the analysis, it was found that the social and environmental have the highest mean weight of 0.5136. The secondary impact factor from the community has the highest weight mean value is 0.2180. Therefore, the Ban Chan warehouse is an appropriate location with the highest mean weight of importance of 0.3122.

Keywords: Analysis Hierarchical Process; Selection; Warehouse Location; Factor

บทนำ

เครื่องดื่มแอลกอฮอล์เป็นสินค้าควบคุมพิเศษ (Special Controlled Products) เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ในปี พ.ศ. 2551 รัฐบาลมีมาตรการห้ามขายและโฆษณาเครื่องดื่มแอลกอฮอล์อันเป็นการอวดอ้างสรรพคุณหรือชักชวนในบริเวณใกล้เคียงสถานที่ปฏิบัติพิธีกรรมทางศาสนาหรือวัด โรงเรียน สถาน ที่ราชการ สถานศึกษา สถานบริการน้ำมัน ชุมชน และสวนสาธารณะ ซึ่งเป็นสถานที่อันไหวต่อความรู้สึกของประชาชน [1] เนื่องจากการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ก่อให้เกิดปัญหาอุบัติเหตุบนท้องถนน ปัญหาครอบครัว ปัญหาทะเลาะวิวาท และปัญหาอาชญากรรม [2] ข้อมูลสถิติการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2560 พบว่า ประเทศไทยมีปริมาณการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ 4,861 ล้านลิตร และคาดว่าปี พ.ศ. 2562 - 2564 มีแนวโน้มบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 ของปริมาณการบริโภคแอลกอฮอล์ [3] รัฐบาลจึงกำหนดมาตรการเพื่อลดจำนวนเยาวชนที่บริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประมาณ 2.6 แสนคน ด้วยการควบคุมการเข้าถึงหรือการซื้อตามเวลาและสถานที่ที่กฎหมายกำหนด ห้ามโฆษณาแบบชักชวนการดื่ม ห้ามจำหน่ายแก่เยาวชน โดยเพิ่มโทษสำหรับผู้กระทำความผิดมาตรการควบคุม [4] เนื่องจากเยาวชนที่บริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์กระทำความผิดรุนแรงมากขึ้น ขณะมีเมมา และยังพบว่าเยาวชนกลุ่มดังกล่าวมีเหตุจูงใจให้กระทำผิด โดยการลักทรัพย์ ชิงทรัพย์หรือปล้นทรัพย์เพื่อนำเงินไปซื้อเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ [5] ทำให้ธุรกิจเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ถูกมองว่าเป็นธุรกิจ

ที่สนับสนุนนโยบายมุขโดยไม่คำนึงถึงสังคม ดังนั้น การควบคุมโฆษณาเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ จึงอนุญาตให้ใช้เฉพาะตราสัญลักษณ์ของสินค้าเป็นตัวแทนในการสนับสนุนการกีฬา ดนตรี ทุนการศึกษา และนำเสนอวิถีชีวิตที่ดี ประกอบกับการรณรงค์เพื่อสร้างภาพลักษณ์ที่ดีต่อสังคม [6]

คลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาตั้งอยู่ใกล้กับสถานที่ที่อ่อนไหวต่อความรู้สึกของประชาชนและขนส่งสินค้าผ่านชุมชนโดยมีตราสินค้าติดอยู่กับตัวรถขนส่งทำให้ประชาชนเข้าใจว่าเป็นการส่งเสริมให้เยาวชนบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าเครื่องดื่มแอลกอฮอล์โดยพิจารณาปัจจัยที่กระทบต่อสังคม ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การกำหนดที่ตั้งคลังสินค้าเพื่อเป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์จะพิจารณาตามปริมาณความต้องการของลูกค้าทำให้ที่ตั้งคลังสินค้าถูกกำหนดให้มีพิกัดใกล้กับที่ตั้งของลูกค้าที่มีความต้องการสินค้าสูง โดยการหาค่าพิกัดที่ตั้งของคลังสินค้าด้วยค่าจุดศูนย์กลาง (Center of Gravity) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระยะทางขจัดระหว่างลูกค้ากับคลังสินค้าสั้นที่สุด ซึ่งระยะทางการขนส่งสินค้าถือเป็นต้นทุนที่ผันแปรตามเที่ยวการขนส่งสินค้า [7] จากการศึกษาของ Guo, F. and Shi, X. [8] วิเคราะห์หาพิกัดจุดศูนย์กลางโดยกำหนดให้ระยะทางระหว่างโรงงานกับลูกค้าเป็นต้นทุนขนส่ง ในการวิเคราะห์หาพิกัดคลังสินค้าเปลี่ยนแปลงไปตามต้นทุนขนส่งผันแปรตามเที่ยวการขนส่งสินค้า เนื่องจากที่ตั้งคลังสินค้าอยู่ใกล้กับลูกค้าที่มีความต้องการสูงเพื่อให้ต้นทุนขนส่งสินค้าต่อเที่ยวต่ำที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์พิกัดนิยามกำหนดต้นทุนค่าขนส่งต่อหน่วยต่อกิโลเมตร หรือค่าขนส่งเป็นต่อหน่วยต่อไมล์ทะเลในกรณีการขนส่งสินค้าทางทะเล [9] การหาจุดศูนย์กลางเป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เวลาประมวลผลอย่างรวดเร็ว ซึ่งการกำหนดจุดศูนย์กลางมีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย อาทิ การหาจุดรวบรวมผู้ประสบภัยพิบัติในประเทศฟิลิปปินส์ โดยสามารถช่วยเหลือผู้ประสบภัยออกจากพื้นที่โดยใช้ต้นทุนลดลงและใช้ระยะเวลาเดินทางน้อยลง [10] การหาจุดศูนย์กลางยังมีข้อดีหลายประการซึ่งในงานวิจัยของ Homchalee, R. [11] ได้อธิบายว่า พิกัดที่ตั้งจากการคำนวณเป็นเพียงพิกัดศูนย์กลางพื้นที่เป้าหมายเท่านั้น เนื่องจากพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าใหม่มีโอกาสเป็นสถานที่ที่ไม่เหมาะสมในการกำหนดคลังสินค้า เช่น เป็นพื้นที่ป่า ไม่มีเส้นทางคมนาคม แม่น้ำ ภูเขา ที่อยู่อาศัย พื้นที่ราชการ เป็นต้น หรือพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าใหม่สามารถกำหนดให้เป็นคลังสินค้าได้แต่มีผลกระทบกับชุมชนรอบที่ตั้งคลังสินค้าสามารถกำหนดใกล้เคียงพิกัดใหม่ได้ในรัศมีไม่เกิน 50 กิโลเมตร ซึ่งมีผลกระทบกับต้นทุนการขนส่งไม่มากนัก แต่มีโอกาสส่งผลไม่เหมาะสมกับปัจจัยอื่น ๆ ดังนั้น การคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาหลากหลายปัจจัย งานวิจัยของ Sirisena, H. O. and Samarasekera, N. A. [12] ได้คัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) โดยพิจารณาปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดำเนินธุรกิจคลังสินค้า ซึ่งการพิจารณานั้นให้ความสำคัญกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ของธุรกิจเท่านั้น เช่น ปัจจัยความต้องการสินค้า ปัจจัยการลงทุน ปัจจัยเวลาส่งมอบ ปัจจัยโครงสร้างพื้นฐานทางถนน ปัจจัยสิ่งอำนวยความสะดวกทำเรือ และปัจจัยความพร้อมของระบบสารสนเทศและอุปกรณ์สื่อสารในการตอบสนองความต้องการ เพื่อสนับสนุนให้การดำเนินธุรกิจมีประสิทธิภาพในการส่งมอบสินค้า [13] การคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้ามีการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อองค์กรและลดผลกระทบต่ออย่างต่อเนือง นอกจากการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ส่งผลกระทบต่อองค์กร (Economy) AHP ยังพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม (Social and Environmental) [14] - [17]

Wang, X. [18] กล่าวในงานวิจัยว่า ผู้ประกอบการและรัฐบาลในหลายประเทศให้ความสำคัญกับการจัดการสินค้าควบคุมพิเศษที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนในสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง เช่น

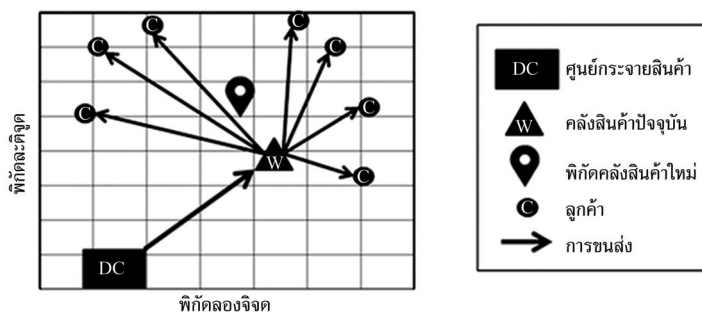
การจัดเก็บและการขนส่งสารเคมีอันตรายมีกฎหมายควบคุมเพื่อให้เกิดความปลอดภัย การคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าเพื่อจัดเก็บสินค้าควบคุมพิเศษด้วย AHP จึงต้องตระหนักถึงผลกระทบที่ส่งผลกับสังคมและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสินค้าควบคุมพิเศษส่วนใหญ่มีความเสี่ยงให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและมีความอ่อนไหวต่อความรู้สึกของคนในชุมชน ต่อมานักวิจัยพยายามอธิบายว่าการคัดเลือกที่ตั้งที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม [19] เนื่องจากมลพิษโดยรอบที่ตั้งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสุขภาพการดำรงชีวิต และความรู้สึกของประชาชนโดยรอบที่ตั้ง โดยประชาชนที่อาศัยในพื้นที่หรืออยู่ระหว่างเส้นทางขนส่งย่อมสุดคมอากาศที่เป็นมลพิษเข้าสู่ร่างกาย [20] - [21] นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของรัฐบาลคือสินค้าควบคุมพิเศษ [22] - [23]

ปัจจุบันคลังสินค้ากรณีศึกษามีที่ตั้งใกล้กับสถานที่อ่อนไหวต่อความรู้สึกของประชาชนและมีการขนส่งโดยใช้ยานพาหนะที่มีตราสินค้าแสดงถึงการสนับสนุนกิจกรรมเพื่อสังคมทำให้เยาวชนบางส่วนมีความเข้าใจว่าการตีเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์ทำให้สังคมดีขึ้น ส่งผลให้ประชาชนในชุมชนไม่พึงพอใจที่มีคลังสินค้าและการขนส่งผ่านเขตชุมชนดังกล่าว และต้องการให้คลังสินค้าเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์กรณีศึกษาย้ายสถานที่ตั้ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าสำหรับการจัดจำหน่ายหรือการกระจายสินค้าเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์ที่เหมาะสมระหว่างผลประโยชน์และสังคม ด้วยการประยุกต์ใช้การหาจุดศูนย์ถ่วงและกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นโดยการพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุน โครงสร้างพื้นฐาน ร่วมกับปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมของกรณีศึกษาคลังสินค้าเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์ในจังหวัดอุดรธานี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

ปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจกระจายสินค้าเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์ในจังหวัดอุดรธานี มีคลังสินค้าสำหรับกระจายสินค้าให้กับผู้ประกอบการค้าส่งหรือลูกค้าที่มีความต้องการจำนวน 1 แห่ง ซึ่งดำเนินการโดยคลังสินค้านี้ดังกล่าวจะรับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าจำนวน 1 แห่ง และจัดส่งให้กับลูกค้าทั้งหมด 15 แห่ง ดังรูปที่ 1 ซึ่งการดำเนินงานของคลังสินค้าในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสังคมจึงทำให้บริษัทกรณีศึกษาจำเป็นต้องกำหนดที่ตั้งคลังสินค้าแห่งใหม่



รูปที่ 1 โครงข่ายการกระจายสินค้าเครื่องตีแมลงกอลฮอลล์

2. วิเคราะห์ตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์ถ่วง

การวิเคราะห์หาตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์ถ่วงสามารถกำหนดพิกัดละติจูด (Latitude) และพิกัดลองจิจูด (Longitude) ของคลังสินค้าเริ่มต้น โดยการหาค่าจุดศูนย์กลางที่มีระยะขจัดไปยังลูกค้าทั้งหมดต่ำที่สุดเพื่อเป็นค่าพิกัดเริ่มต้น (X, Y) [7] การกำหนดพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าใหม่ (X', Y') เริ่มจากการหาระยะขจัดระหว่างพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าเริ่มต้นกับพิกัดลูกค้าทั้งหมด (D_k) [10] ดังสมการที่ (1) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดตำแหน่งพิกัดจุดศูนย์ถ่วงคลังสินค้าใหม่ ดังนั้น การกำหนดพิกัดจุดศูนย์ถ่วงที่ตั้งคลังสินค้าใหม่ที่ผันแปรตามเที่ยวการขนส่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$D_k = \sqrt{(X - X_k)^2 + (Y - Y_k)^2} \quad (1)$$

$$X' = \frac{\sum_k ((Q_k \cdot C_k \cdot X_k) / D_k)}{\sum_k ((Q_k \cdot C_k) / D_k)} \quad (2)$$

$$Y' = \frac{\sum_k ((Q_k \cdot C_k \cdot Y_k) / D_k)}{\sum_k ((Q_k \cdot C_k) / D_k)} \quad (3)$$

เมื่อ

- k = ลำดับลูกค้า
- C_k = ต้นทุนต่อเที่ยวต่อกิโลเมตร
- X = พิกัดละติจูดเริ่มต้น
- Q_k = ปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้า
- Y = พิกัดลองจิจูดเริ่มต้น
- X' = พิกัดละติจูดคลังสินค้าใหม่
- X_k = พิกัดละติจูดลูกค้า
- Y' = พิกัดลองจิจูดคลังสินค้าใหม่
- Y_k = พิกัดลองจิจูดลูกค้า
- D_k = ระยะทางระหว่างพิกัดเริ่มต้นกับลูกค้า

การทำพิกัดจุดศูนย์ถ่วงที่ตั้งคลังสินค้าต้องเก็บรวบรวมข้อมูลลูกค้าทั้งหมดในเขตพื้นที่รับผิดชอบของคลังสินค้ากรณีศึกษา การวิเคราะห์จึงประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการวิเคราะห์หาจุดศูนย์ถ่วงคลังสินค้า

ลูกค้า	พิกัดละติจูด	พิกัดลองจิจูด	ความต้องการต่อปี (พาลาที)	ลูกค้า	พิกัดละติจูด	พิกัดลองจิจูด	ความต้องการต่อปี (พาลาที)
1	17.13011	102.94550	1,321	9	17.42447	102.80699	3,109
2	17.10990	103.01436	1,567	10	17.41964	102.77133	2,756
3	17.76891	102.18898	2,455	11	17.38885	102.80132	1,454
4	17.68986	102.46294	2,507	12	17.40668	102.78771	1,974
5	17.69776	103.25767	2,451	13	17.11006	103.01696	1,232
6	16.94929	103.44136	2,987	14	17.20155	102.44195	1,887
7	17.40089	102.81333	1,324	15	17.19614	102.43890	1,811
8	17.35531	102.82183	2,803	รวม			31,638

จากผลการหาพิกัดจุดศูนย์ถ่วง ถ้าพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าใหม่อยู่ใกล้กับพิกัดจุดศูนย์ถ่วงเริ่มต้น แสดงว่าพิกัดที่ตั้งคลังสินค้าใหม่เป็นคลังสินค้าที่เหมาะสม [9] แต่ในทางปฏิบัติที่ตั้งคลังสินค้าใหม่มีโอกาสตกอยู่ในบริเวณที่ไม่สามารถตั้งได้ ดังนั้น การคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าใกล้เคียงกับพิกัดที่ตั้งใหม่จากการคำนวณสามารถกำหนดที่ตั้งทางเลือกภายในรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตร เพื่อกระทบกับต้นทุนขนส่งน้อยที่สุด [11] และคัดเลือกที่ตั้งด้วย AHP ตามวิธีดำเนินการวิจัยข้อที่ 3

3. กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

3.1 กำหนดเป้าหมายและทางเลือกที่ตั้งคลังสินค้าที่เป็นไปได้ จากค่าพิกัดที่ใกล้เคียงจุดศูนย์ถ่วง

3.2 กำหนดปัจจัยหลักและรองในการพิจารณาคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้า เครื่องดื่มแอลกอฮอล์จากการทบทวนวรรณกรรม การสอบถามผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษาและประชาชนในพื้นที่ พบว่ามีปัจจัยหลักและรองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	คำอธิบาย
1. ต้นทุน [12], [16] - [18]	1.1 ต้นทุนคลังสินค้า	ต้นทุนสร้างคลังสินค้า อุปกรณ์ขนถ่าย และค่าเสีย [18], [20]
	1.2 ต้นทุนขนส่งสินค้า	ต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าจ้าง และค่าซ่อมบำรุง [17], [20]
	1.3 ต้นทุนแรงงาน	ต้นทุนค่าจ้างพนักงานคลังสินค้าและพนักงานขนส่ง [15] - [16], [18]
	1.4 ต้นทุนภาษี	ต้นทุนค่าภาษีดำเนินการกิจการคลังสินค้าเครื่องดื่ม [15] - [16]
2. โครงสร้างพื้นฐาน [12] - [14], [18]	2.1 การเข้าถึงถนนหลัก	ความพร้อมของถนนในการรองรับรถบรรทุกขนส่งสินค้า [14], [21]
	2.2 ระบบสารสนเทศ	ความพร้อมระบบสารสนเทศและอุปกรณ์สื่อสาร [13]
	2.3 ระบบสาธารณูปโภค	ความพร้อมระบบประปาและไฟฟ้า [12]
3. สังคมและสิ่งแวดล้อม [16] - [23]	3.1 ผลกระทบจากชุมชน	คลังสินค้าใกล้ชุมชน วัด โรงเรียน สถานที่ราชการ อื่น ๆ [16]
	3.2 ผลกระทบต่อเยาวชน	เส้นทางการขนส่งเครื่องดื่มผ่านชุมชนที่มีเยาวชนอาศัยอยู่
	3.3 มลพิษทางอากาศ	มลพิษทางอากาศกระทบกับชุมชนในเส้นทางขนส่ง [19], [20] - [23]
	3.4 มลพิษทางเสียง	มลพิษทางเสียงกระทบกับชุมชนในเส้นทางขนส่ง [18]

3.3 ทำการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่ (Pairwise Comparison) เพื่อระบุความสำคัญของปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยแต่ละคู่ในการประเมินมีเกณฑ์ระดับความสำคัญเป็นจำนวนเต็ม 1 - 9 [20] โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้มีส่วนตัดสินใจคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้ามีผู้ประเมินจำนวน 6 คน [14] ซึ่งผู้ประเมินเป็นผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าแห่งใหม่ของบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ เจ้าของกิจการ กรรมการบริหารแผนงาน กรรมการบริหารทั่วไป ผู้จัดการคลังสินค้า ผู้จัดการการตลาด และผู้จัดการแผนกขนส่ง เป็นต้น การเปรียบเทียบปัจจัยสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ A โดยที่ A_{ij} คือ ค่าระดับความสำคัญของการเปรียบเทียบปัจจัย

3.4 ประเมินค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย (Eigenvector) ซึ่งการคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเริ่มจากหาค่าน้ำหนักความสำคัญของการเปรียบเทียบปัจจัยหลักในรูปแบบเมตริกซ์ดังสมการที่ (4) ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย โดยการเฉลี่ยค่าน้ำหนักความสำคัญของการเปรียบเทียบปัจจัยในแนวนอนดังสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ B

$$W_{ij} = A_{ij} / \sum_{i=1}^n V_j; \forall, j \quad (4)$$

$$Eigenvector_i = \sum_j^n W_{ij} / n; \forall, i \quad (5)$$

เมื่อ

A_{ij}	=	ค่าระดับความสำคัญ
V_j	=	ผลรวมน้ำหนักความสำคัญแนวตั้ง
W_{ij}	=	ค่าน้ำหนักความสำคัญ
n	=	จำนวนเมตริกซ์ในการเปรียบเทียบ

3.5 ประเมินค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของลำดับชั้นปัจจัยรอง ซึ่งการคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนักของปัจจัยรองต้องนำปัจจัยรองทำตามข้อที่ 3.2 - 3.4 ซึ่งจะได้ค่า نرمอลไลซ์ (Normalized) จากสมการที่ (5) ในลำดับชั้นปัจจัยรองต้องถ่วงน้ำหนักกับปัจจัยหลักเดียวกันเท่านั้น โดยนำค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญปัจจัยหลักนั้น ๆ คูณกับค่า نرمอลไลซ์ที่คำนวณได้ของแต่ละปัจจัยรองจึงเป็นค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง ทำต่อจนกว่าจะครบทุกปัจจัย

3.6 วิเคราะห์อัตราส่วนความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) การตรวจสอบความสอดคล้องของผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ ถ้าปัจจัยมีความสอดคล้องสามารถนำน้ำหนักความสำคัญใช้เป็นค่าประเมินในการพิจารณาคัดเลือกที่ตั้งได้ [16] โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) คำนวณหาค่าเวกเตอร์ความสอดคล้อง (Consistency Vector) การหาค่าเวกเตอร์ความสอดคล้องคำนวณได้จากการนำเวกเตอร์ B คูณกับเมตริกซ์ A ซึ่งจะได้ผลการคำนวณในรูปแบบเวกเตอร์ C หรือเวกเตอร์ความสอดคล้องในแต่ละลำดับชั้นของปัจจัย

2) คำนวณค่าแลมด้าสูงสุด (λ_{\max}) คือการนำค่าของเวกเตอร์ C ทหารด้วยค่าของเวกเตอร์ B ซึ่งได้ค่าของเวกเตอร์ D แล้วจึงนำผลรวมของเวกเตอร์ D ทหารด้วยจำนวนเมตริกซ์ในการเปรียบเทียบ (n)

3) คำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ (6)

$$CI = \lambda_{\max} - n / (n - 1) \tag{6}$$

เมื่อ

- λ_{\max} = ค่าแลมด้าสูงสุด
- n = จำนวนเมตริกซ์ในการเปรียบเทียบ

4) กำหนดค่าดัชนีความสอดคล้องจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Consistency Index: RI) การกำหนดค่าดัชนีจากการสุ่มได้จากการทดลองสุ่มตัวอย่างจำนวน 64,000 ตัวอย่าง โดยมีค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ดัชนีความสอดคล้องจากการสุ่มตัวอย่าง

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

5) การคำนวณค่าอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) การวิเคราะห์อัตราส่วนความสอดคล้องเหตุผลที่มีจำนวนปัจจัยไม่เกิน 3 ต้องมีความสอดคล้องไม่เกิน 0.07 และถ้ามีจำนวนปัจจัยมากกว่าหรือเท่ากับ 4 ค่าอัตราส่วนความสอดคล้องต้องไม่เกิน 0.10

$$CR = CI / RI \tag{7}$$

เมื่อ

- CI = ค่าดัชนีความสอดคล้อง
- RI = ค่าดัชนีขนาดเมตริกซ์จากการสุ่มตัวอย่าง

3.7 คัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าที่เหมาะสมด้วยการจัดลำดับความสำคัญจาก AHP มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การเปรียบเทียบปัจจัยกำหนดให้เป็นเมตริกซ์ของที่ตั้งคลังสินค้าเพื่อเปรียบเทียบระดับความสำคัญที่แตกต่างระหว่างที่ตั้งคลังสินค้าในแต่ละปัจจัยรอง ซึ่งการเปรียบเทียบอยู่ในรูปแบบเดียวกันกับเมตริกซ์ A โดยค่า A_{ij} กำหนดให้เป็นค่าระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีความแตกต่างระหว่างคลังสินค้า ซึ่งมีการประเมินดังข้อที่ 3.3

2) ทาค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของที่ตั้งคลังสินค้า โดยทาค่าน้ำหนักความสำคัญจากการเปรียบเทียบแต่ละปัจจัยรองระหว่างที่ตั้งคลังสินค้าในรูปแบบเมตริกซ์ดังสมการที่ (4) ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปแบบเมตริกซ์น้ำหนักความสำคัญของที่ตั้งคลังสินค้า จากนั้นวิเคราะห์หาค่าอันอร์มอลไลซ์ดังสมการที่ (5)

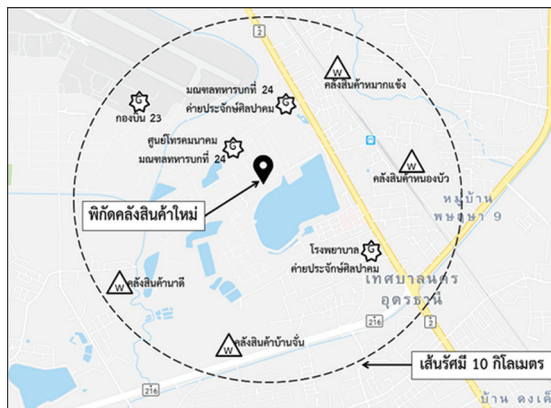
แล้วนำค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญปัจจัยรอนั้น ๆ คูณกับค่านอร์มอลไลซ์ซึ่งเป็นการถ่วงน้ำหนักค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของที่ตั้งคลังสินค้า ทำต่อไปจนกว่าจะครบทุกปัจจัยรอน โดยค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของที่ตั้งคลังสินค้านั้นอยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ B

3) หาผลรวมค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญทุกปัจจัยแต่ละที่ตั้งคลังสินค้า ทำไปจนกว่าจะครบทั้ง 6 คน ซึ่งค่าเฉลี่ยจากผู้เชี่ยวชาญที่ 1 - 6 ในขั้นตอนนี้คือลำดับน้ำหนักความเหมาะสมของที่ตั้งคลังสินค้าแต่ละแห่ง ดังนั้น ที่ตั้งคลังสินค้าค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดคือ ที่ตั้งที่มีความเหมาะสม

ผลการศึกษา

1. ผลการหาจุดศูนย์กลาง

จากการวิเคราะห์หาพิกัดจุดศูนย์กลางคลังสินค้าใหม่ดังสมการที่ (1) - (3) ซึ่งมีต้นทุนค่าขนส่งเท่ากับ 6.98 บาทต่อเที่ยวต่อกิโลเมตร โดยอ้างอิงจากบริษัทกรณีศึกษาพบว่า ผลการวิเคราะห์พิกัดคลังสินค้าใหม่ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ได้พิกัดละติจูดเท่ากับ 17.371774 และพิกัดลองจิจูดเท่ากับ 102.804976 ซึ่งกำหนดพิกัดด้วยโปรแกรม Google Map ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พิกัดคลังสินค้าใหม่จากการหาจุดศูนย์กลาง

พิกัดคลังสินค้าแห่งใหม่จากการหาจุดศูนย์กลางเมื่อกำหนดเป็นที่ตั้งคลังสินค้าในทางปฏิบัติ กลับพบว่าเป็นพื้นที่ราชพัสดุของส่วนราชการ ซึ่งไม่สามารถดำเนินการกำหนดให้เป็นที่ตั้งคลังสินค้าแห่งใหม่ของบริษัทกรณีศึกษาได้ การกำหนดที่ตั้งคลังสินค้าต้องกำหนดพื้นที่ใกล้เคียงพิกัดคลังสินค้าแห่งใหม่จากการสำรวจพบว่ามีที่ตั้ง 4 แห่ง ที่สามารถกำหนดเป็นคลังสินค้าแห่งใหม่ได้คือ คลังสินค้าบ้านจั่น คลังสินค้านาดี คลังสินค้าหมากแข้ง และคลังสินค้าหนองบัว ดังนั้น ที่ตั้งคลังสินค้าทางเลือกที่เป็นไปได้สามารถใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าเครื่องเต็มแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งผลการประเมินทางเลือกที่ตั้งคลังสินค้าแสดงในผลการศึกษาคือข้อที่ 2

2. ผลกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

การเปรียบเทียบปัจจัยหลักเป็นคู่สามารถกำหนดระดับความสำคัญให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ โดยการประเมินค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักจากสมการที่ (4) และ (5) จากนั้นจึงวิเคราะห์

อัตราส่วนความสอดคล้องของเหตุผลจากสมการที่ (7) และ (8) เช่น ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญที่ 1 - 6 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางเมตริกซ์จากการเปรียบเทียบปัจจัยหลักจากผู้เชี่ยวชาญที่ 1 - 6

ผู้เชี่ยวชาญ	ปัจจัยหลัก	ต้นทุน	โครงสร้างพื้นฐาน	สังคมและสิ่งแวดล้อม	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญ
1	ต้นทุน	0.2000	0.2500	0.3333	0.2611
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.4000	0.2500	0.3333	0.3278
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.4000	0.5000	0.3333	0.4111
2	ต้นทุน	0.4000	0.4286	0.5000	0.4429
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.2000	0.1429	0.1667	0.1698
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.4000	0.4286	0.3333	0.3873
3	ต้นทุน	0.2000	0.2222	0.3333	0.2519
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.2000	0.1111	0.1667	0.1593
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.6000	0.6667	0.5000	0.5889
4	ต้นทุน	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	ต้นทุน	0.2727	0.2857	0.3333	0.2973
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.1818	0.1429	0.1667	0.1638
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.5455	0.5714	0.5000	0.5390
6	ต้นทุน	0.2174	0.2000	0.1429	0.1867
	โครงสร้างพื้นฐาน	0.1304	0.2000	0.1429	0.1578
	สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.6522	0.6000	0.7143	0.6555

จากผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 6 คน สรุปว่าปัจจัยหลักที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 0.5136 รองลงมาคือ ปัจจัยต้นทุน และปัจจัยโครงสร้างพื้นฐานตามลำดับ โดยผู้เชี่ยวชาญมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องในการประเมินความสำคัญของปัจจัยหลักไม่เกิน 0.07 แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญ มีความน่าเชื่อถือและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ดังตารางที่ 5

จากการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองซึ่งเป็นปัจจัยแยกย่อยจากปัจจัยหลักที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้เพื่อให้ผู้ตัดสินใจมีความชัดเจนในการประเมินระดับความสำคัญของปัจจัยรอง เช่น ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองจากผู้เชี่ยวชาญที่ 1 พบว่าปัจจัยรองด้านต้นทุน การขนส่ง การเข้าถึงถนนหลัก และผลกระทบจากชุมชนมีความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.3948 0.5889 และ 0.4790 ตามลำดับ ในแต่ละปัจจัยหลักนั้น ๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	ผู้เชี่ยวชาญ						ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ
	1	2	3	4	5	6	
1. ต้นทุน	0.4429	0.2611	0.2519	0.2500	0.2973	0.1867	0.2816
2. โครงสร้างพื้นฐาน	0.1698	0.3278	0.1593	0.2500	0.1638	0.1578	0.2047
3. สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.3873	0.4111	0.5889	0.5000	0.5390	0.6555	0.5136
ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง	0.0158	0.0463	0.0465	0.0000	0.0079	0.0252	-

ตารางที่ 6 เมตริกซ์จากการเปรียบเทียบปัจจัยรองของผู้เชี่ยวชาญที่ 1

ปัจจัยรอง	ต้นทุน คลังสินค้า	ต้นทุนขนส่งสินค้า	ต้นทุนแรงงาน	ต้นทุนภาษี	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ
ต้นทุนคลังสินค้า	0.3636	0.3871	0.2857	0.4000	0.3591
ต้นทุนขนส่งสินค้า	0.3636	0.3871	0.4286	0.4000	0.3948
ต้นทุนแรงงาน	0.1818	0.1290	0.1429	0.1000	0.1384
ต้นทุนภาษี	0.0909	0.0968	0.1429	0.1000	0.1076

ปัจจัยรอง	เข้าถึงถนนหลัก	ระบบสารสนเทศ	สาธารณูปโภค	-	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ
เข้าถึงถนนหลัก	0.6000	0.6667	0.5000	-	0.5889
ระบบสารสนเทศ	0.2000	0.2222	0.3333	-	0.2519
สาธารณูปโภค	0.2000	0.1111	0.1667	-	0.1593

ปัจจัยรอง	ผลกระทบจาก ชุมชน	ผลกระทบต่อ เยาวชน	มลพิษทาง อากาศ	มลพิษทาง เสียง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ
ผลกระทบจากชุมชน	0.5000	0.5455	0.4706	0.4000	0.4790
ผลกระทบต่อเยาวชน	0.2500	0.2727	0.3529	0.3000	0.2939
มลพิษทางอากาศ	0.1250	0.0909	0.1176	0.2000	0.1334
มลพิษทางเสียง	0.1250	0.0909	0.0588	0.1000	0.0937

จากค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของผู้เชี่ยวชาญที่ 1 - 6 พบว่าปัจจัยรองด้านการเข้าถึงถนนหลักมีความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.5505 ปัจจัยรองด้านผลกระทบจากชุมชนมีความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.4245 ดังนั้น ปัจจัยรองด้านต้นทุนคลังสินค้ามีความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.3952 โดยมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องในการประเมินความสำคัญของปัจจัยหลักไม่เกิน 0.10 และ 0.07 ดังตารางที่ 7

ผลการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยรองสามารถวิเคราะห์จากการถ่วงน้ำหนักกับค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักนั้น ๆ ด้วยวิธีดำเนินการวิจัยข้อที่ 3.5 พบว่า ปัจจัยผลกระทบจากชุมชนมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.2180 รองลงมาคือปัจจัยผลกระทบต่อเยาวชนและการเข้าถึงถนนหลักดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง

ปัจจัยรอง	ผู้เชี่ยวชาญ						ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ
	1	2	3	4	5	6	
1.1 ต้นทุนคลังสินค้า	0.3591	0.3616	0.3708	0.4445	0.4596	0.3758	0.3952
1.2 ต้นทุนขนส่งสินค้า	0.3948	0.3750	0.3708	0.2832	0.2945	0.3273	0.3409
1.3 ต้นทุนแรงงาน	0.1384	0.1652	0.1514	0.1651	0.1572	0.1737	0.1585
1.4 ต้นทุนภาษี	0.1076	0.0982	0.1069	0.1072	0.0886	0.1232	0.1053
ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง	0.0170	0.0170	0.0227	0.0264	0.0170	0.0798	-
2.1 การเข้าถึงถนนหลัก	0.5889	0.4429	0.5247	0.5813	0.6080	0.5571	0.5505
2.2 ระบบสารสนเทศ	0.2519	0.3873	0.3338	0.3092	0.2721	0.3202	0.3124
2.3 ระบบสาธารณูปโภค	0.1593	0.1698	0.1416	0.1096	0.1199	0.1226	0.1371
ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง	0.0465	0.0158	0.0464	0.0032	0.0639	0.0158	-
3.1 ผลกระทบจากชุมชน	0.4790	0.3676	0.4161	0.3915	0.4514	0.4412	0.4245
3.2 ผลกระทบต่อเยาวชน	0.2939	0.3954	0.2974	0.3621	0.2932	0.2681	0.3183
3.3 มลพิษทางอากาศ	0.1334	0.1225	0.1398	0.1404	0.1577	0.1759	0.1450
3.4 มลพิษทางเสียง	0.0937	0.1145	0.1467	0.1060	0.0977	0.1148	0.1122
ค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง	0.0304	0.0038	0.0384	0.0364	0.0927	0.0978	-

ตารางที่ 8 สรุปอันดับความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

ปัจจัยหลัก	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ	ปัจจัยรอง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก ความสำคัญ	อันดับความสำคัญ
1. ต้นทุน	0.2816 (28.16 %)	1.1 ต้นทุนคลังสินค้า	0.1126	4
		1.2 ต้นทุนขนส่งสินค้า	0.0957	5
		1.3 ต้นทุนแรงงาน	0.0438	9
		1.4 ต้นทุนภาษี	0.0295	10
2. โครงสร้างพื้นฐาน	0.2047 (20.47 %)	2.1 การเข้าถึงถนนหลัก	0.1127	3
		2.2 ระบบสารสนเทศ	0.0640	7
		2.3 ระบบสาธารณูปโภค	0.0281	11
3. สังคมและสิ่งแวดล้อม	0.5136 (51.36 %)	3.1 ผลกระทบจากชุมชน	0.2180	1
		3.2 ผลกระทบต่อเยาวชน	0.1635	2
		3.3 มลพิษทางอากาศ	0.0745	6
		3.4 มลพิษทางเสียง	0.0576	8

ผู้วิจัยยกตัวอย่างการเปรียบเทียบน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยต้นทุนคลังสินค้า ต้นทุนขนส่งสินค้า ต้นทุนแรงงาน และต้นทุนภาษี โดยผู้เชี่ยวชาญที่ 1 ผลวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญที่ตั้งคลังสินค้าและค่านอร์มอลไลซ์ ซึ่งถ่วงน้ำหนักค่านอร์มอลไลซ์กับค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองนั้น ๆ จากตารางที่ 8 พบว่ามีค่านอร์มอลไลซ์และค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละคลังสินค้า ดังตารางที่ 9

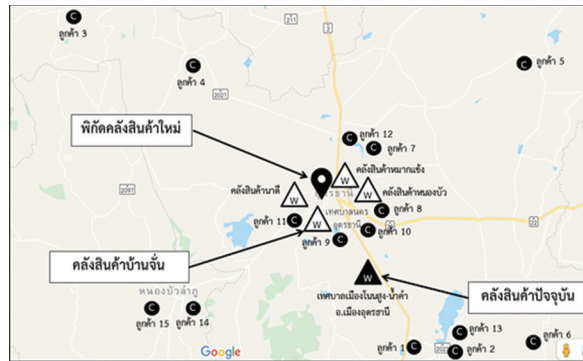
ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยรองของคลังสินค้าโดยผู้เชี่ยวชาญที่ 1

ปัจจัยรอง	ที่ตั้งทางเลือก	คลังสินค้าบ้านจั่น	คลังสินค้านาดี	คลังสินค้าหมากแข้ง	คลังสินค้าหนองบัว	ค่านอร์มอลไลซ์	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญ
ต้นทุนคลังสินค้า	คลังสินค้าบ้านจั่น	0.2500	0.1875	0.1818	0.1429	0.1707	0.0190
	คลังสินค้านาดี	0.2500	0.1875	0.5455	0.4286	0.3872	0.0431
	คลังสินค้าหมากแข้ง	0.2500	0.5625	0.1818	0.2857	0.3433	0.0382
	คลังสินค้าหนองบัว	0.2500	0.0625	0.0909	0.1429	0.0988	0.0110
ต้นทุนขนส่งสินค้า	คลังสินค้าบ้านจั่น	0.3871	0.2308	0.4615	0.4000	0.3641	0.0350
	คลังสินค้านาดี	0.3871	0.2308	0.3077	0.3000	0.2795	0.0268
	คลังสินค้าหมากแข้ง	0.1290	0.4615	0.1538	0.2000	0.2718	0.0261
	คลังสินค้าหนองบัว	0.0968	0.0769	0.0769	0.1000	0.0846	0.0081
ต้นทุนแรงงาน	คลังสินค้าบ้านจั่น	0.3529	0.3750	0.2308	0.3000	0.3019	0.0135
	คลังสินค้านาดี	0.1765	0.1875	0.4615	0.3000	0.3163	0.0141
	คลังสินค้าหมากแข้ง	0.3529	0.3750	0.2308	0.3000	0.3019	0.0135
	คลังสินค้าหนองบัว	0.1176	0.0625	0.0769	0.1000	0.0798	0.0036
ต้นทุนภาษี	คลังสินค้าบ้านจั่น	0.3529	0.3810	0.2222	0.3000	0.3011	0.0089
	คลังสินค้านาดี	0.1765	0.1905	0.4444	0.4000	0.3450	0.0102
	คลังสินค้าหมากแข้ง	0.3529	0.3810	0.2222	0.2000	0.2677	0.0079
	คลังสินค้าหนองบัว	0.1176	0.0476	0.1111	0.1000	0.0862	0.0026

ดังนั้น ผลรวมค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญทุกปัจจัยของที่ตั้งคลังสินค้าแต่ละแห่งจากผู้เชี่ยวชาญ ผลการคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้า 4 แห่ง ที่เป็นไปได้แบบหลายปัจจัยด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น พบว่า ที่ตั้งคลังสินค้าที่มีความเหมาะสมอันดับที่ 1 คือที่ตั้งคลังสินค้าบ้านจั่น มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญ เท่ากับ 0.3122 ถัดมาคือ ที่ตั้งคลังสินค้านาดี หมากแข้ง และหนองบัว ซึ่งมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญ เท่ากับ 0.2940 0.2832 และ 0.1106 ตามลำดับ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สรุปผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของที่ตั้งคลังสินค้า

ที่ตั้งทางเลือก	ผู้เชี่ยวชาญ						ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก	อันดับความสำคัญ
	1	2	3	4	5	6		
คลังสินค้าบ้านจั่น	0.3017	0.3127	0.3099	0.2827	0.3675	0.2986	0.3122	1
คลังสินค้านาดี	0.3169	0.3145	0.2917	0.2917	0.2644	0.2849	0.2940	2
คลังสินค้าหมากแข้ง	0.2857	0.2815	0.2874	0.2938	0.2585	0.2926	0.2832	3
คลังสินค้าหนองบัว	0.0957	0.0913	0.1110	0.1319	0.1096	0.1240	0.1106	4



รูปที่ 3 ที่ตั้งคลังสินค้าเครื่องดัดแปลงแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมในจังหวัดอุตรธานี

สรุปผลและการอภิปรายผล

จากปัญหาที่ประชาชนในชุมชนไม่ยินยอมให้ตั้งคลังสินค้าสำหรับการกระจายสินค้าควบคุมพิเศษ (เครื่องดัดแปลงแอลกอฮอล์) ของบริษัทกรมศึกษา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าเครื่องดัดแปลงแอลกอฮอล์ที่มีความเหมาะสมระหว่างการดำเนินธุรกิจคลังสินค้าเครื่องดัดแปลงและชุมชนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ ผลการวิจัยพบว่าที่ตั้งคลังสินค้าใหม่มีพิภคจุดศูนย์ถ่วงละติจูดเท่ากับ 17.371774 และพิภคลองจิจูดเท่ากับ 102.804976 ซึ่งเป็นพิภคที่มีต้นทุนการขนส่งสินค้าต่ำที่สุด แต่พิภคไม่สามารถกำหนดเป็นที่ตั้งได้เนื่องจากเป็นพื้นที่ราชพัสดุของส่วนราชการ จึงกำหนดที่ตั้งคลังสินค้าทางเลือกใกล้เคียง 4 แห่ง โดยการประเมินน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นจากผู้เชี่ยวชาญ 6 คน การพิจารณาที่ตั้งมีปัจจัยด้านต้นทุน โครงสร้างพื้นฐาน สังคมและสิ่งแวดล้อม จากการวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.5136 ปัจจัยรองผลกระทบจากชุมชนมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดเท่ากับ 0.2180 ดังนั้น การคัดเลือกที่ตั้งคลังสินค้าด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นกำหนดให้ที่ตั้งคลังสินค้าบ้านจั่นมีความเหมาะสมในการจัดตั้งให้เป็นคลังสินค้า ซึ่งมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญที่ตั้งคลังสินค้ามากที่สุดเท่ากับ 0.3122 เนื่องจากเป็นที่ตั้งที่มีความเหมาะสมครอบคลุมปัจจัยโดยรวมของการดำเนินธุรกิจคลังสินค้าเครื่องดัดแปลง กรมศึกษา ในส่วนของคลังสินค้านาดี ทมากแซ็ง และหนองบัว มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 0.2940 0.2832 และ 0.1106 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายงานวิจัย นวัตกรรมและวิเทศสัมพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

References

- [1] The Secretariat of the Cabinet. (2008). **Alcohol Beverage Control Act**. Thailand: Cabinet and Royal Gazette Publishing Office
- [2] Plan for System Development Model and Method of Treatment for People with Integrated Alcohol Consumption Problems. (2010). **Caring for Employees in the Workplace to Prevent and Solve Alcohol Drinking Problems**. Thailand: Plan for System Development Model and Method of Treatment for People with Integrated Alcohol Consumption Problems
- [3] Krungsri Research. (2019). **Beverage Industry**. Access (11 July 2019). Available (www.krungsri.com/bank/getmedia/77793dc9-0214-4a51-9dd1-d16af17ebcd/IO_Beverage_190503_TH_EX.aspx)
- [4] Institute for Population and Social Research Mahidol University and Office of Health Promotion Fund and National Bureau of Health Commission. (2010). **Thai Health 2010 Social Capital Crisis Opportunity**. Thailand: Amarin Printing and Publishing Public Company Limited
- [5] Chachoengsao Justice Provincial Office Ministry of Justice. (2013). **Campaign to Enforce Laws to Prohibit the Sale of Alcohol and Cigarettes to Children Under 18**. Access (12 July 2019). Available (http://chachoengsao.moj.go.th/article_details.php?id=18&fbclid=IwAR2ORDQ_KKLdXhbVR6BAW-O4pJGSC1z9ecXodEfBtFwBqldF86t4xH-zG3E)
- [6] Center for Alcohol Studies. (2007). **Control of Alcohol Problems by Law**. Thailand: Soda Studio Creation and Publishing
- [7] Ghadge, A., Yang, Q., and Caldwell, N. (2016). Facility Location for a Closed-Loop Distribution Network a Hybrid Approach. **International Journal of Retail & Distribution Management**. Vol. 44, Issue 9, pp. 884-902. DOI: 10.1108/IJRDM-07-2015-0094
- [8] Guo, F. and Shi, X. (2018). Research on the Logistics Node Location of Beijing Xinfadi Branch Center. In **IMMS '18: Proceedings of the 2018 International Conference on Information Management & Management Science**. pp. 105-108. DOI: 10.1145/3277139.3277159
- [9] Wimonket, R. and Opananon, S. (2008). Finding a Suitable Location for the Container Loading Center Between the Hulls in the Eastern Region. **Thai VCML Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 99-110
- [10] Gutierrez, M. T. E. and Mutuc, J. E. S. (2018). A Model for Humanitarian Supply Chain An Operation Research Approach. **Procedia Engineering**. Vol. 212, pp. 884-902. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.01.085
- [11] Homchalee, R. (2015). **A Study Appropriate Supply Chain Model for Ethanol Industry in Thailand**. Ph.D. Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University
- [12] Sirisena, H. O. and Samarasekera, N. A. (2018). Vessel Spare Parts Distribution Center Location Decision Model for Ship Maintenance Supply Chain. In **2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)**. pp. 185-190. DOI: 10.1109/SOLI.2018.8476802

- [13] Juan, J. S., Fernandez, C., Lim, B., Lim, E., and Li, R. (2017). A Tool for Selecting Optimal Emergency Response Unit Locations Using an Integrated AHP-MILP Approach. In **2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. pp. 185-190. DOI: 10.1109/IEEM.2017.8289843
- [14] Rahimi, F., Goli, A., and Rezaee, R. (2017). Hospital Location-Allocation in Shiraz Using Geographical Information System (GIS). **Shiraz E-Medical Journal**. Vol. 18, No. 8, pp. 1-8. DOI: 10.5812/semj.57572
- [15] Tezcan, S., Ocak, S., and Top, M. (2019). Analytic Hierarchy Process for Hospital Site Selection. **Health Policy and Technology**. Vol. 8, Issue 1, pp. 42-50. DOI: 10.1016/j.hlpt.2019.02.005
- [16] He, Y., Wang, X., Lin, Y., Zhou, F., and Zhou, L. (2017). Sustainable Decision Making for Joint Distribution Center Location Choice. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. Vol. 55, pp. 202-216. DOI: 10.1016/J.TRD.2017.07.001
- [17] Eursiriwan, N., Panichgarn, V., Rangsarn, D., and Warichwattana, U. (2017). The Selection Criteria of Suitable Location for Weigh Station Establishment Using the Analytical Hierarchy Process (AHP). **Kasem Bundit Engineering Journal**. Vol. 7, No. 1, pp. 17-33
- [18] Wang, X. (2017). Research on the Location of the Hazardous Chemical Distribution Center Under the Supply Chain Environment. **Chemical Engineering Transactions**. Vol. 62, pp. 1351-1356. DOI: 10.3303/CET1762226
- [19] Pluemudom, A. and Smakgahn, K. (2017). Appropriate Sanitation Assessment of Landfill Pond Construction Case Study in Mueang Samut Prakan District, Samut Prakan Province. **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University**. Vol. 4, Number 5, pp. 93-103
- [20] Ding, Z., Zhu, M., Wu, Z., Yanbin Fu, Y., and Liu, X. (2018). Combining AHP-Entropy Approach with GIS for Construction Waste Landfill Selection-A Case Study of Shenzhen. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. Vol. 15, Issue 10, pp. 1-21. DOI: 10.3390/ijerph15102254
- [21] Randazzo, L., Cusumano, A., Oliveri, G., Stefano, P. D., Renda, P., Perricone, M., and Zarcone, G. (2018). Landfill Site Select for Municipal Solid Waste by Using AHP Method in GIS Environment Waste Management Decision Support in Sicily (Italy). **Multidisciplinary Journal for Waste Resources & Residues**. Vol. 2, pp. 78-88. DOI: 10.31025/2611-4135/2018.13656
- [22] Kabak, M. and Keskin, I. (2018). Hazardous Materials Warehouse Selection Based on GIS and MCDM. **Arabian Journal for Science and Engineering**. Vol. 43, No. 6, pp. 3269-3278. DOI: 10.1007/s13369-018-3063-z
- [23] Akgün, İ. and Erdal, H. (2019). Solving an Ammunition Distribution Network Design Problem Using Multi-Objective Mathematical Modeling, Combined AHP-TOPSIS, and GIS. **Computers & Industrial Engineering**. Vol. 129, pp. 512-528. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.004

สายอากาศกะทัดรัดที่ครอบคลุมสามย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย A Compact Tri-Band Antenna for Wireless Communications

สุธาสินี ละมุลตรี^{1*} สุภาดา ศรีสุโคตร¹ ไกรสุรย์ สุขเพ็งพะเนา¹ และเจษฎา กุละวงศ์¹
Suthasinee Lamultree^{1*} Supada Srisukhot¹ Kraisoorn Sukphengphanao¹ and
Chaetsada Kulawong¹

Received: October 15, 2019; Revised: February 1, 2020; Accepted: March 3, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบด้วยช่องเปิดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีปริมาตรรูปตัวแอลแบบกลับด้านและมีความถี่ปฏิบัติการสามย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย โครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา ประกอบด้วยโมโนโพลสี่เหลี่ยมที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นพิมพ์บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ขนาด 50 x 50 มม. มีค่าสภาวะยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 สูง 1.6 มม. สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วม 50 โอห์ม มีวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบตัวแพร่กระจายคลื่นเพื่อบังคับลำคลื่นของสายอากาศให้แพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง นอกจากนี้ยังมีปริมาตรรูปตัวแอลกลับด้านร่วมด้วย เพื่อช่วยปรับจูนการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศ พบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยมี $S_{11} < -10$ dB ครอบคลุมย่านความถี่ 1.50 - 2.22 2.77 - 3.81 และ 4.45 - 6.37 GHz มีค่าอัตราขยายสูงสุดของแต่ละย่านเท่ากับ 1.52 3.44 และ 2.72 dBi ตามลำดับ

คำสำคัญ : สายอากาศกะทัดรัด; สายอากาศที่ครอบคลุมสามย่านความถี่; การสื่อสารไร้สาย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

* Corresponding Author E-mail Address: suthasinee.la@rmuti.ac.th

Abstract

This paper proposes a tri-band rectangular monopole antenna surrounded by rectangular ring with symmetrical perturbation inverted L-shape strips for wireless communications. The antenna structure is simple, compact and lightweight. It is printed on FR4 substrate of dimensions of 50×50 mm. with the relative permittivity of 4.3, high of 1.6 mm and fed by coplanar waveguide with 50-ohm impedance. This presented antenna consists of a monopole rectangular radiating patch, a pair of inverted L-shape strip for improving the impedance matching, and a rectangular ring to control its radiation to be bidirectional pattern. In the processes, an electromagnetic microwave simulation tool is employed to investigate optimum parameters. It is found that both simulated and measured results are in good agreement. This antenna provides $S_{11} < -10$ dB covered 1.50 - 2.22, 2.77 - 3.81, and 4.45 - 6.37 GHz with maximum gains of 1.52, 3.44, and 2.72 dBi, respectively.

Keywords: Compact Antenna; Tri-band Antenna; Wireless Communications

บทนำ

การสื่อสารโทรคมนาคมและการสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและการทำงานของมนุษย์อย่างมาก การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้บริการและรองรับความต้องการได้หลากหลายระบบเป็นที่ต้องการเป็นอย่างยิ่ง การพัฒนาสายอากาศซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สายนี้ เป็นอีกส่วนที่ได้รับความสนใจในการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [1] - [6] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบสายอากาศให้สามารถปฏิบัติการได้หลายย่านความถี่ ซึ่งจะช่วยลดจำนวนอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารที่ใช้งานในย่านความถี่หลาย ๆ ย่าน เช่น สำหรับ Wifi ที่ใช้ทั้ง 2.4 GHz และ 5 GHz [2] หรือ GSM/3G/4G ที่ใช้ในย่าน 800 900 1800 2100 MHz [7] - [9] เป็นต้น ซึ่งหากจะให้ครอบคลุมทั้งการใช้งานโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล และโครงข่ายโทรคมนาคมก็จะออกแบบให้ครอบคลุมการทำงานในย่านความถี่นั้น ๆ อีกระบบการสื่อสารไร้สายที่มีความน่าสนใจและกำลังจะมีการนำมาใช้งานในอนาคตอันใกล้คือ ระบบ 5G ที่มีประกาศย่านความถี่ใช้งานสามย่าน คือ ย่านความถี่ต่ำในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 GHz ย่านความถี่กลางในช่วงความถี่ 1 - 6 GHz และย่านความถี่สูงในช่วงความถี่มากกว่า 24 GHz [10] - [11] โดยสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับปฏิบัติการได้จะพิจารณาที่โครงสร้างของสายอากาศที่แข็งแรง น้ำหนักเบา มีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำกว่า -10 dB (ในงานวิจัยนี้จะพิจารณา S_{11} แทน) และค่าอัตราขยาย (Gain) ที่เหมาะสมตลอดย่าน

การออกแบบสายอากาศเพื่อปฏิบัติการหลายย่านความถี่นี้ ได้มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัด คุ่มค่ากับการลงทุน โดยได้ออกแบบสายอากาศให้สามารถปฏิบัติการได้หลายย่านความถี่ย่อย สำหรับรองรับเทคโนโลยีในอนาคตระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่ช่วงกลางระหว่าง 3300 - 3800 MHz และ 4400 - 5000 MHz [10] - [11] นอกจากนี้ยังสามารถ

ปฏิบัติการได้สำหรับระบบจีเอสเอ็ม (GSM) สำหรับมาตรฐาน GSM 1800 ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 1710 - 1785 MHz และ 1805 - 1880 MHz [7] ระบบการเชื่อมต่อโครงข่ายร่วมกันทั่วโลกด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Wi-MAX) สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE 802.16e ครอบคลุมย่านความถี่ 3300 - 3800 MHz [8] - [9] และระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ครอบคลุมย่านความถี่ 5.150 - 5.350 5.470 - 5.725 และ 5.725 - 5.850 GHz [2] ในการออกแบบสายอากาศที่สามารถปฏิบัติการได้หลายระบบนี้ได้มีการนำเสนอหลากหลายเทคนิคและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [8] - [9], [12] - [17] เช่น สายอากาศโมโนโพลที่พิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์รูปต่าง ๆ เช่น แบบคอคเคียวรูปตัวที โครงสร้างหลายมิติ รูปทรงบานพร้อมปลอกแขนรูปตัววี (Flared Shape with V-Sleeve) และรูปตัววาย เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์หลายความถี่และครอบคลุมการปฏิบัติการหลายย่าน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างสายอากาศที่กล่าวมานี้บางโครงสร้างยังมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ต่อมาได้มีการนำเสนอเทคนิคอื่น ๆ เพื่อลดขนาดโครงสร้างของสายอากาศด้วย เช่น เทคนิคการเจาะร่อง การเพิ่มจำนวนช่องเปิด (Slots) การป้อนสัญญาณด้วยโพรบรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปตัวแอล การเพิ่มช่องเปิดรูปตัวยู (U-Slot) การออกแบบช่องเปิดแบบคอคเคียว การเพิ่มช่องเปิดรูปทรงต่าง ๆ เพื่อให้เกิดโหมดการทำงานที่ต่างกัน และการออกแบบสายอากาศจากวัสดุคิงยวด (Metamaterial) เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มส่วนต่าง ๆ เข้ามานี้ทำให้โครงสร้างสายอากาศซับซ้อนยิ่งขึ้น

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบกรวดร่วมและมิงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบ และเพื่อให้สามารถปฏิบัติการได้สามย่านความถี่ ได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านที่ด้านข้างของวงแหวนสี่เหลี่ยม โครงสร้างของสายอากาศนี้มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และไม่ซับซ้อน ในการออกแบบได้เริ่มจากการออกแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ความถี่ปฏิบัติการย่านกลาง โดยออกแบบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้เกิดคลื่นเป็นใหญ่ (Dominant Mode) TE_{10} ที่ความถี่ย่านล่าง และทำการปรับแต่งขนาดของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมก่อน จากนั้นได้เพิ่มปรสิตรูปตัวแอลกลับด้านที่ด้านข้างวงแหวนสี่เหลี่ยมเพื่อปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ด้านบน สำหรับรายละเอียดในการออกแบบ และการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศได้แสดงในหัวข้อต่อไป

การออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

1. โครงสร้างของสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศที่ครอคลุมสามย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายนี้ ได้เลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริบแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ความถี่กลาง 3.5 GHz ทั้งนี้เพราะโครงสร้างไม่ซับซ้อน แข็งแรง และน้ำหนักเบา โดยแพตช์สี่เหลี่ยมมีความกว้าง w , ความยาว l , ที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งท่อนำคลื่นระนาบร่วมพิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ที่มีค่าสภาพยอมลัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ϵ_r เท่ากับ 4.3 วางบนวัสดุรองรับ (Substrate) ที่มีความสูง h เท่ากับ 1.6 มม. และมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Tangent) δ เท่ากับ 0.02 แพตช์สี่เหลี่ยมนี้ล้อมรอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมโดยมีความหนาด้านข้าง d_1 และความหนากระนาบกรวดด้านบน d_2 ช่องเปิดสี่เหลี่ยมกว้าง a และยาว b ซึ่งภายในช่องเปิดมีปรสิตรูปตัวแอลแบบกลับด้านที่บริเวณกระนาบกรวดด้านบน โดยฐานปรสิตรูปตัวแอลมีความกว้าง l_1 มีความหนา l_2 และความยาว l_3 ติดด้านข้างวงแหวนสี่เหลี่ยม

ที่ตำแหน่งความสูง p สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณโดยใช้สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม โดยมีความกว้าง w_r ความยาว l_r โดยช่องว่างระหว่างขอบล่างของแพตช์สี่เหลี่ยมกับระนาบกราวด์เท่ากับ s ส่วนความสูงของระนาบกราวด์เท่ากับ l_c และช่องว่างระหว่างระนาบกราวด์ทั้งสองด้านกับสายนำสัญญาณมีค่า g ดังแสดงในรูปที่ 1

ในการวิจัยเริ่มต้นได้กำหนดขนาดของวัสดุฐานรองมีขนาดความกว้าง w_g เท่ากับ 50 มม. และขนาดความยาว l_g เท่ากับ 50 มม. และได้ออกแบบตัวแพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการ 3.5 GHz โดยคำนวณจากสมการที่ (1) - (3) ที่ได้ทำการชดเชยผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effect) ด้วย [17] - [18] พบว่าค่าเริ่มต้นสำหรับความกว้าง w_r เท่ากับ 26 มม. และความยาว l_r เท่ากับ 22 มม.

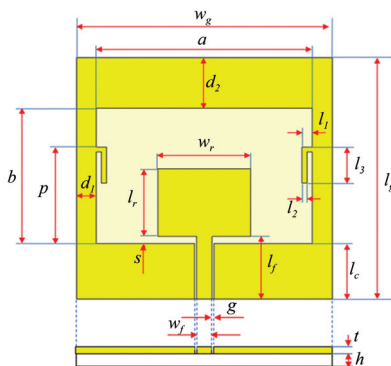
$$w_r = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{1}$$

$$l_r = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 0.824h \left[\frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{w_r}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{w_r}{h} + 0.8 \right)} \right] \tag{2}$$

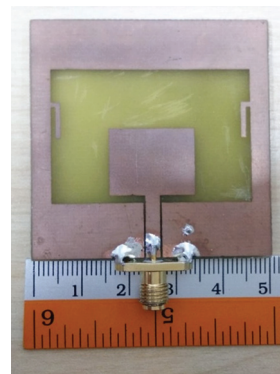
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w_r}}} \right] \tag{3}$$

โดย

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)



(ก) รูปจำลอง



(ข) สายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ

นอกจากนี้ได้เพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมพื้นผ้าล้อมรอบแพตช์สี่เหลี่ยม เพื่อบังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยใช้ทฤษฎีท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ TE_{10} [19] โดยกำหนดให้ความกว้าง $a = 1.5b$ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ a เท่ากับ 42 มม. สำหรับความหนาวงแหวนในเบื้องต้นได้กำหนดความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 4 และ 10.5 มม. ตามลำดับ ในการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบกราวด์ร่วม เพื่อให้แมตซ์อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ดังนั้นสามารถคำนวณความกว้าง w_f และความยาว l_f ของสายป้อนสัญญาณได้จากสมการที่ (4) - (5) [18] โดยกำหนดให้ Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม และความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ 3.5 GHz ดังนั้น w_f เท่ากับ 3 มม. และ l_f เท่ากับ 13 มม. ตามลำดับ ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณ g เท่ากับ 0.4 มม. สำหรับค่าความยาวระนาบกราวด์ l_c เท่ากับ 11.5 มม. ระยะห่างระหว่างขอบล่างแพตช์สี่เหลี่ยมและระนาบกราวด์ s เท่ากับ 1.5 มม. ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะใช้เป็นค่าคงที่ตลอดบทความ

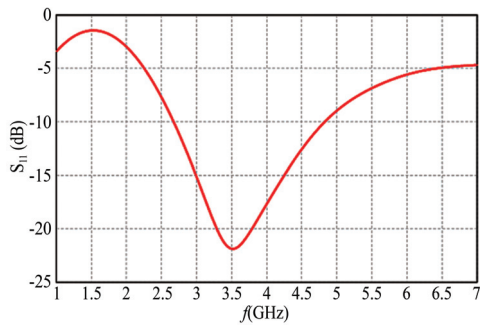
$$w_f = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln \left(2 \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln \left(\frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (4)$$

$$l_f = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (5)$$

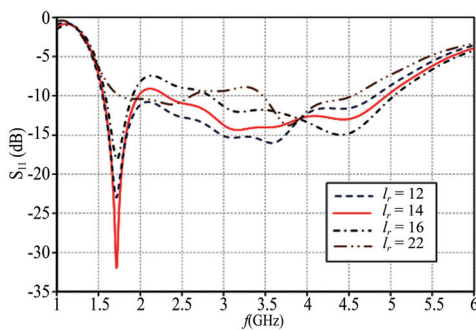
โดย $B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$

2. การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยได้เริ่มต้นการออกแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมที่ความถี่ 3.5 GHz ด้วยสมการที่ (1) - (3) พบว่าสายอากาศนี้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 3.5 GHz มีย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์แคบครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 2.67 - 4.82 GHz ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์และบังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการเพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง a เท่ากับ 42 มม. และความยาว b เท่ากับ 28 มม. ที่ล้อมรอบแพตช์สี่เหลี่ยมและทำหน้าที่ระนาบกราวด์ร่วมด้วย โดยได้ศึกษาผลกระทบของความยาวแพตช์สี่เหลี่ยมร่วมด้วย พบว่าการเพิ่มวงแหวนสี่เหลี่ยมช่วยให้ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น กล่าวคือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.8 และ 3.5 GHz ดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาผลกระทบของความยาวแพตช์สี่เหลี่ยม พบว่าแพตช์สี่เหลี่ยมที่มีความยาวสั้นลงทำให้ช่วงกว้างความถี่ย่าน 3.5 GHz กว้างมากขึ้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกค่าที่ดีที่สุดของความยาวแพตช์เท่ากับ 14 มม. เนื่องจากการแมตซ์อิมพีแดนซ์ดีที่สูงสุดและครอบคลุมสองย่านความถี่จากนั้นจะพิจารณาความกว้างแพตช์สี่เหลี่ยมที่เหมาะสมต่อไป

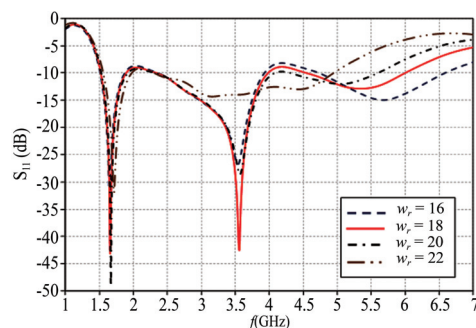


รูปที่ 2 S_{11} ของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม



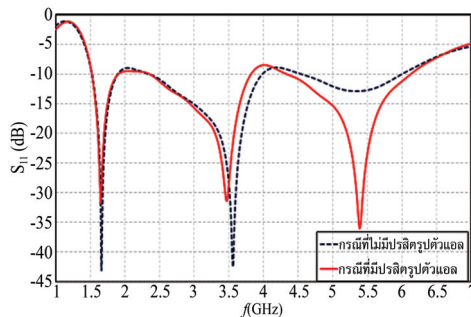
รูปที่ 3 ผลกระทบของยาวแพทช์ l_r ที่มีผลต่อ S_{11}

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของความกว้างแพทช์สี่เหลี่ยม w_r ที่มีผลต่อ S_{11} สำหรับกรณีที่ยังไม่รวมผลกระทบจากปรีดิรูปตัวแอล พบว่าค่าความกว้างแพทช์สี่เหลี่ยม w_r ยิ่งสั้นจะยิ่งส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ย้ายบนเลื่อนขึ้นไปที่มีความถี่สูง แต่ที่ย่านความถี่ย่านล่างและย่านความถี่กลางเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดิม แต่การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ยังขึ้น เมื่อพิจารณา S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB สำหรับ $w_r = 16$ มม. และ $w_r = 18$ มม. พบว่าทั้งสองกรณีนี้มีช่วงปฏิบัติการสามย่านความถี่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบกล่าวคือ ย่านความถี่ด้านล่างตั้งแต่ 1.72 - 1.87 GHz ที่ย่านความถี่กลาง 3.3 - 3.8 GHz และที่ย่านความถี่สูง 5.2 - 5.8 GHz โดยพบว่า $w_r = 18$ มม. มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่กลางดีกว่ากรณี $w_r = 16$ มม. ดังนั้นจึงเลือก $w_r = 18$ มม.

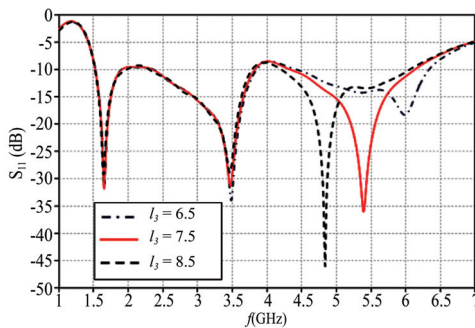


รูปที่ 4 ผลกระทบของความกว้างแพทช์สี่เหลี่ยม w_r ที่มีผลต่อ S_{11}

เพื่อปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูงให้สามารถปฏิบัติการได้สามย่านความถี่ที่ชัดเจนขึ้น ได้เพิ่มปริมาตรรูปตัวแอลแบบกลับด้านร่วมด้วย โดยกำหนดให้ความหนา l_2 เท่ากับ 1 มม. และออกแบบความยาวของปริมาตรรูปตัวแอล l_3 ยาวเท่ากับ $\lambda_g/4$ (ที่ความถี่ 5.5 GHz) [8] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรตัวแอลกลับด้านนี้ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 5.5 GHz ได้ดียิ่งขึ้นและมีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ที่ย่านความถี่แรกตั้งแต่ 1.52 - 1.90 GHz ย่านความถี่ที่สองตั้งแต่ 2.35 - 3.82 GHz และย่านความถี่ที่สามตั้งแต่ 4.34 - 6.12 GHz ดังรูปที่ 5 เมื่อปรับความยาว l_3 เท่ากับ 8.5 7.5 และ 6.5 มม. พบว่ายิ่ง l_3 ยาวมากขึ้นมีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงเท่านั้นเลื่อนขึ้นไปที่ย่านความถี่สูง กล่าวคือ เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 4.8 5.4 และ 6 GHz ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ย่านล่างและย่านกลางไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในบทความนี้ได้เลือก $l_3 = 7.5$ มม. เนื่องจากเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่กลาง 5.5 GHz มากที่สุดดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ได้พิจารณาผลกระทบของตำแหน่งความสูงของฐานปริมาตรรูปตัวแอล p และความกว้างของฐานปริมาตรรูปตัวแอล l_1 ร่วมด้วย

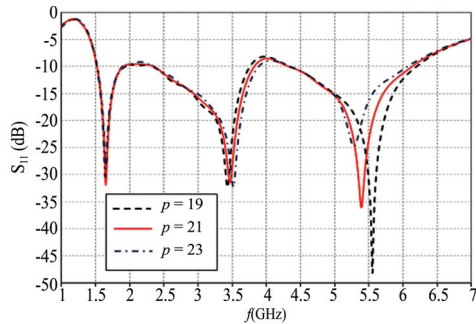


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบสายอากาศที่นำเสนอกรณีที่ไม่มีและกรณีที่มีปริมาตรตัวแอลกลับด้าน



รูปที่ 6 ผลกระทบของความยาวปริมาตรตัวแอล l_3 ที่มีผลต่อ S_{11}

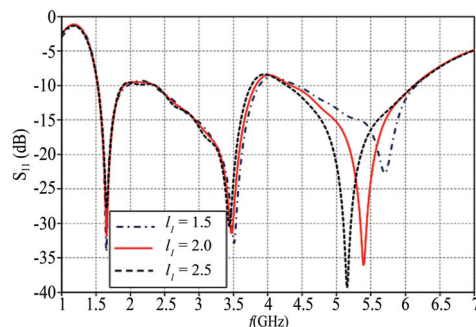
รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของตำแหน่งของปริมาตรตัวแอลแบบกลับด้าน p ต่อ S_{11} พบว่าปริมาตรตัวแอลกลับด้านนี้มีผลกระทบที่ย่านความถี่สูง 5.5 GHz โดยการเลื่อนตำแหน่ง p ให้สูงขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงเลื่อนลงไปที่ความถี่ต่ำเล็กน้อย แต่ช่วงกว้างความถี่เท่าเดิม ในการออกแบบนี้ได้เลือกตำแหน่ง p เท่ากับ 21 มม. เนื่องจากที่ย่านความถี่สูงเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่กลาง 5.5 GHz และมีช่วงปฏิบัติการครอบคลุมย่านความถี่กลางที่ต้องการ



รูปที่ 7 ผลกระทบของตำแหน่งความสูงปรสิตรูปตัวแอล p ที่มีผลต่อ S_{11}

สำหรับผลกระทบของความกว้างฐานของปรสิตรูปตัวแอล l_1 ต่อ S_{11} ได้แสดงในรูปที่ 8 พบว่ายิ่งความกว้างฐานยาวขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูง 5.5 GHz จะเลื่อนไปยังความถี่ต่ำสำหรับความกว้าง l_1 เท่ากับ 1.5 2 และ 2.5 มม. พบว่าเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงที่ 5.7 5.1 และ 5.4 GHz ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือก l_1 เท่ากับ 2 มม. เนื่องจากเกิดความถี่เรโซแนนซ์ใกล้กับความถี่กลาง 5.5 GHz มากที่สุดนอกจากนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของฐานปรสิตรูปตัวแอลไม่ได้มีผลกระทบต่อย่านความถี่ต่ำที่ 1.7 และ 3.5 GHz

จากผลการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้สรุปการออกแบบสายอากาศ ดังตารางที่ 1 พบว่าสายอากาศที่ออกแบบนี้มีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ปฏิบัติการสามย่านความถี่ กล่าวคือ ย่านล่างความถี่ 1.52 - 1.90 GHz ความถี่ย่านกลางความถี่ 2.34 - 3.82 GHz และความถี่ย่านบนความถี่ 4.33 - 6.12 GHz ซึ่งมีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการสำหรับระบบ 5G ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่กลาง 3300 - 3800 และ 4400 - 5000 MHz นอกจากนี้ยังสามารถปฏิบัติการร่วมกับระบบ GSM-1800 WI-MAX และ WLAN โดยมีค่าอัตราการขยายสูงสุดที่ย่านล่างเท่ากับ 2.86 dBi ที่ย่านความถี่กลางเท่ากับ 3.66 dBi และที่ย่านบนเท่ากับ 5.6 dBi ดังรูปที่ 9 ข้อสังเกต จากรูปที่ 9 พบว่าค่าอัตราการขยายสูงสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการของ WLAN 5.5 GHz (5.150 - 5.85 GHz) มีค่า 3.16 dBi

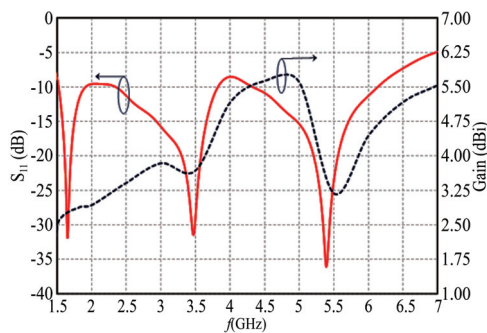


รูปที่ 8 ผลกระทบของความกว้างของฐานปรสิตรูปตัวแอล l_1 ที่มีผลต่อ S_{11}

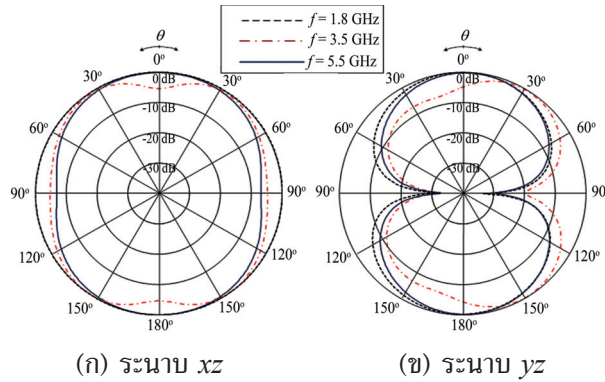
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
w_g	50	p	21
l_g	50	g	0.4
w_r	18	s	1.5
l_r	14	t	0.035
w_f	3	d_1	4
l_f	13	d_2	10.5
l_c	11.5	l_1	2
a	42	l_2	1
b	28	l_3	7.5

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth: HPBW) ในระนาบ xz มีค่าเท่ากับ 179 องศา และ 84 องศา สำหรับระนาบ yz ที่ความถี่ 3.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 112 และ 68 องศา สำหรับระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่ 5.5 GHz พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 56 และ 53 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลการจำลอง S_{11} และอัตราขยายของสายอากาศ

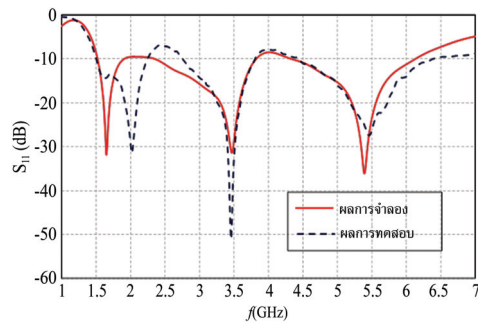


รูปที่ 10 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศ

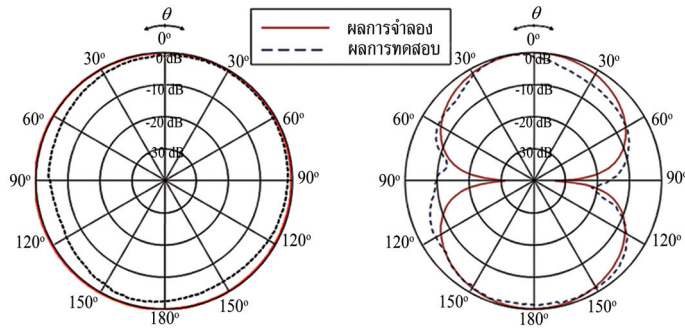
เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการออกแบบและการวิเคราะห์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผล ด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C สำหรับคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ ได้แก่ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ (ดังรูปที่ 1(ข)) ได้สร้างตามขนาดที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 โดยส่วนที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นสร้างจากตัวนำทองแดงหนา 0.03 มม. เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 18 มม. ความยาว 14 มม. พิมพ์บนวัสดุรองรับที่มีค่าสภาพยอมลัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 สูง 1.6 มม. โดยมีระนาบกราวด์แบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมพิมพ์บนวงจรพิมพ์ด้านบน (ด้านบน) มีความกว้างเท่ากับ 23.1 มม. และความยาวเท่ากับ 11.5 มม. มีช่องว่างระหว่างเส้นป้อนสัญญาณและระนาบกราวด์เท่ากับ 0.4 มม. เส้นป้อนสัญญาณกว้าง 3 มม. และยาว 13.5 มม. นอกจากนี้ที่ระนาบกราวด์ใต้พิมพ์วงแหวนสี่เหลี่ยมมีความกว้างและความยาวด้านในเท่ากับ 42 และ 28 มม. ตามลำดับ เพื่อทำหน้าที่บังคับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ช่องเปิดสี่เหลี่ยมด้านในโหนดด้วยปรีลิตรูปตัวแอลกลับด้านที่มีความยาวเท่ากับ 7.5 มม. หนา 1 มม. มีฐานกว้าง 2 มม. ที่ตำแหน่งความสูง 21 มม. ดังตารางที่ 1 สำหรับการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศได้ทำการเชื่อมต่อด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SMA ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

สำหรับการเข้ากันได้ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์มนั้น พิจารณาจากค่า S_{11} โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ $|S_{11}| < -10$ dB จากรูปที่ 11 พบว่าผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศที่ออกแบบนี้มีความสอดคล้องกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ครอบคลุมย่านความถี่ปฏิบัติการสำหรับระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่กลาง นอกจากนี้ยังครอบคลุมระบบ GSM - 1800 Wi-MAX และ WLAN กล่าวคือ จากการจำลองเกิดความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้นที่ความถี่ย่านล่าง 1.65 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 1.52 - 1.90 GHz) ความถี่ย่านกลาง 3.43 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 2.34 - 3.82 GHz) และความถี่ย่านบน 5.39 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 4.33 - 6.12 GHz) ส่วนผลที่ได้จากการทดสอบเกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ย่านล่าง 2.02 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 1.50 - 2.22 GHz) ความถี่ย่านกลาง 3.46 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 2.77 - 3.81 GHz) และความถี่ย่านบน 5.44 GHz (ครอบคลุมย่านความถี่ 4.45 - 6.37 GHz) ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดสอบ S_{11}

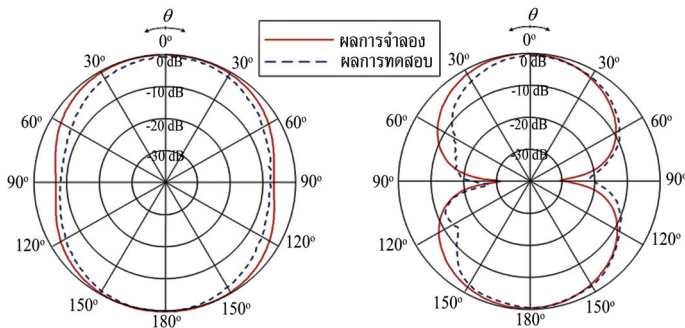
เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบให้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางสอดคล้องกัน มีค่าความแรงของสนามไฟฟ้าแรงที่สุดที่มุม 0 และ 180 องศา ที่ความถี่ 1.8 GHz และความถี่ 3.5 GHz สำหรับความถี่ 5.5 GHz พบว่าสายอากาศนี้ให้แบบรูปแบบสองทิศทางที่มีมุมยกเท่ากับ 28 องศา โดยผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 12 สำหรับผลที่ได้จากการจำลองที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 180 องศา และในระนาบ yz เท่ากับ 84 องศา ส่วนผลจากการทดสอบมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 179 และ 44 องศา ตามลำดับจากการจำลองผลที่ความถี่ 3.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 112 องศา และในระนาบ yz เท่ากับ 68 องศา ส่วนผลจากการทดสอบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 80 และ 58 องศา และจากการจำลองผลที่ความถี่ย่านบน 5.5 GHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 56 องศา และระนาบ yz เท่ากับ 53 องศา ตามลำดับ ผลจากการทดสอบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากันคือ 53 องศา ดังรูปที่ 12 - 14 และเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าอัตราการขยายโดยใช้สมการฟรีส (Friis Transmission Equation) [18] โดยใช้สายอากาศสององค์ประกอบที่เหมือนกัน (สายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศภาครับและภาคส่ง) โดยไม่นำค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณในภาครับและภาคส่งมาคำนวณร่วมด้วย เพราะในขั้นตอนการทดสอบนี้ได้ทำการปรับเทียบ (Calibration) ที่ปลายสายก่อนการทดสอบแล้ว ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งเท่ากับ 33 เซนติเมตร ดังนั้นค่าการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Loss) ที่ความถี่ 1.8 3.5 และ 5.5 GHz เท่ากับ -27.91 -33.69 และ -37.62 dB ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนกำลังงานสายอากาศรับต่อกำลังงานสายอากาศส่งเท่ากับ -24.87 -26.82 และ -32.17 dB ตามลำดับ ดังนั้นค่าอัตราการขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 1.8 3.5 และ 5.5 GHz มีค่าอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 1.52 3.43 และ 2.72 dBi ตามลำดับ



(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

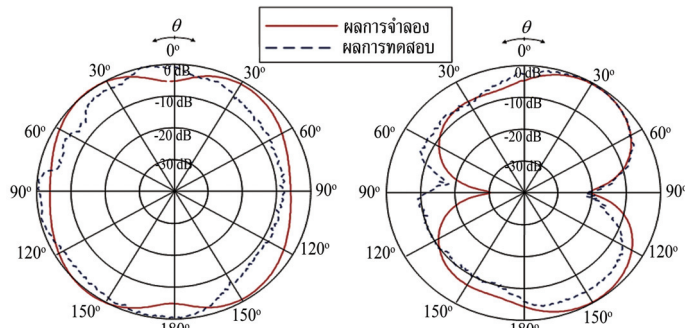
รูปที่ 12 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 1.8 GHz



(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 13 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz



(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 14 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.5 GHz

หมายเหตุ ผลการจำลองและผลการทดสอบมีความแตกต่างกันเนื่องจากการจำลองไม่ได้พิจารณาผลของตัวเชื่อมต่อยุ่ด้วย แต่ในการทดสอบจำเป็นต้องเชื่อมต่อสายอากาศและระบบสายส่งด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SMA

สรุปและวิจารณ์

บทความนี้แนะนำเสนอสายอากาศโมโนโพลีเหลี่ยมที่ล้อมรอบด้วยช่องเปิดวงแหวนสี่เหลี่ยมที่สามารถปฏิบัติการสามย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยโครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา ประกอบด้วยโมโนโพลีเหลี่ยมที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นที่ออกแบบที่ย่านความถี่กลางพิมพ์บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งที่นำคลื่นระนาบร่วม 50 โอห์ม โดยมีวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบตัวแพร่กระจายคลื่นเพื่อบังคับลำคลื่นของสายอากาศให้แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและช่วยปรับปรุงย่านความถี่เชิงอิมพีแดนซ์ล่าง นอกจากนี้ได้เพิ่มประสิทธิภาพตัวแอลแบบกลับด้านร่วมด้วย เพื่อช่วยปรับปรุงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่สูง พบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยสายอากาศต้นแบบมี $S_{11} < -10$ dB ครอบคลุมสามย่านความถี่ตั้งแต่ 1.50 – 2.22 2.77 – 3.81 และ 4.45 – 6.37 GHz สำหรับระบบ 5G ที่ย่านความถี่ต่ำ 1800 MHz และย่านความถี่กลางที่ต่ำกว่า 6 GHz นอกจากนี้ยังสามารถปฏิบัติการได้สำหรับระบบ GSM-1800 และ GSM-1900 Wi-MAX ย่าน 3.5 GHz และ WLAN ย่าน 5.5 GHz ด้วย โดยมีอัตราขยายสูงสุดในแต่ละย่านเท่ากับ 1.52 3.44 และ 2.72 dBi ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- [1] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., and Ittipiboon, A. (2001). **Microstrip Antenna Design Handbook**. London: Artech House Inc.
- [2] Chen, Z. N., Qing, X., See, T. S. P., and Toh, W. K. (2012). Antennas for WiFi Connectivity. **Proceedings of the IEEE**. Vol. 100, Issue 7, pp. 2322-2329. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2183830
- [3] Jothi Chitra, R. and Nagarajan, V. (2013). Double L-Slot Microstrip Patch Antenna Array for WiMAX and WLAN Applications. **Computers & Electrical Engineering**. Vol. 39, Issue 3, pp. 1026-1041. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2012.11.024
- [4] Hoang, T. V. and Park, H. C. (2014). Very Simple 2.45/3.5/5.8 GHz Triple-Band Circularly Polarized Printed Monopole Antenna with Bandwidth Enhancement. **Electronics Letters**. Vol. 50, Issue 24, pp. 1792-1793. DOI: 10.1049/el.2014.2935
- [5] Chakraborty, U., Kundu, A., Chowdhury, S. K., and Bhattacharjee, A. K. (2014). Compact Dual-Band Microstrip Antenna for IEEE 802.11a WLAN Application. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 407-410
- [6] Wu, T. L., Pan, Y. M., Hu, P. F., and Zheng, S. Y. (2017). Design of a Low Profile and Compact Omnidirectional Filtering Patch Antenna. **IEEE Access**. Vol. 5, pp. 1083-1089. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2651143

- [7] Ban, Y. L., Li, C., Sim, C. Y. D., Wu, G., and Wong, K. L. (2016). 4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications. **IEEE Access**. Vol. 4, pp. 2981-2988. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2582786
- [8] Hu, W., Yin, Y. Z., Fei, P., and Yang, X. (2011). Compact Triband Square-Slot Antenna with Symmetrical L-Strips for WLAN/WiMAX Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 10, pp. 462-465. DOI:10.1109/LAWP.2011.2154372
- [9] Osklang, P., Phongcharoenpanich, C., and Akkaraekthalin, P. (2019). Triband Compact Printed Antenna for 2.4/3.5/5 GHz WLAN/WiMAX Applications. **International Journal of Antennas and Propagation**. Vol. 2019, p. 13. DOI: 10.1155/2019/8094908
- [10] Ta, X. S., Choo, H., and Park, I. (2017). Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 16, pp. 2183-2186. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2703850
- [11] Li, Y., Zhao, Z., Tang, Z., and Yin, Y. (2020). Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 68, Issue 4, pp. 3231-3236. DOI: 10.1109/TAP.2019.2957720
- [12] Changand, T. N. and Jiang, J. H. (2009). Meandered T-Shaped Monopole Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 57, Issue 12, pp. 3976-3978. DOI: 10.1109/TAP.2009.2026713
- [13] Nguyen, V., Park, B., Park, S., and Yoon, G. (20014). A Planar Dipole for Multiband Antenna Systems with Self-Balanced Impedance. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 1632-1635. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2347952
- [14] Huang, H., Liu, Y., Zhang, S., and Gong, S. (2015). Multiband Metamaterial-Loaded Monopole Antenna for WLAN/WiMAX Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 14, pp. 662-665. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2376969
- [15] He, M., Ye, X., Zhou, P., Zhao, G., Zhang, C., and Sun, H. (2015). A Small-Size Dual-Feed Broadband Circularly Polarized U-Slot Patch Antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 14, pp. 898-901. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2384496
- [16] Yang, Y., Chu, Q., and Mao, C. (2016). Multiband MIMO Antenna for GSM, DCS, and LTE Indoor Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 15, pp. 1573-1576. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2517188
- [17] Lamultree, S. and Jansri, C. (2019). A Compact Unidirectional Pattern Antenna for Wireless Communications. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 12, No. 2, pp. 14-28
- [18] Balanis, C. A. (2007). **Antenna Theory, Analysis and Design**. New York: John Wiley & Sons
- [19] Lamultree, S. and Phongcharoenpanich, C. (2008). Bidirectional Ultra-Wideband Antenna Using Rectangular Ring Fed by Stepped Monopole. **Progress in Electromagnetics Research PIER**. Vol. 85, pp. 227-242. DOI: 10.2528/PIER08080103

ตัวตรวจจับรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทาง อัตโนมัติ

Trains Detection Using Video Processing Method for Automation Railroad Crossing

ซูไฮดี สนิ¹ ธีรพงษ์ ฉิมเพชร^{1*} นราทร สังข์ประเสริฐ¹ และจรูญ เจริญเนตรกุล¹

Suhaidee Sani¹ Teerapong Chimphet^{1*} Naratorn Sangprasert¹ and

Charoon Charoennatkul¹

Received: December 2, 2019; Revised: March 30, 2020; Accepted: March 31, 2020

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอตัวตรวจจับรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประมวลผลภาพเคลื่อนไหวเพื่อประยุกต์ใช้ในงานคมนาคมทางรางและเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องมือด้านวิศวกรรมในการช่วยป้องกันอุบัติเหตุสำหรับจุดตัดผ่านทางรถไฟระบบลูกออกแบบให้ตรวจจับรถไฟดีเซลที่มีความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อาศัยกล้องที่วางจรปิดที่ติดตั้งไว้บริเวณด้านข้างรางรถไฟมีระยะห่างจากจุดตัดผ่านทางที่ติดตั้งเครื่องกั้นทางไว้เป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร ข้อมูลภาพเคลื่อนไหวของรถไฟจะถูกส่งผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ทำการประมวลผลภาพที่ได้ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยฟังก์ชันในการตรวจจับรถไฟ ได้แก่ ฟังก์ชันน้ำหนักของสีที่มีหน้าที่แยกแยะสีของวัตถุ ฟังก์ชันความเหมือนที่มีหน้าที่เปรียบเทียบวัตถุกับภาพในฐานข้อมูล และฟังก์ชันการเคลื่อนไหวด้วยขนาดพิกเซลของภาพที่มีหน้าที่ในการดูการเคลื่อนที่ของวัตถุ เมื่อระบบแยกแยะวัตถุที่เป็นรถไฟได้แล้วก็จะทำการส่งสัญญาณควบคุมให้เครื่องกั้นทางทำงาน ผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบสามารถตรวจจับรถไฟดีเซลได้เป็นอย่างดีและมีความแม่นยำเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่เข้าสู่ระยะ 50 เมตรจากตัวกล้อง โดยเครื่องกั้นทางสามารถทำงานได้ก่อนขบวนรถเคลื่อนที่มาถึงจุดตัดผ่านทางรถไฟ จึงถือได้ว่าเป็นเครื่องมือในการช่วยป้องกันอุบัติเหตุ ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีที่มีราคาสูงและเป็นงานวิจัยหนึ่งในการช่วยพัฒนาระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยให้มีความยั่งยืน

คำสำคัญ : รถไฟ; วิดีโอ; เครื่องกั้นทาง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author E - mail Address: ch_teerapong@hotmail.com

Abstract

This paper presents trains detection by using video processing method for automation railroad crossing. It aims to study method of video processing, adaption in rail transport and developing engineering tools preventing accidents at crossing. The system is designed to detect diesel trains, which have the speed the limited speed posted at 120 km/h. The system use closed circuit TV cameras (CCTV), which were installed on the side of the railroad in 1 km from the crossing, to supports data recording. Data of video processing of trains will pass on fiber optic cable to a computer system. Then, processing of image of trains by program, which were developed by trains detection function which consists of color threshold function, pattern matching function and motion gauge function. When the system can identify objects that are trains, the system will sent signal control to railroad crossing. The results showed that the trains detection system works well with diesel trains and is a exact tool when the trains moving into distance 50 m from closed circuit TV camera (CCTV) and the railroad crossing works before the trains moving arrive at the crossing. The finding shows method of video processing could be an accident prevention on the rail road tool, decreasing dependence high priced technology and it is a research in supporting the sustainable development railroad transportation system in Thailand.

Keywords: Train; Video; Railroad Crossing

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งหลายด้าน หนึ่งในนั้นคือด้านระบบขนส่งทางราง โดยภาครัฐได้เล็งเห็นถึงความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นระบบที่มีผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ จึงเกิดเป็นโครงการหลายโครงการ เช่น การพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมือง การสร้างรางรถไฟทางคู่สายใหม่ เป็นต้น ทำให้สัดส่วนการขนส่งทางรถไฟในประเทศไทยจะเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 1.5 เป็นร้อยละ 5 ประชาชนเข้าถึงรถไฟได้ง่ายขึ้นมีเส้นทางรถไฟที่ครอบคลุมพื้นที่ การเดินทางและการขนส่งด้วยรถไฟตรงเวลาและปลอดภัยมากขึ้น เป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากพื้นที่อย่างคุ้มค่านำไปสู่การตั้งถิ่นฐานอย่างเป็นระบบ นอกจากนี้จะช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งซึ่งจะส่งผลให้ประเทศมีขีดความสามารถในการแข่งขันที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย [1] แต่ถึงอย่างไรนั้นการคมนาคมขนส่งในประเทศก็ยังคงจำเป็นต้องพึ่งพาทางเลือกด้านอื่น ๆ เช่น ทางถนน ทางทะเล หรือแม้กระทั่งทางอากาศ หากแต่เมื่อระบบขนส่งทางรางพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็นวงกว้างอาจส่งผลกระทบต่อภาคการคมนาคมด้านอื่น ตัวอย่างเช่นมีรางรถไฟที่มีถนนตัดผ่านมากขึ้นอาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุ เหมือนที่เกิดขึ้นมาแล้วทั้งในอดีตและปัจจุบัน ซึ่งสาเหตุอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักมาจากทัศนวิสัยและสภาพแวดล้อม ตลอดจนความบกพร่องของ

อุปกรณ์บริเวณทางตัดผ่านหรือเกิดขึ้นเนื่องจากความประมาทเลินเล่อ ความคะนอง และการไม่ปฏิบัติตามกฎจราจรเพราะฉะนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาโครงข่ายรถไฟในประเทศอย่างแท้จริงจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย

จากข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย [2] - [3] ระบุว่าโครงข่ายเส้นทางรถไฟทั้งประเทศมีจุดตัดผ่านทางรถไฟทั้งสิ้น 2,517 จุด เป็นจุดตัดที่ได้รับอนุญาต 1,933 แห่ง และไม่ได้รับอนุญาตหรือทางลักผ่าน 584 แห่ง โดยยังมีจุดตัดผ่านอีกหลายแห่ง ที่ยังไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันอุบัติเหตุหรือเครื่องกั้นถนนในแต่ละปีปรากฏข้อเท็จจริงว่าได้มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นในบริเวณจุดตัดทางรถไฟซึ่งเป็นจุดตัดของทางรถไฟกับถนนอยู่บ่อยครั้ง ดังเช่นในปี พ.ศ. 2558 ตัวเลขอุบัติเหตุสูงถึง 127 ครั้ง เสียชีวิต 27 คน และผู้บาดเจ็บ 31 คน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นในแต่ละครั้งจะนำมาซึ่งความสูญเสียมากมายไม่ว่าจะเป็น การสูญเสียชีวิตหรือทรัพย์สินทั้งของผู้ขับขี่ยานพาหนะ ผู้ที่โดยสารอยู่บนพาหนะที่แล่นผ่านทางรถไฟหรือความเสียหายแก่ตัวรถไฟ การแก้ไขปัญหานี้ในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้หลักการทางด้านวิศวกรรมในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมและทัศนวิสัยบริเวณทางตัดผ่าน โดยการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องหมายหรือการให้ความรู้ความเข้าใจแก่ผู้ขับขี่เกี่ยวกับสาเหตุและความร้ายแรงของอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น

งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญในการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและความปลอดภัยในการคมนาคมทางถนนที่เกี่ยวข้องกับการคมนาคมทางรางจึงได้ทำการวิจัย การพัฒนาตัวตรวจจับรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ เพื่อเป็นเครื่องมือด้านวิศวกรรมในการช่วยลดอุบัติเหตุในจุดที่เป็นทางตัดผ่านทางรถไฟ โดยการพัฒนาระบบเครื่องกั้นทางตัดผ่านแบบอัตโนมัติที่ใช้หลักการประมวลผลภาพรถไฟจากสัญญาณวิดีโอ และเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยพัฒนาระบบขนส่งทางรางในประเทศให้มีความยั่งยืน ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสนับสนุนแนวคิดในการทำวิจัยในครั้งนี้

บทความวิจัยในปี ค.ศ. 2015 ของ Shogo, Y., Naoko, T., Gege, D., Shinji, W., Masahide, T., Makoto, Y., and Tamio, O. เรื่อง Design Optimization of Magnetic Sensor for Train Detection [4] ได้นำเสนอการตรวจจับรถไฟด้วยเซนเซอร์แม่เหล็ก มีหลักการตรวจจับคือตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะติดตั้งอยู่ด้านข้างบริเวณรางรถไฟ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่มายังบริเวณดังกล่าวตัวล้อที่มีคุณสมบัติเป็นเหล็กจะทำหน้าที่เป็นสื่อนำฟลักซ์แม่เหล็กส่งผ่านไปยังตัวรับทำให้สามารถตรวจจับขบวนรถไฟได้และสามารถนำผลการตรวจจับที่ได้ไปควบคุมเครื่องกั้นทางได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับการรถไฟแห่งประเทศไทยใช้งานอยู่เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายสามารถตรวจจับรถไฟอย่างแม่นยำ แต่หากมีวัตถุหรือตัวนำที่สามารถเป็นสื่อนำฟลักซ์แม่เหล็กก็อาจทำให้ระบบเข้าใจว่ามีรถไฟเคลื่อนที่ผ่านเข้ามา

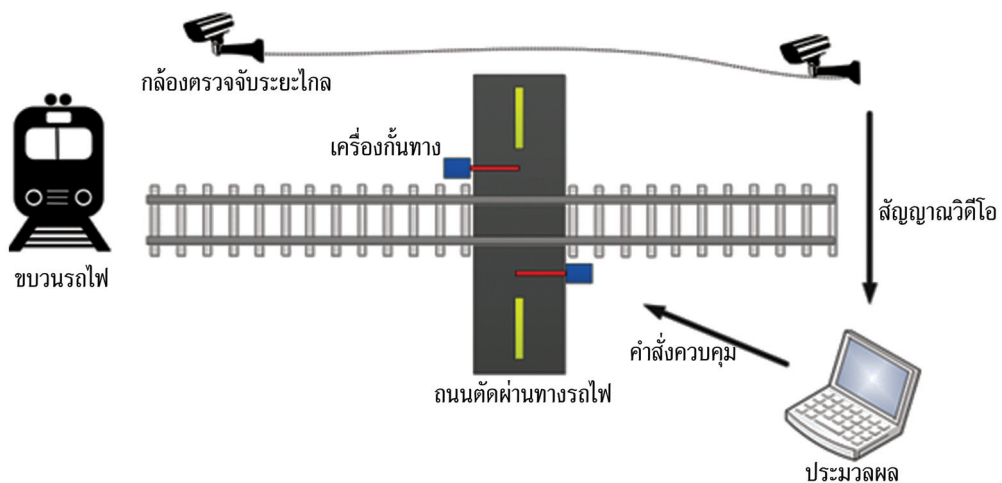
บทความวิจัยในปี ค.ศ. 2010 ของ Angrisani, L., Grillo, D., Schiano, R., Moriello, Lo., and Giovanni, F. เรื่อง Automatic Detection of Train Arrival Through An Accelerometer [5] ได้นำเสนอการตรวจสอบรถไฟที่กำลังมาถึงสถานีด้วยหลักการตรวจจับความเร่งที่ได้จากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับตัวรางรถไฟ มีหลักการทำงานคือแรงสั่นสะเทือนในรางจะเกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของรถไฟเมื่อรถไฟเข้าใกล้สถานีจะทำให้ระดับของแรงสั่นสะเทือนในรางมีค่าสูงขึ้น จากการศึกษา งานวิจัยข้างต้นผู้วิจัยพบว่าหลักการตรวจจับดังกล่าวเป็นวิธีที่ต้องอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อจำแนกเอกลักษณ์สัญญาณที่เป็นของรถไฟ หากแต่ยังไม่สามารถระบุทิศทางในการเคลื่อนที่ได้

บทความวิจัยในปี ค.ศ. 2011 ของ Arvind, H. N., Paul, B., and Ralph, B. เรื่อง Railway Level Crossing Obstruction Detection Using MIMO Radar [6] เป็นบทความที่นำเสนอการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมสำหรับเครื่องกั้นทางผ่าน โดยอาศัยเซนเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า Radar ที่มีความถี่ 24.225 GHz ติดตั้งเหนือพื้นดินบริเวณทางตัดผ่านมีระดับความสูงจากพื้นดิน 4 เมตร มีหลักการการทำงานคือระบบจะมองรถไฟเป็นวัตถุหรือสิ่งแปลกปลอม ปรากฏขึ้นบนความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นตัวประมวลผลจะคำนวณค่าความถี่ที่ได้รับแล้วส่งการให้เครื่องกั้นทางตัดผ่านทำงานจากการศึกษาวิจัยข้างต้นผู้วิจัยพบว่าหลักการตรวจจับดังกล่าวสามารถตรวจจับขบวนรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่ได้ โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยข้างต้นได้สรุปว่าขอบเขตในการตรวจจับขบวนรถไฟนั้นจะมีระยะ 30 เมตร ห่างจากเครื่องส่ง Radar

จากการทบทวนวรรณกรรมสามารถสรุปได้ว่าการตรวจจับขบวนรถไฟจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะอาศัยการติดตั้งเซนเซอร์ไว้กับรางรถไฟโดยเน้นการตรวจจับส่วนล้อของรถไฟหรือค่าสัญญาณของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นหลักการที่ให้ความแม่นยำอยู่ในระดับสูงหากแต่ผู้วิจัยเห็นว่าลักษณะการติดตั้งบางหลักการยังคงต้องติดตั้งอุปกรณ์ค่อนข้างเยอะและง่ายต่อการรบกวนจากภายนอก เช่น มีผู้อาศัยอยู่บริเวณรางรถไฟนำโลหะไปวางตรงตำแหน่งเซนเซอร์ก็อาจทำให้เครื่องกั้นทางจุดตัดผ่านทำงานได้ การใช้กล้องที่วิงจรถัดฝักระวังรถไฟน่าจะเป็นทางออกของปัญหาข้างต้นได้อย่างดี

ทฤษฎีและกรอบแนวคิด

ตัวตรวจจับรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัตินี้ออกแบบมาสำหรับตรวจจับขบวนรถจักรดีเซลที่มีความเร็วต่ำ องค์ประกอบของระบบตามกรอบแนวคิดแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานในการออกแบบระบบดังนี้



รูปที่ 1 ระบบตรวจจับรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ

1. รถจักรดีเซลในประเทศไทยนิยมใช้รถจักรดีเซลอยู่ 2 ประเภทคือ รถดีเซลราง (Diesel Railcar) เป็นรถโดยสารที่มีเครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนด้วยตนเอง และรถจักรดีเซลไฟฟ้า (General Electric) คือรถจักรที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีต้นกำลังจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่เครื่องยนต์ดีเซลจะหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไปจ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อทำการขับเคลื่อนเพลาให้รถเคลื่อนที่ โดยที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถจักรดีเซลนั้นจะมีค่าความเร็วสูงสุดอยู่ระหว่าง 100 - 103 กม./ชม. เมื่อขบวนรถจักรดีเซลวิ่งอยู่บนรางด้วยความเร็วหากเกิดเหตุฉุกเฉินนั้นขบวนรถจะต้องหยุดรถโดยการเบรก ซึ่งระยะเบรกโดยนัยดังกล่าว ตามมาตรฐานการออกแบบระบบเบรกที่การรถไฟไทยกำหนดขึ้นใช้เอง กำหนดให้รถคันเดียว (Individual Car) มีระยะเบรกไม่เกิน 700 เมตร และขบวนรถ (Train) มีระยะเบรกไม่เกิน 1,000 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ปลอดภัย จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงมีสมมติฐานว่าการตรวจจ็บบรถไฟที่ระบบตรวจจ็บบตรวจจ็บบขบวนรถได้ในระยะที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของระยะเบรก

2. กล้องตรวจจ็บบ บริเวณทางตัดผ่านจะติดตั้งกล้องที่วิ้งจรปิด ระยะไกลความละเอียดสูง กำหนดมุมกล้องแบบคงที่เอาไว้ โดยติดตั้งแบบยกระดับริมทางรถไฟ ซึ่งจะมีกล้องที่วิ้งจรปิดจำนวน 1 ตัวต่อหนึ่งทางรถไฟเพื่อทำหน้าที่ตรวจจ็บบทั้งขาขึ้นและขาล่องของขบวนรถ

3. ตัวประมวลผล สัญญาณภาพทุกเฟรม หรือทุก Shot จะเป็นแบบ Real-time จะถูกส่งต่อเข้าสู่การวิเคราะห์โดยหลักการวิเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ ตัวประมวลผลจะได้รับเฟรมภาพอย่างต่อเนื่องนำเฟรมภาพที่ได้ไปหาความแตกต่างระหว่างเฟรมภาพก่อนหน้ากับเฟรมภาพในปัจจุบัน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างกับพื้นหลัง หากมีวัตถุเข้ามาในเฟรมก็จะเกิดความแตกต่างขึ้น ระบบจะทำการแยกตัววัตถุออกจาก Background จากการกำหนดค่าเกณฑ์ของความแตกต่าง Threshold ซึ่งจะทำให้วัตถุที่ระบบสนใจจะมีลักษณะพิกเซลเป็นสีขาวและมีพื้นหลังเป็นสีดำ จากนั้นวัตถุที่มีพิกเซลเป็นสีขาวจะเข้าสู่ขั้นตอนการหาขนาดรูปร่างโดยการเปลี่ยนวัตถุให้เป็นพิกเซลที่มีพื้นที่สีเหลืองจตุรัสเพื่อหาพื้นที่ของวัตถุดังกล่าว หากพื้นที่ของวัตถุที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ระบบก็จะตัดสินใจว่าวัตถุดังกล่าวคือขบวนรถไฟแล้วทำการส่งเอาต์พุตออกไปสั่งการเครื่องกันทาง

วิธีการวิจัย

1. โปรแกรมตรวจจ็บบรถไฟ

จากระบบตรวจจ็บบรถไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการประมวลผลภาพเป็นสิ่งสำคัญในการทำงาน ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาโปรแกรมตรวจจ็บบรถไฟขึ้นเพื่อเป็นตัวรับภาพเคลื่อนไหวจากกล้องแล้วประมวลผลเพื่อการตัดสินใจในการควบคุมเครื่องกันทาง โดยทำการออกแบบหน้าต่างโปรแกรมตรวจจ็บบรถไฟไว้ดังรูปที่ 2

ในส่วนของหน้าต่างโปรแกรมลำดับที่หนึ่งจะบ่งบอกแค่ชื่อชิ้นงานหรือหน้าที่ของโปรแกรมเท่านั้น และในส่วนของหน้าต่างโปรแกรมลำดับที่สองจะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของโปรแกรม เช่น แสดงภาพเคลื่อนไหวขณะที่มีรถไฟวิ่งเข้ามาหน้ากล้องที่ติดตั้งอยู่ข้างทางรถไฟ และยังแสดงถึงลำดับการประมวลผลของตัวโปรแกรมเพื่อให้ผู้ใช้งานได้สังเกตขั้นตอนการทำงาน ในการประมวลผลภาพที่รับมาจากกล้อง ผู้วิจัยได้เขียนคำสั่งที่มีฟังก์ชันการทำงานดังรูปที่ 3 หลังจากรับสัญญาณภาพเข้าสู่คอมพิวเตอร์แล้วจะนำภาพดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการคัดแยกเฟรมภาพ (Frame Extraction) เพื่อทำการวิเคราะห์เฟรมก่อนหน้านั้น

และเฟรมปัจจุบัน ภาพที่ได้จะเป็นภาพสี 8 บิต มีองค์ประกอบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินแล้วทำการแบ่งการประมวลผลแบบขนานกันทำให้สามารถเพิ่มความรวดเร็วในการทำงานได้ยิ่งขึ้น

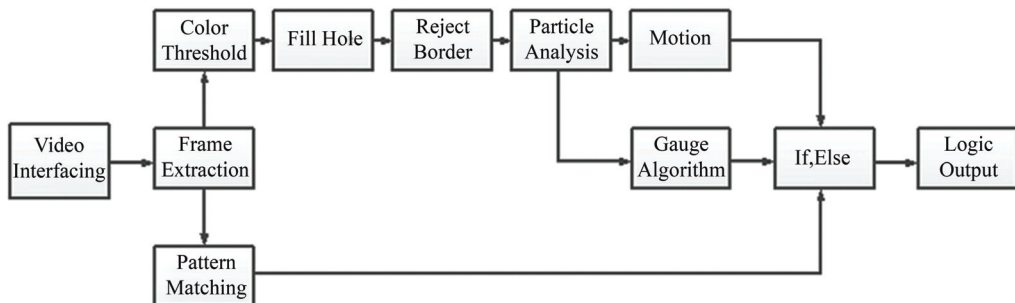


(ก) หน้าต่างโปรแกรมลำดับที่หนึ่ง



(ข) หน้าต่างโปรแกรมลำดับที่สอง

รูปที่ 2 โปรแกรมตรวจจับรถไฟ



รูปที่ 3 ลำดับคำสั่งและฟังก์ชันในการประมวลผล

1.1 การค้นหาพื้นที่ของสี Color Threshold โดยส่วนใหญ่จะพบว่ารถไฟดีเซลจะมียังมีองค์ประกอบของสีที่ค่อนข้างเหมือนกันคือ มีลักษณะของสีขบวนแรกเป็นสีเหลืองแดง ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลเพื่อกำหนด

ช่วงองค์ประกอบสีลงในโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์วัตถุที่เป็นรถไฟ ในที่นี้กำหนดให้สีแดงจะค่าน้ำหนักอยู่ที่ 98 - 239 สีเขียวจะมีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 65 - 115 และสีน้ำเงินจะมีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 98 - 146

1.2 ความเหมือน Pattern Matching การตรวจสอบว่าวัตถุที่เคลื่อนเข้ามานั้นเป็นขบวนรถไฟหรือไม่นั้น ผู้วิจัยจะอาศัยฟังก์ชันตรวจสอบความเหมือนกับข้อมูลภาพที่ได้บันทึกเก็บไว้ โดยทำการถ่ายภาพหน้าขบวนรถไฟแต่ละขบวนจำนวนไม่น้อยกว่า 3 ภาพ แล้วเก็บบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูลให้ตัวโปรแกรมสามารถเรียกใช้งานในการเปรียบเทียบได้

1.3 Motion, Gauge Algorithm เป็นการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของวัตถุเพื่อลดความผิดพลาดที่เกี่ยวกับวัตถุที่มีความคล้ายกับรถไฟ อาศัยการตรวจสอบโดยการดูจำนวนพิกเซลของภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องคือ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้ามาภาพที่ได้จะมีขนาดของพิกเซลที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

1.4 เมื่อเงื่อนไขจากฟังก์ชันข้างต้นผ่านการประมวลผลตามองค์ประกอบที่กำหนดไว้แล้ว โปรแกรมก็จะส่งเอาต์พุตออกมาในลักษณะลอจิก คือ หากเป็นขบวนรถไฟ โปรแกรมจะส่งค่าเป็นลอจิก 1 และหากไม่มีขบวนรถไฟหรือเป็นวัตถุชนิดอื่น ๆ โปรแกรมจะส่งค่าเป็นลอจิก 0

2. การติดตั้งกล้องและเครื่องกันทาง

การติดตั้งกล้องและการติดตั้งเครื่องกันทางชั่วคราวแสดงดังรูปที่ 4 การนำสัญญาณภาพขณะที่ขบวนรถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าสู่คอมพิวเตอร์นั้น ผู้วิจัยจะใช้กล้องที่วิ้งจระปิดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับภาพเคลื่อนไหวแบบเรียลไทม์



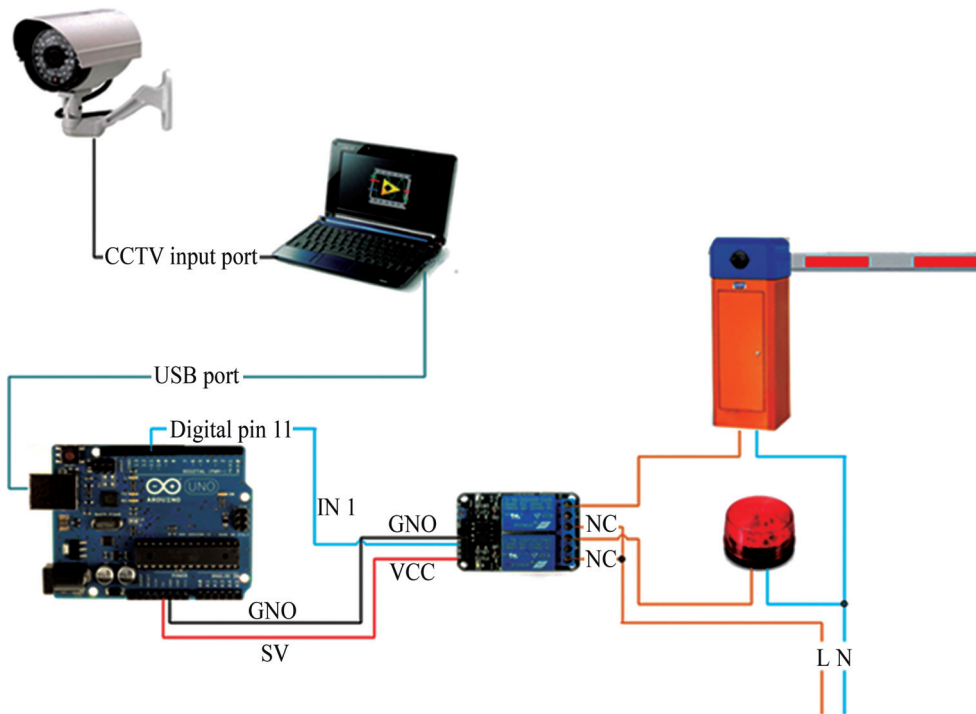
(ก) ตำแหน่งกล้องที่วิ้งจระปิด



(ข) คานคั้นทาง

รูปที่ 4 การติดตั้งกล้องตรวจจบบรรยากาศและเครื่องกันทาง

โดยจะติดตั้งกล้องไว้บริเวณข้างทางรถไฟด้วยเสาเหล็กซึ่งมีความสูงจากพื้นประมาณ 2.5 เมตร เพื่อให้มุมตรวจจับมีความเหมาะสมและครอบคลุมกับขนาดของตัวรถไฟที่เคลื่อนที่เข้ามา ตัวกล้องจะห่างจากจุดที่ติดตั้งเครื่องกันทางเป็นระยะทาง 1,000 เมตร โดยข้อมูลภาพจากกล้องจะถูกส่งผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ทำให้เพิ่มระยะการตรวจจับให้กับระบบได้สูงขึ้น เมื่อมีขบวนรถไฟเข้ามาบริเวณหน้ากล้องแล้วตัวประมวลผลให้ผลลัพธ์เอาต์พุตแล้วนั้น ค่าที่ได้จะส่งผ่านเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต เพื่อส่งสัญญาณไฟฟ้าควบคุมไปสั่งการเครื่องกันทางและหลอดไฟแจ้งเตือน วงจรไฟฟ้าสำหรับการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 5 และคุณสมบัติของอุปกรณ์ในระบบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 วงจรไฟฟ้าของระบบตรวจจบบรรลไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ในระบบตรวจจบบรรลไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอ

อุปกรณ์	คุณสมบัติเฉพาะ
CCTV Camera	Image Sensor 2MP progressive, 25/30fps
Fiber Media Converter	Transmission Distance - 2km
Computer	CPU > core i3, memory > 2GB
Microcontroller	Arduino UNO R3, Clock Speed 16 MHz
Relay module	Opto isolated Relay, AC250V 10A contact
Barrier Gate	Power 300 W, Opening time 4s





ผลการทดลอง

ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยตรวจจบบรรลไฟด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิดีโอสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ 1) ผลลัพธ์ของโปรแกรมตรวจจบบรรลไฟ 2) ผลลัพธ์ของเครื่องกั้นทาง โดยมีปัจจัยที่ต้องควบคุมคือบริเวณจุดตัดผ่านทางรลไฟที่มีการจราจรตัดผ่านของยานพาหนะอื่นน้อยที่สุด เป็นเส้นทางที่รถจักรดีเซลวิ่งด้วยความเร็วในช่วงระหว่าง 50 - 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ในการทำงานของระบบ ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลลัพธ์ของโปรแกรมตรวจจ็บบรถไฟ





ทำการเก็บผลการทดลองเพื่อหาความสามารถการตรวจจ็บบรถจักรดีเซลที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ช่วงระหว่าง 50 - 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยหลักการ 1) คุณ้้าหนักของสี (Color Threshold) 2) ความเหมือน (Pattern Matching) และ 3) การเคลื่อนที่ปริมาณพิกเซล (Motion, Gauge Algorithm) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 - 4

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การตรวจจ็บบรถไฟด้วยวิธีการคุณ้้าหนักของสี (Color Threshold)

ระยะห่างของวัตถุถึงหน้ากล้อง	ลักษณะการตรวจจ็บบ	รูปการตรวจจ็บบ
100 m	ตรวจจ็บบไม่ได้	
50 m	ตรวจจ็บบได้	
20 m	ตรวจจ็บบได้	
10 m	ตรวจจ็บบไม่ได้	


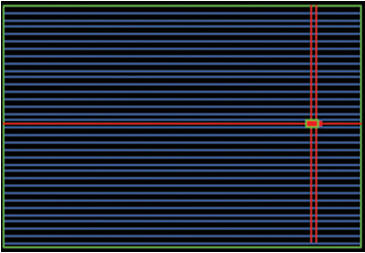

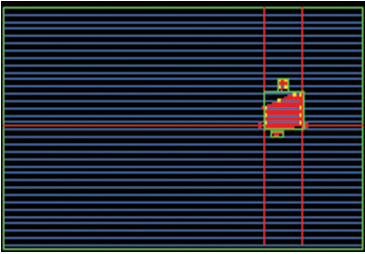

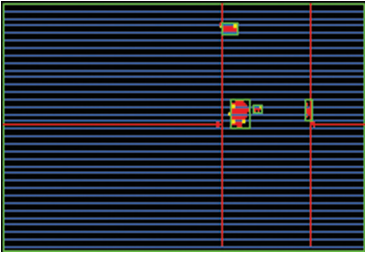

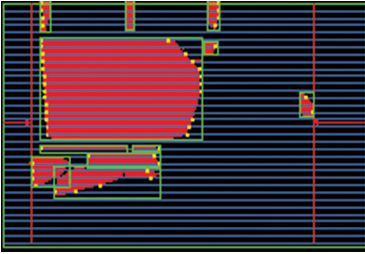
จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมตรวจจับรถไฟที่อาศัยหลักการของสี (Color Threshold) จะสามารถตรวจจับวัตถุที่เป็นรถไฟได้ สังเกตได้จากเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้ามาโดยมีระยะห่างถึงหน้ากล้องที่วิวจรมปิดเท่ากับ 50 เมตร โปรแกรมจะเริ่มตรวจจับวัตถุดังกล่าวแล้วเปรียบเทียบกับค่าของสีที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ หากค่าของสีวัตถุเป็นไปตามที่กำหนดตัวโปรแกรมก็จะทำการระบุวัตถุด้วยการตีกรอบ และหากวัตถุเคลื่อนที่เข้าสู่หน้ากล้องมากจนเกินไปจนทำให้ภาพที่ได้ล้นขอบพื้นที่ตรวจจับจะส่งผลให้โปรแกรมไม่สามารถวิเคราะห์วัตถุดังกล่าวได้

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การตรวจจับรถไฟด้วยวิธีการดูความเหมือน (Pattern Matching)

ระยะห่างของวัตถุถึงหน้ากล้อง	ลักษณะการตรวจจับ	รูปการตรวจจับ
100 m	ตรวจจับไม่ได้	
50 m	ตรวจจับได้	
20 m	ตรวจจับได้	
10 m	ตรวจจับได้	

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมตรวจจ็บบรถไฟที่อาศัยหลักการดูความเหมือน (Pattern Matching) จะสามารถตรวจจ็บบวัตถุที่เป็นรถไฟได้ สังเกตได้จากเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้ามา โดยมีระยะทางถึงหน้ากล้องวิดีโอเท่ากับ 50 เมตร โปรแกรมจะเริ่มตรวจจ็บบวัตถุดังกล่าวแล้วเปรียบเทียบกับรูปภาพในฐานข้อมูลของตัวรถจักรที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ หากวัตถุที่เข้ามามีลักษณะเหมือนกับภาพตามที่กำหนดตัวโปรแกรมก็จะทำการระบุวัตถุด้วยการตีกรอบ วิธีการนี้จะแก้ปัญหาของภาพที่ล้นออกจากพื้นที่ตรวจจ็บบได้อีกทางหนึ่ง

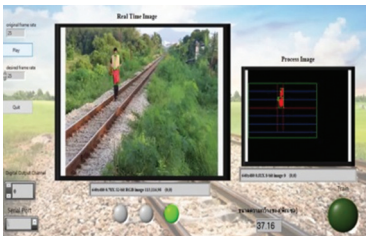


ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การตรวจจ็บบรถไฟด้วยวิธีการดูการเคลื่อนที่ ปริมาณพิกเซล (Motion, Gauge Algorithm)

ระยะห่างของวัตถุถึงหน้ากล้อง	ขนาดพิกเซล	รูปการตรวจจ็บบ	การเพิ่มขึ้นของพิกเซล ขณะวัตถุเคลื่อนที่เข้ามา
100 m	7.21		
50 m	45.25		
20 m	106.21		
10 m	335.25		

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมตรวจจับรถไฟที่อาศัยหลักการการเคลื่อนที่ ปริมาณ พิกเซล (Motion, Gauge Algorithm) จะสามารถตรวจจับวัตถุที่เป็นรถไฟได้สังเกตได้จากเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้ามา โปรแกรมจะเริ่มวัดขนาดพิกเซลของภาพเพื่อวิเคราะห์วัตถุ หากปริมาณของพิกเซลมีค่าเพิ่มอย่างต่อเนื่อง ก็จะมีหมายถึงเป็นวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ตามแนวรางซึ่งก็คือรถไฟ

ผลการทดลองดังตารางที่ 3 - 4 แสดงถึงความสามารถในการทำงานของโปรแกรมตรวจจับรถไฟ โดยผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขในการส่งสัญญาณควบคุมเครื่องกันทางก็คือเมื่อมีการทำงานตามหลักการตรวจจับข้างต้นเพียงสองในสามฟังก์ชันเท่านั้น และในกรณีอื่น ๆ ที่มีวัตถุแปลกปลอมอยู่บนรางรถไฟหรือเป็นรถไฟที่วิ่งเข้ามาในเวลากลางคืนการทำงานของโปรแกรมจะแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 กรณีอื่น ๆ ในการทำงานของโปรแกรมตรวจจับรถไฟ

กรณีอื่น ๆ	ลักษณะภาพ	การทำงานของโปรแกรม
กรณีที่มีวัตถุมีลักษณะสีเหมือนหรือใกล้เคียงกับรถไฟเคลื่อนที่อยู่ บนรางรถไฟ ตัวอย่างเช่น มีคนใส่เสื้อผ้าสีเหลืองแดงเดินอยู่บนรางรถไฟ		โปรแกรมจะตรวจสอบได้เฉพาะองค์ประกอบสี แต่จะไม่ระบุว่าเป็นรถไฟ
กรณีที่รถไฟวิ่งเข้ามาในเวลากลางคืน จะเห็นเป็นลักษณะไฟส่องสว่างขนาดใหญ่		โปรแกรมจะระบุว่าเป็นรถไฟเนื่องจากองค์ประกอบของสีที่มีความสว่าง และตำแหน่งของหลอดไฟด้านหน้ารถไฟที่ตรงกับรูปภาพในฐานข้อมูล
กรณีที่มีวัตถุอื่น ๆ ที่มีแสงสว่างเคลื่อนที่อยู่บนรางรถไฟ ตัวอย่างเช่น มีคนเดินคาดตะเกียง		โปรแกรมจะไม่ระบุว่าเป็นรถไฟเนื่องจากค่าพิกเซลของภาพมีขนาดเล็กกว่าแสงสว่างจากรถไฟ

2. ผลลัพธ์ของเครื่องกันทาง

เมื่อขบวนรถไฟเคลื่อนที่เข้าในระยะเวลาตรวจจับของกล้องที่วิวจจรปิดที่อยู่ห่างไปจากตำแหน่งเครื่องกันทางเป็นระยะทาง 1,000 เมตร ภาพจะถูกส่งผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังบอร์ด Arduino UNO R3 เพื่อสั่งให้รีเลย์ไปตัดวงจรให้สัญญาณไฟแจ้งเตือนติดขึ้นเป็นเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นจะสั่งให้รีเลย์ตัวที่สองทำงานเพื่อสั่งให้เครื่องกันทางปิดลง และเครื่องกันทางจะเปิดขึ้นอีกครั้งเมื่อท้ายขบวนรถไฟพ้นระยะเวลาตรวจจับของกล้องที่วิวจจรปิดที่ติดตั้งอีกฝั่งหนึ่งของตัวอย่างการทำงานของเครื่องกันทางแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องกั้นทางขณะมีรถไฟเคลื่อนที่ผ่าน

สรุปผลและการอภิปรายผล

ตัวตรวจจบบรรยากาศด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิถีโอสสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ เป็นการพัฒนาขึ้นจากเทคโนโลยีภายในประเทศมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเครื่องมือทางด้านวิศวกรรมและลดการนำเข้า นำไปใช้งานบริเวณจุดตัดผ่านทางรถไฟที่ยังขาดซึ่งความปลอดภัยลดอุบัติเหตุอันร้ายแรงต่อชีวิตผู้สัญจรบนถนนและขบวนรถไฟ จากผลการทดสอบระบบสรุปได้ว่าโปรแกรมตรวจจบบรรยากาศมีฟังก์ชันการทำงานที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันการกรองคัพประกอบของสี่ ฟังก์ชันความเหมือนของภาพ ฟังก์ชันการเคลื่อนไหวจากขนาดพิกเซล โดยฟังก์ชันดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่ช่วยลดเวลาในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ทำให้การตัดสินใจเพื่อการควบคุมทำได้อย่างรวดเร็ว มีการอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่สามารถอัปเดตรูปภาพของรถไฟที่ใช้งานปัจจุบันได้ตลอดเวลา การใช้งานสามารถตรวจจบบรรยากาศที่เคลื่อนที่มีความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้เป็นอย่างดีมีความแม่นยำเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่เข้าสู่ระยะ 50 เมตร จากตัวกล้องที่วิ่งจรปิดโดยเครื่องกั้นทางสามารถแจ้งเตือนและปิดกั้นทางตัดผ่านก่อนขบวนรถถึงจุดตัดได้ก่อน 1 กิโลเมตร ระบบโดยรวมสามารถเพิ่มเติมจุดติดตั้งกล้องที่วิ่งจรปิดเพื่อการประมวลผลภาพมุมอื่นได้ เนื่องจากอาศัยคอมพิวเตอร์ที่ทำงานเพียงจุดเดียวและสามารถควบคุมเครื่องกั้นทางได้หลาย ๆ ตัวพร้อมกัน ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือในการช่วยลดอุบัติเหตุในจุดที่เป็นทางตัดผ่านทางรถไฟ และเป็นงานวิจัยหนึ่งในการช่วยพัฒนาระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยให้มีความยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการพัฒนาตัวตรวจจบบรรยากาศด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณวิถีโอสสำหรับเครื่องกั้นทางอัตโนมัติ ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2562 ครั้งนี้ และคณะผู้บริหารเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อมูลเพื่อใช้ในการประกอบการจัดทำวิจัย

References

- [1] Profillidis, V. A. (2009). **Railway Management and Engineering**. 3rd Edition. Ashgate Publishing Limited
- [2] Garber, N. J. and Hoel, L. A. (2009). **Traffic and Highway Engineering**. 4th Edition. Cengage Learning
- [3] Griffin, K. W. (2004). **Building Type Basics for Transit Facilities**. John Wiley & Sons, Inc
- [4] Shogo, Y., Naoko, T., Gege, D., Shinji, W., Masahide, T., Makoto, Y., and Tamio, O. (2015). Design Optimization of Magnetic Sensor for Train Detection. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol. 51, Issue 3, pp. 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2358379
- [5] Angrisani, L., Grillo, D., Schiano, R., Moriello, Lo., and Giovanni, F. (2010). Automatic Detection of Train Arrival Through An Accelerometer. In **2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings**. DOI: 10.1109/IMTC.2010.5488089
- [6] Arvind, H. N., Paul, B., and Ralph, B. (2011). Railway Level Crossing Obstruction Detection Using MIMO Radar. In **Proceedings of the 8th European Radar Conference**. pp. 57-60

ผลของสารสกัดด้วยน้ำต่อปริมาณสารพฤกษเคมีและกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ
ของสาหร่ายสีแดง (*Caloglossa beccarii* De Toni)

Effect of Water Extraction on Phytochemicals and Antioxidant Activities of Red Algae (*Caloglossa beccarii* De Toni)

วัลภา เทลือแท้¹ เพ็ญศรี เพ็ญประไพ² และวรรณิณี จันทรแก้ว^{1*}

Wanlapa Luealae¹ Pensri Penprapai² and Wanninee Chankaew^{1*}

Received: October 2, 2019; Revised: November 19, 2019; Accepted: November 20, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารพฤกษเคมี และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระซึ่งวิเคราะห์ประสิทธิภาพในด้านการกำจัดอนุมูล ABTS และการจับโลหะของสารสกัดหยาบจากสาหร่าย *Caloglossa beccarii* ซึ่งได้เก็บตัวอย่างจากจังหวัดนครศรีธรรมราชที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน (อุณหภูมิ/เวลา) 5 สภาวะ ได้แก่ 4 °C/24 h, 25 °C/12 h, 50 °C/6 h, 75 °C/3 h และ 100 °C/1.5 h ผลการศึกษาพบว่า สารสกัดทั้ง 5 สภาวะ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด สารฟลาโวนอยด์รวม และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.95 ± 0.21 mg GAE/g extract และมีค่า IC_{50} ในการกำจัดอนุมูลอิสระเท่ากับ 0.24 ± 0.00 mg/mL ส่วนสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมที่สูงที่สุดเท่ากับ 24.67 ± 0.04 mg QE/g extract และมีค่า IC_{50} ต่ำสุดในประสิทธิภาพในการจับโลหะเท่ากับ 0.27 ± 0.003 mg/mL ตามลำดับ จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า สภาวะในการสกัดด้วยน้ำที่ 4 °C/24 h และ 25 °C/12 h มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ด้านกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่าย *C. beccarii*

คำสำคัญ : สาหร่าย; ฟีนอลิก; ฟลาโวนอยด์; อนุมูลอิสระ

¹ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นครศรีธรรมราช

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นครศรีธรรมราช

¹ Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat

² Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat

* Corresponding Author E - mail Address: wanninee.c@rmutsv.ac.th

Abstract

The objectives of this research were to compare the phytochemical contents and antioxidant activities analyzed by scavenging activity of ABTS radical and metal ablating activity of *Caloglossa beccarii* aqueous extract using 5 different extraction conditions (4 °C/24 h, 25 °C/12 h, 50 °C/6 h, 75 °C/3 h and 100 °C/1.5 h). *Caloglossa beccarii*, was collected from Nakhon Si Thammarat province. The results showed the total phenolic compound, total flavonoid content and antioxidant activities content were significantly different among extract condition ($p < 0.05$). The aqueous extract at 25 °C/12 h showed the highest of total phenolic compound was 32.95 ± 0.21 mgGAE/g extract and the best activity of scavenging ABTS with $IC_{50} = 0.24 \pm 0.00$ mg/mL, respectively. The extract at condition 4 °C/24 h showed the highest of total flavonoid was 24.67 ± 0.04 mgQE/g extract and the lowest IC_{50} with metal chelation = 0.27 ± 0.00 mg/mL, respectively. This findings indicated that the aqueous extracts at condition 4 °C/24 h and 25 °C/12 h were the most suitable for antioxidant extraction from *C. beccarii*.

Keywords: Algae; Phenolic; Flavonoid; Free Radical

บทนำ

ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับสารต้านอนุมูลอิสระอย่างกว้างขวางทั้งในส่วนของการค้นหาชนิดและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระต่าง ๆ เนื่องจากอนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลต่าง ๆ ที่อยู่รอบข้างได้ จะส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เซลล์ภายในร่างกายและสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เช่น จากกระบวนการเผาผลาญอาหารภายในร่างกาย การถูกกระตุ้นจากแสงแดด มลพิษ ควันบุหรี่ แอลกอฮอล์ ความเครียด ฯลฯ โดยปกติร่างกายของคนเราจะมีกลไกในการกำจัดอนุมูลอิสระได้หลายทาง แต่ในสภาวะที่มีการสร้างอนุมูลอิสระจำนวนมากเกินไปที่จะกำจัดได้ทันอาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บของเซลล์ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น โรคชรา โรคมะเร็ง โรคหัวใจขาดเลือด โรคความจำเสื่อม โรคข้ออักเสบ โรคภูมิแพ้ โรคความดันโลหิต และโรคต่อกระเพาะ เป็นต้น [1] จากงานวิจัยพบว่าในธรรมชาติมีแหล่งสำคัญของสารที่มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถนำมาใช้ป้องกันและรักษาโรคได้ เช่น พืชที่ใช้บริโภคในชีวิตประจำวัน พืชสมุนไพร [2] และสาหร่าย [3]

สาหร่ายสีแดงน้ำจืดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยในเซลล์ของสาหร่ายที่ประกอบไปด้วยกลุ่มสารทุติยภูมิหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิโปรตีนและกลุ่มสารพฤษเคมีอื่น ๆ ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ และสามารถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้ปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่สกัดมาได้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการสกัด ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด [4] จากคุณสมบัติดังกล่าวของสาหร่ายจึงทำให้เป็นที่น่าสนใจ ซึ่งจากการสืบค้นข้อมูลการนำสาหร่ายสีแดงน้ำจืด

ไปใช้ประโยชน์ยังมีรายงานไม่มากนัก ทั้งนี้มีการศึกษากันมากในสาหร่ายทะเล สาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina plantensis*) สำหรับในน้ำจืดนั้นมีการศึกษาในสาหร่ายสีเขียว คือ สาหร่ายเตา (*Spirogyra neglecta*) [5] สาหร่ายไคตะ (*Microspora* sp.) สาหร่ายไคไหม (*Cladophora* sp.) สาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน คือ สาหร่ายลอน (*Nostochopsis* sp.) [6] มีรายงานในสาหร่ายสีแดงน้ำจืด เช่น *Compsopogon aeruginosus* Kützinger [7] *Caloglossa ogasawarensis* Okamura [8] *Compsopogon caeruleus* Montagne และ *Sirodotia suecica* Kylin [9] สำหรับในสาหร่ายสีแดง *Caloglossa beccarii* De Toni นั้นที่ผ่านมา Luealae, W., Penpapai, P., and Chankaew, W. [10] ได้ทำการศึกษาฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระ DPPH ของสารสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน สามสภาวะ พบว่าสารสกัดน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ข้อมูลครอบคลุมมากขึ้นสำหรับนำสาหร่ายสีแดงชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารฟุกุซเคมี และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการกำจัดอนุมูล ABTS และการจับโลหะของสารสกัดหยาบ *Caloglossa beccarii* ในสภาวะที่ต่างกันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสำคัญ รวมทั้งได้เลือกน้ำเป็นตัวทำละลายในการสกัดเพื่อความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ประโยชน์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนวิธีการวิจัย

1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างสาหร่าย *C. beccarii* จากลำธารในเขตอำเภอทุ่งสง (08°09.051 N, 099°44.786 E) และอำเภอชะอวด (07°57.13 N, 099°45.55 E) จังหวัดนครศรีธรรมราช มาล้างทำความสะอาดและฟุ้งลมให้มีความหมดพอสสมควร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนกว่าสาหร่ายจะแห้ง แล้วนำมาป่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าให้ละเอียด

1.2 การเตรียมสารสกัดหยาบ

การเตรียมสารสกัดหยาบ โดยชั่งผงสาหร่ายมา 20 g เติมน้ำลงไปปริมาตร 200 mL และนำมาสกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกันที่อุณหภูมิ/เวลา 5 สภาวะ ได้แก่ 4 °C/24 h (ทำการสกัดในตู้เย็น อุณหภูมิ 4 °C), 25 °C/12 h, 50 °C/ 6 h, 75 °C/3 h และ 100 °C/1.5 h ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ทำการสกัดซ้ำจากตัวอย่างเดิมจำนวน 3 ซ้ำ แล้วจึงนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยสารสกัดที่ได้จะนำไปทำให้แห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งและบันทึกน้ำหนักสารสกัดที่ได้ และเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างสาหร่ายที่นำมาสกัด จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณสารสกัดหยาบ (%yield) หลังจากนั้นนำสารสกัดหยาบที่ได้มาทำการเจือจางด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 0.005 - 3.200 mg/L เพื่อนำไปทำการทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระต่อไป

2. การหาปริมาณสารฟุกุซเคมี

สารฟุกุซเคมีที่มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในสาหร่ายนั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการหาทั้งหมด 2 ชนิด ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Contents)

ทำการศึกษาด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Assay โดยปิเปตสารสกัดหยาบจากสาหร่ายปริมาณ 0.1 mL ผสมกับสาร Folin-Ciocalteu ปริมาตร 0.5 mL เติมสารละลาย Sodium Carbonate (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 20 % ปริมาตร 1 mL และน้ำกลั่นปริมาตร 8.4 mL ผสมให้เข้ากัน บ่มทิ้งไว้ในที่มืด 1 h วัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 765 nm ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Biodrop) ใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน โดยดัดแปลงตามวิธีการของ Julkunen-Tiitto, R. [11]

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวม (Total Flavonoid Contents)

ทำการศึกษาด้วยวิธี Aluminum Chloride Colorimetric Assay โดยการปิเปตสารสกัดหยาบจากสาหร่ายปริมาณ 0.02 mL ใส่ในภาชนะทดลองที่มีสารละลาย Aluminum Chloride ความเข้มข้น 10 % ปริมาตร 0.02 mL เติมสารละลาย Potassium Acetate ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 0.02 mL และน้ำกลั่นปริมาตร 0.180 mL จากนั้นเขย่าให้เข้ากันบ่มทิ้งไว้ 30 min ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 nm ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลต (Biochrom รุ่น EZ Read 2000) ใช้ควอซิตินเป็นสารมาตรฐาน โดยดัดแปลงตามวิธีการของ Chang, C., Yang, M., Wen, H., and Chern, J. [12]

3. การทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

การทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีแต่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด 2 วิธี ดังนี้

3.1 วิธี Scavenging Activity of ABTS radical

เป็นวิธีการวัดความสามารถในการฟอกสีอนุมูลอิสระเอบีทีเอส (ABTS⁺, 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzo-thiazoline-6-sulfonic acid) radical) ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ ดัดแปลงตามวิธีการของ Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., and Rice-Evans, C. [13] โดยการผสมสารละลาย ABTS⁺ ความเข้มข้น 7 mM ปริมาตร 2 mL กับสารละลาย Potassium Persulfate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ความเข้มข้น 140 mM ปริมาตร 35.5 μL ในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 16 h ที่อุณหภูมิห้อง จะได้ Stock ABTS radical cation ที่มีสีน้ำเงินอมเขียว ก่อนนำมาทำการทดลองจะต้องเจือจาง Stock ABTS radical cation ด้วยน้ำกลั่นให้ได้ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.700 ± 0.010 (ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนการใช้งาน) เติมสารสกัดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 0.1 mL ในหลอดทดลองผสมกับสารละลาย ABTS⁺ ปริมาตร 0.9 mL เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 6 min วัดค่าการดูดกลืนแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 734 nm ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลต โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม และใช้ ไทโรลอกซ์เป็นสารมาตรฐาน นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณร้อยละการกำจัดความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระดังสมการที่ (1) จากนั้นนำค่า % inhibition ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารสกัดแต่ละสภาวะที่ได้จากการคำนวณไปสร้างกราฟเส้นตรงเพื่อกำหนดค่า Half maximal inhibitory concentration (IC_{50}) ซึ่งหมายถึงค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่มีผลต่อการลดจำนวนของอนุมูลอิสระลงไปครึ่งหนึ่งจากจำนวนของอนุมูลอิสระเริ่มต้น

$$\%inhibition = \left[\frac{A734_{control} - A734_{sample}}{A734_{control}} \right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

A734 control = ค่าการดูดกลืนแสงของสารควบคุม (ABTS^{•+} ที่เจือจางแล้ว)
A734 sample = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง (สารสกัด + ABTS^{•+})

3.2 วิธี Metal Chelating Activity

เป็นการวัดความสามารถในการแย่งจับโลหะไอออน ตามวิธีของ Dinis, T. C. P., Madeira, V. M. C., and Almeda, L. M. [14] โดยเตรียมตัวอย่างสารสกัดที่เข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 0.800 mL ในหลอดทดลอง และใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออนเป็นชุดควบคุม เติมสารละลาย Iron (II) chloride (FeCl₂) ความเข้มข้น 2 mM ปริมาตร 0.01 mL และสารละลาย Ferrozine ความเข้มข้น 5 mM ปริมาตร 0.02 mL เขย่าอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 min วัดค่าดูดกลืนแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 562 nm ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลต โดยใช้ดีทีเอเป็นสารมาตรฐาน นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการจับโลหะ (%*chelating ability*) ดังสมการที่ (2) จากนั้นนำค่า %*chelating ability* ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารสกัดที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (2) จะนำไปสร้างกราฟเส้นตรงเพื่อคำนวณหาค่า IC₅₀

$$\%chelating\ ability = \left[\frac{A562control - A562sample}{A562control} \right] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

A562control = ค่าการดูดกลืนแสงของสารควบคุม (DI + FeCl₂ + Ferrozine)
A562sample = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง (สารสกัด + FeCl₂ + Ferrozine)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

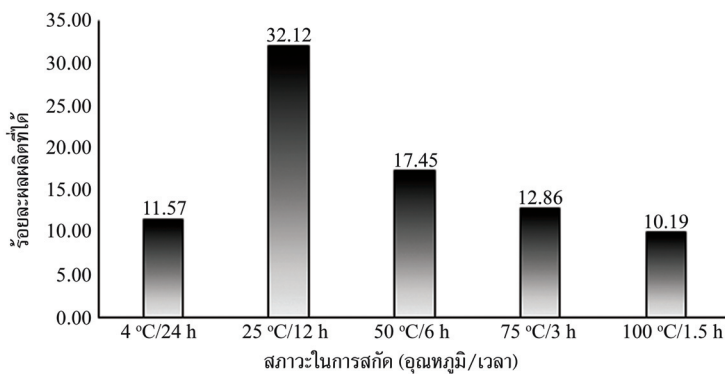
นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way ANOVA จากนั้นเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (p < 0.05) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสารฟลาโวนอยด์กับกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson's Correlation Coefficients, r) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลการทดลองและวิจารณ์

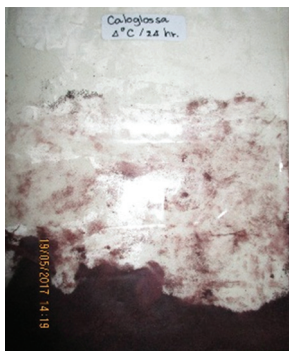
1. ปริมาณสารสกัดหยาบ

จากการนำสาหร่าย *C. beccarii* มาสกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะ พบว่าสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h มีร้อยละผลผลิตมากที่สุด รองลงมาคือสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h และน้อยที่สุดคือสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 100 °C/1.5 h คิดเป็น 32.12 17.45 และ 10.19 ตามลำดับ (รูปที่ 1) ซึ่งสีของสารสกัดหยาบหลังจากการนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีสีที่แตกต่างกันออกไป

ในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการสกัด (รูปที่ 2) จากข้อมูลข้างต้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Malaiwan, T. [15] และ Boonchum, W. [16] ที่ทำการสกัดสาหร่าย *Spirogyra* sp. พบว่าน้ำเป็นตัวทำละลายได้ดีที่สุด และได้ร้อยละผลผลิต มากกว่าตัวทำละลายเอทานอล โดยค่า % yield สารสกัดด้วยน้ำและเอทานอลของ สาหร่ายดังกล่าวเท่ากับ 12.62 และ 4.44 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h พบว่ามีร้อยละผลผลิตสูงกว่างานวิจัยของ Malaiwan, T. [15] นอกจากนี้ยังมีร้อยละผลผลิตสูงกว่า สารสกัดน้ำของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด *C. aeruginosus* และ *C. ogasawaraensis* [8] ผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่าสารประกอบที่มีขั้วสูงอาจมีส่วนสำคัญในสาหร่ายและสามารถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายมีขั้ว [17] ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตสารสกัดขึ้นอยู่กับสภาวะในการสกัดถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ สภาวะในที่นี้ ได้แก่ ระยะเวลา และอุณหภูมิในการสกัดซึ่งมีผลต่อปริมาณสารสกัดที่ออกมา กล่าวคือ เมื่อใช้ระยะเวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่สกัดมาได้เพิ่มขึ้น [4] ในขณะเดียวกัน การใช้น้ำร้อนในการสกัดสารสำคัญจากสาหร่ายจะทำให้ได้สารในกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ [18] นอกจากนี้ ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ คือ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบกับตัวทำละลายเนื่องจากเมื่อเราเลือกใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบกับตัวทำละลายเหมาะสมจะส่งผลให้ได้ปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น [19]



รูปที่ 1 ร้อยละผลผลิตของสาหร่าย *C. beccarii* ที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะ



(ก) 4 °C/24 h



(ข) 25 °C/12 h

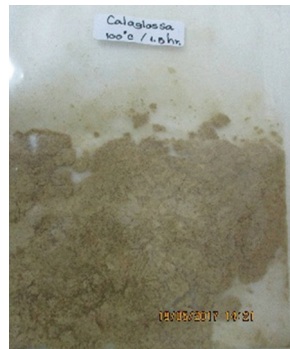


(ค) 50 °C/6 h

รูปที่ 2 สีของสารสกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะของสาหร่าย *C. beccarii* หลังจากการนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



(ง) 75 °C/3 h



(จ) 100 °C/1.5 h

รูปที่ 2 สีของสารสกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะของสาหร่าย *C. beccarii* หลังจากการนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ต่อ)

2. การหาปริมาณสารฟุกุซเคมี

2.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ผลการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดซึ่งได้คำนวณจากสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก ($y = 0.8503 + 0.0732x$; $R^2 = 0.9951$) จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสาหร่าย *C. beccarii* ที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) โดยสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่สูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h และน้อยที่สุดคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h โดยมีค่า 32.95 ± 0.21 , 24.01 ± 0.48 และ 16.72 ± 0.25 mg GAE/g extract ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Ramdani, M., Elasri, O., Saidi, N., Elkhiaati, N., Taybi, F. A., Mostareh, M., Zaalali, O., Haloui, B., and Ramdani, M. [20] พบว่าสารสกัดด้วยน้ำทุกสภาวะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดน้อยกว่า สารสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C และ 40 °C ของสาหร่ายสีแดงทะเล *Gracilaria bursa-pastoris* แต่สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h 25 °C/ 12 h และ 75 °C/3 h มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายสีแดงน้ำจืด *Caloglossa ogasawaraensis* และ *Compsopogon aeruginosus* แต่สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h และ 100 °C/1.5 h มีค่าต่ำกว่าสาหร่าย *C. ogasawaraensis* แต่มีค่าสูงกว่าสาหร่าย *C. aeruginosus* ซึ่งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 20.89 ± 0.68 และ 6.14 ± 0.43 mg GAE/g extract [8] ซึ่งสอดคล้องกับรายงานหลายฉบับที่กล่าวว่าการใช้ความร้อนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เพราะอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกและส่งผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าลดลง [21] - [22]

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวม

ผลการศึกษาปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมซึ่งได้คำนวณจากสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานเคอเวอซิทิน ($y = 0.0025 + 0.0593x$; $R^2 = 0.9997$) จากการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบของสาหร่าย *C. beccarii* ที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะ มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมี

นัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) โดยสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h และน้อยที่สุดคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 100 °C/1.5 h โดยมีค่า 24.67 ± 0.02 , 22.67 ± 0.02 และ 11.40 ± 0.08 mgQE/g extract ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Chankaew, W., Penpapai, P., Pood-ngam, J., and Luealae, W. [9] พบว่าสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมสูงกว่าสารสกัดเมทานอลของสาหร่ายสีแสดน้ำจืด 2 ชนิด คือ *Compsopogon caeruleus* และ *Sirodotia suecica* แต่มีปริมาณน้อยกว่าสารสกัดน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C และ 40 °C ของสาหร่ายสีแสดทะเล *Gracilaria bursapastoris* ซึ่งมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมเท่ากับ 19.22 ± 0.12 และ 59.04 ± 0.09 mgQE/g extract [20] ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Zakaria, N. A., Ibrahim, D., Sulaiman, S. F., and Supardy, N. A. [23] ที่กล่าวว่าสารต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้จากพืชมีแนวโน้มที่จะละลายน้ำได้เนื่องจากมักเป็นสารจำพวกไกลโคไซด์ และมีความสัมพันธ์กับการศึกษาของ Isantea, O. and Wonggajang, K. [24] ที่พบว่าสารฟลาโวนอยด์จะถูกสกัดออกมาได้มากที่สุดในตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วสูง

ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารฟลาโวนอยด์รวมของสารสกัดสาหร่าย *C. beccarii* ที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน

สภาวะในการสกัด (อุณหภูมิ/เวลา)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mgGAE/g extract)	สารฟลาโวนอยด์รวม (mgGAE/g extract)
4 °C/24 h	$24.01 \pm 0.48^{d*}$	24.67 ± 0.02^e
25 °C/12 h	32.95 ± 0.21^e	22.67 ± 0.02^d
50 °C/6 h	$16.72 \pm 0.25^{a*}$	16.92 ± 0.06^c
75 °C/3 h	21.85 ± 0.31^c	11.87 ± 0.04^b
100 °C/1.5 h	$18.48 \pm 0.25^{b*}$	11.40 ± 0.08^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$); * Luealae, W., Penpapai, P., and Chankaew, W. [10]

3. การทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

3.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Scavenging Activity of ABTS Radical

สารสกัดจากสาหร่ายแต่ละสภาวะในการสกัดตอบสนองต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแต่ละวิธีได้แตกต่างกัน โดยสารสกัดด้วยน้ำทั้ง 5 สภาวะให้ค่า IC_{50} ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) โดยพบว่าสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h แสดงผลการต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h และมีฤทธิ์ต่ำสุดที่สภาวะ 4 °C/24 h โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 0.24 ± 0.00 , 0.33 ± 0.00 และ 0.55 ± 0.00 mg/mL ตามลำดับ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโทรลอคซ์พบว่า ทุกสภาวะในการสกัดมีฤทธิ์กำจัดอนุมูล ABTS ได้น้อยกว่า ซึ่งค่า IC_{50} ของสารมาตรฐานโทรลอคซ์เท่ากับ 0.04 ± 0.00 mg/mL (ตารางที่ 2) จากผลการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าสารสกัดสาหร่ายสีแสดน้ำจืด *C. beccarii* ทั้ง 5 สภาวะในการสกัด

มีความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS ได้ดีกว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายสีน้ำตาล *Amphiroa* sp., *Halimeda macroloba*, *Sargassum bimderi* และ *Turbinaria conoides* [16] และสารสกัดน้ำสาหร่าย *Spirulina platensis* [25] แต่ต่ำกว่าสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.) [26] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด พบว่ามีความสัมพันธ์กับความสามารถในการกำจัดอนุมูล ABTS ($R = -0.464$) กล่าวคือหากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากขึ้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS จะมีค่า IC_{50} ต่ำลง (IC_{50} น้อยจะมีประสิทธิภาพดี) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Piluzza, G. and Bullitta, S. [27] พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระบางชนิด

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการจับโลหะด้วยวิธี Metal Chelating Activity

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการจับโลหะจัดเป็นอีกกลไกหนึ่งในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากโลหะไอออน โดยเฉพาะธาตุเหล็กที่อยู่ในรูปเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เป็นตัวการสำคัญที่มีบทบาทในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโลหะไอออน Fe^{2+} จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นสารอนุมูล Superoxide anion ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระเริ่มต้นที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระตัวอื่น ๆ ตามมา [14] จากการศึกษาพบว่าสารสกัดด้วยน้ำทั้ง 5 สภาวะมีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) โดยสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีประสิทธิภาพในการจับโลหะมากที่สุด โดยให้ค่า IC_{50} ต่ำสุด รองลงมาคือ สารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 50 °C/6 h และมีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้น้อยที่สุดที่สภาวะ 100 °C/1.5 h โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 0.27 ± 0.00 , 0.32 ± 0.00 และ 2.03 ± 0.02 mg/mL ตามลำดับ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานอัสตีที่เอพบว่าทุกสภาวะในการสกัดมีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้น้อยกว่า ซึ่งค่า IC_{50} ของสารมาตรฐานอัสตีที่เอเท่ากับ 0.04 ± 0.00 mg/mL อย่างไรก็ตามสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้ดีกว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายทะเล *Caulerpa lentilifera*, *Sargassum oligocystum* และ *Gracilaria changii* [28] และสารสกัดเมทานอลความเข้มข้น 70 % ของสาหร่ายสีน้ำตาลทะเล *Ecklonia cava* [29] แต่มีประสิทธิภาพในการจับโลหะได้น้อยกว่าสารสกัดน้ำสาหร่ายเตา (*Spirogyra neglecta*) [30] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมพบว่า มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการจับโลหะ ($R = -0.589$) กล่าวคือหากมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์มากขึ้นประสิทธิภาพในการจับโลหะสูงขึ้นเช่นกัน จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักได้ดีที่สุด เนื่องมาจากในขั้นตอนการสกัดในสภาวะนี้ไม่ต้องผ่านความร้อนใด ๆ จึงทำให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระไม่ถูกทำลาย เพราะอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ [31] และที่อุณหภูมิ 4 °C สามารถสกัดสารสีกลุ่มไฟโคบิลิโปรตีนออกมาได้ในปริมาณมาก ซึ่งสารสีกลุ่มนี้มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระได้ [32] - [33]

ตารางที่ 2 ค่า IC_{50} ของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสาหร่าย *C. beccarii* ที่สกัดด้วยน้ำในสภาวะที่ต่างกัน 5 สภาวะ

สภาวะในการสกัด (อุณหภูมิ/เวลา)	IC_{50} (mg/ml)	
	ฤทธิ์กำจัดอนุมูล ABTS	ประสิทธิภาพในการจับโลหะ
4 °C/24 h	0.55±0.00 ^f	0.27±0.00 ^b
25 °C/12 h	0.24±0.00 ^b	0.33±0.00 ^d
50 °C/6 h	0.33±0.33 ^c	0.32±0.01 ^c
75 °C/3 h	0.50±0.00 ^d	0.66±0.02 ^e
100 °C/1.5 h	0.51±0.00 ^e	2.03±0.02 ^f
โทรลลอคซ์	0.04±0.00 ^a	-
อีซีทีเอ	-	0.04±0.00 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุปผล

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสารสกัดด้วยน้ำทั้ง 5 สภาวะ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสารฟลาโวนอยด์รวมที่แตกต่างกัน ทำให้มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระที่แตกต่างกันด้วย โดยสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 4 °C/24 h มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพในการจับโลหะดีที่สุด ส่วนสารสกัดด้วยน้ำที่สภาวะ 25 °C/12 h มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดและมีฤทธิ์กำจัดอนุมูล ABTS ดีที่สุด ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยน้ำเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสีแดงน้ำจืด *Caloglossa beccarii* ควรทำการสกัดที่อุณหภูมิต่ำคือ 4 °C และ 25 °C ซึ่งมีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด และงานวิจัยนี้ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานในการสกัดสารเพื่อนำไปใช้พัฒนาเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติในอุตสาหกรรมเวชสำอางและเภสัชกรรมได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปี 2560 และ Prof. Ganesan Kandaswamy, Prof. John A. West และ Prof. Orlando Necchi JR. สำหรับการยืนยันชนิดของสาหร่ายสีแดงน้ำจืดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

References

- [1] Ames, B. N., Shigenaga, M. K., and Hagen, T. M. (1993). Oxidation, Antioxidants and the Degenerative Disease of Aging. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**. Vol. 90, No. 17, pp. 7915-7922. DOI: 10.1073/pnas.90.17.7915

- [2] Krishnaiah, D., Sarbatly, R., and Nithyanandam, R. (2011). A Review of the Antioxidant Potential of Medicinal Plant Species. **Food and Bioproducts Processing**. Vol. 89, No. 1, pp. 217-233. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.04.008
- [3] Peerapornpisal, Y. (2013). **Freshwater Algae in Thailand: Applied Algae Research Laboratory, Microbiology Section**. Department of Biology. Faculty of Science, Chiang Mai University
- [4] Dai, J. and Mumper, R. (2010). Plant Phenolics: Extraction, Analysis and Their Antioxidant and Anticancer Properties. **Molecules**. Vol. 15, No. 10, pp. 7313-7352. DOI: 10.3390/molecules15107313
- [5] Peerapornpisal, Y., Punyoyai, T., and Amornlerdpison, D. (2012). Antioxidant and Anti-Inflammatory Activities of *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing. **KKU Science Journal**. Vol. 40, Number 1, pp. 228-235
- [6] Phonrin, A. (2017). **Determination of Total Phenolic and Antioxidant Activity in Fresh Water Macroalgae from Nan Province**. M. Sc. Thesis, Burapha University, Chonburi
- [7] Chankaew, W. and Penpapi, P. (2015). Distribution and Antioxidant Activity of Freshwater Red Algae in Watershed Area, Nakhon Si Thammarat Province. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 43, Suppl. 1, pp. 215-223
- [8] Chankaew, W., Luealae, W., and Phomhom, S. (2016). Diversity and Screening of Biological Activity of Red Macroalgae from Trang Watershed Area, Thailand. **International Journal of Agricultural Technology**. Vol. 12, No. 7.2, pp. 2113-2122
- [9] Chankaew, W., Penpapai, P., Pood-ngam, J., and Luealae, W. (2018). Phycobiliprotein, Polyphenol Contents and Antioxidant Activity of Two Red Algae, *Compsopogon coeruleus* Montagne and *Sirodotia suecica* Kylin. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 46, Suppl. 1, pp. 279-285
- [10] Luealae, W., Penpapai, P., and Chankaew, W. (2018). Phenolic Content and Antioxidant Activity of Aqueous Extracts of Red Alga, *Caloglossa beccarii* De Toni. In **Proceedings of the 2nd Endemic Botanical Conference of Thailand**. Chiang Rai: Mae Fah Luang University. pp. 1-8
- [11] Julkunen-Tiitto, R. (1985). Phenolic Constituents on the Leaves of Northern Willows: Methods for the Analysis of Certain Phenolics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 33, Issue 2, pp. 213-217. DOI: 10.1021/jf00062a013
- [12] Chang, C., Yang, M., Wen, H., and Chern, J. (2002). Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. **Journal of Food and Drug Analysis**. Vol. 10, Issue 3, pp. 178-182. DOI: 10.38212/2224-6614.2748
- [13] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., and Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. **Free Radical Biology and Medicine**. Vol. 26, Issue 9/10, pp. 1231-1237. DOI: 10.1016/s0891-5849(98)00315-3
- [14] Dinis, T. C. P., Madeira, V. M. C., and Almeda, L. M. (1994). Action of Phenolic Derivatives (Acetaminophen, Salicylate, and 5-amiosalicylate) as Inhibitors of Membrane Lipid Peroxidation and as Peroxyl Radical Scavengers. **Archives of Biochemistry and Biophysics**. Vol. 315, Issue 1, pp. 161-169. DOI: 10.1006/abbi.1994.1485

- [15] Malaiwan, T. (2550). **Study on Antioxidant of *Cladophora* sp., *Nostochopsis* sp. and *Spirogyra* sp.** Independent Study, Chiang Mai University, Chiang Mai
- [16] Boonchum, W. (2011). **Antioxidation Activity of Some Marine Algae from the Gulf of Thailand and the Application in Cosmeceutical Product.** Ph.D. Philosophy in Applied Microbiology, Chiang Mai University, Chiang Mai
- [17] Yarnpakdee, S., Benjakul, S., and Senphan, T. (2018). Antioxidant Activity of the Extracts from Freshwater Macroalgae (*Cladophora glomerata*) Grown in Northern Thailand and its Preventive Effect Against Lipid Oxidation of Refrigerated Eastern Little Tuna Slice. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**. Vol. 19, Number 3, pp. 209-219. DOI: 10.4194/1303-2712-v19_03_04
- [18] Jiao, G., Yu, G., Zhang, J., and Ewart, H. S. (2011). Chemical Structures and Bioactivities of Sulfated Polysaccharides from Marine Algae. **Marine Drugs**. Vol. 9, Issue 2, pp. 196-223. DOI: 10.3390/md9020196
- [19] Palakajornsak, Y. (2004). **Extraction and Stability of Anthocyanins from Mangosteen Peel.** M.Sc. Thesis in Department of Food Technology, Silpakorn University, Bangkok
- [20] Ramdani, M., Elasri, O., Saidi, N., Elkhiaati, N., Taybi, F. A., Mostareh, M., Zazaali, O., Haloui, B., and Ramdani, M. (2017). Evaluation of Antioxidant Activity and Total Phenol Content of *Gracilaria bursa-pastoris* Harvested in Nador Lagoon for an Enhanced Economic Valorization. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**. Vol. 4, No. 28, pp. 1-7. DOI: 10.1186/s40538-017-0110-z
- [21] Siritrakulsak, P. and Simla, S. (2015). Effects of Conventional Cooking Method on Antioxidant Content in Moonflower. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 43, Suppl. 1, pp. 875-880
- [22] Lapnitiporn, S., Laihakunjit, N., and Kerdchoechuen, O. (2012). Physico-Chemical Composition and Antioxidant Activity of Cashew Apple Juice. **Thai Journal of Agricultural Science**. Vol. 43, Suppl. 2, pp. 409-412
- [23] Zakaria, N. A., Ibrahim, D., Sulaiman, S. F., and Supardy, N. A. (2011). Assessment of Antioxidant Activity, Total Phenolic Content and *invitro* Toxicity of Malaysian Red Seaweed, *Acanthophora spicifera*. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**. Vol. 3, No. 3, pp. 182-191
- [24] Isantea, O. and Wonggajang, K. (2015). The Investigation of the Extraction Solvent System of Phenolic and Flavonoids Rich Extracts and Antioxidant Activity from *Tagetes erecta* Flower. **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal**. Vol. 7, No. 7, pp. 29-40
- [25] Kongyod, K. (2010). **Anti-Bacterial and Anti-Free Radical Effects of *Spirulina platensis* Extract.** M.Sc. Thesis in Biology, Chiang Mai University, Chiang Mai
- [26] Rattanapot, T., Menhumphan, K., Srimaroeng, C., Junthip, R., and Amornlerdpison, D. (2012). Antioxidant Activity of *Spirogyra* sp. and Effect of its Supplementation on Growth Performance of Tilapia in Cage Culture. **Journal of Fisheries Technology Research**. Vol. 6, No. 2, pp. 23-43
- [27] Piluzza, G. and Bullitta, S. (2011). Correlations Between Phenolic Content and Antioxidant Properties in Twenty-Four Plant Species of Traditional Ethnoveterinary use in the Mediterranean Area. **Pharmaceutical Biology**. Vol. 49, Issue 3, pp. 240-247. DOI: 10.3109/13880209.2010.501083

- [28] Sumintilee, W., Banjongsinsiri, P., Praiboon, J., and Klaypradit, W. (2014). Antioxidant Activities of Crude Extract from *Caulerpa lentillifera*, *Sargassum oligocystum* and *Gracilaria changii*. **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol. 9, No. 1, pp. 63-75
- [29] Senevirathne, M., Kim, S., Siriwardhana, N., Ha, J., Lee, K., and Jeon, Y. (2006). Antioxidant Potential of *Ecklonia cava* on Reactive Oxygen Species Scavenging, Metal Chelating, Reducing Powder and Lipid Peroxidation Inhibition. **Food Science and Technology International**. Vol. 12, Issue 1, pp. 27-38. DOI: 10.1177/1082013206062422
- [30] Punyoyai, T. (2008). **Antioxidant Activity of Tao, *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing**. M.Sc. Thesis in Biology, Chiang Mai University, Chiang Mai
- [31] Loannou, I., Hafsa, I., Hamdi, S., Charbonnel, C., and Ghoul, M. (2012). Review of the Effects of Food Processing and Formulation on Flavonol and Anthocyanin Behavior. **Journal of Food Engineering**. Vol. 111, Issue 1, pp. 208-217. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.02.006
- [32] Bhat, V. B. and Madyastha, K. M. (2000). C-Phycocyanin: A Potent Peroxyl Radical Scavenger *in Vivo* and *in Vitro*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**. Vol. 275, Issue 1, pp. 20-25. DOI: 10.1006/bbrc.2000.3270
- [33] Estrada, J. E. P., Bescós, P. B., and del Fresno, A. M. V. (2001). Antioxidant Activity of Different Fractions of *Spirulina platensis* Protean Extract. **II Farmaco**. Vol. 56, Issue 5-7, pp. 497-500. DOI: 10.1016/s0014-827x(01)01084-9

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำและชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลต่อคุณภาพของสังขยาดำ

The Study of the Appropriate Proportion of Black Sesame and Types of Sweetener for the Quality of Black Sesame Egg Custard Sauce

กฤติน ชุมแก้ว¹ ไชยสิทธิ์ พันธุ์ฟูจินดา¹ และอรุณวรรณ อรรถธรรม^{1*}

Krittin Chumkaew¹ Chaiyasit Punfujinda¹ and Aroonwan Atthatham^{1*}

Received: December 12, 2019; Revised: April 28, 2020; Accepted: April 29, 2020

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปริมาณของงาดำ และชนิดสารให้ความหวานแทนน้ำตาล ได้แก่ สตีเวีย และซูคราโลสต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ภายนอก คุณค่าทางโภชนาการ และการยอมรับของผู้บริโภค โดยเตรียมสังขยาเสริมงาดำจำนวน 3 สูตร แปรรูปอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5 10 และ 15 ของส่วนผสมทั้งหมด และนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ พบว่า คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัส ในด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี รสชาติ และความชอบโดยรวม สังขยาเสริมงาดำร้อยละ 10 มีคะแนนความชอบมากกว่าร้อยละ 5 และ 15 ค่าความหนืด และค่าสี a^* มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสี L^* มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการศึกษาผลของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล 2 ชนิด ได้แก่ สตีเวีย และซูคราโลส พบว่าสังขยาเสริมงาดำร้อยละ 10 ที่ใช้ซูคราโลสเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลให้ผลการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมสูงกว่าสังขยาเสริมงาดำจากสตีเวีย โดยด้านรสชาติหวาน และความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าความหนืดและค่าสี ($L^* a^* b^*$) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการพบว่าสังขยาเสริมงาดำจากซูคราโลสมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงาน 200.33 กิโลแคลอรี ไขมัน 13.33 กรัม คาร์โบไฮเดรต 12.76 กรัม โปรตีน 7.33 กรัม โยอาทาร์ 5.05 กรัม ความชื้น 64.98 กรัม เถ้า 1.60 กรัม น้ำตาลทั้งหมด 4.05 กรัม แคลเซียม 394.57 มิลลิกรัม เหล็ก 1.57 มิลลิกรัม และฟอสฟอรัส 218.15 มิลลิกรัม การทดสอบยอมรับผู้บริโภคพบว่า ยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับการยอมรับมาก โดยผู้บริโภค ร้อยละ 90 ตัดสินใจซื้อเมื่อผลิตภัณฑ์วางจำหน่าย โดยให้เหตุผลว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกเพื่อสุขภาพร้อยละ 45

คำสำคัญ : งาดำ; สารให้ความหวานแทนน้ำตาล; สังขยา; คุณภาพทางกายภาพ; คุณค่าทางโภชนาการ

¹ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

¹ Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani

* Corresponding Author E-mail Address: aroonwan_a@rmutt.ac.th

Abstract

The study aimed at studying the results of the amount of black sesame and types of sweetener replacement such as stevia and sucralose on the sensory quality, physical quality, the nutrition property and the customers' satisfaction. The three recipes of black sesame egg custard sauce with the proportion of 5, 10 and 15 % were set. The sensory evaluation result showed that the scores of the sensory quality in terms of colors, tastes, and preferences were higher in black sesame egg custard sauce with the proportion of 10 % than the ones with 5 % and 15 %. Stickiness and color value (a^*) significantly increased, while color value (L^*) significantly decreased ($p \leq 0.05$) with increasing the proportions of black sesame. Also, the results from the two types of the sweetener replacements, namely sucralose and stevia, showed that the 10 % black sesame egg custard sauce with sucralose was more popular among the panelist than the black sesame egg custard sauce with stevia in terms of the sweetness, and the overall preferences were significantly different ($p \leq 0.05$). However, stickiness value ($L^* a^* b^*$) was not significantly different ($p \leq 0.05$). The results regarding to its nutrition property revealed that black sesame egg custard sauce with sucralose contained nutrition property in terms of calories, fat, carbohydrate, protein, dietary fiber, moisture, ash, total sugar, calcium, iron, and phosphorus (200.33 Kcal, 13.33 g, 12.76 g, 7.33 g, 5.05 g, 64.98 g, 1.60 g, 4.05 g, 394.57 mg, 1.57 mg and 218.15 mg). The results of the customers' satisfaction revealed that the participants accepted the product in a high acceptance level. 90 % of them would buy the product if it were launched into the market and 45 % stated that the product could be considered as healthy products.

Keywords: Black Sesame; Sweetener; Egg Custard Sauce; Physical Quality; Nutrition Property

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมบริโภคสังขยาเป็นอาหารหวานหลังมื้ออาหารหลัก เป็นอาหารว่างระหว่างมื้ออาหารหรืออาหารบริโภคเป็นอาหารมื้อเช้ากับชาหรือกาแฟ ซึ่งเหมาะกับสภาพสังคมปัจจุบันที่มีความเร่งรีบที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการกินอาหารมื้อเช้า สังขยาเป็นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากรับประทานง่าย มีรสชาติหวานมันถูกปากคนไทย ซึ่งจะเห็นได้จากการจำหน่ายตามร้านสะดวกซื้อ ร้านผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ร้านขนม ร้านขายน้ำเต้าหู้ ตลาดนัด หรือการจำหน่ายผ่านช่องทางออนไลน์ และในปัจจุบันสังขยายังเป็นผลิตภัณฑ์ที่กำลังเป็นกระแสนิยมนำไปประกอบเป็นธุรกิจ เช่น การนำสังขยาไปพัฒนาให้เป็นรสชาไทย เผือก ชาเขียว และนำมาสอดไส้ขนมปัง สามารถสร้างรายได้เฉลี่ยวันละ 3,000 - 5,000 บาท และยังขยายสาขาไปทั่วทุกจังหวัด [1]

สังขยาเป็นของหวานที่มีลักษณะเนื้อเนียนนุ่ม รสชาติหวาน กลิ่นหอมรับประทานนิยมใช้เป็นไส้ของขนมปังหวานเพื่อทำให้รสชาติของขนมปังอร่อยยิ่งขึ้น ใช้จิ้มกับขนมปังหนึ่ง ปาท่องโก๋ หรือใช้ทา

ขนมปังแซนวิช ส่วนผสมหลัก ได้แก่ ไข่ไก่ น้ำตาลทราย น้ำกะทิ นมข้นจืด หรือนมสด นอกจากนี้ยังนิยมใช้กลิ่นรสต่าง ๆ ทั้งกลิ่นวานิลลา กลิ่นใบเตยจากการคั้นน้ำใบเตย และกลิ่นชาจากน้ำชงชา ได้แก่ ชาไทย ชาเขียว กรรมวิธีในการทำส่วนใหญ่จะนำไปคุ่นหรือกวน ลักษณะที่ดีของสังขยาคือมีความข้นหนืด มันวาว และรสชาติหวานมัน [2] และจากการที่สังขยามีรสชาติหวานนั้น อาจส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ หากบริโภคในปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการของร่างกาย ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นไขมันสะสมในร่างกาย ทำให้หน้าหนักเกิน อ้วน และเกิดโรคหรือปัญหาทางสุขภาพตามมา [3] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์สังขยาในรูปแบบต่าง ๆ เช่น งานวิจัยของ Kee-ariyo, C., Apinya, M., Photchanee, B., and Nanolin, D. [4] ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมไทยจากพืชสมุนไพรพื้นบ้าน โดยการพัฒนาผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมไขมันผง พบว่า สังขยาเสริมไขมันผงร้อยละ 0.5 ได้รับความชอบระดับปานกลาง และผู้บริโภคยอมรับสังขยาเสริมไขมันผงร้อยละ 81 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Mekrawee, N., Teeranuch, C., Onanong, T., Narongchai, K., and Kraiyarach, P. [5] ที่ทำการศึกษาเรื่อง สังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาดำ พบว่าสามารถใช้น้ำเต้าหู้ผสมงาดำแทนน้ำใบเตยในสังขยาได้ร้อยละ 100 ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบโดยรวมในระดับชอบมาก และสนใจซื้อผลิตภัณฑ์ร้อยละ 100 และเมื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของสังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาดำกับสังขยาใบเตยพบว่า สังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาดำมีแร่ธาตุจำพวก แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก โพแทสเซียม สังกะสี ฯลฯ ในปริมาณที่สูงกว่าสังขยาใบเตย

ดังนั้นจากเหตุผลข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำ เนื่องจากงาดำมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีแร่ธาตุที่สำคัญ ได้แก่ แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ไอโอดีน และฟอสฟอรัส โดยเฉพาะแคลเซียม มีมากกว่าพืชทั่วไปประมาณ 40 เท่า ซึ่งแคลเซียมมีความสำคัญในกระบวนการสร้างและพัฒนาของกระดูก รวมทั้งยังมีบทบาทที่สำคัญต่อการสร้างมวลกระดูก [6] โดยคณะผู้วิจัยทำการศึกษาสังขยาเสริมงาดำในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อหาความเหมาะสมของปริมาณงาดำโดยนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางกายภาพ และทำการศึกษาคัดเลือกชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลในสูตรสังขยาเสริมงาดำ เพื่อทดแทนความหวานจากน้ำตาลที่ให้พลังงานแก่ร่างกาย เป็นการใช้ความหวานจากสารให้ความหวานที่ไม่ให้พลังงาน แต่ยังมีรสชาติหวานที่ใกล้เคียงกับน้ำตาล ซึ่งสอดคล้องกับกระแสนิยมของผู้บริโภค ผนวกกับมาตรการส่งเสริมของหน่วยงานภาครัฐทั่วโลกที่ให้ความสำคัญต่อสุขภาพมากขึ้น [7] และผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลยังเหมาะกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก สามารถใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ทำให้อ้วน และไม่ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือด จึงเหมาะสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน แต่ควรรับประทานในปริมาณไม่เกินค่า ADI กำหนด สำหรับน้ำตาลเทียมแต่ละตัวเพื่อป้องกันการเกิดอันตรายต่อสุขภาพ [8] และนอกจากนี้คณะผู้วิจัยทำการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ และศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล

จากการศึกษาวิจัยชิ้นนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาลที่มีรสชาติหวานใกล้เคียงน้ำตาลแต่ไม่ให้พลังงาน และยังคงลักษณะที่ดีของสังขยาไว้ อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในท้องตลาด เพื่อเป็นทางเลือกแก่กลุ่มคนที่รักสุขภาพ ทั้งนี้ผู้บริโภคยังได้รับคุณประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มมากขึ้นจากการบริโภคผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำ เช่น แคลเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และใยอาหาร นอกจากนี้ยังเป็นทางเลือกการใช้พืชเศรษฐกิจของไทย และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่สินค้าทางการเกษตรอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์

สูตรสังขยงาดำประกอบด้วย นมสด 750 กรัม นมข้นจืด 500 กรัม ไข่แดง 100 กรัม แป้งข้าวโพด 50 กรัม น้ำตาลทราย 150 กรัม โดยทำการแปรผันปริมาณของงาดำร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรสังขยาเสริมงาดำในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 4 สูตร

ส่วนผสม	สูตรควบคุม งาดำร้อยละ 0 (กรัม)	งาดำร้อยละ 5 (กรัม)	งาดำร้อยละ 10 (กรัม)	งาดำร้อยละ 15 (กรัม)
นมสด	750	750	750	750
นมข้นจืด	500	500	500	500
ไข่แดง	100	100	100	100
แป้งข้าวโพด	50	50	50	50
น้ำตาลทราย	150	150	150	150
งาดำ	-	77.5	155	232.5

อุปกรณ์ในการผลิตสังขยงาดำ ได้แก่ หม้ออบลมร้อน รุ่น CO-703A ผู้ผลิตประเทศจีน เครื่องปั่น รุ่น HR2115/02 ผู้ผลิต ประเทศอินโดนีเซีย หม้อตุ๋น อ่างผสม ตะกร้อมือ พายยาง ถ้วยเตรียม อุปกรณ์ชั่งตวง

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมและกรรมวิธีในการผลิตสังขยงาดำ

ล้างงาดำให้สะอาด พักในกระชอนจนสะเด็ดน้ำ และนำไปอบด้วยหม้ออบลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เวลา 12 - 15 นาที [9] เพื่อเพิ่มความหอมให้แก่งาดำ และงาดำที่ผ่านกระบวนการอบจะมีผลทำให้ปริมาณแคลเซียมที่อยู่ในงาดำมีเพิ่มมากขึ้น [10]

นำส่วนผสม ประกอบด้วย นมสด นมข้นจืด ไข่แดง แป้งข้าวโพด น้ำตาล และงาดำ ร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ปั่นให้เข้ากันด้วย โถปั่นของเหลวด้วยความเร็วระดับสูงสุด (ระดับ 5) เวลา 2 นาที นำไปตุ๋นด้วยหม้อตุ๋นความร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที คนด้วยตะกร้อมืออย่างสม่ำเสมอ จนแป้งสุกและมีความข้นหนืด ใส่ น้ำตาลทราย ตุ่นต่อ 5 นาที เก็บรักษาในภาชนะที่มีฝาปิด เพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และประสาทสัมผัสต่อไป

2.2 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ศึกษาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนำสังขยาเสริมงาดำในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ งาดำร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) 5 10 และ 15 ของส่วนผสมทั้งหมดไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี กลิ่น รสชาติ ความข้นหนืด และ

ความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน ทำการทดสอบแบบ 9 - Point Hedonic Scale (1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด)

2.3 การประเมินคุณภาพทางด้านกายภาพ

วิเคราะห์ค่าความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบราง Bostwick Consistometers ยี่ห้อ CSC Scientific รุ่น 1-800-458-2558 และค่าสีในระบบ CIE (L^* a^* b^*) โดยใช้เครื่องวัดสี Minolta Colorimeter รุ่น CR-300 (Minolta Co., Ltd, Osaka, Japan)

2.4 ศึกษาคัดเลือกชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล

ทำการทดลองโดยใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาล 2 ชนิด ได้แก่ สตีเวีย และซูคราโลส มาทดแทนน้ำตาลในสูตร โดยสตีเวียมีความหวานเป็น 300 เท่าของน้ำตาล และซูคราโลส 600 เท่าของน้ำตาล [7] นำส่วนผสมตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 2 มาผสมรวมกัน ปั่นให้เข้ากันด้วยโถปั่นของเหลวด้วยความเร็วระดับสูงสุด (ระดับ 5) เวลา 2 นาที นำไปคั่วด้วยหม้อตุ๋นความร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที คนด้วยตะกร้อมืออย่างสม่ำเสมอ จนแห้งและมีความข้นหนืด เก็บรักษาในขวดแก้วที่มีฝาปิด

จากนั้นนำสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล ทั้ง 2 สูตร (สตีเวีย และซูคราโลส) ไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และวิเคราะห์ค่าความหนืด และค่าสีในระบบ CIE (L^* a^* b^*)

ตารางที่ 2 สูตรสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล

ส่วนผสม	สังขยาเสริมงาดำจากสตีเวีย (กรัม)	สังขยาเสริมงาดำจากซูคราโลส (กรัม)
นมสด	750	750
นมข้นจืด	500	500
ไข่แดง	100	100
แป้งข้าวโพด	50	50
งาดำ	155	155
สตีเวีย	0.5	-
ซูคราโลส	-	0.25

2.5 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำต่อปริมาณ 100 กรัม ได้แก่ พลังงานทั้งหมด ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน โยอาอาหาร ความชื้น เถ้า น้ำตาลทั้งหมด ด้วยวิธี AOAC [11] รวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัส ด้วยวิธี AOAC [12] ของสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล และสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย

2.6 การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำ

ทำการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จำนวนผู้บริโภค 100 คน จากสูตรสังขยาเสริมงาดำที่ผ่านการคัดเลือกชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลที่ได้รับคะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงสุด โดยใช้วิธีประเมินและทดสอบชิมแบบ 9 - Point Hedonic Scale (1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด) ซึ่งทำการทดสอบความชอบในด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี กลิ่น รสชาติ ความข้นหนืด และความชอบโดยรวม รวมถึงข้อมูลทั่วไปจากแบบสอบถามการยอมรับ

ของผู้บริโภค โดยใช้กลุ่มผู้ทดสอบภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทำการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) ทดสอบแบบ (Central Location Test)

2.7 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลคะแนนที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS for Windows [13]

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางกายภาพของสังขยาเสริมงาดำ

ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางกายภาพของสังขยาเสริมงาดำ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ งาดำร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) 5 10 และ 15 ของส่วนผสมทั้งหมด เพื่อเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับสูงสุดไปพัฒนาต่อ ดังนี้

1.1 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากตารางที่ 3 พบว่า ผลคณิตรัสสังขยาเสริมงาดำที่มีงาดำร้อยละ 10 ให้ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี รสชาติ และความชอบโดยรวม มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสังขยา งาดำที่มีร้อยละ 5 และ 15 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากสังขยาที่เสริมงาดำร้อยละ 10 มีลักษณะที่ดี มีความข้นหนืดที่พอดี ไม่ข้นมากและไม่เหลวจนเกินไป อีกทั้งจากข้อเสนอแนะของผู้ทดสอบระบุว่า สีของสังขยาเสริมงาดำอยู่ในระดับความเข้มที่ดี มีสีน้ำตาลสวย มีความมันเงา และมีรสชาติที่ดีเพราะงาดำที่เติมลงไปไม่น้อยและไม่มากเกินไปจนไม่ทำให้มีรสขมของงาดำ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกสูตรสังขยาที่มีปริมาณงาดำร้อยละ 10 ไปพัฒนาต่อไป เนื่องจากเป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับและมีคะแนนความชอบสูงสุด และมีความใกล้เคียงกับสูตรควบคุม

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสังขยาเสริมงาดำ ($n = 50$)

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	สูตรควบคุม งาดำร้อยละ 0	งาดำร้อยละ 5	งาดำร้อยละ 10	งาดำร้อยละ 15
ลักษณะปรากฏ	7.16 ^a ±0.37	6.72 ^b ±1.21	7.20 ^a ±1.03	6.58 ^b ±1.03
สี	6.82 ^b ±1.13	6.56 ^b ±1.70	7.68 ^a ±0.91	6.92 ^b ±10.6
กลิ่น	6.52 ^b ±1.03	6.88 ^a ±1.76	7.36 ^a ±1.24	6.28 ^b ±1.26
รสชาติ	6.92 ^a ±0.63	6.12 ^b ±1.62	7.00 ^a ±1.34	6.30 ^b ±1.52
ความข้นหนืด	7.00 ^a ±0.85	6.36 ^b ±1.69	7.18 ^a ±1.41	7.12 ^a ±1.27
ความชอบโดยรวม	6.94 ^a ±0.65	6.58 ^b ±1.56	7.18 ^a ±1.33	6.32 ^b ±1.25

หมายเหตุ : ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

1.2 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ

จากการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ความหนืด และค่าสี (L^* a^* b^*) ของสังขยาเสริมงาดำในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4 พบว่า ค่าความหนืดของสังขยาเสริมงาดำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยถ้ามีปริมาณงาดำเพิ่มมากขึ้น การไหลจะช้าลง ทำให้ค่าความหนืดลดลงตามไปด้วย กล่าวคือ งาดำร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) งาดำร้อยละ 5 งาดำร้อยละ 10 และงาดำร้อยละ 15 มีค่าเท่ากับ 0.32 0.30 0.27 และ 0.24 (ชม./วินาที) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากงาดำมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ มีใยอาหารที่ค่อนข้างสูงสามารถอุ้มน้ำได้ดี [14] และจากการที่งาดำมีใยอาหารสูงนั้น จะไปเพิ่มเนื้อเยื่อหรือเยื่อใยให้แก่ผลิตภัณฑ์สังขยา ยิ่งเพิ่มปริมาณงาดำมากขึ้นเท่าไร สังขยาจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งความหนืดของสังขยาจะแปรผันตามปริมาณของงาดำ

ค่าสีพบว่า ค่าสี L^* และ a^* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่องาดำมีปริมาณเพิ่มขึ้นก็จะมีผลทำให้ค่าความสว่าง L^* ลดลง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของงาดำที่มีเปลือกหุ้มเมล็ดสีดำเข้ม เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในสังขยาก็จะทำให้สังขยามีสีดำตามไปด้วย ส่วนค่า a^* ค่าความเป็นสีแดง เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเพิ่มปริมาณงาดำมีค่าอยู่ในช่วง 0.34 - 2.00 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องสังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาดำ [5] พบว่า การใช้น้ำเต้าหู้ผสมงาดำแทนน้ำใบเตยมีผลทำให้ค่าความสว่าง L^* ลดลง และค่า a^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากมีส่วนผสมของงาดำทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเทาดำ ส่วนค่าสี b^* พบว่า งาดำร้อยละ 5 10 และ 15 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างกันกับงาดำร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การนำงาดำมาเสริมในผลิตภัณฑ์สังขยาในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยเพิ่มปริมาณงาดำที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 1(ก) งาดำร้อยละ 5 ดังรูปที่ 1(ข) งาดำร้อยละ 10 และ ดังรูปที่ 1(ค) งาดำร้อยละ 15 มีผลทางกายภาพด้านสีที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน คือสังขยาจะมีสีดำเข้มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของงาดำที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ ($n = 5$)

คุณภาพทางกายภาพ	สูตรควบคุม งาดำร้อยละ 0	งาดำร้อยละ 5	งาดำร้อยละ 10	งาดำร้อยละ 15
ค่าความหนืด (ชม./วินาที)	0.32 ^a ±0.00	0.30 ^b ±0.00	0.27 ^c ±0.00	0.24 ^d ±0.01
ค่าสี				
L^*	53.52 ^a ±1.18	24.82 ^b ±0.85	22.22 ^c ±0.90	16.38 ^d ±2.20
a^*	4.86 ^a ±0.15	0.34 ^d ±0.19	0.92 ^c ±0.35	2.00 ^b ±0.70
b^*	21.18 ^a ±0.40	4.98 ^b ±0.35	5.46 ^b ±1.41	5.64 ^b ±1.02

หมายเหตุ : ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



(ก) งาดำร้อยละ 5



(ข) งาดำร้อยละ 10



(ค) งาดำร้อยละ 15

รูปที่ 1 สังขยาเสริมงาดำในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 ระดับ

2. ผลการศึกษาคัดเลือกชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล

จากผลการศึกษาข้างต้น คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกสังขยาเสริมงาดำที่มีส่วนผสมงาดำร้อยละ 10 ที่มีผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงสุดมาศึกษาชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล 2 ชนิด คือ สตีเวีย และซูคราโลส จากนั้นทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางกายภาพ

2.1 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทั้ง 2 สูตร ได้แก่ สตีเวีย และซูคราโลสไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังตารางที่ 5 พบว่า ด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี กลิ่น ความชื้นหนืด ของสังขยาเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลด้วยสตีเวีย และซูคราโลสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ด้านรสชาติหวาน และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสังขยาจากซูคราโลสมีคะแนนความชอบมากกว่าสตีเวีย เนื่องจากซูคราโลสให้รสชาติหวานใกล้เคียงกับน้ำตาล และไม่ทำให้เกิดรสขม หรือเผ็ดติดปลายลิ้นเหมือนสตีเวีย [8] จึงมีผลทำให้ผู้ทดสอบชิมชอบรสชาติหวานของซูคราโลสมากกว่าสตีเวีย ซึ่งสอดคล้องกับ Srisangwan, N. [15] และ Khamwachiraphitak, M., Payom, R., Morragot, K., Suvitchaya, S., Kanokwan, P., Benjang, A., Songpoltanarit, M., and Benjawan, B. [16] ได้รายงานไว้ว่า ซูคราโลสถูกสร้างจากน้ำตาลซูโครสเป็นสารตั้งต้น แล้วแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิล 3 ตำแหน่งด้วยอะตอมสารคลอไรด์ ทำให้มีสูตรโครงสร้างคล้ายกับน้ำตาล ร่างกายไม่สามารถย่อยได้ แต่ยังคงให้รสชาติหวาน และไม่รบกวนสมดุลกรด-เบสของน้ำตา ละลายน้ำได้ดีและสามารถนำไปปรุงอาหารร้อนบนเตาโดยไม่สูญเสียความหวาน

2.2 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์ความชื้นหนืด และค่าสี (L^* a^* b^*) ของสังขยาเสริมงาดำที่มีสารให้ความหวานแทนน้ำตาล 2 ชนิด ดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากสังขยาเสริมงาดำทั้ง 2 สูตร มีการใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลในปริมาณที่น้อยมากและใกล้เคียงกัน จึงทำให้ความชื้นหนืดของผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 สูตรไม่แตกต่างกัน และจะเห็นได้ว่าซูคราโลสไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารให้เนื้อและเพิ่มความหนืดแก่ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมีปริมาณของแข็งที่น้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำตาลชนิดอื่น [17] นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Akesuwan, A. [18] ที่กล่าวว่า ชนิดของน้ำตาลและความเข้มข้นของน้ำตาลในส่วนผสม ส่งผลต่อความหนืดในผลิตภัณฑ์

ค่าสี L^* a^* และ b^* พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่เป็นผงสีขาวและใช้ในปริมาณที่น้อยมาก และสารทดแทนความหวานจะไม่มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือเกิดได้น้อยมาก เนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งมีหมู่ที่เป็นอัลดีไฮด์และคีโตนทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนโตรเจน เช่น เอมีน โพรตีน ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดิน (Melanoidins) ซึ่งสารทดแทนความหวานส่วนใหญ่ไม่มีหมู่ที่เป็นอัลดีไฮด์และคีโตนอยู่ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ [19]

ตารางที่ 5 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล ($n = 50$)

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	สังขยาเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาล	
	สตี้เวีย	ซูคราโรส
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.02±0.76	7.10±0.81
สี ^{ns}	7.10±0.93	7.36±0.63
กลิ่น ^{ns}	6.88±1.76	7.36±1.24
รสชาติหวาน	6.12 ^b ±1.62	7.32 ^a ±1.03
ความข้นหนืด ^{ns}	6.96±0.60	7.00±1.17
ความชอบโดยรวม	6.58 ^b ±1.56	7.32 ^a ±1.26

หมายเหตุ : ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแถวแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพของสังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล ($n = 5$)

คุณภาพทางกายภาพ	สังขยาเสริมงาดำจากสารให้ความหวานแทนน้ำตาล	
	สตี้เวีย	ซูคราโรส
ค่าความหนืด (ชม./วินาที) ^{ns}	0.26±0.00	0.27±0.00
สี		
L^* ^{ns}	12.48±0.31	12.50±1.26
a^* ^{ns}	1.10±1.05	0.44±0.39
b^* ^{ns}	4.92±0.38	4.96±0.37

หมายเหตุ : ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ

นำสังขยาเสริมงาคำที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลที่ได้รับการยอมรับสูงสุด คือ สังขยาเสริมงาคำจากซูคราโลสแทนน้ำตาล และสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย ตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 7 มาทำการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการต่อ 100 กรัม

จากตารางที่ 8 พบว่า เมื่อเปลี่ยนจากสังขยาที่ใช้ใบเตยมาเป็นงาคำ มีผลทำให้สังขยาเสริมงาคำมีปริมาณใยอาหาร แคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากงาคำเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงชนิดหนึ่ง ซึ่งในเมล็ดงาคำมีกากใยร้อยละ 2.5-2.6 นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุร้อยละ 4.1-6.5 เช่น เหล็ก ไอโอดีน สังกะสี แคลเซียม ฟอสฟอรัส เป็นต้น [20] โดยเฉพาะแคลเซียมมีปริมาณสูงถึง 394.566 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม อาจเป็นเพราะงาคำมีแคลเซียมมากกว่าพืชทั่วไป 40 เท่าและสูงกว่างาขาวประมาณ 2 เท่า ซึ่งแคลเซียมจะมีความสำคัญในการสร้างกระดูกเด็กในวัยเจริญเติบโต และสตรีในวัยหมดประจำเดือน ซึ่งมีความบกพร่องของฮอร์โมนเอสโตรเจน ทำให้มีการดึงแคลเซียมออกจากกระดูก ดังนั้นงาคำจึงเป็นแหล่งแคลเซียมที่ดีจึงควรบริโภค [6] และยังคงคล้องกับ Mekrawee, N., Teeranuch, C., Onanong, T., Narongchai, K., and Kraiyarach, P. [5] ที่ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์สังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาคำกับสังขยาใบเตยพบว่าสังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาคำมีแนวโน้มปริมาณแคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัสสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสังขยาใบเตย

คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลทั้งหมดของสังขยาเสริมงาคำจากซูคราโลสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย เนื่องจากสังขยาเสริมงาคำจากซูคราโลสใช้สารให้ความหวานจากซูคราโลส ซึ่งเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลที่ไม่ให้พลังงาน [7] และไม่มีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดหรือระดับอินซูลิน ไม่ทำให้ฟันผุ จึงเหมาะกับผู้ป่วยโรคเบาหวาน [16] แต่ในทางกลับกันการใช้สารให้ความหวานจากน้ำตาลทราย ซึ่งน้ำตาลทราย คือคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในกลุ่มน้ำตาลโมเลกุลคู่ น้ำตาล 1 กรัม จะให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี นอกจากนี้น้ำตาลยังเป็นอาหารที่ปราศจากกากใย ไม่มีทั้งวิตามิน และแร่ธาตุ เมื่อกินเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นพลังงานที่ใช้ในร่างกาย และถ้ามากเกินไปจะถูกเปลี่ยนเป็นไขมันสะสมในร่างกาย ดังนั้นการบริโภคน้ำตาลในปริมาณมากจะส่งผลให้มีน้ำหนักเกิน ทำให้เกิดโรคหรือปัญหาสุขภาพตามมา การเลือกรับประทานอาหารที่มีปริมาณมากน้อยของน้ำตาล จึงเป็นสิ่งสำคัญลำดับต้น ๆ ของการควบคุมและดูแลร่างกาย [3]

ส่วนพลังงานทั้งหมดของสังขยาเสริมงาคำจากซูคราโลสพบว่า มีปริมาณเท่ากับ 200.33 กิโลแคลอรี ซึ่งมากกว่าสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทรายที่มีปริมาณเท่ากับ 147.12 กิโลแคลอรี ทั้งนี้เนื่องจากสังขยาเสริมงาคำจากซูคราโลส มีไขมัน 13.33 กรัม และโปรตีน 7.33 กรัม ซึ่งมีแนวโน้มที่สูงกว่าสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิจัยของ Mekrawee, N., Teeranuch, C., Onanong, T., Narongchai, K., and Kraiyarach, P. [5] พบว่า สูตรสังขยาน้ำเต้าหู้ผสมงาคำมีปริมาณไขมัน และโปรตีนสูงกว่าสูตรสังขยาใบเตย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพลังงานทั้งหมดที่มีปริมาณสูง ส่วนใหญ่มาจากไขมันและโปรตีนซึ่งมีอยู่มากในงาคำ ซึ่งสอดคล้องกับตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทยที่ระบุไว้ งาคำอบปริมาณ 100 กรัม มีไขมัน 51.9 กรัม และโปรตีน 20.6 กรัม [10] อย่างไรก็ตามไขมันจากงาคำเป็นไขมันที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงร้อยละ 85 โดยมีกรดไขมันอิ่มตัวประมาณร้อยละ 42 - 48 การมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะช่วยควบคุมระดับคอเลสเตอรอลในเลือดไม่ให้มีมากเกินไป

ป้องกันไม่ให้หลอดเลือดแข็ง ป้องกันโรคหัวใจ และโรคที่เกี่ยวข้องกับเส้นเลือดบางชนิด รวมทั้งให้ความชุ่มชื้นแก่ผิว [6] และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Klinkajorn, S. [21] ที่ทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์เนยงาดำพบว่า มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึงร้อยละ 82.7 และยิ่งสอดคล้องกับ Bunsit, K. and Teerapon, B. [22] ได้รายงานมาว่า จากการทดลองคนที่ เป็นอาสาสมัครที่มีระดับไขมันในเลือดสูง มีสภาวะเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือด เมื่อให้กินกานงาดำ ในรูปแคปซูลปริมาณ 2.52 - 2.58 กรัมต่อวัน ติดต่อกันเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าอาสาสมัครมีระดับไขมันในเลือดลดลง โดยเฉพาะระดับคอเรสเตอรอลรวม และแอลดีแอลคอเรสเตอรอล

ตารางที่ 7 สูตรสังขยาเสริมงาดำจากชูคราโรสแทนน้ำตาลกับสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย

สังขยาเสริมงาดำจากชูคราโรสแทนน้ำตาล		สังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย	
ส่วนผสม	(กรัม)	ส่วนผสม	(กรัม)
นมสด	750	นมสด	750
นมข้นจืด	500	นมข้นจืด	500
ไข่แดง	100	ไข่แดง	100
แป้งข้าวโพด	50	แป้งข้าวโพด	50
งาดำ	155	น้ำใบเตย	155
ชูคราโรส	0.25	น้ำตาลทราย	150

หมายเหตุ : สูตรสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทรายดัดแปลงจากงาดำร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) [23]

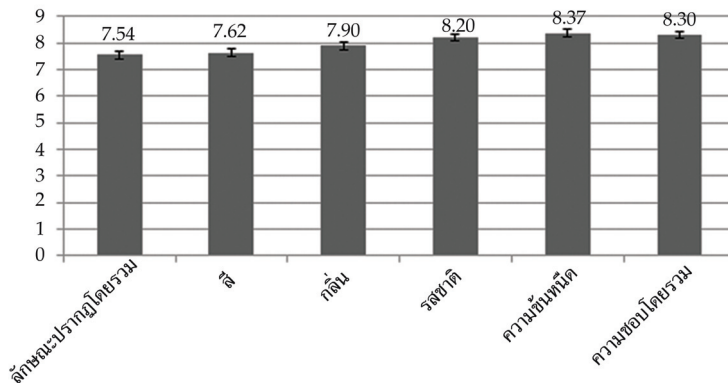
ตารางที่ 8 คุณค่าทางโภชนาการของสังขยาเสริมงาดำจากชูคราโรสแทนน้ำตาลกับสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย

คุณค่าทางโภชนาการ	สังขยาเสริมงาดำจาก	สังขยาใบเตยจาก
	ชูคราโรสแทนน้ำตาล	น้ำตาลทราย
พลังงานทั้งหมด (Calories)	200.33 Kcal/100 g	147.12 Kcal/100 g
ไขมัน (Fat)	13.33 g/100 g	4.88 g/100 g
คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)	12.76 g/100 g	22.64 g/100 g
โปรตีน (Protein)	7.33 g/100 g	3.16 g/100 g
ใยอาหาร (Dietary Fiber)	5.05 g/100 g	0.22 g/100 g
ความชื้น (Moisture)	64.98 g/100 g	68.66 g/100 g
เถ้า (Ash)	1.60 g/100 g	0.66 g/100 g
น้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar)	4.05 g/100 g	18.24 g/100 g
แคลเซียม (Calcium)	394.566 mg/100 g	75.192 mg/100 g
เหล็ก (Iron)	1.570 mg/100 g	0.459 mg/100 g
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	218.154 mg/100 g	83.760 mg/100 g

4. ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

จากผู้บริโภคจำนวน 100 คน พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 65 ที่เหลือเป็นเพศชายร้อยละ 35 อายุอยู่ระหว่าง 15 - 24 ปี ร้อยละ 40 รองลงมาอายุอยู่ระหว่าง 25 - 34 ปี ร้อยละ 25 อาชีพนักศึกษาร้อยละ 40 รองลงมาอาชีพอิสระร้อยละ 26 ระดับการศึกษาปริญญาตรีร้อยละ 41 รองลงมามัธยมศึกษาตอนปลายร้อยละ 23 มีรายได้อยู่ระหว่าง 10,001 - 20,000 บาทต่อเดือน ร้อยละ 35 รองลงมา 5,001 - 10,000 บาทต่อเดือน ร้อยละ 30

จากรูปที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสังขยาเสริมงาดำจากซูคราไรสแทนน้ำตาลพบว่า ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยรวมทุกด้านเท่ากับ 7.98 อยู่ในระดับการยอมรับมาก โดยเมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ความชื่นชอบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.37 ความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.30 รสชาติมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.20 กลิ่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.90 สีมามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.62 และลักษณะปรากฏโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.54 ตามลำดับ การตัดสินใจบริโภคผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคพบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่ร้อยละ 90 ตัดสินใจซื้อเมื่อผลิตภัณฑ์วางจำหน่ายที่เหล็กร้อยละ 10 ไมซื้อ เนื่องจากไม่ชอบที่มีลักษณะสีดำ และไม่ชอบกลิ่นงาดำ ส่วนด้านเหตุผลในการซื้อผู้บริโภคร้อยละ 45 ให้เหตุผลว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกเพื่อสุขภาพ รองลงมาร้อยละ 23 ให้เหตุผลว่ามีปริมาณน้ำตาลต่ำ รองลงมาร้อยละ 15 ให้เหตุผลว่าประโยชน์ของงาดำ และร้อยละ 7 ให้เหตุผลว่าเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในท้องตลาด



รูปที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำจากซูคราไรสแทนน้ำตาล

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปริมาณงาดำที่เหมาะสมในการผลิตสังขยา สรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์สังขยาสามารถเสริมงาดำได้ร้อยละ 10 ของส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและได้รับการยอมรับสูงสุด ส่วนลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนืด และค่าสีของสังขยาเสริมงาดำมีความแตกต่างกันกับสังขยาสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) และเมื่อนำสังขยาเสริมงาดำมาศึกษาคัดเลือกชนิดของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล พบว่าสังขยาเสริมงาดำจากซูคราไรสได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงกว่าสารให้ความหวานจากสตีเวีย ส่วนค่าความหนืด และค่าสีไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) คุณค่าทางโภชนาการของสังขยาเสริมงาดำจากซูคราไรส มีปริมาณพลังงานทั้งหมด ไขมัน โปรตีน โยอาทาร์ เถ้า แคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัส

โดยมีแนวโน้มสูงกว่าสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย ส่วนคาร์โบไฮเดรต ความชื้น และน้ำตาลทั้งหมด มีแนวโน้มต่ำกว่าสังขยาใบเตยจากน้ำตาลทราย นอกจากนี้ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์สังขยาเสริมงาดำ จากซูคราโลสในระดับการยอมรับมาก โดยผู้บริโภคส่วนใหญ่ร้อยละ 90 ตัดสินใจซื้อเมื่อผลิตภัณฑ์วางจำหน่าย และร้อยละ 45 ให้เหตุผลว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกเพื่อสุขภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ และกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2561 ในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- [1] SME Cheechongruay. (2019). **Pungplunglava Franchise Khanompungsaitaluk Longtoonngai Kumraignkrung**. Access (18 March 2020). Available (<http://cheechongruay.smartsme.co.th/content/22264>)
- [2] Daedkhulchon, J. (2014). **Thai Dessert Book 2**. Bangkok: Diamond Publisher
- [3] Bureau of Nutrition, Department of Health. (2011). **Good Health Starts at Foods Reduce Sweet, Salty, add More Vegetables, Fruits**. In: Saleepan, S., and Sukjai, S. (eds.). Bangkok: Veterans Organization Printing Factory.
- [4] Kee-ariyo, C., Apinya, M., Photchanee, B., and Nanoln, D. (2012). **The Development Thai Dessert form Local Herbs**. Research Report, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [5] Mekrawee, N., Teeranuch, C., Onanong, T., Narongchai, K., and Kraiyarach, P. (2016). Tofu Egg Custard Sauce with Black Sesame. **Home Economics Journal**. Vol. 59, No. 3, pp. 26-35
- [6] Sagepakdee, N. (2001). **Development of Semi-Finished Black Sesame Soup Products**. Thesis Master Degree of Home Economics, Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University
- [7] Jacob, M., Tripathi, A. M., Yadav, G., and Saha, S. (2016). Nutritive and Non-Nutritive Sweeteners: A Review. **International Journal of Oral Health and Medical Research**. Vol. 2, No. 5, pp. 149-153
- [8] Chermongkhl, W. (2008). Sweeteners: Use and Safety. **Thai Pharmaceutical and Health Science Journal**. Vol. 3, No. 1, pp. 161-168
- [9] Hemrangkha, P. (2011). **The Development of Bread Sticks with Black Sesame: A Case Study of Khakai Company Limited**. Thesis Master Degree of Arts, Development Strategy, Rajabhat Rajanagarindra University
- [10] Bureau of Nutrition, Department of Health. (2001). **Nutritive Values of Thai Foods**. In: Boonvisut, S. (eds.). Bangkok: Department of Health

- [11] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17th ed. Maryland, USA: AOAC International
- [12] AOAC. (2005). **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18th ed. Maryland, USA: AOAC International
- [13] Vanidbhuncha, K. (2007). **Data Analysis SPSS for Windows**. 10th ed. Bangkok: Thamasan Publishers Ltd.
- [14] Deveries, L. J. and Reinhold, V. N. (1992). **Controlling Dietary Fiber in Food Products**. New York: Van Nostrand Reinhold
- [15] Srisangwan, N. (2012). **Nutritional Improvement of A-lua and Foi-Thong Desserts by Using Non sugar Sweeteners**. Thesis Master Degree of Science, Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University
- [16] Khamwachiraphitak, M., Payom, R., Morragot, K., Suvitchaya, S., Kanokwan, P., Benjang, A., Songpoltanarit, M., and Benjawan, B. (2008). Influence of Fructose Syrup and Sucralose on Some Characteristics of Mixed Fruit Jams. **Research Journal and Development of Valaya Alongkorn Under the Royal Patronage**. Vol. 11, No. 2, pp. 15-23
- [17] Tanthipiriya, J. (2006). **Partial Substitution of Sugars by Sweeteners “Sucralose” in Pomelo Jam Product**. Nakhonpathom: Nakhonpathom Rajabhat University
- [18] Akesuwan, A. (2009). Quality of Reduced-Fat Chiffon Cakes Prepared with Erythritol-Sucralose as Replacement for Sugar. **Pakistan Journal of Nutrition**. Vol. 8, Issue 9, pp. 1383-1386. DOI: 10.3923/pjn.2009.1383.1386
- [19] Lin, S. D., Hwang, C. F., and Yeh, C. H. (2003). Physical and Sensory Characteristics of Chiffon Cake Prepared with Erythritol as Replacement for Sucrose. **Journal of Food Science**. Vol. 68, Issue 6, pp. 2107-2110. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb07027.x
- [20] Vongyeam, W. (2009). **Supplementing Rice Flour Cookies with Protein Extracted from Black Sesame Seeds**. Thesis Master Degree of Science, Agro-Industrial Product Development, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University
- [21] Klinkajorn, S. (2002). **Production of Black Sesame *Sesame indicum* Linn. Butter**. Thesis Master Degree of Science in Food Technology, Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
- [22] Bunsit, K. and Teerapon, B. (2014). Value of Unroasted Black Sesame Seed Cake. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University**. Vol. 16, No. 2, pp. 47-54
- [23] Phuksuksakul, A. (2015). **Food for Family**. Food and Nutrition Department, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและการยับยั้งเอนไซม์แองจิโอเทนซิน
ของปลาซ้มนิระหว่างการหมัก

Changes in Antioxidant Activity and Angiotensin I-Converting Enzyme Inhibition of *Plaa-som* During Fermentation

ชมนุช ข้องลา^{1*} สุมาลี มุสิก้า¹ อารยา รานอก¹ ชนิตา กุประดิษฐ์¹ และเสกสรร มังคลานันท์¹
Chompoonuch Khongla^{1*} Sumalee Musika¹ Araya Ranok¹ Chanida Kupradit¹ and
Seksan Mangkalanant¹

Received: May 25, 2019; Revised: November 11, 2019; Accepted: November 12, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอลฟา-อะมิโน คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ และการยับยั้งเอนไซม์แองจิโอเทนซิน (ACE) ของปลาซ้มนิที่ได้จากการหมักปลาน้ำจืดชนิดต่าง ๆ เป็นเวลา 0 3 และ 4 วัน รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระของปลาซ้มนิผ่านการย่อย ในทางเดินอาหารแบบจำลอง ซึ่งพบว่า ปลาซ้มนิที่หมักนาน 3 และ 4 วัน มีปริมาณแอลฟา-อะมิโน คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} และสมบัติในการรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกสูงกว่า ปลาซ้มนิวันที่ 0 ปลาซ้มนิที่ได้จากปลาสร้อยขาวและปลาสร้อยเกล็ดดำที่ระยะเวลาการหมัก 3 และ 4 วัน มีปริมาณแอลฟา-อะมิโน และคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าปลาซ้มนิที่หมักจากปลาสร้อยนกเขา และปลาสร้อยลูกกล้วย เมื่อเลือกปลาซ้มนิที่หมักจากปลาสร้อยขาวไปวิเคราะห์สมบัติการยับยั้งเอนไซม์ ACE พบว่า ปลาซ้มนิที่หมักเป็นระยะเวลา 3 วัน มีสมบัตียับยั้งเอนไซม์ ACE มากสุด ดังนั้นเลือกปลาซ้มนิที่หมัก จากปลาสร้อยขาวที่ระยะเวลาการหมัก 3 วัน ไปวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-อะมิโนและคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ประจวบกับ ABTS^{•+} หลังจากรับประทานด้วยระบบทางเดินอาหารแบบจำลองพบว่า ปริมาณแอลฟา-อะมิโนเพิ่มขึ้น ส่วนคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการย่อยในระบบทางเดินอาหารแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับปลาซ้มนิที่ไม่ผ่านการย่อย ผลจากการศึกษานี้บ่งชี้ได้ว่าปลาซ้มนิที่ได้จากปลาสร้อยขาว ที่หมักนาน 3 วัน เป็นแหล่งเพปไทด์ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งเอนไซม์ ACE ที่ดี

คำสำคัญ : ปลาซ้มนิ; สมบัติต้านอนุมูลอิสระ; สมบัตียับยั้งเอนไซม์แองจิโอเทนซิน; การย่อยในทางเดินอาหารแบบจำลอง

¹ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

¹ Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author E - mail Address: chompoonuch.2840@gmail.com

Abstract

The objective of this research was to study the changes in α -amino acid content, antioxidant and angiotensin I-converting enzyme (ACE)-inhibitory activities of *Plaa-som* obtained from fermentation of various types of freshwater fish for 0, 3 and 4 days, including study the antioxidant activity of *Plaa-som* after the simulated gastrointestinal (GI) digestion. The results found that *Plaa-som* at 3 and 4 days of fermentation contained higher α -amino acid content, ABTS^{•+} cation radical scavenging activity and ferric reducing antioxidant power than that of day 0. *Plaa-som* obtained from *Henicorhynchus siamensis* and *Thynnichthys thynnoides* at 3 and 4 days of fermentation had higher α -amino acid content and antioxidant activities than that *Osteochilus hasseltii* and *Labiobarbus siamensis*. *Plaa-som* obtained from *Henicorhynchus siamensis* was selected for determination of ACE-inhibitory activity. The results found that *Plaa-som* at 3 day of fermentation exhibited the highest ACE-inhibitory activity. Thus, *Plaa-som* obtained from *Henicorhynchus siamensis* at 3 day of fermentation was selected for determination of α -amino acid content and ABTS^{•+} cation radical scavenging activity after simulated gastrointestinal (GI) digestion. The results found that α -amino acid content increased, while antioxidant activity did not change after simulated gastrointestinal (GI) digestion when compared with undigested *Plaa-som*. The results of this study indicate that *Plaa-som* obtained from *Henicorhynchus siamensis* at 3 day of fermentation is a good source of natural antioxidant and ACE-inhibitory peptides.

Keywords: *Plaa-som*; Antioxidant Activity; Angiotensin I-Converting Enzyme-Inhibitory Activity; Simulated Gastrointestinal (GI) Digestion

บทนำ

ปลาสดจัดเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากมีโปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุสูง นิยมบริโภคในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและแพร่หลายไปสู่ภาคอื่น ๆ ปัจจุบันมีการผลิตปลาสดกันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมการผลิตแปรรูปปลาน้ำจืดในรูปของปลาสดในภาคอีสานมีปริมาณการผลิตประมาณ 1.35 ล้านกิโลกรัมต่อปี หรือเป็นมูลค่าประมาณ 100 ล้านบาทต่อปี ซึ่งนับว่าเป็นรายได้ที่สร้างเม็ดเงินให้กับผู้ประกอบการได้เป็นอย่างดี [1] ปลาสด คือ ผลิตภัณฑ์ปลาที่ผ่านกระบวนการหมักด้วยเกลือ คาร์โบไฮเดรต (ข้าวเจ้าสุกหรือข้าวเหนียวหนึ่ง) และกระเทียม คลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นหมักที่อุณหภูมิห้อง (25 - 30 °C) นาน 3 - 5 วัน ในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีรสเปรี้ยวพอเหมาะ ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำกว่า 4.5 ปลาสดอาจทำมาจากปลาทั้งตัวหรือเฉพาะเนื้อปลาก็ได้ [2] - [3] ในระหว่างการหมักเอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์จะย่อยสลายโปรตีน และไขมัน ทำให้ได้เปปไทด์ กรดอะมิโน และกรดไขมัน ก่อให้เกิดกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

ต่างไปจากเดิม [3] ปลาสมัมนิยมทำจากปลาน้ำจืด เช่น ปลาตะเพียน ปลานวลจันทร์ ปลาเยือก ปลาเทโพ ปลาสร้อย ปลากRAY และปลาจีน ส่วนปลาในวงศ์ปลาตะเพียน (*Cyprinidae*) เช่น ปลาสร้อยนกเขา (*Osteochilus hasseltii*) ปลาสร้อยเกล็ดถี่ (*Thynnichthys thynnoides*) ปลาสร้อยขาว (*Henicorhynchus siamensis*) และปลาสร้อยลูกกล้วย (*Labiobarbus siamensis*) เป็นปลาที่ทำได้ง่ายและเป็นปลาที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของภาคอีสาน โดยนิยมนำมาแปรรูปเป็นปลาสมั ปลาจ๋า และน้ำปลา ดังนั้น การศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพของเพปไทด์ในตัวอย่างปลาสมัที่ทำจากปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ อาจเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ปลาสมัอีกทางหนึ่งและเป็นการสร้างความเข้าใจใหม่และเปลี่ยนมุมมองแนวความคิดของผู้บริโภคที่เคยมองว่าอาหารหมักดองไม่ดีต่อสุขภาพว่าอาหารหมักดองก็สามารถเป็นอาหารที่มีหน้าที่ส่งผลดีต่อสุขภาพได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้เป็นข้อมูลสำหรับผู้บริโภคในการเลือกบริโภคผลิตภัณฑ์จากปลาสมั รวมทั้งอาจเป็นข้อมูลที่ใช้สร้างเอกลักษณ์ และจุดเด่นของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้ผลิตปลาสมัอีกด้วย

เพปไทด์อิสระที่ปลดปล่อยออกมาจากโปรตีนของเนื้อปลาหรือของเนื้อสัตว์หรือของถั่วเหลืองนั้น เป็นเพปไทด์เชิงหน้าที่ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เรียกว่า เป็นเพปไทด์เชิงหน้าที่ (Functional Peptides) ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่ม “ไบโอแอคทีฟเพปไทด์” (Bioactive Peptide) เช่น เพปไทด์ที่มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant Peptides) ยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial Peptide) และลดความดันโลหิตสูง (Antihypertensive Peptide) ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของเพปไทด์ในการยับยั้งเอนไซม์ Angiotensin I Converting Enzyme (ACE) ส่งผลให้ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดที่เป็นผลมาจากความดันโลหิตสูง [1] ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาสุขภาพที่ใหญ่ที่สุดในโลก โดยโรคหัวใจและหลอดเลือดเป็นสาเหตุการเสียชีวิตทั่วโลกสูงถึง 17.5 ล้านคนต่อปี [4] เอนไซม์ ACE ทำหน้าที่เปลี่ยนชื่อ Angiotensin I ให้เป็น Angiotensin II ซึ่งสาร Angiotensin II มีฤทธิ์ทำให้หลอดเลือดหดตัว ส่งผลให้ความดันโลหิตเพิ่มสูงขึ้น [5] นอกจากนี้เอนไซม์ ACE ยังมีผลในการลดปริมาณ Bradykinin ซึ่ง Bradykinin เป็นเพปไทด์ที่มีผลลดความดันโลหิต [6] ดังนั้นหากสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE ก็อาจจะลดความดันโลหิตได้ [7] มีรายงานว่าเพปไทด์จากผลิตภัณฑ์หมักดอง เช่น หอยนางรม [8] และน้ำปลา [9] มีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ ACE

อนุมูลอิสระเป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ มากมาย เช่น มะเร็ง [10] หัวใจ [11] และโรคอัลไซเมอร์ [12] เป็นต้น อนุมูลอิสระเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในร่างกายและมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอกในร่างกาย เช่น การติดเชื้อ รังสี สารเคมี ยา คิวบิเลีย เขม่าจากเครื่องยนต์ คิวบิเลีย อาหารย่าง และอาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นต้น ปกติร่างกายของคนเรามีสารต้านอนุมูลอิสระทำหน้าที่ป้องกันเซลล์ เนื้อเยื่อ และอวัยวะจากการทำลายโดยอนุมูลอิสระ [13] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อร่างกายได้รับอนุมูลอิสระมากเกินไปหรือระบบต้านอนุมูลอิสระภายในร่างกายเสื่อมลง ทำให้อนุมูลอิสระเป็นปัญหาต่อสุขภาพได้ มีรายงานว่าเพปไทด์ที่ได้จากหอยแมลงภู่มักดอง [14] น้ำปลา [15] กะปิ [16] Fish Past [17] และปลาจ๋า [18] - [19] มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของเพปไทด์ที่กล่าวมาข้างต้น ได้แก่ ระดับการย่อยสลายโปรตีน ปริมาณเพปไทด์ ชนิดและลำดับของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในสายเพปไทด์ ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการหมักชนิดวัตถุดิบ และระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก

เพปไทด์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพอาจถูกย่อยในระหว่างที่ผ่านไปในระบบการย่อยในทางเดินอาหาร (Gastrointestinal (GI) Tract) ก่อนที่จะถูกดูดซึมในเยื่อบุผิวลำไส้ [20] เนื่องจากเอนไซม์ที่ทำหน้าที่

ย่อยอาหาร และสภาวะความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะอาหารอาจมีผลต่อโครงสร้างและหน้าที่ของเพปไทด์ [21] มีรายงานว่าเพปไทด์จากนมถั่วเหลืองหมักที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบการย่อยในทางเดินอาหาร ได้แก่ เอนไซม์เพปซิน ทริปซิน และแพนครีเอติน มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 - 35 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ผ่านการย่อย [22] ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี (pH ความชื้น และปริมาณแอลฟา-อะมิโน) คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างปลาส้มที่หมักจากปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ และคุณสมบัติในการยับยั้งเอนไซม์ ACE ในระหว่างกระบวนการหมัก และศึกษาปริมาณแอลฟา-อะมิโนและคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของปลาส้มหลังผ่านการจำลองในระบบการย่อยในทางเดินอาหารด้วย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี (pH ความชื้น และปริมาณแอลฟา-อะมิโน) และคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของปลาส้มที่หมักจากปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสารสกัดปลาส้มที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์ ACE
3. เพื่อศึกษาผลการย่อยต่อปริมาณแอลฟา-อะมิโนและคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของปลาส้มด้วยระบบทางเดินอาหารแบบจำลอง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ และอุปกรณ์

ปลาน้ำจืดวงศ์ปลาตะเพียน (ปลาสร้อยนกเขา ปลาสร้อยเกล็ดถี่ ปลาสร้อยขาว และปลาสร้อยลูกกล้วย) จากตลาดซีพี อำเภอไชยชัย จังหวัดนครราชสีมา สาร 2,4,6-Trinitrobenzenesulfonic acid (TNBS) สาร Trolox จากบริษัท Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, ประเทศสหรัฐอเมริกา สาร 2, 2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) และ 2, 4, 6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ) จากบริษัท Biochemika, Buchs, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

2. กระบวนการหมักปลาส้ม

ทำการหมักปลาส้มโดยใช้ปลา 4 ชนิด ได้แก่ ปลาสร้อยนกเขา (*Osteochilus hasseltii*) ปลาสร้อยเกล็ดถี่ (*Thynnichthys thynnoides*) ปลาสร้อยขาว (*Henicorhynchus siamensis*) และปลาสร้อยลูกกล้วย (*Labiobarbus siamensis*) โดยนำปลามาซอดเกล็ด คัดไส้ ล้างด้วยน้ำให้สะอาด ประมาณ 4 ครั้ง จากนั้นนำปลาใส่ตะกร้าทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำและนำปลาไปแช่ในน้ำเกลืออัตราส่วนปลาต่อเกลือต่อน้ำเปล่าเท่ากับ 4 : 1 : 4 ส่วน ประมาณ 2 - 3 ชั่วโมง จนกระทั่งเนื้อปลาแข็ง จากนั้นนำปลามาคลุกเคล้ากับข้าวเหนียวสุกและกระเทียมในอัตราส่วนปลาต่อข้าวสุกต่อกระเทียม 10 : 1 : 1 และบรรจุใส่ถุงพลาสติก ปิดถุงให้สนิท หมักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0 3 และ 4 วัน การเตรียมตัวอย่างปลาส้มในถุงพลาสติกทำสภาวะละ 2 ซ้ำ และเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความชื้น ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-อะมิโน และคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระนั้นนำตัวอย่างปลาส้มในถุงพลาสติกแต่ละซ้าทำการวิเคราะห์อีก 2 ซ้ำ

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ซั่งตัวอย่างปลาส้มที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 0 3 และ 4 วัน ปริมาณ 3 กรัม และเติมน้ำกลั่น

ปราศจากไอออน 17 มิลลิลิตร นำไปปั่นผสมด้วยเครื่องโฮโมจิไนส์ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm นาน 1 นาที และนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH meter ตามวิธีดัดแปลงจาก AOAC [23]

4. ความชื้น

เก็บตัวอย่างปลาสดที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 0 3 และ 4 วัน มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธี AOAC [23]

5. แอลฟา-อะมิโนและคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ

ซึ่งตัวอย่างปลาสดที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 0 3 และ 4 วัน ปริมาณ 3 กรัม และเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 17 มิลลิลิตร นำไปปั่นผสมด้วยเครื่องโฮโมจิไนส์ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm นาน 1 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที นำตัวอย่างส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณ α -Amino Acid โดยใช้วิธี Trinitrobenzene Sulfonic acid (TNBS) [24] นำตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} และคุณสมบัติในรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกตามวิธีของ Wiriayaphan, C., Chitsomboon, B., and Yongsawadigul, J. [25] คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระแสดงในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตัวอย่าง (mg Trolox eq./g dry basis)

6. คุณสมบัติในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE

เลือกปลาสดที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสูงมาวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ ACE ตามวิธีของ Cushman, D. W. and Cheung, H. S. [26] โดยการเติมสารละลายส่วนใสของปลาสดปริมาตร 50 ไมโครลิตร จากนั้นเติมเอนไซม์ ACE ความเข้มข้น 25 mU ปริมาตร 50 ไมโครลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารตั้งต้นปริมาตร 150 ไมโครลิตร (ส่วนประกอบของสารตั้งต้น คือ Hippuryl-L-histidyl-L-leucine (HHL) ความเข้มข้น 8.3 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายบอเรนัทเฟออร์ 50 มิลลิโมลาร์ ที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 500 มิลลิโมลาร์ ที่ pH 8.3) และนำไปบ่มต่อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 250 ไมโครลิตร จากนั้นสกัดกรด Hippuric โดยเติมสารละลายเอทิลอะซิเตต (Ethyl Acetate) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลาย เขย่าให้เข้ากัน นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 800 ×g เป็นเวลา 15 นาที เก็บสารละลายชั้นบนซึ่งมีกรด Hippuric ละลายอยู่ในหลอดทดลองและนำไปประเหยโดยใช้กระบอกทราย ควบคุมความร้อนของทรายที่ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร เพื่อละลายกรด Hippuric และกรองผ่านแผ่นกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ปริมาณกรด Hippuric ด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้ Photodiode Array Detector (DAD (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) ฉีดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร เข้าคอลัมน์ Zorbax Eclipse XDB-C₁₈ Column (4.6×150 mm, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) จากนั้นใช้สารละลาย Mobile phase (A) ซึ่งประกอบไปด้วย 0.05 % TFA ในน้ำ และ (B) 0.05 % TFA ในอะซิโตไนโตรลด้วยอัตรา 0.5 มิลลิลิตร/นาที ช่วงของการแยกทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของ Mobile phase (B) ที่ 20 - 60 % ที่ช่วงเวลา 13 นาทีแรก จากนั้นคงความเข้มข้นของ Mobile phase (B) ที่ 60 % เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเปลี่ยนความเข้มข้นของ Mobile phase (B) เป็น 20 % เป็นเวลา 2 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 228 นาโนเมตร และคำนวณความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ ACE แสดงในหน่วยเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง (% Inhibition)

7. การจำลองการย่อยปลาสมัในระบบทางเดินอาหาร (*In Vitro Simulated Gastrointestinal (GI) Digestion of Plaa-som*)

เลือกตัวอย่างปลาสมัที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงมาศึกษาการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร ตามวิธีดัดแปลงของ Wiriyaphan, C., Xiao, H., Decker, E.A., and Yongsawatdigul, J. [27] โดยชั่งตัวอย่างปลาสมั 3 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออนปริมาณ 17 มิลลิลิตร นำไปปั่นผสมด้วยเครื่องโฮโมจีไนส์ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm นาน 1 นาที ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 นอร์มอล จากนั้นเติมเอนไซม์เพปซินในอัตราส่วนเอนไซม์ต่อปลาสมั 1 : 100 เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 1 มิลลิลิตร สำหรับวิเคราะห์เพปไทด์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระประจวบ (ABTS^{•+}) จากนั้นย่อยตัวอย่างเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แบ่งเก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์เพปไทด์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระประจวบ ABTS^{•+} สำหรับตัวอย่างที่เหลือปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.4 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 นอร์มอล จากนั้นเติมเอนไซม์แพนครีเอตินในอัตราส่วนเอนไซม์ต่อตัวอย่าง 2 : 100 ย่อยตัวอย่างเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยที่ระยะเวลาเริ่มต้น ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์เพปซิน และเอนไซม์แพนครีเอตินไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ และปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณเพปไทด์และคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของ ABTS^{•+} ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 5

8. สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่น 95 % โดยใช้โปรแกรม PASW Statistics 18 Release 18.0.0 Software

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ปลาสมัที่หมักตอนเริ่มต้น (0 วัน) มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.34 \pm 0.01 - 6.52 \pm 0.02 เมื่อระยะเวลาการหมักปลาสมัเพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 4 วัน ส่งผลให้ค่า pH ลดลงอยู่ในช่วง 4.35 \pm 0.08 - 4.81 \pm 0.04 โดยปลาสมัที่หมักจากปลาสร้อยขาวมีค่า pH ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.35 \pm 0.08 ในวันที่ 4 ของการหมัก (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างปลาสดที่หมักจากปลาน้ำจืดสกุลปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)			
	ปลาสร้อยเกล็ดถี่	ปลาสร้อยลูกกล้วย	ปลาสร้อยนกเขา	ปลาสร้อยขาว
0	6.47±0.07	6.52±0.02	6.37±0.14	6.34±0.01
3	5.12±0.06	4.83±0.04	4.91±0.05	4.86±0.11
4	4.81±0.04	4.49±0.10	4.57±0.04	4.35±0.08

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 2)

การที่ pH ลดลงเนื่องจากกิจกรรมการหมักจากจุลินทรีย์กลุ่มแลคติก (Lactic Acid Bacteria) ที่มีสมบัติเฉพาะตัวในการเปลี่ยนรูปกลูโคสที่ได้มาจากการย่อยของส่วนผสมที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรดแลคติก กรดอะซิติก หรือกรดซิติริก [3] ค่า pH ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ที่ระยะเวลาการหมัก 4 วัน สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [28] โดยระบุว่าผลิตภัณฑ์ปลาสดจะต้องมีค่า pH ไม่เกิน 4.6 เมื่อกำหนดวันที่เริ่มบริโภค ยกเว้นปลาสดจากปลาสร้อยเกล็ดถี่ที่ค่า pH สูงกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเล็กน้อย (4.81±0.04) ในวันที่ 4 ของการหมัก กรดเหล่านี้มีผลต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียและจุลินทรีย์ก่อโรค และทำให้ปลาสดมีรสเปรี้ยว Chaikham, P. and Kaewjinda, R. [3] รายงานว่าปลาสดที่หมักจากปลาตะเพียนที่ระยะเวลาการหมัก 3 วัน มีค่า pH อยู่ในช่วง 4.03 - 4.49 ในขณะที่ Onsa-ard, E., Promchote, P. T., and Mawean, M. [29] รายงานว่าปลาสดที่หมักจากปลาตะเพียนและปลาสวายมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.79 - 6.32 การที่ค่า pH ของปลาสดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการหมัก ได้แก่ ชนิด และขนาดของปลา ปริมาณจุลินทรีย์ที่ติดมากับตัวปลา เกลือ ข้าวเหนียว และระยะเวลาในการหมัก

2. ความชื้น

ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ปลาหมัก ถ้าความชื้นสูงส่งผลให้อายุการเก็บรักษาลดลง จากผลการทดลองหาความชื้นในตัวตัวอย่างปลาสดที่หมักจากปลาน้ำจืดสกุลปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน พบว่า ปลาสดที่ระยะเวลาการหมักเริ่มต้น (0 วัน) มีค่าความชื้นในช่วงร้อยละ 68.69±1.51 - 73.17±1.89 เมื่อหมักปลาสดนาน 3 วัน ค่าความชื้นในปลาสดที่ทำจากปลาสร้อยทุกชนิดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ยกเว้นตัวอย่างปลาสร้อยลูกกล้วยที่มีค่าความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 69.95±1.34 หลังจากหมักนาน 4 วัน ปลาสดที่หมักจากปลาสร้อยทุกชนิดมีค่าความชื้นลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 66.70±1.02 - 70.85±0.32 โดยปลาสดที่หมักจากปลาสร้อยนกเขามีค่าความชื้นลดลงมากที่สุด (ตารางที่ 2) การที่ความชื้นในปลาสดลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกลือไปดึงน้ำออกจากตัวปลา นอกจากนี้ยังเป็นผลจากค่า pH ลดลงใกล้เคียงกับจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric Point) ของโปรตีนปลา ส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของปลาสดลดลง [30] - [31] ซึ่งค่าความชื้นของปลาสดจากงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับปลาสดฟัก Molly, K., Demeyer, D., Johansson, G., Raemeakers, M., Ghistelinck, M., and Geenen, I. [32] รายงานว่าปริมาณความชื้นในปลาสดฟัก

ทางการค้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 69.66 - 77.08 ในขณะที่ Jittrepotch, N., Rojsuntornkitti, K., and Kongbangkerd, T. รายงานว่าปลาส้มที่หมักเป็นเวลา 168 ชั่วโมง มีค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 60.76±0.20 - 60.80±0.20 [31]

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างปลาส้มที่หมักจากปลาน้ำจืดสกุลปลาสร้อยชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	ความชื้น (%wet basis)			
	ปลาสร้อยเกล็ดถี่	ปลาสร้อยลูกกล้วย	ปลาสร้อยนกเขา	ปลาสร้อยขาว
0	73.17±1.89	74.86±1.22	68.69±1.51	70.44±1.86
3	72.73±0.10	69.95±1.34	70.23±0.39	70.29±1.77
4	70.85±0.32	69.17±0.52	66.70±1.02	67.88±1.69

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 2)

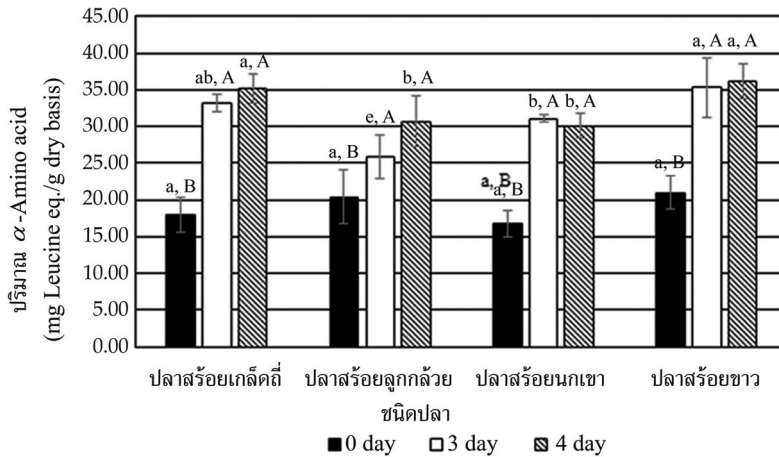
3. แอลฟา-อะมิโน (α -Amino acid) และคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่ละลายในน้ำของตัวอย่างปลาส้ม โดยวิธี TNBS พบว่า ปริมาณแอลฟา-อะมิโนของตัวอย่างปลาส้มที่หมักจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิด ที่ระยะเวลาการหมักวันที่ 3 และ 4 สูงกว่าวันเริ่มต้น (วันที่ 0) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$, รูปที่ 1) แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณแอลฟา-อะมิโนไม่แตกต่างกันระหว่างวันที่ 3 และ 4 ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 25.84 - 35.29 และ 30.12 - 36.11 มิลลิกรัมสมมูลของลิซีนต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การที่ปริมาณแอลฟา-อะมิโนเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณเพปไทด์และกรดอะมิโน ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายของโปรตีนจากเอนไซม์โปรติเนสในตัวปลา และจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบในเนื้อปลา [19]

นอกจากนี้ การที่ปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่ระยะเวลาการหมักที่ 3 และ 4 วัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าปริมาณเพปไทด์ในตัวปลาที่หมักเป็นเวลา 3 และ 4 วัน มีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากกรดอะมิโนเปลี่ยนเป็นเอมีน กรดที่ระเหยได้ และสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ หรือการย่อยสลายของเอนไซม์ [17]

เมื่อพิจารณาชนิดของปลาน้ำจืดที่ใช้หมักพบว่า ที่วันแรกของการหมัก ค่าแอลฟา-อะมิโนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$, รูปที่ 1) เมื่อหมักปลาส้มนาน 3 และ 4 วัน พบว่า ปลาส้มที่หมักจากปลาสร้อยขาว และปลาสร้อยเกล็ดถี่มีค่าแอลฟา-อะมิโนสูงสุด ($p \leq 0.05$, รูปที่ 1) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.29±4.08 33.23±1.16 และ 36.11±2.35 35.12±2.03 มิลลิกรัมสมมูลของลิซีนต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ รองลงมาคือปลาสร้อยนกเขา และปลาสร้อยลูกกล้วย การที่ปริมาณแอลฟา-อะมิโนแตกต่างกันอาจเนื่องมาจากชนิดปลาที่แตกต่างกัน และปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในตัวปลา และโปรตีนสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ที่ติดมากับตัวปลามีปริมาณแตกต่างกัน [32] Riebroy, S., Benjakul, S., Visessanguan, W., Kijrongrojana, K., and Tanaka, M. รายงานว่าในช่วงเริ่มต้นการย่อยกล้ามเนื้อปลาเป็นผลมาจากเอนไซม์คาเทปซินที่อยู่ในตัวปลา และตามด้วยกิจกรรมของเอนไซม์เพปติเดสที่สร้างจาก

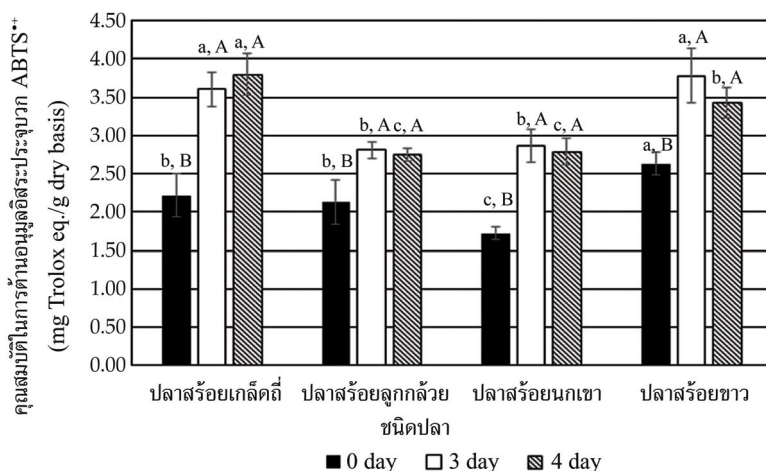
จุลินทรีย์จะย่อยชิ้นส่วนของโปรตีนเป็นเปปไทด์สายสั้นและกรดอะมิโน การย่อยสลายโปรตีนมากส่งผลในการพัฒนากลิ่นรสและกลิ่นในผลิตภัณฑ์ปลาหมัก การย่อยสลายโปรตีนในปลาหมักขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สูตรที่ใช้ในการหมัก จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในตัวปลา และสภาวะในการหมัก [33]



รูปที่ 1 ปริมาณ α -Amino acid ในตัวอย่างปลาหมักจากปลาน้ำจืดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

หมายเหตุ * ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างปลาแต่ละชนิดที่ระยะเวลาการหมักเดียวกัน
 ** ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างระยะเวลาการหมักต่างกัน ของปลาชนิดเดียวกัน; ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 4 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 4$)

คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ เป็นการวัดสมบัติต้านอนุมูลอิสระทางอ้อม โดยการออกซิไดซ์สาร $ABTS$ ด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตให้กลายเป็นอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ ที่มีสีฟ้าเขียว และสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร หากเปปไทด์มีคุณสมบัติในการให้อิเล็กตรอน/โปรตอน กับอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ ค่าดูดกลืนแสงจะลดลง [19] จากผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ ของตัวอย่างปลาหมักที่ทำจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิด ที่ระยะเวลาการหมักวันที่ 3 และ 4 สูงกว่าวันเริ่มต้น (วันที่ 0) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$, รูปที่ 2) แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ ไม่แตกต่างกันระหว่างวันที่ 3 และ 4 ($p > 0.05$, รูปที่ 2) ซึ่งคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 1) เมื่อปริมาณแอลฟา-อะมิโนเพิ่มขึ้นบ่งชี้ได้ว่าการย่อยสลายโปรตีนในตัวปลาเพิ่มขึ้นได้เปปไทด์หรือกรดอะมิโนเพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ $ABTS^{•+}$ เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2 คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบจาก ABTS^{•+} ของตัวอย่างปลาส้มจากปลาน้ำจืดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

หมายเหตุ * ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างปลาแต่ละชนิดที่ระยะเวลาการหมักเดียวกัน
 ** ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างระยะเวลาการหมักต่างกันของปลาชนิดเดียวกัน; ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 4 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 4$)

เมื่อพิจารณาชนิดของปลาน้ำจืดที่ใช้หมักพบว่า ที่ระยะเวลาการหมักปลาส้มที่ 3 และ 4 วัน ปลาส้มที่หมักจากปลาสวายขาว และปลาสวายเกล็ดดีมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบจาก ABTS^{•+} สูงที่สุด ($p < 0.05$, รูปที่ 2) มีค่าเท่ากับ 3.78 ± 0.36 3.60 ± 0.22 และ 3.44 ± 0.20 3.80 ± 0.27 มิลลิกรัม สมมูลของโทโลกร์ต่อกรัมน้ำหนักแห้งตัวอย่าง ตามลำดับ

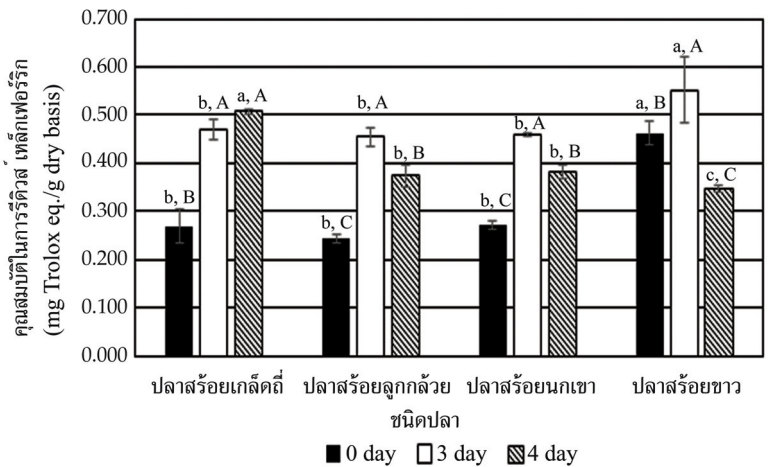
งานวิจัยนี้บ่งชี้ได้ว่าคุณสมบัติด้านอนุมูลอิสระประจวบจาก ABTS^{•+} ของตัวอย่างปลาส้ม ขึ้นกับปริมาณโปรตีนที่ถูกย่อยสลายในปลาแต่ละชนิดและระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก ซึ่งการที่คุณสมบัติด้านอนุมูลอิสระประจวบจาก ABTS^{•+} แตกต่างกันอย่างนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมาจากตัวปลา และเอนไซม์ที่มีอยู่ภายในตัวปลามีความแตกต่างกันทำให้อัตราการย่อยสลายโปรตีนของปลาแต่ละชนิดแตกต่างกันส่งผลให้ได้ขนาดเพปไทด์ และจำนวนกรดอะมิโนและชนิดกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในสายเพปไทด์แตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติด้านอนุมูลอิสระประจวบจาก ABTS^{•+} แตกต่างกันด้วย

เพปไทด์ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 2 - 20 ตัว จะแสดงฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ฤทธิ์ด้านการอักเสบ ด้านอนุมูลอิสระ ลดความดันเลือด ด้านจุลินทรีย์ และต้านมะเร็ง เป็นต้น [34] - [35] ซึ่งฤทธิ์ทางชีวภาพของเพปไทด์ขึ้นอยู่กับลำดับของกรดอะมิโน ชนิดกรดอะมิโนและความยาวของสายเพปไทด์ [36]

คุณสมบัติในการรีดิวซ์เหล็กเฟอร์ริกเป็นการวัดความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของเพปไทด์/กรดอะมิโนกับเหล็กเฟอร์ริก [19] จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติในการรีดิวซ์เหล็กเฟอร์ริกของตัวอย่างปลาส้มที่ทำจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิด ที่ระยะเวลาการหมักวันที่ 3 และ 4 สูงกว่าวันเริ่มต้น (วันที่ 0) อย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$, รูปที่ 3) ยกเว้นปลาสร้อยขาวที่หมักเป็นระยะเวลา 4 วัน เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการหมักปลาส้มระหว่างวันที่ 3 และ 4 พบว่า คุณสมบัติในการรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกลดลงโดยปกติแล้วคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับการย่อยสลายโปรตีน กล่าวคือถ้าระดับการย่อยสลายของโปรตีนสูงบ่งชี้ถึงพันธะเพปไทด์ในสายโปรตีนถูกตัดจำนวนมาก ทำให้ได้เปปไทด์และกรดอะมิโนจำนวนมากส่งผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น [37] แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 1 ปริมาณแอลฟา-อะมิโนของปลาส้มทั้ง 4 ชนิด ที่หมักไว้เป็นระยะเวลา 3 และ 4 วัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยทั่วไปแล้วเปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนที่มีโครงสร้างวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ เช่น ไทโรซีน (Tyr) ฮิสทีดีน (His) ทรีปโตแฟน (Trp) และฟีนิลอะลานีน (Phe) จะมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนและ/หรือโปรตอนกับอนุมูลอิสระได้ง่าย [38] - [39] กรดอะมิโนซิสเตอีน (Cys) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ "ซัลไฮดริล" มีความสามารถในการให้โปรตอนกับอนุมูลอิสระได้ง่ายเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าลำดับของกรดอะมิโนที่อยู่ภายในสายเพปไทด์มีผลต่อคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ หากกรดอะมิโนฟีนิลอะลานีนหรือฮิสทีดีนอยู่ในตำแหน่งปลายสายด้าน N-terminus เพปไทด์จะมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระสูง [40] - [41] หรือหากกรดอะมิโนทรีปโตแฟนหรือไทโรซีนอยู่ที่ปลายสายของเพปไทด์ด้าน N-terminus หรือ C-terminus เพปไทด์ก็จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงเช่นเดียวกัน [42] นอกจากนี้พันธะเพปไทด์หรือโครงสร้างของเพปไทด์มีผลในการเสริมฤทธิ์และลดฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อเปรียบเทียบกับกรดอะมิโนอิสระ [43] ดังนั้นจากผลการทดลองนี้การที่คุณสมบัติในการรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกของตัวอย่างปลาส้มจากปลาสร้อยลูกกล้วย ปลาสร้อยขาว และปลาสร้อยนกเขาที่หมักไว้เป็นระยะเวลา 4 วัน มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 3 อาจเนื่องมาจากตัวอย่างปลาส้มดังกล่าวประกอบด้วยเพปไทด์ที่มีชนิดและลำดับกรดอะมิโนแตกต่างกัน งานวิจัยนี้บ่งชี้ได้ว่าคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณเพปไทด์แล้วยังขึ้นกับชนิดและลำดับกรดอะมิโนในสายเพปไทด์ด้วย

เมื่อพิจารณาชนิดของปลาน้ำจืดที่ใช้หมักพบว่า ที่ระยะเวลาการหมักปลาส้มที่ 3 วัน ปลาส้มที่หมักจากปลาสร้อยขาวมีคุณสมบัติในการรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกสูงที่สุด ($p \leq 0.05$, รูปที่ 3) มีค่าเท่ากับ 0.551 ± 0.069 มิลลิกรัมสมมูลของโทลอกรีตต่อกรัมน้ำหนักแห้งตัวอย่าง ในขณะที่วันหมักที่ 4 วัน ปลาส้มที่หมักจากปลาสร้อยเกล็ดก็มีคุณสมบัติในการรีดิวส์เหล็กเฟอร์ริกสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.507 ± 0.006 มิลลิกรัมสมมูลของโทลอกรีตต่อกรัมน้ำหนักแห้งตัวอย่าง



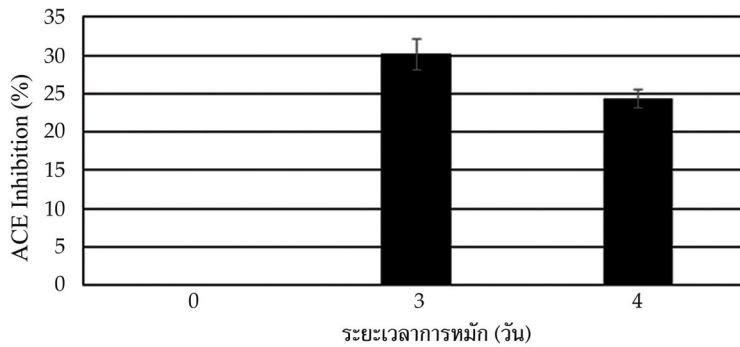
รูปที่ 3 ความสามารถในการรีดิวซ์เทรลิกเพอร็อกไซด์ของตัวอย่างปลาสลิมจากปลาน้ำจืดชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

หมายเหตุ * ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างปลาแต่ละชนิดที่ระยะเวลาการหมักเดียวกัน;
 ** ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกัน หมายถึง ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างระยะเวลาการหมักต่างกัน ของปลาชนิดเดียวกัน; ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 4 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 4$)

4. คุณสมบัติในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE

จากการทดลองวิเคราะห์สมบัติการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE ในตัวอย่างปลาสลิมจากปลาสร้อยขาวที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน พบว่า ที่วันเริ่มต้นของการหมัก (0 วัน) ไม่มีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE เนื่องจากที่วันแรกของการหมักโปรตีนยังไม่ถูกย่อยสลายทำให้มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ส่งผลให้ไม่สามารถจับกับบริเวณเร่งของเอนไซม์ ACE ได้ (รูปที่ 4)

ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับ Jemil, I., Mora, L., Nasri, R., Abdelhedi, O., Aristoy, M. C., Hajji, M., Nasri, M., and Toldrá, F. [44] ซึ่งรายงานว่าการโปรตีนจากปลาซาร์ดีนที่ไม่ได้ผ่านการย่อยไม่มีคุณสมบัติยับยั้งเอนไซม์ ACE เมื่อหมักปลาสลิมนาน 3 และ 4 วัน การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ 0 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 30.13 ± 1.97 และ 24.36 ± 1.19 ตามลำดับ ผลการทดลองนี้บ่งชี้ได้ว่า เเปปไทด์ที่มีคุณสมบัติยับยั้งเอนไซม์ ACE ซึ่งอยู่ภายในสายโปรตีนถูกปลดปล่อยออกมาโดยเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีนในตัวปลาและจากจุลินทรีย์ในระหว่างการหมัก ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Jemil, I., Mora, L., Nasri, R., Abdelhedi, O., Aristoy, M. C., Hajji, M., Nasri, M., and Toldrá, F. [44] ซึ่งรายงานว่าการโปรตีนไฮโดรไลเสทที่ได้จากการหมักปลาซาร์ดีนด้วยเชื้อ *B. subtilis* A26 (CTM50700) และ *B. amyloliquefaciens* An6 เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 0.2 mg/ml มีคุณสมบัติยับยั้งเอนไซม์ ACE ร้อยละ 45 - 50 Nasri, R., Jridi, M., Lassoued, I., Jemil, I., and Ben Slama-Ben Salem, R. รายงานว่าการโปรตีนไฮโดรไลเสทที่มีระดับการย่อยสลายของสูงมีสมบัติยับยั้งเอนไซม์ ACE สูงด้วย [45]



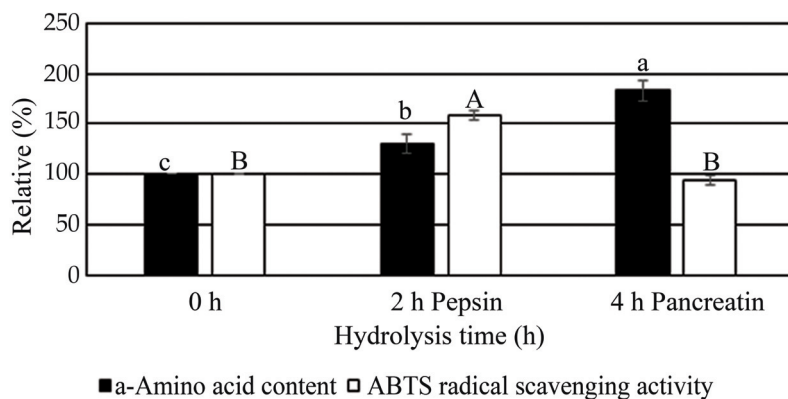
รูปที่ 4 ความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ ACE ของตัวอย่างปลาสดจากปลาสร้อยขาวที่ระยะเวลาการหมัก 0 3 และ 4 วัน

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 2)

5. การจำลองการย่อยปลาสดในระบบทางเดินอาหาร (*In Vitro* Simulated Gastrointestinal (GI) Digestion of *Plaa-som*)

ปลาสดที่หมักจากปลาสร้อยขาวเป็นเวลา 3 วัน มีปริมาณแอลฟา-อะมิโน คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} และคุณสมบัติในการรีดิวซ์เหล็กเพอริริกสูง ดังนั้น จึงเลือกปลาสดที่หมักจากปลาสร้อยขาวเป็นเวลา 3 วัน มาทดสอบการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-อะมิโนและคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} พบว่า ปริมาณแอลฟา-อะมิโนเพิ่มขึ้นเมื่อย่อยปลาสดด้วยเอนไซม์เพปซินและแพนครีเอตินร้อยละ 30 และ 83 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างปลาสดที่ไม่ผ่านการย่อย (0 ชั่วโมง) ($p \leq 0.05$, รูปที่ 5) การที่ปริมาณแอลฟา-อะมิโนเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายโปรตีนได้เพปไทด์ และกรดอะมิโนเพิ่มขึ้น

คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อย่อยปลาสดด้วยเอนไซม์เพปซิน (ร้อยละ 58) และลดลงเมื่อผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แพนครีเอติน (ร้อยละ 5) แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปลาสดที่ไม่ได้ผ่านการย่อย (0 ชั่วโมง, $p > 0.05$) การที่คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} ของปลาสดที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แพนครีเอตินมีค่าลดลงอาจเนื่องมาจากเอนไซม์แพนครีเอตินย่อยสลายเพปไทด์ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกร ABTS^{•+} ส่งผลให้ลำดับกรดอะมิโนในสายเพปไทด์เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 5 ปริมาณ α -Amino acid และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} ของปลาซั่มที่หมักจากปลาสร้อยขาวนาน 3 วัน หลังจากผ่านการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร

หมายเหตุ * อักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันระหว่างบาร์แสดงถึงความแตกต่างกันของปริมาณ α -Amino Acid อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 ** อักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันระหว่างบาร์แสดงถึงความแตกต่างกันของปริมาณฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$); ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 4 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 4$)

สรุป

ค่า pH และความชื้นของตัวอย่างปลาซั่มที่หมักจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิด เป็นเวลา 3 และ 4 วัน มีค่าอยู่ในช่วง $4.35 \pm 0.08 - 5.12 \pm 0.06$ และร้อยละ $66.70 \pm 1.02 - 72.73 \pm 0.01$ ตามลำดับ ปลาซั่มที่หมักจากปลาสร้อยขาวเป็นเวลา 3 วัน มีปริมาณแอลฟา-อะมิโน คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} และคุณสมบัติในการรีดิวซ์เหล็กเฟอร์ริกสูง รวมทั้งมีฤทธิ์ในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE นอกจากนี้คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระประจวบกับ ABTS^{•+} ของตัวอย่างปลาซั่มหลังผ่านย่อยในระบบทางเดินอาหารด้วยเอนไซม์เพปซินตามด้วยเอนไซม์แพนครีเอตินมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปลาซั่มที่ไม่ได้ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ ดังนั้น ควรบริโภคปลาซั่มที่ทำจากปลาสร้อยขาวที่ระยะเวลาในการหมัก 3 วัน เพื่อให้ได้เปปไทด์ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสูง และคุณสมบัติในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE ทั้งนี้งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและสมบัติในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACE ของตัวอย่างปลาซั่มที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้อำนาจอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่สนับสนุนสถานที่ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

References

- [1] Pongrut, S. (2017). **Strategic Management of Plaa Som Products in Yala**. An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Business Administration. Faculty of Management Science, School Yala Rajabhat University
- [2] Saithong, P., Panthavee, W., Boonyaratanakorkit, M., and Sikkhamondhol, C. (2010). Use of a Starter Culture of Lactic Acid Bacteria in *Plaa-Som*, a Thai Fermented Fish. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. Vol. 110, Issue 5, pp. 553-557. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2010.06.004
- [3] Chaikham, P. and Kaewjinda, R. (2017). Quality Changes of *Plaa-Som* during Fermentation Along with Difference Levels of Probiotic *Lactobacillus casei* 01. **VRU Research and Development Journal Science and Technology**. Vol. 12, No. 3, pp. 37-53 (in Thai)
- [4] WHO (2018). **Noncommunicable Diseases**. Access (11 June 2018). Available (<http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>)
- [5] Mentz, R. J., Bakris, G. L., Waeber, B., McMurray, J. J. V., Gheorghide, M., Ruilope, L. M., and Pitt, B. (2013). The Past, Present and Future of Renin-Angiotensin Aldosterone System Inhibition. **International Journal of Cardiology**. Vol. 167, Issue 5, pp. 1677-1687. DOI: 10.1016/j.ijcard.2012.10.007
- [6] Villadóniga, C. and Cantera, A. M. B. (2019). New ACE-Inhibitory Peptides Derived from α -Lactalbumin Produced by Hydrolysis with *Bromelia antiacantha* Peptidases. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. Vol. 20, DOI: 10.1016/j.bcab.2019.101258
- [7] FitzGerald, R. J., Murray, B. A., and Walsh, D. J. (2004). Hypotensive Peptides from Milk Proteins. **The Journal of Nutrition**. Vol. 134, Issue 4, pp. 980-988. DOI: 10.1093/jn/134.4.980S
- [8] Je, J. Y., Park, J. Y., Jung, W. K., Park, P. J., and Kim, S. K. (2005). Isolation of Angiotensin I Converting Enzyme (ACE) Inhibitor from Fermented Oyster Sauce, *Crassostrea gigas*. **Food Chemistry**. Vol. 90, Issue 4, pp. 809-814. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.05.028
- [9] Ichimura, T., Hu, J., Aita, D. Q., and Maruyama, S. (2003). Angiotensin I-Converting Enzyme Inhibitory Activity and Insulin Secretion Stimulative Activity of Fermented Fish Sauce. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. Vol. 96, Issue 5, pp. 496-499. DOI: 10.1016/S1389-1723(03)70138-8
- [10] Goodman, M., Bostick, R. M., Kucuk, O., and Jones, D. P. (2011). Clinical Trials of Antioxidants as Cancer Prevention Agents: Past, Present, and Future. **Free Radical Biology and Medicine**. Vol. 51, Issue 5, pp. 1068-1084. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2011.05.018
- [11] Sugamura, K. and Keaney, J. F. Jr. (2011). Reactive Oxygen Species in Cardiovascular Disease. **Free Radical Biology and Medicine**. Vol. 51, Issue 5, pp. 978-992. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2011.05.004

- [12] Butterfield, D. A. and Lauderback, C. M. (2002). Lipid Peroxidation and Protein Oxidation in Alzheimer's Disease Brain: Potential Causes and Consequences Involving Amyloid β -peptide-Associated Free Radical Oxidative Stress. **Free Radical Biology and Medicine**. Vol. 32, Issue 11, pp. 1050-1060. DOI: 10.1016/S0891-5849(02)00794-3
- [13] Samaranayaka, A. G. P. and Li-Chan, E. C. Y. (2011). Food-Derived Peptidic Antioxidants: A Review of Their Production, Assessment, and Potential Applications. **Journal of Functional Foods**. Vol. 3, Issue 4, pp. 229-254. DOI: 10.1016/j.jff.2011.05.006
- [14] Jung, W. K., Rajapakse, N., and Kim, S. K. (2005). Antioxidative Activity of a Low Molecular Weight Peptide Derived from the Sauce of Fermented Blue Mussel, *Mytilus edulis*. **European Food Research and Technology**. Vol. 220, pp. 535-539. DOI: 10.1007/s00217-004-1074-3
- [15] Harada, K., Okano, C., Kadoguchi, H., Okubo, Y., Ando, M., and Kitao, S. (2003). Peroxyl Radical Scavenging Capability of Fish Sauces Measured by the Chemiluminescence Method. **International Journal of Molecular Medicine**. Vol. 12, Issue 4, pp. 621-625. DOI: 10.3892/ijmm.12.4.621
- [16] Peralta, E. M., Hatate, H., Kawabe, D., Kuwahara, R., Wakamatsu, S., Yuki, T., and Murata, H. (2008). Improving Antioxidant Activity and Nutritional Components of Philippine Salt-Fermented Shrimp Paste through Prolonged Fermentation. **Food Chemistry**. Vol. 111, Issue 1, pp. 72-77. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.03.042
- [17] Anggo, A. D., Ma'ruf, W. F., Swastawati, F., and Rianingsih, L. (2015). Changes of Amino and Fatty Acids in Anchovy (*Stolephorus* sp). Fermented Fish Paste with Different Fermentation Periods. **Procedia Environmental Sciences**. Vol. 23, pp. 58-63. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.01.009
- [18] Sawatdichaikul, O., Madmanee, W., Tangkanakul, P., and Trakoontivakorn, G. (2014). *In vitro* Antioxidant Activity of Peptide Fragments from Fermented *Channa striata*. **The 4th International Biochemistry and Molecular Biology Conference**. April 2-3, Bangkok, Thailand
- [19] Promchote, P. T. (2017). Chemical Compositions and Antioxidant Properties of *Pla-ra* Thai Indigenous Fermented Fish Product. **Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University**. Vol. 19, No. 2, pp. 159-172 (in Thai)
- [20] Picariello, G., Ferranti, P., Fierro, O., Mamone, G., Caira, S., and Di Luccia, A. (2010). Peptides Surviving the Simulated Gastrointestinal Digestion of Milk Proteins: Biological and Toxicological Implications. **Journal of Chromatography B**. Vol. 878, Issue 3-4, pp. 295-308. DOI: 10.1016/j.jchromb.2009.11.033
- [21] Ao, J. and Li, B. (2013). Stability and Antioxidative Activities of Casein Peptide Fractions During Simulated Gastrointestinal Digestion *In Vitro*: Charge Properties of Peptides Affect Digestive Stability. **Food Research International**. Vol. 52, Issue 1, pp. 334-341. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.03.036
- [22] Singh, B. P. and Vij, S. (2018). *In vitro* Stability of Bioactive Peptides Derived from Fermented Soy Milk Against Heat Treatment, pH and Gastrointestinal Enzymes. **LWT**. Vol. 91, pp. 303-307. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.01.066

- [23] AOAC (2000). **Official Methods of Analysis (17th ed.)**. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Chemists
- [24] Adler-Nissen, J. (1979). Determination of the Degree of Hydrolysis of Food Protein Hydrolyzates by Trinitrobenzenesulfonic Acid. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 27, Issue 6, pp. 1256-1262. DOI: 10.1021/jf60226a042
- [25] Wiriayaphan, C., Chitsomboon, B., and Yongsawadigul, J. (2012). Antioxidant Activity of Protein Hydrolysates Derived from Threadfin Bream Surimi Byproducts. **Food Chemistry**. Vol. 132, Issue 1, pp. 104-111. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.10.040
- [26] Cushman, D. W. and Cheung, H. S. (1971). Spectrophotometric Assay and Properties of the Angiotensin-Converting Enzyme of Rabbit Lung. **Biochemical Pharmacology**. Vol. 20, Issue 7, pp. 1637-1648. DOI: 10.1016/0006-2952(71)90292-9
- [27] Wiriayaphan, C., Xiao, H., Decker, E.A., and Yongsawatdigul, J. (2015). Chemical and Cellular Antioxidative Properties of Threadfin Bream (*Nemipterus* spp.). Surimi Byproduct Hydrolysates Fractionated by Ultrafiltration. **Food Chemistry**. Vol. 167, pp. 7-15. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.06.077
- [28] Thai Community Product Standard (TCPS). (2014). **Standard for Fermented Fish, Pla-Som no. 26/2014**. Thai Industrial Standards Institute. Ministry of Industry, Bangkok
- [29] Onsa-ard, E., Promchote, P. T., and Mawuang, M. (2011). **A Study of Cultural Local Fermented Food Production in Ubon Ratchathani**. Final Report Project of Culture and Arts Preservation and Maintainace. p. 65 (in Thai)
- [30] Huff-Lonergan, E. and Lonergan, S. M. (2005). Mechanisms of Water-Holding Capacity of Meat: the Role of Postmortem Biochemical and Structural Changes. **Meat Science**. Vol. 71, Issue 1, pp. 194-204. DOI: 10.1016/j.meatsci.2005.04.022
- [31] Jittrepotch, N., Rojsuntornkitti, K., and Kongbangkerd, T. (2015). Physico-Chemical and Sensory Properties of *Plaa-som*, a Thai Fermented Fish Product Prepared by using Low Sodium Chloride Substitutes. **International Food Research Journal**. Vol. 22, Issue 2, pp. 721-730
- [32] Molly, K., Demeyer, D., Johansson, G., Raemeakers, M., Ghistelinck, M., and Geenen, I. (1997). The Importance of Meat Enzymes in Ripening and Flavour Generation in Dry Fermented Sausages. First Results of a European Project. **Food Chemistry**. Vol. 59, Issue 4, pp. 539-545. DOI: 10.1016/S0308-8146(97)00004-6
- [33] Riebroy, S., Benjakul, S., Visessanguan, W., Kijrongrojana, K., and Tanaka, M. (2004). Some Characteristics of Commercial Som-fug Produced in Thailand. **Food Chemistry**. Vol. 88, Issue 4, pp. 527-535. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.01.067
- [34] Shahidi, F. and Zhong, Y. (2008). Bioactive Peptides. **Journal of AOAC International**. Vol. 91, Issue 4, pp. 914-931. DOI: 10.1093/jaoac/91.4.914
- [35] Ryan, J. T., Ross, R. P., Bolton, D., Fitzgerald, G. F., and Stanton, C. (2011). Bioactive Peptides from Muscle Sources: Meat and Fish. **Nutrients**. Vol. 3, Issue 9, pp. 765-791. DOI: 10.3390/nu3090765

- [36] Meisel, H. and FitzGerald, R. J. (2003). Biofunctional Peptides from Milk Proteins: Mineral Binding and Cytomodulatory Effects. **Current Pharmaceutical Design**. Vol. 9, Issue 16, pp. 1289-1295. DOI: 10.2174/1381612033454847
- [37] Phanturat, P., Benjakul, S., Visessanguan, W., and Roytrakul, S. (2010). Use of Pyloric Caeca Extract from Bigeye Snapper (*Priacanthus macracanthus*) for the Production of Gelatin Hydrolysate with Antioxidative Activity. **LWT- Food Science and Technology**. Vol. 43, Issue 1, pp. 86-97. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.06.010
- [38] Qian, Z. L., Jung, W. K., and Kim, S. K. (2008). Free Radical Scavenging Activity of a Novel Antioxidative Peptide Purified from Hydrolysate of Bullfrog Skin, *Rana catesbeiana* Shaw. **Bioresource Technology**. Vol. 99, Issue 6, pp. 1690-1698. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.04.005
- [39] Rajapakse, N., Mendis, E., Jung, W. K., Je, J. Y., and Kim, S. K. (2005). Purification of a Radical Scavenging Peptide from Fermented Mussel Sauce and Its Antioxidant Properties. **Food Research International**. Vol. 38, Issue 2, pp. 175-182. DOI: 10.1016/j.foodres.2004.10.002
- [40] Mendis, E., Rajapakse, N., Byun, H. G., and Kim, S. K. (2005). Investigation of Jumbo Squid (*Dosidicus gigas*) Skin Gelatin Peptides for Their *In Vitro* Antioxidant Effects. **Life Sciences**. Vol. 77, Issue 17, pp. 2166-2178. DOI: 10.1016/j.lfs.2005.03.016
- [41] Mendis, E., Rajapakse, N., and Kim, S. K. (2005). Antioxidant Properties of a Radical-Scavenging Peptide Purified from Enzymatically Prepared Fish Skin Gelatin Hydrolysate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 53, Issue 3, pp. 581-587. DOI: 10.1021/jf048877v
- [42] Sadat, L., Cakir-Kiefer, C., N'Negue, M. A., Gaillard, J. L., Girardet, J. M., and Miclo, L. (2011). Isolation and Identification of Antioxidative Peptides from Bovine α -Lactalbumin. **International Dairy Journal**. Vol. 21, No. 4, pp. 214-221. DOI: 10.1016/j.idairyj.2010.11.011
- [43] Hernández-Ledesma, B., Davalos, A., Bartolome, B., and Amigo, L. (2005). Preparation of Antioxidant Enzymatic hydrolysates from α -Lactalbumin and β -Lactoglobulin. Identification of Active Peptides by HPLC-MS/MS. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 53, Issue 3, pp. 588-593. DOI: 10.1021/jf048626m
- [44] Jemil, I., Mora, L., Nasri, R., Abdelhedi, O., Aristoy, M. C., Hajji, M., Nasri, M., and Toldrá, F. (2016). A Peptidomic Approach for the Identification of Antioxidant and ACE-Inhibitory Peptides in Sardinelle Protein Hydrolysates Fermented by *Bacillus subtilis* A26 and *Bacillus amyloliquefaciens* An6. **Food Research International**. Vol. 89, Part 1, pp. 347-358. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.08.020
- [45] Nasri, R., Jridi, M., Lassoued, I., Jemil, I., and Ben Slama-Ben Salem, R. (2014). The Influence of the Extent of Enzymatic Hydrolysis on Antioxidative Properties and ACE-Inhibitory Activities of Protein Hydrolysates from Goby (*Zosterisessor ophiocephalus*) Muscle. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. Vol. 173, pp. 1121-1134. DOI: 10.1007/s12010-014-0905-3

การประยุกต์ใช้แป้งเมล็ดขนุนเพื่อทดแทนสารกันสีในการเขียนผ้าบาติก

Application of Jackfruit Seed Flour for Substitution of Color - Resist Substance in Batik Painting

โสภภาพรรณ ซอหะซัน¹ สาคร ชลสาคร^{1*} และรัตนพล มงคลรัตนาลิทธิ²

Sophaphan Sorhasan¹ Sakorn Chonsakorn^{1*} and Rattanaphol Mongkholrattanasit²

Received: June 5, 2019; Revised: December 11, 2019; Accepted: December 12, 2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์วิจัยเพื่อศึกษากระบวนการผลิตแป้งจากเมล็ดขนุน องค์ประกอบทางเคมี ความหนืด และสูตรที่เหมาะสมของสารกันสี วิธีการวิจัย คือ การเตรียมผงแป้งเมล็ดขนุน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ปัจจัยคือ อุณหภูมิการอบแป้งเมล็ดขนุน 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส คัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ความหนืด และการศึกษาสูตรสารกันสีที่มีส่วนผสมแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียวในสัดส่วนของน้ำหนัก 30 กรัม จำนวน 5 สูตร คือ 28:2 26:4 24:6 22:8 และ 20:10 และใช้น้ำ 32 กรัม น้ำมันพืช 2 กรัม น้ำเกลือ 23 กรัม และน้ำปูนใส 13 กรัม ในน้ำหนักที่เท่ากันทุกสูตร นำมาเขียนบนผ้าฝ้าย ระบายสีรีแอคทีฟ ผกสีด้วยโซเดียมซิลิเกต ล้างให้สะอาดและตากให้แห้ง จากนั้นทดสอบค่าดัชนีความขาว ค่าสี ความกระด้างของผ้า วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมในการกันสีผ้าบาติก ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุนที่เหมาะสมประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ ล้างให้สะอาด ปอกเปลือกหุ้มสีขาวครีมและน้ำตาลออกหั่นเป็นชิ้น 1-2 มิลลิเมตร อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส บดละเอียด และร่อนตะแกรง 80 เมช ได้แป้งลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวครีม กลิ่นหอมธรรมชาติ ผลขององค์ประกอบทางเคมี และความหนืดพบว่า แป้งที่อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความชื้น ความหนืด เหมาะสมเป็นสารทดแทนสารกันสี และผลของสูตรที่เหมาะสมในการกันสีพบว่า สูตรที่ 4 มีความสามารถในการกันสี เส้นคมชัดสม่ำเสมอ และง่ายต่อการทำความสะอาดผ้าบาติกโดยไม่ต้องใช้ความร้อน

คำสำคัญ : เมล็ดขนุน; สารกันสี; การประยุกต์ใช้; แป้งเมล็ดขนุน; บาติก

¹ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹ Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

² Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

* Corresponding Author E - mail Address: sakorn_c@rmutt.ac.th

Abstract

The objective of this research was studied the production process of flour from jackfruit seeds, the chemical composition and viscosity of the flour, and the optimum formula of this color-resist substance. The chemical composition and viscosity of the flour were studied by means of Completely Randomized Design (CRD). The factors included in the study were the baking temperature for the jackfruit seed flour at 3 levels (60, 80, and 100 degrees Celsius), and the mixture of jackfruit seed flour and sticky rice flour in proportion of 30-gram weight at 5 formulas (28:2, 26:4, 24:6, 22: 8 and 20:10 grams), and 32 water, 2 oil, 23 saline and 13 limewater grams in equal weight in all formulas, for making the color-resist substance. The color-resist substance obtained was then painted on cotton fabric, followed by reactive color and sealed with sodium silicate. The thoroughly washed and dried fabric was tested for the Whiteness Index and color values fabric stiffness, the variance (Analysis of Variance, ANOVA), and the differences in the mean by Duncan's New Multiple Range Test. It was found that the appropriate production process of jackfruit seed flour was in the following 6 steps: the seeds were thoroughly washed; the white cream and brown shells were peeled off; the seeds were cut into 1 - 2 millimeter pieces, left in hot air oven under the temperature of 80 degrees Celsius, then ground fine and sifted with a sieve of 80 mesh. The flour obtained was fine flour in white cream color with natural fragrance. From the chemical composition and viscosity test, it was found that the baked flour at 80 degrees Celsius had moisture, viscosity; and this was suitable as substitution of color-resist substance. Concerning the mixture proportion, it was found that formulas 4 resulted in the best color-resist substance with the ability of color barrier, consistent clear lines, and making it easy to clean batik without using heat.

Keywords: Jackfruit Seed; Color-Resist Substance; Application; Jackfruit Seed Flour; Batik

บทนำ

ขนุน (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) เป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญในเขตร้อนเพาะปลูกมากในประเทศไทยแถบเอเชีย ในประเทศไทยขนุนปลูกกระจายอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ โดยเฉพาะในเขตภาคตะวันออกเป็นแหล่งปลูกและแปรรูปผลิตภัณฑ์จากขนุน ได้แก่ จังหวัดชลบุรี ฉะเชิงเทรา ระยอง ปราจีนบุรี จันทบุรี และตราด [1] ขนุนเป็นผลไม้ที่ออกผลตลอดปีสามารถรับประทานได้ทุกฤดู โดยส่วนใหญ่นิยมบริโภคเนื้อหรือนำมาใส่ในของหวาน สามารถนำเนื้อขนุนมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ขนุนอบแห้ง ขนุนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง ขนุนเชื่อม ขนุนแผ่นทอด นอกจากนี้ใช้เป็นสีย้อมเครื่องเรือนเครื่องใช้และเป็นยา [2] ส่วนเมล็ดขนุนสามารถต้มรับประทานได้แต่นิยมเป็นส่วนน้อย เมล็ดขนุนถือได้ว่า

เป็นผลพลอยได้จากการแปรรูปและบริโภคขนุนคิดเป็นร้อยละ 10 - 15 ของน้ำหนักผลขนุน เมื่อคิดจากผลผลิตทั้งประเทศอาจมีเมล็ดขนุนเหลือทิ้ง (By Product) สูงถึง 19,600 - 19,931 ตันต่อปี [3] เมล็ดขนุนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอาหารได้ เช่น เมล็ดขนุนในน้ำเชื่อม ขนมเมล็ดขนุน และการนำเมล็ดขนุนมาทำเป็นแป้งเพื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เช่น ขนมคุกกี้ ขนมปัง และข้าวเกรียบ โดยแป้งเมล็ดขนุน (Jackfruit Seed Flour) ผลิตจากเมล็ดขนุน ซึ่งมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก [4] เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนเกิดเจลแป้ง จะมีความคงตัวต่ออุณหภูมิสูงมีคุณลักษณะที่สามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความข้นและความคงตัวในซอสพริก [2] ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้แป้งในการเคลือบเส้นด้ายเพื่อเพิ่มความแข็งแรงขณะทอ [5]

สิ่งทอเป็นสินค้าที่นารายได้เข้าประเทศ และมีการจ้างงานอยู่ในอันดับต้น ๆ การตกแต่งผืนผ้าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เช่น การพิมพ์ การเพ้นท์สี การทำผ้ามัดย้อม และผ้าบาติก [6] อุตสาหกรรมสิ่งทอมีแนวโน้มที่จะได้รับความนิยมในการใช้ผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบธรรมชาติมากขึ้น โดยเฉพาะในตลาดยุโรป [7] การทำผ้าบาติกเป็นการกันสีแบบรีซิสต์ (Resist Dyeing) เป็นเทคนิคการกันสีย้อมเพื่อไม่ให้สีย้อมผ่านเข้าไปได้ [8] ผ้าบาติกเป็นการนำผ้าสีขาวมากันสี หรือเขียนลวดลายด้วยเทียน ชี้นิ้วหรือสารกันสีก่อนที่จะแต้มสี ย้อมสีหรือระบายสี [9] สารกันสีที่ใช้ในงานบาติกในประเทศไทยมีส่วนผสมของขี้ผึ้งผสมกับไข ยางสน หรือพาราฟิน [10] ในกระบวนการลอกสารกันสีต้องใช้วิธีต้ม เพื่อลอกเทียนออกจะมีกลิ่นโอระเหยของเทียน ส่งผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจและเกิดของเสียปนเปื้อนก่อให้เกิดการอุดตันท่อน้ำทิ้ง ปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการนำเข้าสารกันสีจากต่างประเทศ ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณและเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับกระบวนการผลิตอีกด้วย

ดังนั้น การประยุกต์ใช้แป้งเมล็ดขนุนเพื่อทดแทนสารกันสีในการเขียนผ้าบาติก โดยเริ่มการศึกษากระบวนการผลิตแป้งจากเมล็ดขนุน องค์ประกอบทางเคมี และความหนืด เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน ตรวจสอบคุณภาพการใช้สารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนภายหลังการล้างออกจากผ้าบาติก เช่น ทดสอบความกระด้างของผ้า ค่าสี เพื่อพัฒนาสารกันสีธรรมชาติจากแป้งเมล็ดขนุน ใช้ทดแทนสารสังเคราะห์ที่ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เป็นการนำเมล็ดขนุนเหลือทิ้งจากการเกษตรมาพัฒนาให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผ้าบาติกด้วยนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่สะอาด ลดการใช้สารเคมีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มทางเลือกในการใช้งาน และลดการนำเข้าสารกันสีจากต่างประเทศ

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ สี และสารเคมี

- 1.1 เมล็ดขนุนสด พันธุ์มาเลย์
- 1.2 ผ้าฝ้ายสีขาว เป็นผ้าทอลายขัด ที่ผ่านการลอกแป้ง
- 1.3 สีรีแอคทีฟ อุณหภูมิห้อง สีแดง ท้างทุนส่วนจำกัดโยฮันเนิสเคมิชและโยฮันคัลเลอร์เท็กซ์
- 1.4 โขเดียมซิลิเกต บริษัท เอกสร์รค์เน็ตเวิร์ค จำกัด
- 1.5 สบู่มาตรฐาน (Standard Soap) บริษัท SDC Enterprises Limited

- 1.6 น้ำมันพืช ตราอู่น บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน)
- 1.7 ปูนแดง (Red Lime Paste) สำหรับทำน้ำปูนใส
- 1.8 แป้งข้าวเหนียว ตราช้างสามเศียร บริษัท โรงเส้นหมี่ขอเฮง จำกัด
- 1.9 เปลือกแกง ผลิตโดย ออนพาณิชย์
- 1.10 ซีดึงสำหรับใช้เป็นตัวกันสีในงานบาติก ทางหุ้นส่วนจำกัดโยฮันเวลด์เคมริชและ

โยฮันคัลเลอร์เท็กซ์

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 2.1 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray Dryer) ผลิตโดย หจก.บี.ดับบลิว.เอส.เทรคตั้ง
รุ่น BWS 5 380 V
- 2.2 ตะแกรงขนาด 80 เมช
- 2.3 เครื่องบดแห้งอเนกประสงค์ บริษัท ส.สุทรผลิตภัณฑ์แก๊ส จำกัด รุ่น NT-500D
- 2.4 กรอบไม้ ใช้สำหรับซิงผ้าบาติก
- 2.5 ชานตั้ง บริษัท เอกสรรค์เน็ตเวอร์ค จำกัด
- 2.6 เครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer Model Data Color 850 TM
- 2.7 เครื่องทดสอบความกระด้าง (Stiffness) ตามมาตรฐาน ASTM D 1388-96 ด้วย
เครื่อง Shirley Stiffness Tester
- 2.8 เครื่องวัดความหนืด วิธีที่ใช้ Viscometer, Brookfield Dv-ii+ Version 5.0

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย แบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ วิธีการทำสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และความหนืด วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการเขียนลวดลาย วิธีการเขียนผ้าบาติกจากสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน และวิธีการทดสอบความกระด้างและค่าสี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4. วิธีการทำสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

การเตรียมแป้งเมล็ดขนุน รายละเอียดดังต่อไปนี้

- 4.1 คัดเลือกเมล็ดขนุน พันธุ์มาเลย์ โดยมีลักษณะเมล็ดสด มีผิวตึง ไม่มีกลิ่นเหม็น
โดยนำมาล้างทำความสะอาด
- 4.2 ปอกเปลือกชั้นนอกหุ้มเมล็ดขนุนสีขาวครีมและสีน้ำตาลออก ล้างด้วยน้ำสะอาด
พักให้สะเด็ดน้ำ
- 4.3 หนาหนา 1 - 2 มิลลิเมตร
- 4.4 อบโดยตู้อบลมร้อนแบบถาดให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- 4.5 บดให้เนื้อละเอียดและร้อนด้วยตะแกรง 80 เมช ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 [4]
- 4.6 เก็บรักษาแป้งเมล็ดขนุนไว้ในที่อุณหภูมิห้อง โดยนำแป้งเมล็ดขนุนที่ได้มาใส่ถุงพลาสติก
ซิปล็อค เพื่อป้องกันอากาศเข้า

5. วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และความหนืด

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และความหนืด โปรตีน ไขมัน เถ้า และความชื้น ตามมาตรฐาน AOAC, 2000 และทดสอบหาค่าความหนืด วิธีที่ใช้ Viscometer, Brookfield Dv-ii+ Version 5.0 เพื่อคัดเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการทำสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

6. วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการเขียนลวดลาย

6.1 การเตรียมผ้าใช้ผ้าฝ้ายสีขาว เป็นผ้าทอละลายขัดที่ผ่านการลอกแป้ง ตามวิธีการ [8] โดยนำผ้าฝ้ายมาทำความสะอาดด้วยน้ำสบู่ 2 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ล้างน้ำสะอาด และตากให้แห้ง

6.2 การเตรียมสีรีแอคทีฟ สีที่ใช้ในการย้อมระบาย เป็นสีย้อมอุณหภูมิห้อง โดยใช้สีรีแอคทีฟสีละ 3 กรัม ต่อน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร ผสมสีแล้วคนให้ละลาย สีที่ละลายแล้วควรเก็บในขวดที่มีฝาปิดเพื่อป้องกันน้ำสีระเหย

6.3 การเตรียมน้ำเกลือและน้ำปูนใส มีวิธีการเตรียมตามวิธีการ [8] โดยเตรียมน้ำเกลือ (เกลือแกง) ร้อยละ 25 ต่อน้ำปูนแดง ร้อยละ 2 ต่อน้ำปูนแดงเมื่อนำมาผสมรอให้ตกตะกอน รินน้ำใส ๆ มาใช้

6.4 การเตรียมอุปกรณ์เขียนลวดลาย ในการเขียนลวดลายबाटจากแป้งเมล็ดขนุนจะใช้กรวยพลาสติกตัดมุมขนาด 0.5 เซนติเมตร นำไปเขียนตามลวดลายเพื่อกันสีทดแทนการทำผ้าबाटที่ใช้น้ำเทียน (ซีตัง) เป็นตัวกันสี

6.5 การเตรียมส่วนผสมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

ในการเตรียมส่วนผสมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน มีปริมาณส่วนผสมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

สูตร	แป้งเมล็ดขนุน (กรัม)	แป้งข้าวเหนียว (กรัม)	น้ำ (กรัม)	น้ำมันพืช (กรัม)	น้ำเกลือ (กรัม)	น้ำปูนใส (กรัม)
1	28	2	32	2	23	13
2	26	4	32	2	23	13
3	24	6	32	2	23	13
4	22	8	32	2	23	13
5	20	10	32	2	23	13

6.6 การเตรียมแป้งกันสีจากเมล็ดขนุน

6.6.1 ชั่งแป้งเมล็ดขนุน แป้งข้าวเหนียว น้ำ น้ำมันพืช น้ำเกลือ น้ำปูนใส ตามสัดส่วนในตารางที่ 1

6.6.2 ผสมทุกอย่างตามสัดส่วนของแต่ละสูตรลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้

6.6.3 คนให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำมาตั้งไฟนาน 5 นาที ความร้อนที่ระดับ 2.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมคนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหม้

6.6.4 ตักแป้งกันสีใส่ถุงพลาสติกที่เตรียมไว้ พร้อมนำไปใช้งาน

7. วิธีการเขียนผ้าบาติกจากสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

- 7.1 เขียนลวดลายลงบนผ้า โดยใช้ดินสอร่างลวดลาย
- 7.2 ซึงผ้าลงบนกรอบไม้ที่เตรียมไว้ ตึงผ้าให้ตึงทั้ง 4 ด้าน
- 7.3 เตรียมแป้งกันสีตามส่วนผสมในแต่ละสูตร ดังตารางที่ 1
- 7.4 บรรจุสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนที่เตรียมใส่กรวยพลาสติก ตัดมุมขนาด 0.5 เซนติเมตร
- 7.5 บีบกรวยแป้งกันสีลงบนผ้าตามลวดลายที่ร่างไว้
- 7.6 ตากสารกันสีให้แห้งอย่างน้อย 3 ชั่วโมง
- 7.7 ระบายสีตามลวดลายและปล่อยให้แห้งอย่างน้อย 6 ชั่วโมง
- 7.8 ผนึกสีด้วยโซเดียมซัลเฟต และปล่อยให้แห้งประมาณ 8 - 12 ชั่วโมง
- 7.9 ล้างผ้าที่ผลึกสีด้วยโซเดียมซัลเฟตและกำจัดแป้งเมล็ดขนุนที่ใช้สำหรับกันสีออกให้

สะอาด ตาก ให้แห้ง

- 7.10 ทดสอบความกระด้างของผ้าและค่าสี

8. วิธีการทดสอบความกระด้างและค่าสี

8.1 การทดสอบความกระด้าง (Stiffness) ตามมาตรฐาน ASTM D 1388-96 ด้วยเครื่อง Shirley Stiffness Tester

- 8.2 ค่าสีเครื่อง Spectrophotometer Model Data Color 850 TM

9. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุน ปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ อุณหภูมิของการอบแป้งเมล็ดขนุน จำนวน 3 ระดับ คือ อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) คัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม และศึกษาสูตรสารกันสีที่มีส่วนผสมแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียวในสัดส่วนของน้ำหนัก 30 กรัม จำนวน 5 สูตร คือ 28:2 26:4 24:6 22:8 และ 20:10 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมในการกันสีผ้าบาติก

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการศึกษากระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุน องค์ประกอบทางเคมี ความหนืด และสูตรที่เหมาะสมของสารกันสี เพื่อนำมาผลิตเป็นสารกันสีในงานบาติก ได้ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลดังต่อไปนี้

1. กระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุน กระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุน ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) เมล็ดขนุนสด
ผ่านการล้างสะอาด



(ข) ปอกเปลือกหุ้ม
ออกจนหมด



(ค) ทั่นหนา
1 - 2 มิลลิเมตร



(ง) อบลมร้อนแบบถาด



(จ) บดให้ละเอียด



(ฉ) ร่อนผ่านตะแกรง
ขนาด 80 เมช



(ช) ผงแป้งเมล็ดขนุน



(ฅ) แป้งเมล็ดขนุนพร้อมใช้

รูปที่ 1 กระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุน

จากรูปที่ 1 กระบวนการผลิตแป้งเมล็ดขนุนที่เหมาะสมประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ นำเมล็ดขนุนสดล้างทำความสะอาด ดังรูปที่ 1(ก) ปอกเปลือกหุ้มเมล็ดขนุนสีขาวยครีมและสีน้ำตาลออกจนหมดล้างด้วยน้ำสะอาดพักให้สะเด็ดน้ำ ดังรูปที่ 1(ข) จากนั้นนำเมล็ดขนุนมาทั่นหนา 1 - 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1(ค) นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 1(ง) บดด้วยเครื่องบดแห้งจนกระทั่งละเอียด ดังรูปที่ 1(จ) นำผงแป้งเมล็ดขนุนมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ดังรูปที่ 1(ฉ) ซึ่งพบว่า แป้งเมล็ดขนุนมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวครีม มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติของเมล็ดขนุน เมื่อใช้มีกลิ่นหืนจะมีความหยาบเล็กน้อย จากนั้นบรรจุแป้งเมล็ดขนุนใส่ถุงพลาสติกซิปล็อค ดังรูปที่ 1(ช) เพื่อป้องกันอากาศเข้า แป้งที่เก็บรักษาอย่างดีจะมีอายุการใช้งานประมาณ 5 - 6 เดือน [11] และได้ผงแป้งเมล็ดขนุนพร้อมใช้งาน ที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 ดังรูปที่ 1(ฅ)

2. องค์ประกอบทางเคมี และความหนืดของแป้งเมล็ดขนุน

ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี และความหนืดของแป้งเมล็ดขนุนในอุณหภูมิการอบที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบขององค์ประกอบทางเคมี และความหนืดของแป้งเมล็ดขนุนในอุณหภูมิการอบแตกต่างกัน

อุณหภูมิอบแป้งเมล็ดขนุน (องศาเซลเซียส)	ผลการวิเคราะห์ (%)				Centipoise; cP
	ความชื้น	โปรตีน ^{ns}	ไขมัน ^{ns}	เถ้า	ความหนืด
60	5.13 ^a	0.02	1.03	95.89 ^a	2.10 ^b
80	4.76 ^b	0.04	1.03	95.81 ^b	5.00 ^a
100	3.64 ^c	0.07	1.04	95.74 ^c	5.50 ^a

หมายเหตุ : * ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี และความหนืดของแป้งเมล็ดขนุนพบว่า ความชื้นในการอบแป้งเมล็ดขนุนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นมากที่สุดร้อยละ 5.13 รองลงมาคือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นร้อยละ 4.76 ซึ่งพบว่า อุณหภูมิในการอบทั้ง 3 อุณหภูมิ มีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้ [4] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Wisansakkul, S., Oupathumpanont, O., Sungsanit, K., and Chulacupt, S. [12] คือ มีค่าความชื้นร้อยละ 5.75 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Narklor, D., Sungnark, A., and Limroongreungrat, K. [13] ที่กล่าวว่าแป้งเมล็ดขนุนที่นำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอาหาร แป้งดิบจากเมล็ดขนุนที่มีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 8

โปรตีนพบว่า ปริมาณโปรตีนในแป้งเมล็ดขนุนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าโปรตีนมากที่สุด คือร้อยละ 0.07 รองลงมาคือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยมีค่าโปรตีนร้อยละ 0.04 ตามลำดับทั้ง 3 อุณหภูมิพบว่า มีค่าปริมาณโปรตีนในแป้งเมล็ดขนุนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \geq 0.05$)

ไขมันพบว่า ปริมาณไขมันในแป้งเมล็ดขนุนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าไขมันมากที่สุด ร้อยละ 1.04 และรองลงมาคือ อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าไขมันร้อยละ 1.03 ทั้ง 3 อุณหภูมิพบว่า มีค่าปริมาณไขมันในแป้งเมล็ดขนุนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \geq 0.05$)

เถ้าพบว่า ปริมาณเถ้าในแป้งเมล็ดขนุนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าเถ้ามากที่สุดร้อยละ 95.89 รองลงมาคือ อุณหภูมิอบ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเถ้าร้อยละ 95.81 ตามลำดับ

ความหนืดพบว่า ในการอบแป้งเมล็ดขนุนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดมากที่สุด ร้อยละ 5.50 รองลงมาคือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความหนืดร้อยละ 5.00 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Klaijoy, C. [14] กล่าวว่า แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำแต่เมื่อให้ความร้อนพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง ส่งผลให้เม็ดแป้งดูน้ำและพองตัว เกิดความหนืด สามารถใช้เป็นสารกันสีในงานบาติกบนผ้าไหม นอกจากนี้ Changpaiboon, S., Suraswadi, P., and Rungruangkitkrai, T. [6] พบว่า ความหนืดของแป้งข้าวไทยมีผลช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกันสีของผ้าบาติก

ผลการศึกษาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในองค์ประกอบทางเคมี ความชื้น ความหนืดและเถ้าของแป้งเมล็ดขนุน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ส่วนโปรตีนและไขมัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \geq 0.05$) ดังนั้นในการคัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแป้งเมล็ดขนุนเพื่อนำมาเป็นสารกันสี จึงเลือกใช้ความชื้นและความหนืดเป็นสมบัติสำคัญ โดยเลือกอุณหภูมิการอบที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีของแป้งเมล็ดขนุนมีสีชาวครีม ช่วยลดพลังงานในการอบ อีกทั้งความหนืดมีผลช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการกันสี

3. ลักษณะการกันสีของสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

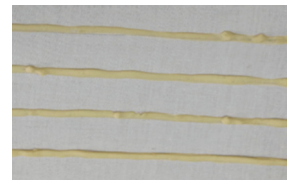
การเตรียมสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน จำนวน 5 สูตร มีลักษณะการกันสี แสดงรูปที่ 2



(ก) น้ำเทียบ (ควบคุม)



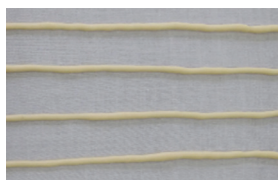
(ข) แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 1



(ค) แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 2



(ง) แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 3



(จ) แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 4



(ฉ) แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 5

รูปที่ 2 ลักษณะการกันสีของสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน 5 สูตร

จากรูปที่ 2 ลักษณะการกันสีของสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนจำนวน 5 สูตร เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเส้นกันสีกับเส้นน้ำเทียบ (ควบคุม) ดังรูปที่ 2(ก) พบว่า แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 4 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 22:8 ดังรูปที่ 2(จ) และสูตรที่ 5 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 20:10 ดังรูปที่ 2(ฉ) มีลักษณะของขนาดเส้นกันสีที่สม่ำเสมอ และยึดเกาะพื้นผ้าได้ดีตามลำดับ ส่วนแป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 1 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 28:2 ดังรูปที่ 2(ข) สูตรที่ 2 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 26:4 ดังรูปที่ 2(ค) และสูตรที่ 3 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 24:6 ดังรูปที่ 2(ง) มีลักษณะของขนาดเส้นกันสีที่ไม่สม่ำเสมอตามลำดับ

สีของเส้นกันสี เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นน้ำเทียบ (ควบคุม) ดังรูปที่ 2(ก) พบว่า แป้งเมล็ดขนุนกันสีทั้ง 5 สูตร มีลักษณะสีเป็นสีชาวครีม เนื่องจากตัวเมล็ดขนุนมีเยื่อหุ้มสีชาวครีมและเยื่อสีน้ำตาล

การเกาะติดบนพื้นผ้า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นน้ำเทียบ (ควบคุม) ดังรูปที่ 2(ก) พบว่า แป้งเมล็ดขนุนกันสีสูตรที่ 4 ดังรูปที่ 2(จ) และสูตรที่ 5 ดังรูปที่ 2(ฉ) มีการเกาะติดผ้าที่ดี ตัวเส้นกันสีไม่มีน้ำซึมออกมาที่พื้นผ้า เนื่องจากมีส่วนผสมของเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียวในอัตราส่วน (กรัม) 22:8 (สูตรที่ 4) และ 20:10 (สูตรที่ 5) ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดความหนืดและการเกาะติดผ้าดีขึ้น ส่วนแป้งเมล็ดขนุน

กันสีสูตรที่ 1 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 28:2 ดังรูปที่ 2(ข) มีน้ำซึมออกมาที่พื้นผ้า อีกทั้งแป้งเมล็ดขนุนกับสีสูตรที่ 2 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 26:4 ดังรูปที่ 2(ค) และแป้งเมล็ดขนุนกับสีสูตรที่ 3 มีปริมาณแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) 24:6 ดังรูปที่ 2(ง) มีการเกาะติดผ้าได้น้อย ตามลำดับ

4. ประสิทธิภาพสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน

จากการเขียนผ้าผ้ามัดย้อมด้วยสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน 5 สูตร ลงสีรีแอคทีฟ และทำการเคลือบด้วยโซเดียมซัลไฟเตด แล้วทำการลอกแป้งกันสีออกจากผ้า แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน 5 สูตร

ลำดับที่ของสูตร	สูตรสารกันสี					ค่าสี**			ทดสอบความกระด้าง		ลักษณะเส้นกันสี		
	แป้งเมล็ดขนุน (กรัม)	แป้งเหนียว (กรัม)	น้ำ (กรัม)	น้ำเกลือ (กรัม)	น้ำปูน (กรัม)	WI	L*	a*	b*	ΔE*		ระยะการโค้งตัว	
												เส้นด้ายยืน (เซนติเมตร)	เส้นด้ายพุ่ง (เซนติเมตร)
ผ้าฝ้าย (ควบคุม)	-	-	-	-	-	151.75 ^a	91.30 ^a	2.20 ^{cd}	-16.79 ^b	-	2.23 ^d	1.93 ^c	
น้ำเขียนผ้า	-	-	-	-	-	127.42 ^f	90.46 ^f	1.96 ^d	-11.34 ^a	5.13 ^d	2.87 ^{ab}	2.37 ^{ab}	
1	28	2	32	2	23	144.03 ^c	86.63 ^f	8.88 ^a	-16.19 ^b	8.40 ^a	2.97 ^a	2.40 ^a	
2	26	4	32	2	23	146.60 ^b	87.31 ^c	8.10 ^{ab}	-16.60 ^b	7.37 ^b	2.77 ^{bc}	2.23 ^{ab}	
3	24	6	32	2	23	146.11 ^{bc}	87.82 ^d	7.56 ^{ab}	-16.35 ^b	6.60 ^c	2.90 ^{ab}	2.33 ^{ab}	
4	22	8	32	2	23	146.01 ^c	89.33 ^c	4.84 ^{bcd}	-16.01 ^b	3.37 ^f	2.90 ^{ab}	2.23 ^{ab}	
5	20	10	32	2	23	145.22 ^d	89.09 ^c	5.67 ^{abc}	-15.83 ^b	4.24 ^e	2.67 ^c	2.17 ^b	

หมายเหตุ : ** ทดสอบตรงบริเวณเส้นสีขาว และตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

จากตารางที่ 3 ประสิทธิภาพสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุน 5 สูตร พบว่า ค่าดัชนีความขาวของผ้า ทั้ง 5 สูตร มีค่าความขาวมากกว่าผ้าที่เขียนสารกันสีด้วยน้ำเตียน โดยสูตรที่ 2 มีค่าดัชนีความขาวมากที่สุด คือ 146.60 รองลงมา สูตรที่ 3 คือ 146.11

ค่า L^* ค่าความสว่างของสี (ค่าเท่ากับ 0 หมายถึงสีดำ ค่าเท่ากับ 100 หมายถึงสีขาว) พบว่า สูตรที่ 4 มีค่าความสว่างมากที่สุด คือ 89.33 รองลงมาสูตรที่ 5 คือ 88.09

ค่า a^* ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (+ หมายถึงความเป็นสีแดง, - หมายถึงความเป็นสีเขียว) พบว่าค่า a^* มีค่าบวก แสดงว่าบริเวณที่กันสีจากแป้งเมล็ดขนุนมีความเป็นสีแดง โดยสูตรที่ 4 มีความเป็นสีแดงน้อยที่สุด คือ 4.84 รองลงมาสูตรที่ 5 คือ 5.67 ส่งผลให้เส้นกันสี มีสีแดงเข้มเข้าไปบริเวณกันสีน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสูตรอื่นตามลำดับ

ค่า b^* ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (+ หมายถึงความเป็นสีเหลือง, - หมายถึง ความเป็นสีน้ำเงิน) พบว่า ค่า b^* มีค่าลบ แสดงว่าบริเวณที่กันสีจากแป้งเมล็ดขนุนมีความเป็นสีน้ำเงิน เมื่อเปรียบเทียบกับ บริเวณที่กันทั้ง 5 สูตรมีค่า b^* มากกว่าผ้าที่เขียนสารกันสีด้วยน้ำเตียน โดยสูตรที่ 5 มีความเป็นสีน้ำเงิน น้อยที่สุด คือ -15.83 รองลงมา สูตรที่ 4 คือ -16.01

ค่า ΔE^* ค่าความแตกต่างของสีพบว่า ค่าความแตกต่างของบริเวณที่กันสีบนผ้าบาติกทั้ง 5 สูตร เมื่อเทียบกับค่าความแตกต่างของน้ำเตียนเส้นกันสีบนผ้าบาติก มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า โดยสูตรที่ 4 คือ 3.37 รองลงมาสูตรที่ 5 คือ 4.24

จากผลข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่า L^* a^* b^* และ ΔE^* มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกันกับ ค่าดัชนีความขาว กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของแป้งเมล็ดขนุนต่อแป้งข้าวเหนียว (กรัม) จาก 28:2 (สูตรที่ 1) 26:4 (สูตรที่ 2) 24:8 (สูตรที่ 3) 22:8 (สูตรที่ 4) และ 20:10 (สูตรที่ 5) พบว่า การเพิ่มปริมาณ แป้งข้าวเหนียวในสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5 ส่งผลให้บริเวณที่กันสีมีความหนืดขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวเหนียว มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง ซึ่งอะไมโลเพคตินมีคุณสมบัติทำให้เกิดความเหนียว [15] ในขณะที่การเพิ่ม ปริมาณแป้งเมล็ดขนุนในสูตรที่ 1 พบว่า บริเวณที่กันสีมีความหนืดน้อยลง เนื่องจากแป้งเมล็ดขนุนมีปริมาณ อะไมโลสสูงกว่าอะไมโลเพคติน ส่งผลทำให้บริเวณที่กันสี มีสีแดงเข้มเข้าไปติดในผ้าบาติกมากกว่าสูตรอื่น ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Changpaiboon, S., Suraswadi, P., and Rungruangkitkrai, T. [6] พบว่า ส่วนผสมของแป้งที่สามารถกันสีได้ดี คือ แป้งข้าวเหนียว และรำข้าว โดยการใช้แป้งข้าวไทย ในการผลิตสารกันสีเพื่อใช้ในงานบาติก

ค่าความกระด้างแนวเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งพบว่า อัตราส่วนผสมของแป้งเมล็ดขนุนต่อ แป้งข้าวเหนียว (กรัม) จาก 22:8 (สูตรที่ 4) 20:10 (สูตรที่ 5) และ 24:6 (สูตรที่ 3) มีค่าความกระด้าง ของพื้นผ้าบาติกน้อยกว่าสารกันสีด้วยน้ำเตียน ตามลำดับ เนื่องจากสามารถกำจัดสารกันสีด้วยการแช่น้ำสะอาด เส้นกันสีฟองตัว หลุดร่อนออกจากตัวผ้าจนหมด เหลือแป้งตกค้างบนผ้าน้อย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ผลการศึกษาของ Kachachat, P. and Jieyin, L. [16] กล่าวไว้ว่า การกันสีจากแป้งหว่านดัดแปรมีความ ความกระด้างของผ้าแนวเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง มีค่าความกระด้างของพื้นผ้าบาติกใกล้เคียงสารกันสี ด้วยน้ำเตียน และเมื่อเปรียบเทียบสารกันสีด้วยน้ำเตียนพบว่า ต้องใช้ความร้อนเนื่องจากมีส่วนผสมของ ซีผึ้ง ไช ยางสนหรือพาราฟิน ล้างออกได้ยาก จึงทำให้ผ้ามีความแข็งกระด้างมากกว่าสารกันสีจาก แป้งเมล็ดขนุน สอดคล้องกับการศึกษาของ Masae, M., Sikong, L., and Kooptarnond, K. [17] กล่าวว่า การล้างเตียนไซบนพื้นผ้าบาติก ต้องต้มด้วยน้ำเดือดเพื่อล้างเตียนออก

สรุปผลการวิจัย

สารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนที่ผ่านการอบแป้งเมล็ดขนุนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความชื้นร้อยละ 4.76 สีมี่สีขาวครีม มีระดับความหนืดที่เหมาะสมมีผลช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการกันสี และสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนมีความสามารถในการกันสีน้อยกว่าน้ำเทียน โดยสูตรที่ 4 เป็นสูตรที่สามารถกันสีที่มีความหนืดที่เหมาะสม สามารถเขียนเส้นได้คมชัด มีสีเข้มเข้าไปติดได้น้อย และล้างออกได้ง่าย มีคุณสมบัติที่เหมาะสมจะนำไปทำสารกันสีในงานบาติก จึงนับว่าเป็นการพัฒนาสารกันสีธรรมชาติจากแป้งเมล็ดขนุนใช้ทดแทนสารสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เป็นทางเลือกใหม่ให้แก่ผู้ผลิตและผู้บริโภคที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผ้าบาติกด้วยนวัตกรรมและเทคโนโลยีสะอาด ไม่ต้องระงับอันตรายที่เกิดจากน้ำเทียนที่ร้อนและการสูดไอระเหยของน้ำเทียนในระหว่างเขียนลาย ซึ่งสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนสามารถลอกแป้งกันสีโดยการแช่น้ำ แป้งกันสีจะพองตัวหลุดออกมาโดยไม่ต้องใช้ความร้อน ช่วยลดต้นทุนการใช้แก๊สทุ้มเพื่อลอกน้ำเทียนออก และลดการนำเข้าสารกันสีจากต่างประเทศ

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยฉบับนี้ คือ ผ้าบาติกที่เขียนโดยสารกันสีจากแป้งเมล็ดขนุนสามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เสื้อผ้า ผ้าเช็ดหน้า ผ้าพันคอ และเคหะสิ่งทอ เป็นต้น อาจใช้สีธรรมชาติทดแทนสีรีแอคทีฟ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการใช้สีสังเคราะห์ โดยการใช้สีธรรมชาติในชิ้นงานผ้าบาติก เป็นการเพิ่มจุดสนใจและมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ [18]
2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป คือ แป้งเมล็ดขนุนสามารถใช้ทดแทนสารกันสีในการเขียนผ้าบาติก จึงควรได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานราชการ หรือหน่วยงานท้องถิ่น [19] ให้มีส่วนร่วมในการทดแทนสารสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เป็นการนำเมล็ดขนุนเหลือทิ้งจากการเกษตรมาพัฒนาให้มีมูลค่าเพิ่มและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณสาขาวิชาสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดสอบสิ่งทอ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและความหนืดของแป้งเมล็ดขนุน อีกทั้งคณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบความกระด้างของผ้า

References

- [1] Wongsas, J., Bhuwakietkumjohn, N., Kanlaya, T., and Chalalai, A. (2012). Design and Construction of Peeling and Size Reducing Machine for Jackfruit Seed. **Agricultural Science Journal**. Vol. 43, Suppl. 3, pp. 171-174
- [2] Boonkong, J. (2011). Study on Physicochemical Properties of Phosphate Starch from Jackfruit Seed (*Artocarpus heterophyllus* Lamk.). **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol. 7, No. 1, pp. 40-50
- [3] Nutalai, P., Kaewsrithong, J., and Sirianganakun, S. (2014). Effect of Wheat Flour Substitution with Jackfruit Seed Flour on Qualities of Cookies. In **Proceedings of 1st National Conference on Science Education to Inspire Innovation**. Mahidol University. pp. 225-227
- [4] Thumthanruk, B., Silapruang, S., and Aeimsard, R. (2012). Glucose Syrup Produced from Jackfruit Seed Flour and Tapioca Starch. **Agricultural Science Journal**. Vol. 43, Suppl. 2, pp. 149-152
- [5] Uttaphab, D. (n.d.). **Carbohydrate Technology**. Access (9 August 2019). Available (https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap3/chapter3_3.html)
- [6] Changpaiboon, S., Suraswadi, P., and Rungruangkitkrai, T. (2008). Development of Color Resistant Material from Thai Rice Flour for Resist Dyeing Process. In **Proceedings of 43rd Kasetsart Univesity Annual Conference: Animal, Agro-Industry**. pp. 444-451. Bangkok
- [7] Thairathonline. (2014). **Agriculture Value of Waste Materials Agriculture to Textile Exports**. Access (25 January 2019). Available (<http://www.thairath.co.th/content/459958>)
- [8] Klaijoy, C. and Mongkholrattanasit, R. (2012). **Development of Color Resistant Material from Flour of Gaint Taro for Resist Printing and Dyeing**. Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [9] Thongprayoon, S. (2007). **The Improvement of Batik Design in Songkhla Province: the Study of Source of Production at Wangkaew-Wangkhaw Village, Tombon Bo-yang, Moung District, Songkhla Province**. Faculty of Fine Art, Songkhla Rajabhat University
- [10] Phinkun, K. (2002). **Batik Painting Techniques**. Bangkok: Khaofang Publishing
- [11] Snow, P. (2017). **How to Keep the Dough for a Long Time**. Access (9 January 2019). Available (<http://www.trueplookpanya.com/knowledge/content/55472/-blo-footip-foo->)
- [12] Wisansakkul, S., Oupathumpanont, O., Sungsanit, K., and Chulacupt, S. (2016). Development Production of Bioplastics from Jackfruit Seeds Starch. **Burapha Science Journal**. Vol. 21, No. 2, pp. 216-228
- [13] Narklor, D., Sungnark, A., and Limroongreungrat, K. (2011). Improvement in Quality of Jackfruit Seed Flour by Pregelatinization. **Burapha Science Journal**. Vol. 16, No. 1, pp. 12-21
- [14] Klaijoy, C. (2011). Making Batik on Silk Using Tapioca Starch to Resist Printing and Dyeing. **Colourway**. Vol. 17. No. 97. pp. 35-38

- [15] Sriraod, K. and Piyajomkwan, K. (2003). **The Technology of Flour**. Edition 4, Bangkok: Kasetsart University
- [16] Kachachat, P. and Jieyin, L. (2015). **Resist Printing of Cotton and Silk Fabric with Carboxymethylcellulose from Wild Taro Using Reactive Dyes and Batik Technique**. Technology Program in Textile Chemical Technology, Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [17] Masae, M., Sikong, L., and Kooptarnond, K. (2013). Comparative of Paraffin and Turpentine Used in Wax Resist Dying on Batik Fabric. **Journal of Community Development Research (Humanities and Social Sciences)**. Vol. 6, No. 1, pp. 31-41
- [18] Anunvrapong, A., Noodang, P., Pariman, B., Jiraboon, S., and Wongsathongdee, S. (2017). The Product Development of Batik using Natural Dyes Mixing Technique. **Wrea-wa Kalasin Journal of Kalasin Univerity**. Vol. 4, No. 2, pp. 207-222
- [19] Khunchaikan, J., Chonsakorn, S., and Mongkholrattanasit, R. (2018). Physical Properties of Yok Denim Nakhon Fabric. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 11, No. 3, pp. 130-143

การพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัว และการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

The Development of Interactive Multimedia for Learning how to Send Documents and Registration as a Student of Rajamangala University of Technology Isan

บุญญรัตน์ รุ่งสูงเนิน^{1*} และสิริกานต์ ไชยสิทธิ์¹

Punyarat Rungsoongnern^{1*} and Sirikan Chaiyasit¹

Received: October 2, 2019; Revised: November 1, 2019; Accepted: November 13, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัว และการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 2) เพื่อศึกษาการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างก่อนและหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ โดยมีกลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 โรงเรียนสุนทรวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ภาคการเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 46 คน ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างโดยใช้ความน่าจะเป็น ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่ม เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลคือ แบบประเมินคุณภาพมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ด้านเนื้อหา ด้านการออกแบบ และด้านเทคนิค แบบวัดระดับการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างก่อนและหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ แบบสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ สถิติที่ใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลจากการวิจัยพบว่า 1) มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ย 4.72 2) ผลการวัดระดับการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างก่อนใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์มีค่าร้อยละ 47.82 มีการรับรู้อยู่ในระดับน้อยที่สุด และผลการวัดระดับการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างหลังการใช้งานมีค่าร้อยละ 84.64 มีการรับรู้อยู่ในระดับมากที่สุด 3) ผลการศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ โดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากกว่าเฉลี่ย 4.39

คำสำคัญ : มัลติมีเดีย; ปฏิสัมพันธ์; สื่อเรียนรู้; วงจรการพัฒนาระบบงาน

¹ คณะศิลปกรรมและออกแบบอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Fine Art and Industrial Design, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: wanpyrpy@gmail.com

Abstract

This aim of this research is to 1) Development of interactive multimedia for learning how to send documents and registration as a student of Rajamangala University of Technology Isan. 2) Study the perception of the sample group before and after using the multimedia interaction. 3) Study the satisfaction of the sample after using the multimedia interaction. The samples were students in the senior high school grade 12, Suranaree Witthaya School, Nakhon Ratchasima, the first semester of the academic year 2019, Amount 46 people. Obtained from using the probability sampling method with Cluster sampling methods. The instruments used in the research were interactive multimedia for learning how to send documents and registration as a student of Rajamangala University of Technology Isan. The tools used for data collection were 1) Quality assessment form for multimedia interaction consist of content, design and technical. 2) Perception level test form of sample group before and after using multimedia interaction. 3) Satisfaction survey form of sample group after using multimedia interaction. Statistics used are mean, percentage and standard deviation. The research found that 1) Quality of interactive multimedia overall at quality is very good, the average was 4.72. 2) Perception of the sample group before using multimedia interaction overall the perception at the least level, perception was 47.82 percent, Perception of the sample group after using multimedia interaction overall the perception at the highest level, perception was 84.64 percent. 3) Satisfaction of the sample group after using multimedia interaction overall satisfaction was at a high level, satisfied at the average was 4.39.

Keywords: Multimedia; Interactive; Learning Media; SDLC

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้ให้ความสำคัญในด้านการศึกษากับประชาชนทุกคนอย่างเท่าเทียมกัน โดยมอบสิทธิและโอกาสให้ประชาชนคนไทยเข้ารับการศึกษาขั้นพื้นฐานไม่น้อยกว่า 12 ปี [1] หากประชาชนได้รับการศึกษาขั้นพื้นฐานแล้ว จึงจะสามารถเข้ารับการศึกษาในระดับอุดมศึกษาได้ ซึ่งสถาบันที่มีการจัดการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ระดับสถาบันวิชาชีพชั้นสูง และระดับมหาวิทยาลัย [2] โดยสถาบันวิชาชีพชั้นสูงจะมุ่งเน้นให้นักศึกษามีความรู้ทางทฤษฎีควบคู่กับการพัฒนาทักษะในการปฏิบัติงานในวิชาชีพเฉพาะด้าน ส่วนระดับมหาวิทยาลัยจะมุ่งเน้นการศึกษาวิจัยค้นคว้าโดยอิสระ ซึ่งกระบวนการรับนักศึกษาใหม่เป็นก้าวแรกที่จะเปลี่ยนนักเรียนจากการศึกษาขั้นพื้นฐานเข้าสู่การศึกษาระดับอุดมศึกษา โดยเริ่มตั้งแต่การสมัคร การสอบคัดเลือก การประกาศผลการสอบคัดเลือก ตลอดจนการรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษาใหม่นั้น ปัจจุบันล้วนใช้สื่ออิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเข้ามาเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลต่าง ๆ แต่ในขณะเดียวกันก็เกิดปัญหาที่นักศึกษาใหม่ถูกตัดสิทธิ์

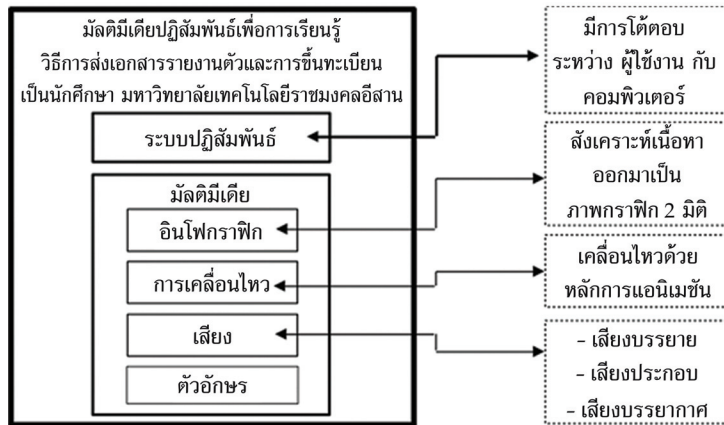
ในการเข้าศึกษาต่อ ไม่ว่าจะเป็นการไม่ทราบวันและเวลาที่แน่ชัดในการส่งเอกสารและรายงานตัว หรือมีการจัดเตรียมเอกสารสำหรับรายงานตัวมาไม่ครบถ้วน อันเนื่องมาจากสื่อประชาสัมพันธ์รูปแบบล้าสมัย ไม่ดึงดูดความสนใจ และยากต่อความเข้าใจสำหรับนักศึกษาใหม่ หากมีการนำสื่อที่ทันสมัย ใช้ได้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลาย เข้าถึงผู้รับสื่อได้ทั่วถึง และสามารถถ่ายทอดเนื้อหาให้ผู้รับสื่อเข้าใจได้ง่าย จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ การทำงานแบบโต้ตอบหรือระบบปฏิสัมพันธ์ถูกนำมาใช้ร่วมกับสื่อมัลติมีเดีย เพื่อนำเสนองานด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดการโต้ตอบในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การมองเห็น การสัมผัส การไต่คน การไต่กลิ้ง เป็นต้น โดยนกออกแบบสื่อปฏิสัมพันธ์ต้องคำนึงถึงการเลือกใช้เทคโนโลยีปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการสื่อสาร และเลือกใช้ให้สอดคล้องกับเนื้อหาที่ต้องการนำเสนอ และเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายให้มากที่สุด [3] ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับวิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้สามารถใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ เพื่อลดปัญหาการกีดกันทางการเข้าศึกษาต่อ ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยประยุกต์ใช้วงจรพัฒนาระบบงาน SDLC 7 ขั้นตอน [4] เป็นกรอบในการพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งภายในสื่อจะมีการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ 3 รูปแบบ ได้แก่ การมองเห็น การสัมผัส และการไต่คน โดยผู้วิจัยได้สรุปสาระสำคัญและขั้นตอนการดำเนินการต่าง ๆ ออกมาเป็นเนื้อเรื่อง และใช้ตัวละครเป็นตัวนำเนื้อเรื่อง เพื่อเข้าสู่การสาธิตวิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา และมีการสร้างภาพเคลื่อนไหวในรูปแบบแอนิเมชัน 2 มิติ และใช้วิธีการควบคุมการทำงานโต้ตอบกับผู้ใช้งานโดยเขียนโปรแกรมคำสั่งควบคุมชิ้นงานในรูปแบบการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming) มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น จะกระตุ้นให้นักศึกษาใหม่ผ่านการคัดเลือกและมีสิทธิ์เข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รู้ถึงเนื้อหาเกี่ยวกับการกรอกข้อมูลประวัติ การขึ้นทะเบียนนักศึกษา การสมัครบัญชีผู้ใช้งาน และการเตรียมเอกสารรายงานตัว อันจะทำให้เกิดการสร้างความรู้ตามทฤษฎีคอนสตรัคติวิสต์ (Constructivist Theory) [5] ซึ่งเป็นกระบวนการที่นักเรียนจะนำข้อมูลและประสบการณ์จากการใช้มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ มาเชื่อมโยงกับความรู้ความเข้าใจที่มีอยู่เดิม เพื่อสร้างเป็นความรู้ความเข้าใจของตนเอง อันจะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาใหม่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกคน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. เพื่อศึกษาการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่างก่อนและหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์
3. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์

กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยมีกรอบแนวคิดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวคิดการพัฒนาสื่อมัลติมีเดียที่มีการปฏิสัมพันธ์

จากรูปที่ 1 มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์จะประกอบไปด้วยระบบปฏิสัมพันธ์ซึ่งมีการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ อินโฟกราฟิกที่ได้มาจากการสังเคราะห์เนื้อหาแล้วนำมาออกแบบและสร้างเป็นภาพกราฟิก การเคลื่อนไหวโดยยึดหลักการแอนิเมชัน เสียงบรรยายภาค เสียงประกอบ เสียงบรรยายจากตัวละคร และตัวอักษร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Saitong, P. [3] ได้ศึกษาการพัฒนาโมชันกราฟิกเพื่อประชาสัมพันธ์หลักสูตรระดับปริญญาตรี คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีมนุษย์เป็นศูนย์กลางของการออกแบบ (Human-Centered Design: HCD) มีการใช้ตัวละครในการเล่าเรื่อง โดยออกแบบตัวละครให้เป็นตัวแทนของนิสิตในการแนะนำข้อมูลหลักสูตร ออกแบบสัญลักษณ์ต่าง ๆ ให้สามารถสื่อความหมายแทนข้อมูลที่มีจำนวนมาก มีการสร้างการเคลื่อนไหว ใช้เสียงบรรยาย เสียงดนตรี และเสียงประกอบต่าง ๆ เพื่อกระตุ้นความสนใจ จากการศึกษางานวิจัยของ Saitong, P. [3] ผู้วิจัยใช้การออกแบบกราฟิกโดยการย่อข้อมูลในปริมาณมาก เรียกว่าอินโฟกราฟิก และมีการเล่าเรื่องแนะนำขั้นตอนการส่งเอกสารรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยใช้ตัวละครแทนตัวนักเรียนนักศึกษา และเจ้าหน้าที่ ประกอบกับการเคลื่อนไหวของตัวละคร การเคลื่อนไหวของอินโฟกราฟิกมีความสามารถในการโต้ตอบของระบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความรู้สึกพึงพอใจในระหว่างใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์

Samutsri, W., Liamthaisong, K., and Au-Areemit, S. [6] ได้ศึกษาการพัฒนาสื่อมัลติมีเดียแบบปฏิสัมพันธ์เพื่อส่งเสริมความฉลาดทางอารมณ์ สำหรับนักเรียนระดับประถมศึกษาปีที่ 6 เพื่อประเมินความฉลาดทางอารมณ์ของนักเรียนก่อน-หลังใช้สื่อ โดยกำหนดการพัฒนาสื่อในรูปแบบสื่อมัลติมีเดียพื้นฐาน (Basic Multimedia) คือ การนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกันประกอบกับการมีความสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้งานได้ จากการศึกษาวิจัยของ Samutsri, W., Liamthaisong, K., and Au-Areemit, S. [6] ผู้วิจัยจึงพัฒนาเครื่องมือที่จะช่วยแก้ปัญหาในการส่งเอกสารรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ในรูปแบบมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ โดยใช้สื่อหลายประเภท ได้แก่ กราฟิก ภาพเคลื่อนไหว เสียง ประกอบกับการสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้งานได้

Borchakkaphan, S., Hormsabsin, J., Malahorm, T., and Chajitwanichkul, P. [7] ได้ศึกษาการพัฒนาสื่อมัลติมีเดียเรื่องคำศัพท์ภาษาอังกฤษด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้อก่อนและหลังใช้สื่อมัลติมีเดีย จากการศึกษางานวิจัยของ Borchakkaphan, S., Hormsabsin, J., Malahorm, T., and Chajitwanichkul, P. [7] ผู้วิจัยได้เห็นถึงผลการใช้มัลติมีเดียเพื่อการเรียนรู้อจะทำให้ผู้ใช้มีผลการเรียนรู้ที่สูงกว่า อีกทั้งมัลติมีเดียที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสามารถมีการปฏิสัมพันธ์ได้ จึงมีส่วนช่วยในการรู้จำได้มากขึ้น เพื่อให้ให้นักเรียนที่ผ่านการคัดเลือกเข้าศึกษาต่อในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ได้รู้ถึงขั้นตอนการส่งเอกสารรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา

Rachmadtullah, R., Ms, Z., and Syarif Sumantri, M. [8] ได้ศึกษาการพัฒนาสื่อมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์โดยใช้ในคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษาการเรียนรู้อของนักเรียนชั้นประถมศึกษา โดยให้นักเรียนเลือกเรียนรู้ได้ตามที่ต้องการผ่านบทเรียนคอมพิวเตอร์ที่มีปฏิสัมพันธ์ เพื่อถ่ายทอดเนื้อหาของบทเรียนโดยภายในสื่อมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์จะประกอบไปด้วย เสียง วิดีโอ แอนิเมชัน การมีปฏิสัมพันธ์ ภาพกราฟิก ตัวหนังสือ จากการศึกษางานวิจัยของ Rachmadtullah, R., Ms, Z., and Syarif Sumantri, M. [8] ทำให้ผู้วิจัยเห็นความสำคัญในการใช้มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ในการถ่ายทอดเนื้อหาให้ผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการใช้สื่อหลายแบบมาประกอบกัน ได้แก่ เสียง วิดีโอ แอนิเมชัน การมีปฏิสัมพันธ์ ภาพกราฟิก ตัวหนังสือ ทำให้ผู้ใช้เกิดการรับรู้ต่อเนื้อหาที่ผู้พัฒนาต้องการสื่อสารออกไป

Neil, P. M. and James, L. [9] ได้ศึกษาการใช้หนังสืออิเล็กทรอนิกส์มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ในห้องปฏิบัติการการศึกษาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ หลักสูตรปริญญาตรี ในมหาวิทยาลัยในสหราชอาณาจักร โดยส่วนประกอบของหนังสือที่สื่อถึงความเป็นมัลติมีเดีย ได้แก่ รูปภาพ และวิดีโอ ตัวหนังสือ พบว่านักเรียนกว่าร้อยละ 70 เห็นด้วยกับการใช้หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ และพบว่านักเรียนน้อยกว่าร้อยละ 40 ระบุว่าชอบหนังสืออิเล็กทรอนิกส์มากกว่าหนังสือแบบดั้งเดิม จากการศึกษางานวิจัยของ Neil, P. M. and James, L. [9] ทำให้ผู้วิจัยตระหนักได้ว่า ในปัจจุบันนักเรียนมีความพึงพอใจกับการเรียนรู้อแบบใหม่ เช่น ใช้สื่อใหม่ ใช้เทคโนโลยีใหม่ อันจะก่อให้เกิดการเรียนรู้ได้ที่ใดหรือเวลาใดก็ได้ ส่งผลให้ผู้เรียนหรือผู้ใช้เทคโนโลยีมีความสุขกับการเรียนรู้อมากยิ่งขึ้น

Marsono and Mingchang, W. [10] ได้ศึกษาการออกแบบหนังสือดิจิทัลมัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์ สำหรับการเรียนรู้อการวัดมาตริวิทยาในอุตสาหกรรม ผลจากการศึกษาพบว่า สื่อดิจิทัลมัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยให้นักเรียนสามารถเรียนรู้เกี่ยวกับมาตริวิทยาอุตสาหกรรมได้ทุกที่ทุกเวลา และสามารถทำการปรับปรุงเนื้อหาเกี่ยวกับการวัดมาตริวิทยาอุตสาหกรรมได้โดยเฉพาะ จากการศึกษางานวิจัยของ Marsono and Mingchang, W. [10] ทำให้ผู้วิจัยเห็นถึงการใช้มัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์เพื่อให้ผู้เรียนมีการรับรู้ที่สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถใช้สื่อมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้ทุกที่ทุกเวลาตาม que ผู้ใช้งานต้องการ และเป็นการเรียนรู้โดยอิสระขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้สื่อ ว่าต้องการจะเรียนรู้อเนื้อหาใดเป็นลำดับก่อนหรือหลัง ทำให้ผู้ใช้มีความสุขขณะใช้มัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง คือสื่อมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวงจรการพัฒนาระบบ 7 ขั้นตอน เป็นกรอบในการพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ประกอบไปด้วย เข้าใจปัญหา ศึกษาความเป็นไปได้ วิเคราะห์ ออกแบบ พัฒนาระบบ การปรับเปลี่ยน และบำรุงรักษา ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียด ดังนี้

- 1.1 เข้าใจปัญหา โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น สามารถแยกออกเป็น 6 ประเด็น
 - 1.1.1 ผู้มีสิทธิ์เข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน บางส่วนไม่ทราบขั้นตอนการดำเนินการส่งเอกสารรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา
 - 1.1.2 ผู้มีสิทธิ์เข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ปัจจุบันเป็นคน Gen Z ที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการใช้งานเทคโนโลยี และการรับข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต
 - 1.1.3 มีการเปลี่ยนแปลงเรื่องข้อกำหนดใช้เอกสารสำหรับรายงานตัวที่ต่างไปจากปีก่อน ๆ เช่น มีการใช้สำเนาบัตรประชาชนของบิดามารดา มีการใช้สำเนาทะเบียนบ้านของบิดามารดา เป็นต้น
 - 1.1.4 มัลติมีเดียในปัจจุบันนิยมพัฒนาให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
 - 1.1.5 การรับรู้เนื้อหาจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใช้สื่อหลายประเภทร่วมกัน ได้แก่ ภาพกราฟิก แอนิเมชัน เสียง ตัวหนังสือ การมีปฏิสัมพันธ์
 - 1.1.6 โปรแกรม Adobe Animate เป็นโปรแกรมเฉพาะสำหรับพัฒนามัลติมีเดีย และสามารถส่งออกไฟล์ได้หลายรูปแบบ รวมถึงการส่งออกไฟล์สำหรับใช้งานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต อีกทั้งยังสนับสนุนการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ โดยการใช้ภาษา Action Script 3.0

1.2 ศึกษาความเป็นไปได้ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ของสภาพปัจจุบัน เนื่องจากกลุ่มผู้ใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เป็นกลุ่มคนใน Gen Z คือมีความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตด้วยความทันสมัยของเทคโนโลยี มีพฤติกรรมมารับข่าวสารจากโลกออนไลน์ใช้เวลาส่วนใหญ่ในอินเทอร์เน็ต หากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเนื้อหาที่ต้องการส่งสารแก่กลุ่มคนเหล่านี้ด้วยการนำเทคโนโลยีและความสะดวกสบายเข้ามาใช้ จะสามารถเผยแพร่ข้อมูลได้มากขึ้น
- 1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ได้แก่ คอมพิวเตอร์พกพา ระบบปฏิบัติการแมคอินทอช CPU 2.4 GHz Intel Core I5 Memory 8 GB 1333 MHz DDR3 Graphic Intel HD Graphics 3000 512 MB HDD Solid State SATA Drive 240 GB โปรแกรม Adobe Illustrator ใช้สำหรับสร้างภาพกราฟิก

โปรแกรม Adobe Photoshop ใช้สำหรับตกแต่งภาพกราฟิก โปรแกรม Adobe Animate ใช้สำหรับทำระบบชุดสื่อดิจิทัล และควบคุมฟังก์ชันการทำงานโต้ตอบกับผู้ใช้งานและแสดงผลของระบบด้วย Action Script 3.0

- 1.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ของการเผยแพร่ข้อมูล ผู้วิจัยได้ศึกษาช่องทางต่าง ๆ ในการเผยแพร่มีเดียมีเดียปฏิสัมพันธ์ให้เข้าถึงกลุ่มเป้าหมาย พบว่าฝ่ายงานทะเบียนและประมวลผลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มีเว็บไซต์เพื่อประชาสัมพันธ์ข้อมูล คือ <http://regis.rmuti.ac.th/regis> ผู้วิจัยจึงนำมีเดียมีเดียปฏิสัมพันธ์มาเผยแพร่ในเว็บไซต์ของงานทะเบียนและประมวลผลของมหาวิทยาลัย

1.3 วิเคราะห์ จากการศึกษาเนื้อหาเกี่ยวกับการส่งเอกสารรายงานตัวเพื่อขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา ผู้วิจัยสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 หมวด ได้แก่ การป้อนข้อมูลประวัติ การขึ้นทะเบียนนักศึกษา การเตรียมเอกสารรายงานตัว โดยทั้ง 3 หัวข้อจะนำไปสู่การวิเคราะห์ระบบ ซึ่งภายในระบบจะแสดงเนื้อหาด้วยสื่อหลายประเภท ได้แก่ ภาพอินโฟกราฟิก แอนิเมชัน เสียง และการมีปฏิสัมพันธ์

- 1.4 ออกแบบ ผู้วิจัยได้กำหนดการออกแบบเป็น 5 ส่วน ประกอบไปด้วย

- 1.4.1 การออกแบบกราฟิก ผู้วิจัยได้ออกแบบกราฟิกของตัวละครและฉาก ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1.4.1.1 การออกแบบกราฟิกตัวละคร การออกแบบตัวละคร ผู้วิจัยได้ออกแบบตัวละครมีจำนวน 2 ตัวละคร คือตัวละครเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัย และตัวละครนักเรียน/นักศึกษา โดยมีการออกแบบโดยใช้สัดส่วนตัวละคร 1 : 3 ซึ่งตัวละครสัดส่วนดังกล่าวจะทำให้ตัวละครดูเด็กและมีความน่ารัก เพื่อให้มีความน่ารักเหมาะกับผู้ใช้งาน กำหนดให้ตัวละครทั้ง 2 เป็นเพศหญิง ซึ่งตัวละครเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยจะมีการอ้างอิงถึงเครื่องแบบและสีของการแต่งกายของเจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัย และตัวละครนักเรียน/นักศึกษาจะมีการอ้างอิงถึงเครื่องแบบและสีของการแต่งกายของโรงเรียนและมหาวิทยาลัย ซึ่งนำข้อมูลมาลดทอนรายละเอียดให้มีความเหมาะสมกับการออกแบบ ภายในมีเดียมีเดียปฏิสัมพันธ์ตัวละครทั้ง 2 จะทำหน้าที่คอยบอกเล่าเนื้อหา ขั้นตอนการปฏิบัติ และแนะนำข้อมูลต่าง ๆ ให้ผู้ใช้งาน ประกอบกับการแนะนำให้ผู้ใช้งานมีปฏิสัมพันธ์ร่วมด้วย

1.4.1.2 การออกแบบพื้นหลังและกราฟิกอื่น ๆ ผู้วิจัยเลือกใช้โทนสีพื้นหลังเป็นสีส้มสด ซึ่งเป็นสีประจำของมหาวิทยาลัย และออกแบบกราฟิกอื่น ๆ ที่ใช้ประกอบฉากให้เป็นภาพอินโฟกราฟิกที่สื่อความหมายของการศึกษา หรือเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับการศึกษาในมหาวิทยาลัย

- 1.4.2 การออกแบบการเคลื่อนไหว ผู้วิจัยได้ศึกษาเทคนิคการสร้างภาพเคลื่อนไหวด้วย 12 หลักการแอนิเมชัน และวิธีการทำแอนิเมชันในโปรแกรม Adobe Animate

พบว่าสามารถสร้างภาพเคลื่อนไหวได้ 2 วิธี คือวิธี Frame by Frame และวิธี Motion Tween โดยวิธี Frame by Frame เป็นการถ่ายภาพเคลื่อนไหวโดยใช้ภาพแต่ละภาพมาเรียงต่อกัน ส่วนวิธี Motion Tween คือการนำภาพมากำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายให้แตกต่างกัน ทำให้มองเห็นภาพนั้นมีการเคลื่อนไหว ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ทั้ง 2 เทคนิคขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของกราฟิกในแต่ละเนื้อหา

1.4.3 การออกแบบเสียง ผู้วิจัยได้กำหนดการออกแบบเสียงและการเลือกใช้เสียง โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เสียงบรรยาย เสียงประกอบ และเสียงเพลงบรรยายภาพ โดยกำหนดให้มีรายละเอียด ดังนี้

1.4.3.1 เสียงบรรยาย ผู้วิจัยกำหนดเสียงบรรยายให้มีความสอดคล้องกับตัวละคร และมีความเหมาะสมกับนักศึกษาใหม่ ซึ่งเสียงบรรยายจะเป็นเสียงที่คอยอธิบายขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการรับรู้และเข้าใจในวิธีการต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

1.4.3.2 เสียงประกอบ ผู้วิจัยกำหนดให้มีเสียงประกอบเมื่อมีการวางเมาส์ไว้บนปุ่มที่สามารถคลิกได้ในมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ทั้งหมด เพื่อเป็นการกระตุ้นให้ผู้ใช้อธิบายถึงการมีปฏิสัมพันธ์

1.4.3.3 เสียงเพลงบรรยายภาพ ผู้วิจัยกำหนดให้เป็นเพลงบรรเลง ไม่มีคำร้อง มีทำนองที่ผู้ฟังฟังแล้วรู้สึกสบาย ฟ่อนคลาย เพื่อกระตุ้นให้ผู้ใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้รับรู้ถึงเนื้อหาภายในสื่อ

1.4.4 การออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน เพื่อเพิ่มความสวยงามและให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานตามรูปแบบของระบบที่ใช้งานจริง เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำความรู้จากการใช้มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ไปใช้ได้จริง

1.4.5 การออกแบบรูปแบบการใช้งาน ซึ่งในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานของนักศึกษา โดยมีส่วนประกอบดังนี้

1.4.5.1 เมนูหลัก ประกอบไปด้วย หน้าแรกและหน้าเมนู

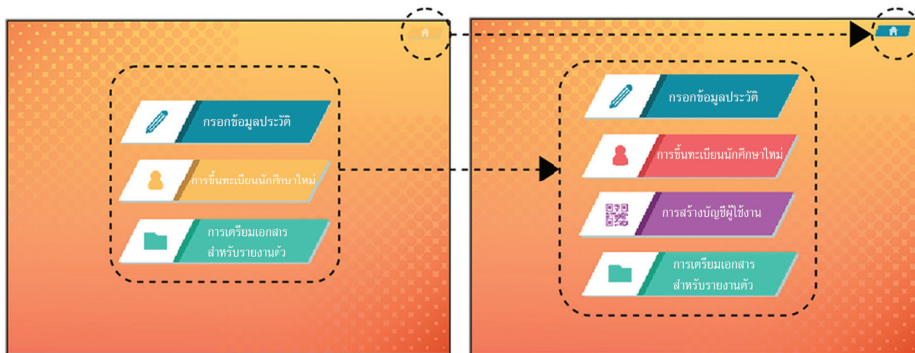
1.4.5.2 เมนูย่อย ประกอบไปด้วย ป้อนข้อมูลประวัติ การขึ้นทะเบียนนักศึกษา และการเตรียมเอกสารรายงานตัว

1.4.5.3 องค์ประกอบภายใน ประกอบไปด้วย ตัวละครนำเสนอเรื่องราวในแอนิเมชัน อินโฟกราฟิกและตัวอักษรประกอบการอธิบายเนื้อหาของตัวละคร มีการแนะนำขั้นตอนที่ละขั้นตอนโดยให้ผู้มีส่วนร่วมในการมีปฏิสัมพันธ์เสมือนได้ใช้ลงมือปฏิบัติจริง ๆ มีเสียงบรรยายของตัวละคร มีเสียงประกอบเมื่อมีการคลิกเมาส์ มีเสียงดนตรีเพลงบรรยายภาพเพื่อกระตุ้นให้ผู้ใช้งานมีความสนใจต่อการใช้งานสื่อ

1.5 พัฒนาระบบ ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Adobe Animate โดยเริ่มจากการกำหนดขนาดหน้าจอเป็น 600 x 800 px เพื่อให้มีความสอดคล้องกับหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่จะนำมัลติมีเดีย

ปฏิสัมพันธ์ไปแสดงผลผ่านเว็บไซต์ของงานทะเบียนและประมวลผลของมหาวิทยาลัยฯ ซึ่งผู้วิจัยมีการจัดทำ Story Board เพื่อแบ่งหน้าการใช้งานออกเป็นแต่ละแผ่นงาน (Scene) ซึ่งมีขั้นตอนการพัฒนา ดังนี้

- 1.5.1 นำเข้าสื่อต่าง ๆ โดยใส่ Layer ซึ่งแยกประเภทกัน ได้แก่ 1) Layer ภาพพื้นหลัง 2) Layer ภาพกราฟ 3) Layer ภาพเคลื่อนไหว 4) Layer วิดีโอ 5) Layer ปุ่มกด 6) Layer เสียง 7) Layer สำหรับเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ ด้วยภาษา Action Script 3.0 โดยส่วนต่าง ๆ จะถูกนำเข้ามาประกอบกันตามเนื้อเรื่องที่ได้ออกแบบไว้ใน Story Board ซึ่งสื่อต่าง ๆ เหล่านี้ถูกนำเข้ามาไว้ใน Layer ที่แยกประเภทกัน เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขและปรับเปลี่ยนชิ้นงาน
- 1.5.2 ทำภาพเคลื่อนไหวด้วยโดยยึด 12 หลักการแอนิเมชันด้วยเทคนิค Frame by Frame และ Motion Tween ตามความเหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วยการเคลื่อนไหวของตัวละคร การเคลื่อนไหวของภาพอินโฟกราฟิก และการเคลื่อนไหวของปุ่มกด เพื่อให้การทำงานมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น
- 1.5.3 เขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ ซึ่งเป็นโปรแกรมคำสั่งควบคุมด้วยภาษา Action Script 3.0 สำหรับควบคุมการแสดงผลของหน้าจอ
- 1.5.4 ส่งออกไฟล์ในรูปแบบ .exe เพื่อให้คอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows สามารถใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้ และส่งออกไฟล์รูปแบบ .swf เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทุกระบบที่มี Flash Player สามารถใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้ และส่งออกไฟล์ในรูปแบบ .html สำหรับใช้แสดงผลบนเว็บไซต์
- 1.6 การปรับเปลี่ยนจะเกิดขึ้นได้ ต้องมีการนำมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบเสียก่อน โดยผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการทดสอบระบบ ดังนี้
 - 1.6.1 ทดสอบด้วยตนเอง เป็นการทดสอบพื้นฐานว่ามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์มีการทำงานของระบบถูกต้องหรือไม่ จากการทดสอบด้วยตนเอง พบว่าระบบมีการเชื่อมโยงและมีการแสดงผลหน้าจอได้ถูกต้อง แต่มีคำภาษาไทยที่ใช้ในเมนูผิบบางคำ ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงแก้ไขให้ถูกต้อง
 - 1.6.2 ทดสอบด้วยผู้เชี่ยวชาญการวัดคุณภาพสื่อ โดยแบ่งออกเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหา ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิค โดยผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาจะทดสอบระบบว่ามีการแสดงเนื้อหาภายในมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ว่ามีความถูกต้องครบถ้วนหรือไม่ ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบจะทดสอบระบบด้านการออกแบบภายในมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ไม่ว่าจะเป็นกราฟิก การเคลื่อนไหว การใช้สี การจัดองค์ประกอบ ว่ามีการออกแบบความเหมาะสมกับเนื้อหาเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน และเหมาะสมกับกลุ่มผู้ใช้หรือไม่ ส่วนผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคจะทดสอบระบบภายในมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ว่ามีการทำงานตามฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ถูกต้องหรือไม่ ซึ่งผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ด้านมีข้อเสนอแนะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การปรับเปลี่ยนตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

จากรูปที่ 2 ผู้วิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบต่าง ๆ ตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ โดยปรับเปลี่ยนสีของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน เนื่องจากสีมีความกลมกลืนกับสีพื้นหลังมากเกินไป ทำให้ใช้งานยาก ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาได้มีการแนะนำให้ปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนให้เป็นปัจจุบัน ได้แก่ เพิ่มเอกสารหลักฐานในการรายงานตัว โดยเพิ่มสำเนาบัตรประชาชนและสำเนาทะเบียนบ้านของบิดามารดา ของนักศึกษา เพิ่มเมนูการสร้างบัญชีผู้ใช้งาน เพื่อให้นักศึกษาสามารถสร้างบัญชีสำหรับใช้งานในระบบบริการสารสนเทศเพื่อการศึกษาของมหาวิทยาลัยได้

1.7 การบำรุงรักษา เป็นการตรวจสอบหา Bug ภายในแพลตฟอร์มเดียวปฏิสัมพันธ์ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1 แบบประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มเดียวปฏิสัมพันธ์สำหรับผู้เชี่ยวชาญ โดยกำหนดรูปแบบข้อคำถามใช้มาตรประมาณค่า 5 ระดับ ของ Likert Scale [11]

2.2 แบบวัดการรับรู้ก่อน-หลังใช้งานแพลตฟอร์มเดียวปฏิสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เป็นแบบทดสอบปรนัย 4 ตัวเลือก แต่มีเพียงคำตอบเดียวที่ถูกต้องที่สุด

2.3 แบบสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานแพลตฟอร์มเดียวปฏิสัมพันธ์ โดยกำหนดรูปแบบข้อคำถามใช้มาตรประมาณค่า 5 ระดับ ของ Likert Scale [11] ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลทั้ง 3 อย่าง จะถูกประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านแบบสอบถาม จำนวน 3 ท่าน เพื่อหาค่า IOC ของข้อคำถาม โดยคัดเลือกข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป มาจัดทำเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล

3. การนำไปทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง

โดยกลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 โรงเรียนสุนทรารวีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ภาคการเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 46 คน ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างโดยใช้ความน่าจะเป็น ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่ม

ผลการวิจัย

1. แพลตฟอร์มเดียวปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ย 4.72 โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ได้แก่ ด้านเนื้อหาที่มีค่าเฉลี่ย 4.83 มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก รองลงมาคือ

ด้านเทคนิคมีค่าเฉลี่ย 4.77 มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก และลำดับสุดท้ายคือ ด้านการออกแบบมีค่าเฉลี่ย 4.57 มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก

2. ผลการวัดระดับการรับรู้ก่อนและหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์พบว่า

2.1 ก่อนใช้งานกลุ่มตัวอย่างมีการรับรู้ร้อยละ 47.82 มีการรับรู้อยู่ในระดับน้อยที่สุด

2.2 หลังการใช้งานกลุ่มตัวอย่างมีการรับรู้ร้อยละ 84.64 มีการรับรู้ในระดับมากที่สุด

3. ผลการศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากมีค่าเฉลี่ย 4.39 โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ได้แก่ ด้านเนื้อหา มีค่าเฉลี่ย 4.50 มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก รองลงมาคือด้านเทคนิคมีค่าเฉลี่ย 4.35 มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก และลำดับสุดท้ายคือ ด้านการออกแบบมีค่าเฉลี่ย 4.32 มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

อภิปรายผล

1. ผู้วิจัยได้พัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน โดยศึกษาข้อมูลเนื้อหาให้ถี่ถ้วน เพื่อให้เนื้อหา มีความทันสมัย และพัฒนามัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์อันประกอบไปด้วยสื่อหลายประเภท ได้แก่ ภาพอินโฟกราฟิก แอนิเมชัน เสียง ตัวอักษร และใช้ตัวละครในการดำเนินเรื่องราวเพื่อแนะนำวิธีการรายงานตัวในแต่ละขั้นตอนประกอบกับการมีปฏิสัมพันธ์ร่วมด้วย ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานเพื่อรับข้อมูลก่อน-หลังได้ตามความต้องการ อีกทั้งผู้วิจัยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวงจรการพัฒนากระบวนการ SDLC 7 ขั้นตอน เป็นกรอบในการพัฒนาปฏิสัมพันธ์ ควบคุมการแสดงผลและการเชื่อมโยงองค์ประกอบภายในของมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุภาษา Action Script 3.0 จึงทำให้มัลติมีเดียที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Samutsri, W., Liamthaisong, K., and Au-Areemit, S. [6] ได้ศึกษาการพัฒนาปฏิสัมพันธ์แบบปฏิสัมพันธ์เพื่อส่งเสริมความฉลาดทางอารมณ์สำหรับนักเรียนระดับประถมศึกษาปีที่ 6 โดยพัฒนาสื่อในรูปแบบมัลติมีเดียพื้นฐาน ซึ่งนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกัน ประกอบกับการมีความสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้งานได้ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rachmادتullah, R., Ms, Z., and Syarif Sumantri, M. [8] ได้ศึกษาการพัฒนาปฏิสัมพันธ์โดยใช้ในคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษาการเรียนรู้อของนักเรียนชั้นประถมศึกษา โดยภายในมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์จะประกอบไปด้วย เสียง วิดีโอ แอนิเมชัน การมีปฏิสัมพันธ์ ภาพกราฟิก ตัวอักษร ซึ่งองค์ประกอบของสื่อหลายประเภทสามารถถ่ายทอดเนื้อหาที่ผู้วิจัยต้องการจะสื่อสารได้เป็นอย่างดี

2. จากการวัดการรับรู้ก่อนและหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่กลุ่มตัวอย่างได้ใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ กลุ่มตัวอย่างมีการรับรู้เนื้อหาเกี่ยวกับการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานสูงกว่าก่อนใช้งานเป็นผลเนื่องมาจากมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นใช้สื่อหลายประเภทมาผสมผสานกัน ได้แก่ เสียง แอนิเมชัน ภาพอินโฟกราฟิก ตัวอักษร การมีปฏิสัมพันธ์ สามารถสร้างการรับรู้ที่เกิดจากการมองเห็น การรับรู้ที่เกิดจากการได้ยิน การรับรู้ที่เกิดจากการสัมผัส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Borchakkaphan, S., Hormsabsin, J., Malahorn, T., and Chaijitwanichkul, P. [7] ได้ศึกษาการพัฒนาปฏิสัมพันธ์เรื่องคำศัพท์ภาษาอังกฤษ

ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยมัลติมีเดียเพื่อการเรียนรู้จะทำให้ผู้ใช้มีผลการเรียนรู้ที่สูงกว่า อีกทั้งมัลติมีเดียที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีการปฏิสัมพันธ์ จึงมีส่วนช่วยในการรู้จำได้มากขึ้น เพื่อให้ให้นักเรียนที่ผ่านการคัดเลือกเข้าศึกษาต่อในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้รู้ถึงขั้นตอนการส่งเอกสารรายงานตัวและขั้นตอนการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Neil, P. M. and James, L. [9] ได้ศึกษาการใช้หนังสืออิเล็กทรอนิกส์มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ในห้องปฏิบัติการการศึกษาศาสตร์ชีวภาพ หลักสูตรปริญญาตรี ในมหาวิทยาลัยในสหราชอาณาจักร โดยส่วนประกอบของหนังสือที่สื่อถึงความเป็นมัลติมีเดีย ได้แก่ รูปภาพ และวิดีโอ ตัวอักษร ซึ่งการพัฒนาสื่อการเรียนรู้แบบใหม่โดยใช้ความก้าวหน้าและทันสมัยของเทคโนโลยีเข้ามาใช้ ส่งผลให้ผู้เรียนมีความสุขกับการเรียนรู้มากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีการรับรู้ในเนื้อหาสูงขึ้นตามด้วย

3. จากการศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างหลังใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ พบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากมีค่าเฉลี่ย 4.39 เป็นผลสืบเนื่องมาจากมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์มีคุณภาพทั้งด้านเนื้อหา ด้านการออกแบบ และด้านเทคนิค โดยผู้วิจัยได้ออกแบบอินโฟกราฟิกที่ช่วยย่อเนื้อหาที่มีปริมาณมากมาเป็นภาพกราฟิกให้ผู้ใช้งานเห็นแล้วเข้าใจง่าย มีการใช้ตัวละครเป็นตัวแทนของนักเรียน/นักศึกษา และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัย ในการนำเสนอเรื่องราว มีการใช้การเคลื่อนไหวของอินโฟกราฟิก การเคลื่อนไหวของตัวละคร การเคลื่อนไหวของปุ่มกดที่สามารถมีปฏิสัมพันธ์ได้ทำให้ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในการรับสาร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saitong, P. [3] ได้ศึกษาการพัฒนาโมชันกราฟิกเพื่อประชาสัมพันธ์หลักสูตรระดับปริญญาตรี คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้มีการใช้ตัวละครในการเล่าเรื่อง โดยออกแบบตัวละครให้เป็นตัวแทนของนิสิตในการแนะนำข้อมูลหลักสูตร ออกแบบสัญลักษณ์ต่าง ๆ ให้สามารถสื่อความหมายแทนข้อมูลที่มีจำนวนมาก มีการสร้างการเคลื่อนไหวใช้เสียงบรรยาย เสียงดนตรี และเสียงประกอบต่าง ๆ เพื่อกระตุ้นความสนใจ ซึ่งมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นก็มีองค์ประกอบดังกล่าว อีกทั้งผู้ใช้ยังสามารถใช้งานมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ได้ทุกที่ทุกเวลาตามที่คุณใช้งานต้องการ และเป็นการเรียนรู้โดยอิสระขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ทำให้ผู้ใช้มีความสุขขณะใช้งานมัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Marsono and Mingchang, W. [10] ได้ศึกษาการออกแบบหนังสือดิจิทัลมัลติมีเดียแบบมีปฏิสัมพันธ์ สำหรับการเรียนรู้การวัดมาตราวิทยาในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยให้นักเรียนสามารถเรียนรู้เกี่ยวกับมาตราวิทยาอุตสาหกรรมได้ทุกที่ทุกเวลา และสามารถทำการปรับปรุงเนื้อหาเกี่ยวกับการวัดมาตราวิทยาอุตสาหกรรมได้โดยเฉพาะ

บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนา มัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์เพื่อการเรียนรู้วิธีการส่งเอกสารรายงานตัวและการขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มีกรอบในการพัฒนาโดยประยุกต์ใช้วงจรพัฒนาระบบงาน SDLC 7 ขั้นตอน ควบคุมการแสดงผลและการเชื่อมโยงองค์ประกอบภายในของมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ ภาษา Action Script 3.0 เพื่อสร้างความรู้เกี่ยวกับการกรอกข้อมูลประวัติ การขึ้นทะเบียนนักศึกษา การสมัครบัญชีผู้ใช้งาน และการเตรียมเอกสารรายงานตัวแก่นักเรียนที่ผ่านการคัดเลือกและมีสิทธิ์เข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยมัลติมีเดียปฏิสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของงานทะเบียนและประมวลผลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

References

- [1] Yamwagee, N. (1999). **Category 3 Educational System**. Access (18 June 2019). Available (<http://www.moe.go.th/hp-vichai/ex-prb05-3.htm>)
- [2] Ma-oon, R. (2016). Effective Teaching and Learning in Higher Education. **Journal of Southern Technology**. Vol. 9, No. 2, pp 169-176
- [3] Saitong, P. (2017). The Development of Motion Infographic for the Undergraduate Program Promotion, Faculty of Informatics, Maharakham University. **Veridian E-Journal, Silpakorn University**. Vol. 10, No. 2, pp. 1330-1241
- [4] Nuallaong, K. (2013). **System Development Life Cycle: SDLC**. Access (20 June 2019). Available (<http://kerati-nuallaong.blogspot.com/2012/03/system-development-life-cycle-sdlc.html>)
- [5] Somabut, A. (2013). **Constructivist Theory**. Access (20 June 2019). Available (<https://teacherweekly.wordpress.com/2013/09/25/constructivist-theory>)
- [6] Samutsri, W., Liamthaisong, K., and Au-Areemit, S. (2018). Multimedia Simulation for Child Emotional Intelligent Development in Prathomsuksa 6 Students. **NRRU Community Research Journal**. Vol. 12, No. 2, pp. 229-242
- [7] Borchakkaphan, S., Hormsabsin, J., Malahorm, T., and Chajitwanichkul, P. (2016). Development of Multimedia's English Vocabulary with Augmented Reality Technology. **Journal of Innovative Technology Management**. Vol. 3, No. 2, pp. 58-64
- [8] Rachmadtullah, R., Ms, Z., and Syarif Sumantri, M. (2018). Development of Computer-Based Interactive Multimedia: Study on Learning in Elementary Education. **International Journal of Engineering and Technology**. Vol. 7, No. 4, pp. 2035-2038. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.16384
- [9] Neil, P. M. and James, L. (2017). Multimedia Interactive eBooks in Laboratory Bioscience Education. **Higher Education Pedagogies**. Vol. 2, Issue 1, pp. 28-42. DOI: 10.1080/23752696.2017.1338531
- [10] Marsono and Mingchang, W. (2016). Designing A Digital Multimedia Interactive Book for Industrial Metrology Measurement Learning. **International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS)**. Vol. 8, No. 5, pp. 39-46. DOI: 10.5815/ijmeecs.2016.05.05
- [11] Chai-ngam, R. (2019). **Likert Rating Scales**. Access (7 November 2019). Available (<https://www.gotoknow.org/posts/659229>)

ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยต่อผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเปลือกข้าวโพด

The Effects of Corn Varieties, Layers of Corn Husks, and Fiber Extraction Methods on Yields and Physical Properties of Corn Husk Fibers

วัลภา แท้มทอง^{1*} สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ¹ และขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ¹

Walapa Tamthong^{1*} Suteeluk Kraisuwan¹ and Kajijarus Pirothamsiri¹

Received: October 2, 2019; Revised: November 19, 2019; Accepted: November 20, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยต่อผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด โดยทดลองใช้ข้าวโพด 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นเปลือกข้าวโพด 2 ชั้น ได้แก่ เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน และวิธีการแยกเส้นใย 6 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 2 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 3 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5 % วิธีที่ 4 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0 % วิธีที่ 5 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5 % และวิธีที่ 6 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0 % จัดสิ่งทดลองแบบ $3 \times 2 \times 6$ แฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการวิจัย พบว่าพันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อผลผลิตและขนาดเส้นใย ($p \leq 0.01$) ชั้นเปลือกข้าวโพดมีผลต่อความยาวและความหยิกงอของเส้นใย ($p \leq 0.01$ และ 0.05 ตามลำดับ) วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อผลผลิต ความยาวและขนาดของเส้นใย ($p \leq 0.01$) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพดมีผลต่อผลผลิต ความยาว ขนาดและความหยิกงอของเส้นใย ($p \leq 0.01$ 0.01 0.05 และ 0.05 ตามลำดับ) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อผลผลิต ความยาวและความหยิกงอของเส้นใย ($p \leq 0.01$ 0.01 และ 0.05 ตามลำดับ) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อผลผลิตเส้นใย ($p \leq 0.01$) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อผลผลิตและความยาวเส้นใย ($p \leq 0.01$)

คำสำคัญ : พันธุ์ข้าวโพด; ชั้นเปลือกข้าวโพด; วิธีการแยกเส้นใย; ผลผลิตเส้นใย; สมบัติทางกายภาพของเส้นใย

¹ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok

* Corresponding Author E-mail Address: agrwpt@ku.ac.th

Abstract

The objective of this research was to study the effects of corn varieties, layers of corn husks, and fiber extraction methods on yields and physical properties of corn husk fibers. Three corn varieties: Insee 2, Hi-brix 3, and ATS 12, two layers of corn husks: outer and inner corn husks and six fiber extraction methods: method 1 using 2.5 g/l alkaline solution, method 2 using 5.0 g/l alkaline solution, method 3 using 2.5 g/l alkaline and 0.5 % enzyme solution, method 4 using 2.5 g/l alkaline and 1.0 % enzyme solution, method 5 using 5.0 g/l alkaline and 0.5 % enzyme solution, and method 6 using 5.0 g/l alkaline and 1.0 % enzyme solution were utilized. The experimental design used was $3 \times 2 \times 6$ factorial experiments in randomized complete block design with three replications. The results showed that corn varieties significantly affected fiber yield and fiber fineness ($p \leq 0.01$). The layers of corn husks significantly affected fiber length and fiber crimp ($p \leq 0.01$ and 0.05 respectively). The fiber extraction methods significantly affected fiber yield, fiber length, and fiber fineness ($p \leq 0.01$). The interaction between the corn varieties and layers of corn husks significantly affected fiber yield, fiber length, fiber fineness, and fiber crimp ($p \leq 0.01$, 0.01 , 0.05 and 0.05 respectively). The interaction between the corn varieties and fiber extraction method significantly affected fiber yield, fiber length, and fiber crimp ($p \leq 0.01$, 0.01 , and 0.05 respectively). The interaction between the layers of corn husks and fiber extraction method significantly affected fiber yield ($p \leq 0.01$). The interaction between corn varieties, layers of corn husks, and fiber extraction method significantly affected fiber yield and fiber length ($p \leq 0.01$).

Keywords: Corn Varieties; Layers of Corn Husk; Fiber Extraction Methods; Fiber Yield; Fiber Physical Properties

บทนำ

ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Zea mays L. var. saccharata* วงศ์ Poaceae เป็นสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตเพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ [1] มีจำหน่ายทั้งแบบฝักสดและแบบแปรรูป ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ประเทศไทยส่งออกสินค้าข้าวโพดหวานแปรรูปจำนวน 17,029 ตัน คิดเป็นเงิน 478.19 ล้านบาท ซึ่งมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 28.66 [2] จากการบริโภคข้าวโพดหวานปริมาณมาก ทำให้มีเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันมีการนำเปลือกข้าวโพดไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น ทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง ทำกระดาษและทำวัสดุผสม ในขณะที่เดียวกันอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ต้องการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติ

จากวัตถุประสงค์ภาคการเกษตร เพื่อสร้างนวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในกระบวนการผลิตสิ่งทอที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีการวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การพัฒนาเส้นใยธรรมชาติจากไฟ กัลวย ต้นชาและบัวหลวง เป็นต้น

เปลือกข้าวโพดหวานมีลักษณะเป็นแผ่นยาวรี ขนาดค่อนข้างใหญ่ ความยาวประมาณ 14 - 32.5 เซนติเมตร ความกว้างประมาณ 5 - 10 เซนติเมตร ประกอบด้วยเส้นใยที่เกาะกลุ่มกันมีส่วนที่เป็นเส้นหนาเรียงห่างกันและคั่นด้วยส่วนที่เป็นแผ่นบาง ซึ่งส่วนของเส้นหนาสสามารถแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้ การแยกเส้นใยจากใบพืชนิยมใช้วิธีการหมักในน้ำ การใช้สารเคมีและการใช้เอนไซม์ การแยกเส้นใยด้วยการหมักในน้ำเป็นการกำจัดเพกทินออกจากผนังเซลล์ มักทำร่วมกับกระบวนการทางเชิงกล เช่น การขัดเส้นใย การทุบเส้นใย เพื่อแยกเนื้อเยื่อพืชที่เปื่อยยุ่ยออกจากเส้นใย เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย แต่ใช้เวลานานประมาณ 2 - 5 เดือน และขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะหยาบ [3] การแยกเส้นใยด้วยสารเคมี เช่น การใช้สารละลายด่าง ต้องเลือกใช้ระดับความเข้มข้นและอุณหภูมิในการแยกเส้นใยให้เหมาะสม เส้นใยที่ได้จะละเอียดกว่าการหมักในน้ำ แต่จะมีลักษณะแข็ง กระด้างและเปราะ [4] การแยกเส้นใยด้วยการใช้เอนไซม์ เป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะเอนไซม์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ในน้ำทิ้ง [5] แต่ต้องใช้วิธีแยกเส้นใยแบบอื่นร่วมด้วย เอนไซม์ที่ใช้ได้มีหลายกลุ่ม เช่น เซลลูเลส เพกทิเนส เฮมิเซลลูเลส ขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของเส้นใยที่ต้องการ และต้องควบคุมสภาวะให้เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจะทำให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพดี

ดังนั้น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ต่าง ๆ จะเป็นแนวทางการพัฒนาเส้นใยที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งทอ และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติให้หลากหลายขึ้น นอกจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และช่วยลดปริมาณขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ด้านสิ่งทอต่อไป การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เฉพาะเพื่อศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยต่อผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 เปลือกของฝักข้าวโพดหวานจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินทรี 2 จากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (ไร่สุวรรณ) อำเภอบางบาล จังหวัดนครราชสีมา พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 จากตลาดสี่มุมเมือง อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี โดยคัดเลือกจากข้าวโพดหวานฝักสดที่มีน้ำหนักทั้งฝักประมาณ 300 - 400 กรัม

1.2 สารเคมีที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; $NaOH$) ชนิดเม็ด น้ำหนักเม็ดละ 0.1 กรัม ผลิตโดย Ajax Finechem Pty Limited ประเทศออสเตรเลีย เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ค่ากิจกรรม (Activity) ของเอนไซม์ประมาณ 31,000 หน่วยต่อกรัม ผลิตโดย Tokyo Chemical Industry Limited ประเทศญี่ปุ่น และกรดแอซิติก (Acetic Acid) ความเข้มข้น 100 % ผลิตโดย Merck KGaA ประเทศเยอรมนี

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล METTLER TOLEDO รุ่น PL 403 น้ำหนักสูงสุด 140 กรัม ความละเอียด 0.001 กรัม

1.4 ตู้อบลมร้อน BINDER รุ่น FD 260

1.5 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ Memmert รุ่น WNE 29

2. วิธีการ

การวิจัยนี้ใช้ข้าวโพด 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นเปลือกข้าวโพดแบ่งเป็น 2 ชั้น ได้แก่ เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน และวิธีการแยกเส้นใย 6 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 2 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 3 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5 % วิธีที่ 4 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0 % วิธีที่ 5 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5 % และวิธีที่ 6 การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0 % จัดสิ่งทดลองแบบ $3 \times 2 \times 6$ แฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ ($3 \times 2 \times 6$ Factorial Experiment in Randomized Complete Block Design) รวมทั้งสิ้น 36 สิ่งทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

2.1 การเตรียมเปลือกข้าวโพด

แยกเปลือกข้าวโพด 2 ชั้นในสุดและ 2 ชั้นนอกสุดออก แบ่งเปลือกข้าวโพดที่เหลือออกเป็น 2 กลุ่มเท่า ๆ กัน กลุ่มที่อยู่ด้านในจัดเป็นเปลือกชั้นใน และกลุ่มที่อยู่ด้านนอกจัดเป็นเปลือกชั้นนอก นำเปลือกข้าวโพดตากแห้งในสภาพแวดล้อมปกติเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 2 °C ระยะเวลา 90 นาที แล้วฟุ้งในตู้ดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำขั้นตอนการอบแห้งและการฟุ้งในตู้ดูดความชื้น จนกระทั่งน้ำหนักของเปลือกข้าวโพดคงที่ ตัดส่วนล่าง (ส่วนที่ติดกับก้านฝัก) และส่วนบนของเปลือกข้าวโพดแต่ละใบออกข้างละ 1 นิ้ว

2.2 การแยกกลุ่มเส้นหนาของเปลือกข้าวโพด

แช่เปลือกข้าวโพดในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนเปลือกข้าวโพดต่อน้ำเท่ากับ 1 : 50 ใช้ลิกคอนกรีตตัวหนอนทับเปลือกข้าวโพดให้จมน้ำเป็นเวลา 30 วัน นำเปลือกข้าวโพดขึ้นจากน้ำ ใช้มือสาบแผ่นบางที่เปื่อยยุ่ยออก เพื่อเอาเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นหนามาใช้ในการทดลองต่อไป แล้วล้างกลุ่มเส้นหนาด้วยน้ำประปาและตากแห้งในสภาพแวดล้อมปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 2 °C ระยะเวลา 90 นาที แล้วฟุ้งในตู้ดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำขั้นตอนการอบแห้งและการฟุ้งในตู้ดูดความชื้น จนกระทั่งน้ำหนักของกลุ่มเส้นหนาคงที่

2.3 การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพด

2.3.1 การแยกเส้นใยโดยการใช้สารละลายต่าง (วิธีที่ 1 - 2) เตรียมสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และ 5.0 กรัมต่อลิตร และใช้อัตราส่วนกลุ่มเส้นหนาของเปลือกข้าวโพดต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 100 ต้มกลุ่มเส้นหนาของเปลือกข้าวโพดในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 60 นาที กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลาย แล้วล้างเส้นใยด้วยน้ำประปาดังนั้นไม่มีสี และมีค่า pH 6 - 7 นำเส้นใยตากแห้งและอบแห้งตามขั้นตอนในข้อ 2.2 และเก็บเส้นใยในถุงพลาสติกปิดสนิท

2.3.2 การแยกเส้นใยโดยการใช้น้ำสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ (วิธีที่ 3 - 6) เตรียมสารละลายต่าง ต้มกลุ่มเส้นหนาของเปลือกข้าวโพด ทำความสะอาดเส้นใย ตากแห้งและอบแห้งเส้นใยตามขั้นตอนในข้อ 2.3.1 เตรียมสารละลายเอนไซม์โดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส 0.5 % และ 1.0 % ของน้ำหนักเส้นใยแห้งที่ได้จากการแยกเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง และใช้อัตราส่วนเส้นใยเปลือกข้าวโพดต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 30 จากนั้นแช่เส้นใยในสารละลายเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 55 °C เวลา 60 นาที กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลาย แล้วล้างเส้นใยด้วยน้ำประปาจนน้ำใสไม่มีสีและมีค่า pH 6 - 7 นำเส้นใยตากและอบแห้งตามขั้นตอนในข้อ 2 และเก็บเส้นใยในถุงพลาสติกปิดสนิท

2.4 การหาผลผลิตเส้นใย ทำโดยชั่งน้ำหนักเส้นใยด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลทศนิยม 3 ตำแหน่ง และคำนวณผลผลิตเส้นใยดังนี้

$$\text{ผลผลิตเส้นใย (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเส้นใย (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเปลือกข้าวโพด (กรัม)}} \times 100 \quad (1)$$

2.5 การทดสอบเส้นใย

ควบคุมสภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิเท่ากับ 27 ± 2 °C และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 65 ± 2 % ทดสอบความยาวเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM Designation: D 5103 - 01 Standard Test Method for Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single - Fiber Test) ทดสอบขนาดเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM Designation: D 1577 - 01 Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers (Option B Single - Fiber Weighing) และทดสอบความหยิกงอของเส้นใยตามวิธีการของ Udomkijdecha, V. [6]

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลผลผลิตเส้นใย ความยาวเส้นใย ขนาดเส้นใยและความหยิกงอของเส้นใย โดยใช้ค่าเฉลี่ย (\bar{X}) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแบบจำแนกสามทาง (Three - Way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้ Bonferroni

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ผลผลิตเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยอยู่ระหว่างร้อยละ 15.90 - 27.49 โดยเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยมากที่สุด และเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยน้อยที่สุด ข้าวโพดแต่ละพันธุ์และวิธีการแยกเส้นใยต่างกันให้ผลผลิตเส้นใยต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นในให้ผลผลิตเส้นใยใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ผลผลิต (ร้อยละ)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	27.49	0.29
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	23.14	0.36
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	23.90	0.99
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	23.89	0.74
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	19.61	1.23
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	20.78	0.85
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	24.62	0.39
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	20.98	0.52
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	21.70	0.34
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	19.60	0.18
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	18.57	0.51
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	15.96	0.83
พันธุ์ไฮ-บรிகซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	25.16	0.19
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	23.00	0.55
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	21.63	0.34
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	16.70	1.13
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	17.24	0.42
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	16.67	1.65
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	23.99	0.27
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	22.85	1.27
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	20.07	0.28
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	19.84	0.20
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	17.20	0.65
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	15.90	0.58
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	23.23	0.14
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	20.14	0.69
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	17.14	0.41
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	20.67	0.25
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	17.31	0.79
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	16.46	0.97
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	26.66	0.86
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	21.81	0.71

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน (ต่อ)

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ผลผลิต (ร้อยละ)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	22.31	0.24
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	22.42	0.80
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	19.20	0.13
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	17.89	1.03

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า พันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยมากที่สุด (ร้อยละ 21.69) รองลงมาคือ เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 (ร้อยละ 20.44) และเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 (ร้อยละ 20.02) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 และเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) จากการสังเกตพบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 มีผิวค่อนข้างหยาบและหนามีกุ่มเส้นใยหนาวยาว (Long Thick Stands) จำนวนมากสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนโดยเฉพาะเปลือกชั้นนอกสุด จึงทำให้มีผลผลิตเส้นใยมากที่สุด เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ประกอบด้วยส่วนที่เป็นหนาจำนวนมากเรียงตัวชิดกัน จึงทำให้ได้ผลผลิตเส้นใยมากกว่า

วิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 - 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 25.19 21.99 21.13 20.52 18.19 และ 17.28 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าวิธีอื่นทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 2 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าวิธีที่ 3 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า การแยกเส้นใยด้วยการใช้สารละลายต่าง และการใช้สารละลายต่างกับสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้ได้ผลผลิตเส้นใยน้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพกทินและเส้นใยสั้น ๆ ที่ยึดเกาะเส้นใยจะถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ซึ่งทำให้เส้นใยมีพื้นผิวเรียบ สะอาดและมีความละเอียดขึ้น สอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะเส้นใยเปลือกข้าวโพดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งพบว่า การแยกเส้นใยด้วยการใช้สารละลายต่าง และการใช้สารละลายต่างกับสารละลายเอนไซม์ที่มีระดับความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้พื้นผิวเส้นใยเรียบและสะอาดขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yilmaz, N. D. [7] ที่ศึกษาผลของการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดด้วยการใช้สารละลายต่างต่อลักษณะของเส้นใยพบว่า การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างที่มีระดับความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้ได้ผลผลิตเส้นใยลดลง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกและชั้นในให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 23.14 และ 20.24 ตามลำดับ เปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอกและชั้นในให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 20.07 และ 19.97 ตามลำดับ และเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกและชั้นในให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 19.16 และ 21.72 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าเปลือกชั้นในอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) ในขณะที่เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นในให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าเปลือกชั้นนอกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอกและชั้นในให้ผลผลิตเส้นใยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 - 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 26.06 22.06 22.80 21.75 19.09 และ 18.37 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่นทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 2 - 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 - 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 24.57 22.93 20.85 18.27 17.22 และ 16.28 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่นทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 2 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 3 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 3 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 - 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 24.95 20.97 19.73 21.55 18.26 และ 17.18 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่นทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 2 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 3 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.01 ตามลำดับ) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 3 ให้ผลผลิตเส้นใยน้อยกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) แต่ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อผลผลิตเส้นใยต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวโพดที่ใช้

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เปลือกชั้นนอกที่แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 - 6 ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตเส้นใยร้อยละ 25.29 22.09 20.89 20.42 18.05 และ 17.97 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เปลือกชั้นนอกที่แยกเส้นใย

การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) สำหรับเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นในพบว่า การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่นทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 2 - 4 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 ให้ผลผลิตเส้นใยมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า วิธีการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 และพันธุ์เอทีเอส 12 ทั้งเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน และวิธีการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 เปลือกชั้นนอกที่ให้ผลผลิตเส้นใยมากที่สุดคือ วิธีที่ 1 คือการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และวิธีการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 เปลือกชั้นใน ที่ให้ผลผลิตเส้นใยมากที่สุดคือวิธีที่ 1 และ 2 คือการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร โดยสรุปพบว่า ผลของวิธีการแยกเส้นใยขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวโพดและชั้นเปลือกข้าวโพด ทั้งนี้วิธีการแยกเส้นใยที่ให้ผลผลิตเส้นใยสูงอาจจะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เพราะเส้นใยยังคงมีลิกนิน เฮมิเซลลูโลสและเพกทินตกค้างอยู่มาก ส่วนชั้นเปลือกข้าวโพด ไม่มีผลต่อผลผลิตเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

2. ความยาวเส้นใย

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ความยาว (มิลลิเมตร)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	190.93	3.52
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	178.33	7.26
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	186.30	5.37
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	178.90	5.12
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	172.33	6.61
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	153.40	13.01
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	179.07	7.25
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	163.53	2.80
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	178.40	4.68
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	179.73	3.95
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	168.93	4.08
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	168.67	4.23
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	209.47	2.19
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	206.00	7.08
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	203.10	5.94
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	186.53	5.92

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน (ต่อ)

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ความยาว (มิลลิเมตร)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	173.13	8.03
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	169.73	11.99
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	182.67	5.33
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	171.37	14.76
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	167.87	8.05
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	130.90	9.54
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	138.30	27.96
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	104.47	22.89
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	182.07	4.53
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	178.03	6.70
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	178.63	1.42
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	173.93	5.61
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	174.63	4.18
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	169.40	3.86
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	176.80	12.47
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	172.53	1.79
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	172.00	8.68
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	168.53	4.38
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	162.37	2.27
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	155.60	5.80

จากตารางที่ 2 พบว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยความยาวอยู่ระหว่าง 104.47 - 209.47 มิลลิเมตร จัดเป็นเส้นใยสั้นแบบยาว (Long Staple Fibers) ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ขึ้นไป ตามเกณฑ์การแบ่งประเภทเส้นใยสั้นของ Goswami, B. C., Anandjiwala, R. D., and Hall, D. M. [8] โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นนอกแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความยาวมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นในแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีค่าเฉลี่ยความยาวน้อยที่สุด เปลือกข้าวโพดชั้นนอกและเปลือกชั้นในและวิธีการแยกเส้นใยต่างกันให้ความยาวเส้นใยต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในขณะที่ข้าวโพดแต่ละพันธุ์ให้ความยาวเส้นใยใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า ชั้นเปลือกข้าวโพดมีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) โดยพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดชั้นนอกมีความยาวมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ค่าเฉลี่ย 181.38 และ 163.43 มิลลิเมตร ตามลำดับ)

วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความยาว 186.83 178.30 181.05 169.76 164.95 และ 153.54 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 1 และ 3 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 5 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า การแยกเส้นใยโดยใช้สารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีระดับความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้เส้นใยมีความยาวลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเส้นใยแยกออกเป็นกลุ่มเล็กลง จึงมีความยาวลดลง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกและชั้นใน มีค่าเฉลี่ยความยาว 176.70 และ 173.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นนอกและชั้นใน มีค่าเฉลี่ยความยาว 191.33 และ 149.26 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยความยาว 176.12 และ 167.97 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดชั้นนอกพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 มีความยาวมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ($p \leq 0.01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 พบว่า เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นในมีความยาวไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อความยาวเส้นใย ($p \leq 0.01$)

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1-6 มีค่าเฉลี่ยความยาว 185.00 170.93 182.35 179.32 170.63 และ 161.03 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 3 และ 4 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$ 0.01 และ 0.05 ตามลำดับ)

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความยาว 196.07 188.68 185.48 158.72 155.72 และ 137.10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 และ 3 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความยาว 179.43 175.28 175.32 171.23 168.50 และ 162.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่ให้เส้นใยที่มีความยาวมากที่สุดไม่แตกต่างกันคือ วิธีที่ 1 - 5 และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 จะได้เส้นใยสั้นที่สุด การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ที่ให้เส้นใยที่มีความยาวมากที่สุดไม่แตกต่างกันคือ วิธีที่ 1 - 3 และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 จะได้เส้นใยสั้นที่สุด และการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ทุกวิธีให้ความยาวเส้นใยไม่แตกต่างกัน นอกจากวิธีที่ 1 กับวิธีที่ 6

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อความยาวเส้นใย ($p \leq 0.01$) ซึ่งค่าเฉลี่ยความยาวเส้นใยแสดงในตารางที่ 2 และผลการวิเคราะห์ Bonferroni มีดังนี้

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกพบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$ และ 0.01 ตามลำดับ) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 - 5 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$ 0.01 0.01 และ 0.05 ตามลำดับ) สำหรับเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นในพบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 3 และ 4 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอกพบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 และ 2 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.01 ตามลำดับ) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นในพบว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$ 0.01 0.01 และ 0.01 ตามลำดับ) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 5 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

- เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกพบว่า การแยกเส้นใยทุกวิธีให้ความยาวเส้นใยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นในพบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 - 3 มีความยาวมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$ 0.05 และ 0.05 ตามลำดับ)

โดยสรุปพบว่า วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อความยาวเส้นใยทุกกรณี ยกเว้นกรณีของเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก การใช้สารละลายด่างและสารละลายเอนไซม์ที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นจะได้เส้นใยที่มีความยาวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อความยาวเส้นใยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวโพด และชั้นเปลือกข้าวโพดที่ใช้ ส่วนพันธุ์ข้าวโพดและปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใยไม่มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

3. ขนาดเส้นใย

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ขนาด (เท็กซ์)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	33.78	3.40
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	30.11	8.61
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	32.55	5.30
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	29.27	1.82
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	29.56	4.42

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน (ต่อ)

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ขนาด (เท็กซ์)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	28.44	3.86
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	35.01	2.88
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	30.30	1.83
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	32.17	3.57
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	32.85	3.72
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	29.94	2.70
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	31.13	3.23
พันธุ์ไฮ-บรிகซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	30.87	0.87
พันธุ์ไฮ-บรிகซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	28.24	1.91
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	25.77	0.24
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	25.41	1.02
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	18.23	2.41
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	18.96	1.03
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	26.59	1.39
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	23.44	2.76
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	23.33	1.76
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	21.72	3.10
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	21.21	3.80
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	20.00	2.72
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	23.54	1.84
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	20.97	2.29
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	24.05	3.12
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	20.69	1.77
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	20.53	2.72
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	17.14	2.32
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	20.81	0.92
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	21.41	1.60
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	18.63	0.77
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	17.15	1.37
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	21.03	3.06
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	15.36	1.04

จากตารางที่ 3 พบว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยอยู่ระหว่าง 15.36 - 35.01 เทกซ์ จัดเป็นเส้นใยหยาบมาก ตามเกณฑ์การจำแนกขนาดเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเมล็ดของ Cook, J. G. [9] ที่กำหนดว่าเส้นใยหยาบจะมีขนาด 1.5 - 2.9 เทกซ์ โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ อินทรี 2 ชั้นในแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยใหญ่ที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยเล็กที่สุด ข้าวโพดแต่ละพันธุ์และวิธีการแยกเส้นใยต่างกันให้ขนาดเส้นใยต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน ให้ขนาดเส้นใยใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า พันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยใหญ่ที่สุด (31.26 เทกซ์) รองลงมาคือ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 (23.65 เทกซ์) และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 (20.11 เทกซ์) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$)

วิธีการแยกเส้นใยมีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใย 28.43 25.74 26.08 24.52 23.42 และ 21.84 เทกซ์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีขนาดใหญ่กว่าที่แยกด้วยวิธีที่ 4 - 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีขนาดใหญ่กว่าที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่าการแยกเส้นใยด้วยการใช้สารละลายต่างกับสารละลายเอนไซม์ มีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เพราะเอนไซม์เซลลูเลสจะย่อยสลายเซลลูโลสส่วนอสัณฐานที่ผนังเซลล์ชั้นนอกออก ทำให้เส้นใยสั้น ๆ หลุดออกจากกลุ่มเส้นใย [4] - [5] จึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อขนาดเส้นใย ($p \leq 0.05$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยขนาด 30.62 และ 31.90 เทกซ์ ตามลำดับ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยขนาด 24.58 และ 22.71 เทกซ์ ตามลำดับ และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยขนาด 21.15 และ 19.07 เทกซ์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 และพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นนอกและชั้นใน มีขนาดเส้นใยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นในอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้จากการแบ่งเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นในของเปลือกหุ้มฝักข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 พบว่ามีเปลือกหุ้มฝักจำนวนมากสูงสุดถึง 19 ใบ ทำให้เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นในมีความหยาบและความหนาแตกต่างกันค่อนข้างมาก จึงมีผลต่อขนาดเส้นใย

ส่วนชั้นเปลือกข้าวโพด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย ไม่มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4. ความเที่ยงของเส้นใย

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยความเที่ยงของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ความเที่ยง (ร้อยละ)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	5.57	0.80
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	6.28	1.36
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	6.76	0.90
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	5.89	1.28
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	5.78	0.95
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	7.22	0.70
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	3.96	0.39
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	5.96	1.22
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	4.70	0.95
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	5.41	0.67
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	4.89	1.54
พันธุ์อินทรี 2	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	6.22	0.22
พันธุ์ไฮ-บรிகซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	6.67	1.56
พันธุ์ไฮ-บรிகซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	5.15	0.64
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	5.97	1.65
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	4.45	0.40
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	5.85	0.84
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	5.00	0.40
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	6.26	0.72
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	6.93	1.03
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	5.56	1.28
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	5.48	0.55
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	4.96	1.25
พันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	4.56	0.58
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 1	5.78	1.15
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 2	5.93	1.71
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 3	5.70	1.05
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 4	5.44	0.95
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 5	4.70	0.55
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นนอก	วิธีที่ 6	5.26	0.74

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยความหนึงของของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด และวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน (ต่อ)

พันธุ์ข้าวโพด	ปัจจัยการทดลอง		ความหนึงของ (ร้อยละ)	
	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย	(\bar{X})	S.D.
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 1	5.04	0.79
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 2	4.96	0.35
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 3	5.85	1.03
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 4	5.30	0.39
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 5	5.00	0.40
พันธุ์เอทีเอส 12	เปลือกชั้นใน	วิธีที่ 6	5.19	0.95

จากตารางที่ 4 พบว่า เส้นใยเปลือกข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยความหนึงอยู่ระหว่างร้อยละ 3.96 - 7.22 โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีค่าเฉลี่ยความหนึงของมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นในแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความหนึงของน้อยที่สุด ข้าวโพดแต่ละพันธุ์และวิธีการแยกเส้นใยต่างกันให้ความหนึงใกล้เคียงกัน ในขณะที่เปลือกข้าวโพดชั้นนอก และเปลือกข้าวโพดชั้นในให้ความหนึงต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ความหนึงของเส้นใยเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งมีผลต่อการยึดเกาะกันของเส้นใยในขณะที่ปั่นเป็นเส้นด้ายและการทำผ้าไม่ทอ เส้นใยที่มีความหนึงมากจะยึดเกาะกันได้ดี [9] ดังนั้น เส้นใยเปลือกข้าวโพดจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปปั่นเป็นเส้นด้าย จากการศึกษาของ Haruthaithanasan, V., Noiiaiboon, V., Ujain, S., Senatham, S., Kwuandee, T., Tulpijit, P., Chollakup, R., Pasookdee, W., and Pochanakul, V. [10] พบว่า เส้นใยสับปะรด 100 % ไม่สามารถปั่นเป็นเส้นด้ายได้ เพราะเส้นใยไม่มีรอยหยัก

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยความหนึงของเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า ชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อความหนึงของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดชั้นนอกมีความหนึงมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 5.74 และ 5.35 ตามลำดับ) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพด พบว่า เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกมีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 67.00 และ 70.42 ตามลำดับ) จึงทำให้เส้นใยอ่อนตัวและบิดตัวได้มากกว่า ส่งผลต่อความหนึงของเส้นใย

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อความหนึงของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยความหนึงของร้อยละ 6.25 และ 5.19 ตามลำดับ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอกและชั้นในมีค่าเฉลี่ยความหนึงร้อยละ 5.51 และ 5.62 ตามลำดับ และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอกและชั้นใน มีค่าเฉลี่ยความหนึงร้อยละ 5.47 และ 5.22 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกมีความหนึงมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นในอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 พบว่า เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นในมีความหนึงไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกมีปริมาณเซลลูโลส

น้อยกว่าเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 66.56 และ 69.74 ตามลำดับ) จึงทำให้เส้นใยอ่อนตัวและบิดตัวได้มากกว่า ส่งผลต่อความหยิกงอของเส้นใย

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อความหยิกงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความหยิกงอ ร้อยละ 4.77 6.12 5.73 5.65 5.34 และ 6.72 ตามลำดับ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความหยิกงอร้อยละ 6.46 6.04 5.76 4.96 5.41 และ 4.78 ตามลำดับ และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 แยกด้วยวิธีที่ 1 - 6 มีค่าเฉลี่ยความหยิกงอร้อยละ 5.41 5.45 5.78 5.37 4.85 และ 5.35 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดทั้ง 3 พันธุ์ ที่แยกด้วยวิธีการแตกต่างกัน มีความหยิกงอของเส้นใยใกล้เคียงกัน นอกจากกรณีของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 ที่มีความหยิกงอน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 เกือบ 2 เท่า (ร้อยละ 4.51 และ 2.70 ตามลำดับ) ทำให้เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 อ่อนตัวได้ยากกว่าและมีความแข็งกระด้างมากกว่า จึงส่งผลต่อความหยิกงอของเส้นใยดังที่ Kawruang, W. and Limmanee, S. [11] กล่าวว่า ลิกนินที่มีอยู่ในปริมาณมากจะทำให้เส้นใยแข็งและอ่อนตัวได้ยาก

ส่วนพันธุ์ข้าวโพด วิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย ไม่มีผลต่อความหยิกงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

สรุปผล

จากการศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยต่อผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด สรุปผลได้ดังนี้ 1) ผลต่อผลผลิตเส้นใยพบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลผลิตเส้นใยมากที่สุด และเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 ให้ผลผลิตเส้นใยน้อยที่สุด พันธุ์ข้าวโพด วิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อผลผลิตเส้นใย 2) ผลต่อความยาวเส้นใยพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นนอก แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีความยาวมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริกซ์ 3 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีความยาวน้อยที่สุด ชั้นเปลือกข้าวโพด วิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อความยาวเส้นใย 3) ผลต่อขนาดเส้นใยพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีขนาดใหญ่ที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีขนาดเล็กที่สุด พันธุ์ข้าวโพด วิธีการแยกเส้นใยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อขนาดเส้นใย และ 4) ผลต่อความหยิกงอของเส้นใยพบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีความหยิกงอมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นใน

แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีความหนืดกอนน้อยที่สุด ชั้นเปลือกข้าวโพด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อความหนืดกอนของเส้นใย โดยสรุป วิธีการแยกเส้นใยที่ใช้สารละลายเอนไซม์มีแนวโน้มที่จะให้เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่มีสมบัติทางกายภาพดี ทั้งนี้อาจศึกษาทดลองใช้สารละลายเอนไซม์ที่มีระดับความเข้มข้นสูงขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนาบุคลากรรุ่นใหม่ตามทิศทางการยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2562

References

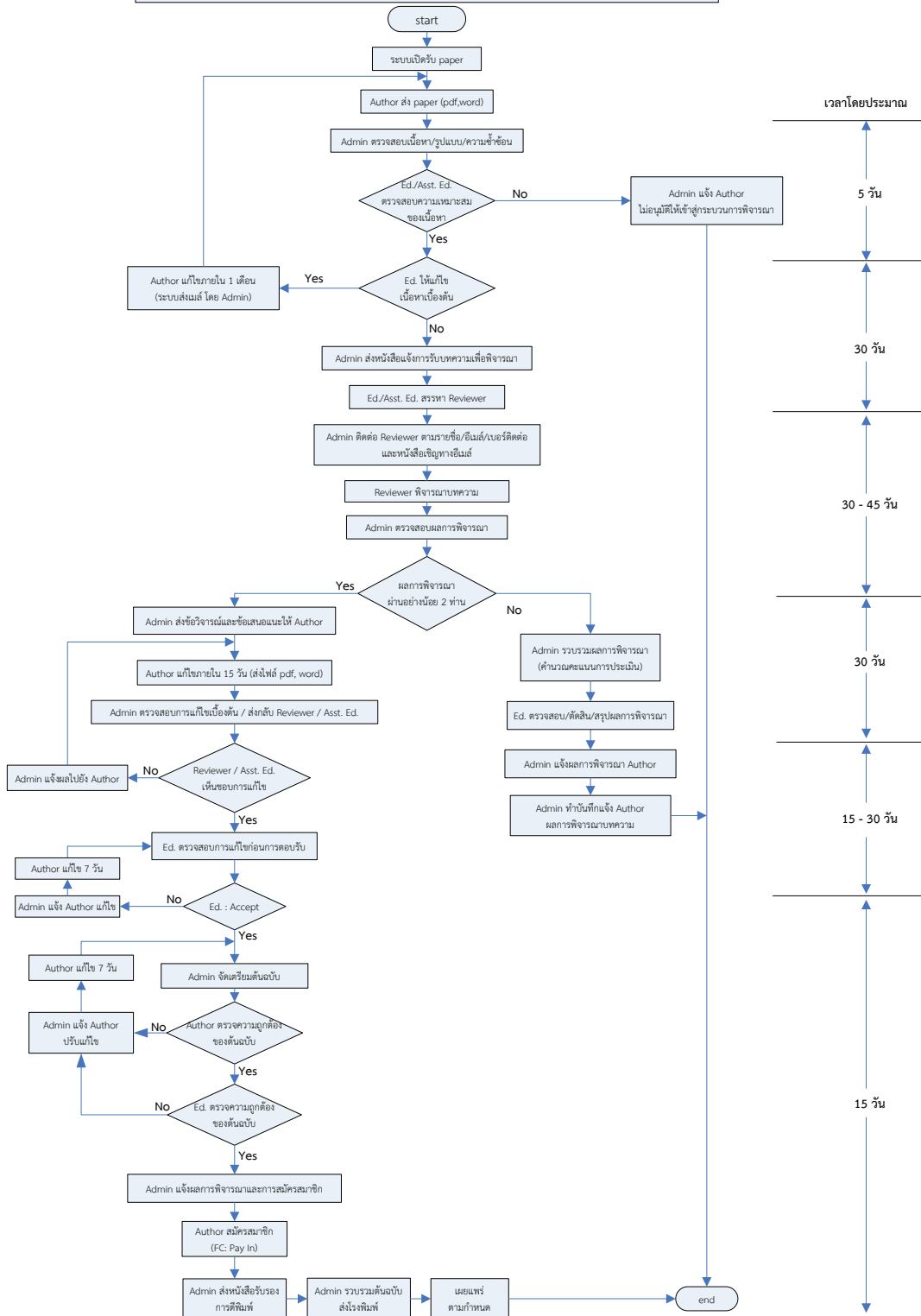
- [1] Boonrueang, S. and Chankroot, A. (2008). **Handbook of Agricultural Extensionist: Corn (Animal Feed Corn and Sweet Corn)**. Bangkok: Bureau of Agricultural Commodities Promotion and Management, Department of Agricultural Extension
- [2] Suteerapoj, W. (2019). **Canned Vegetables and Fruits: 2019 Export Target, Export in January 2019**. Access (7 September 2019). Available (https://ditp.go.th/ewt_news_ditp2.php?content=539767&cate=751&d=)
- [3] Yilmaz, N. D., Sulak, M., Yilmaz, K., and Kalin, F. (2016). Physical and Chemical Properties of Water-Retted Fibers Extracted from Different Locations in Corn Husks. **Journal of Natural Fibers**. Vol. 13, No. 4, pp. 397-409
- [4] Sricharassin, W. (2009). Story of Pineapple Fabric (Not Pineapple). **Colourway**. Vol. 15, No. 85, pp. 21-25
- [5] Konczewicz, W. and Kozlowski, R. M. (2012). **Handbook of Natural Fibres Volume 2: Processing and Applications**. Cornwall, UK: TJ International Ltd., Padstow
- [6] Udomkijdech, V. (1999). **Fiber Science**. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House
- [7] Yilmaz, N. D. (2013). Effect of Chemical Extraction Parameters on Corn Husk Fibres Characteristics. **Indian Journal of Fibres and Textile Research**. No. 38, pp. 29-34
- [8] Goswami, B. C., Anandjiwala, R. D., and Hall, D. M. (2004). **Textile Sizing**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [9] Cook, J. G. (2001). **Handbook of Textile Fibers Vol. 1 Natural Fibres**. 6th ed. Delhi: Replika Press Pvt Ltd.
- [10] Haruthaithanasan, V., Noihaiboon, V., Ujjin, S., Senatham, S., Kwuandee, T., Tulpijit, P., Chollakup, R., Pasookdee, W., and Pochanakul, V. (2004). **Pilot Project of Pineapple Leaf Fiber Utilization for Textile Industry**. Final Report, The Thailand Research Fund.
- [11] Kawruang, W. and Limmanee, S. (2013). Lotus: Fiber from Furrent to Green Textile Innovation. **Colourway**. Vol. 18, No. 105, pp. 4-52



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.ฮีซาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมถึงไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 2.54 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.54 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 2.54 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 3.17 ซม.

- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า

- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman

- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8

- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า

- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย

- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14

- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 13

ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 11

- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย”

“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11

- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านบน ขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา
วางด้านบน ขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 11 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 11 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป
บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมี
ภาษาไทย

2. ผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียด
ต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding
Author) ด้วยการระบุ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันตรงด้วย
กำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา
ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียน
ลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ
1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมาย
เดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

4. คำสำคัญ (Key words) เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้น
ในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มี
ความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น
จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีความสำคัญได้น้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ :** เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (**Materials and Methods**) / วิธีดำเนินการวิจัย (**Research Methodology**) อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. ผลการวิจัย (**Results**) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. การอภิปรายผล (**Discussion**) เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้ายตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัย และการอภิปรายผล (**Results and Discussion**) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. บทสรุป (**Conclusion**) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (**Acknowledgements**) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่ก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (**References**) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (**Method**) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (**Results**) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็น โดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (**Conclusion**) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (**References**) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (**In-text Citations**)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE ระบบตัวเลข (**Numerical System**) เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมาย

วงเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับ จากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1], [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference list)

1) หนังสือ

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อหนังสือ.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น

[1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y. : Delmar Publishers.

2) หนังสือแปล

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อเรื่องของหนังสือแปล// แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม).// โดย/ชื่อผู้แปล.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) บทความหรือบทในหนังสือ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ชื่อเรื่อง./ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี).// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford : Oxford University Press

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี).// ชื่อเรื่องรายงานการประชุม.// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok : Bangkok Medical Publisher

5) วารสาร

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ.// ชื่อวารสาร.// ปีที่.// ฉบับที่.// หน้า/เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) บทความในหนังสือพิมพ์

[X] ชื่อผู้เขียน.// (ปี./วัน./เดือน).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อหนังสือพิมพ์./หน้า/เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

[6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma.**
Bangkok Post. p. 4

7) บทความในสารานุกรม

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อสารานุกรม.//เล่มที่:/หน้า/เลขหน้า-เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

[7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science.** Vol. 51, pp. 380-389

8) วิทยานิพนธ์

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อวิทยานิพนธ์.// ระดับวิทยานิพนธ์/ชื่อสาขา/คณะ/
มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

[8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil.** Ph.D.
Dissertation University of Chicago

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

[X] ผู้เขียน.//ปี.//ชื่อบทความ.//ชื่อวารสารหรือนิตยสาร./ปีที่(เดือนหรือฉบับที่):/เลขหน้า(ถ้ามี).//
เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล)/เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

[9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries.** Access (17 November 2000). Available (<http://www.erin.gov.au/library/guide.html>)

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

[X] ชื่อหน่วยงาน.// (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/เล่มที่(ถ้ามี).//ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).//เมืองที่พิมพ์:/
สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008.** Songkhla: Prince of Songkla University

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง.// (ปีที่พิมพ์).//ชื่อหนังสือ.//เล่มที่ (ถ้ามี)//
ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี)//เมืองที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India.** Chonburi: Department of History Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภูมุนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูป โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภูมุน้อย ควรจัดให้รูปภูมุน้อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปภูมุน้อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปภูมุน้อยที่ 1



(ข) รูปภูมุน้อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

- สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภูมุน้อย
- 7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด
 - 8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
 - 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
 - 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	Table Column Head	
	Subhead (unit)	Subhead (unit)
xxx	123	456
xxx	321	654

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
- 3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \quad (1)$$

- 4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index> โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง บทความวิจัย บทความวิชาการ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

(ภาษาอังกฤษ)

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

วิศวกรรมศาสตร์ ENG เกษตรศาสตร์ AGR สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

- | | | |
|--|--|--|
| <input type="checkbox"/> ไฟฟ้า | <input type="checkbox"/> อิเล็กทรอนิกส์ | <input type="checkbox"/> คอมพิวเตอร์ |
| <input type="checkbox"/> สื่อสาร-โทรคมนาคม | <input type="checkbox"/> สัตวศาสตร์ | <input type="checkbox"/> ศิลปะและการออกแบบ |
| <input type="checkbox"/> วัสดุและโลหะ | <input type="checkbox"/> โยธา-สำรวจ | <input type="checkbox"/> สิ่งแวดล้อม |
| <input type="checkbox"/> พลังงาน | <input type="checkbox"/> สถาปัตยกรรม | <input type="checkbox"/> พีชไร์ |
| <input type="checkbox"/> พืชสวน | <input type="checkbox"/> วิทยาศาสตร์การอาหาร | <input type="checkbox"/> ICT |
| <input type="checkbox"/> อุตสาหการ | <input type="checkbox"/> เคมี | <input type="checkbox"/> คณิตศาสตร์ |
| <input type="checkbox"/> สถิติประยุกต์ | <input type="checkbox"/> เครื่องกล | <input type="checkbox"/> โภชนศาสตร์ |
| <input type="checkbox"/> ฟิสิกส์ | <input type="checkbox"/> อื่น ๆ | |

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์
2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ
3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาคัดฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีसान
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)

บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่

.....โทรศัพท์.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีसान นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีसान” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร

(.....)



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขอลงการพิจารณาบทความเรื่อง
.....
.....
ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่..... และยินยอม
รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน บาท
(.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย
มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่
E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงิน
จะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชภัฏนครราชสีมา



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 13 No. 2 May - August 2020



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com <http://ird.rmuti.ac.th/2015>