



วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 1906-215X

ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2561



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

วารสาร มทร.อีสาน

RMUTI JOURNAL

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุนทรารณ ติ.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

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

พิมพ์ที่

บริษัท สมบูรณ์การพิมพ์ จำกัด
โทรศัพท์ 044 - 954222 - 6

จำนวนพิมพ์ 120 เล่ม เดือนธันวาคม 2561

วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวรรณ ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ อารัง	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมณะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลัมภ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธาริบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุขน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดลิ่งซ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

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

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสุดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โมษิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชุด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเนาวิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ชาคริต
ดร.ชนิดา
ดร.ณรงค์ศักดิ์
ดร.เยาวพา
ดร.สุกัญญา
ดร.เดือนเพ็ญ
นายปริญญ

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ยัมรินทร์	สถาบันวิทยสิริเมธี
สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
การค้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดุสิตจินดาชาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ไชยะ	94/7 หมู่บ้านนาแลนด์ ซอย 5 ถนนสุวินทวงศ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อัสวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ตันสุวรรณรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ศรีภูธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เสาวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อุ้นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
แยรัมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำทล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นาชัยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหารงานทั่วไป

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวรัตนภรณ์

หมีเงิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

นางสาวสุภาภรณ์

พิมพ์สุคะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

นางสาวอรุณรักษ์

ศิราชมัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลและดอกอัญชัน	1
สถาพร คำหอม	
การตรวจสอบสภาพถนนคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์	17
ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง, ชนระบ วิชาลัย และวีระพงษ์ พจนพิมล	
ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน	32
เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์	
การพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนด้วยวิธีการการหาค่าที่เหมาะสม	43
เดือนแรม แพ่งเกี้ยว, เอกรัฐ ชะอุมเอียด, อาทิตย์ ทัดทาน, เอกชัย เอ็งเล้ง และอลงกรณ์ จันทธีราช	
ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่ออัตราการแห้ง คุณภาพทางกายภาพและสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสน	57
วิจิตรา เหลียวตระกูล, ฐาณินี จิรสถิตอนุสรณ์, ณัฐธิดา เอี่ยมนิล และวชิรญา เหลียวตระกูล	
ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันต่อการเจริญเติบโตและการผลิตทอกซิน <i>Pir</i> ของเชื้อแบคทีเรีย <i>Vibrio parahaemolyticus</i> สายพันธุ์ก่อโรค Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND)	70
นิอร จิรพงษ์รกุล, อรณิชา รัตนารณ, พงศ์พันธุ์ แพรกทอง และกิตติชนม์ อุเทนพะนันธุ์	
ระบบเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุ	89
จักรกฤษ โบบทอง, อีฟชั่น ทมานระเด็น, จินดา คงเจริญ, ศิวภา พฤตมณี และสุพัตรา พุฒินาวรัตน์	
การกำจัดความชื้นและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดินของระบบการผลิตประปาเทศบาลตำบลสุเม จังหวัดอุบลราชธานี	101
อมรรัตน์ วงษ์กลม	
การประมาณค่าของเชิงเขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงด้วยข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก	117
ประวิทย์ อ่องอารีย์, ชฎาพร พรหมสาซาฯ, ทิตยา วงศ์สีดา และณัฐพัชร บัวทองจันทร์	
สมบัติทางกายภาพของฝ้ายกเคนิมนคร	130
จุฑามาศ ขุนไชยการ, สาคร ชลสาคร และรัตนพล มงคลรัตนาลิทธิ	
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการพยากรณ์สำหรับตัวแบบของตัวแปรเดียวกับข้อมูลที่มีฤดูกาล	144
กฤตาพร พืชระสุภา	
บทความวิชาการ	
การพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพ: การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของข้าว อ้อย และปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม	165
อาทิตย์ อัศวสุชี, นิภาวรรณ เป็งกลาง, พัสตราภรณ์ กิจศิริ, รัชดาวรรณ ตามกลาง และจิตติพร วัฒนกุล	

Table of Contents

Research Articles

Comparison of Dye-Sensitized Solar Cells Performance using Natural Dye Sensitizer Extracted from <i>Zingiber cassumunar</i> and <i>Clitoria ternatea</i>	1
Sataporn Komhom	
Concrete Pavement Monitoring with Ground Penetrating Radar	17
Narongchai Wiwattanachang, Chanarop Vichalai and Veerapong Pongpinimol	
Biomass Pellets Electrical Power Generation System by Using Gasification Technology	32
Jensak Ekburanawat	
The Development of a Dual- Axis Solar Tracking System Using the Optimization Method	43
Duanraem Phaengkio, Accarat Chaoumead, Arthit Thatthan, Eakkachai Engseng, and Arongkorn Jantiras	
Effect of Drying Temperatures on Drying Rate, Physical and Antioxidative Properties of <i>Sesbania javanica</i> Mig. Flowers	57
Wijitra Liaotrakoon, Thayinee Jirasatitanusorn, Nattida Aemnin, and Vachiraya Liaotrakoon	
Effect of Diurnal Temperature Change on Growth and Pir Toxin Production of <i>Vibrio parahaemolyticus</i> Causing Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND)	70
Nion Chirapongsatonkul, Onnicha Rattanaporn, Pongpan Pragthong, and Kittichon U-taynapun	
Getting Lost Monitoring System for the Elderly Patients	89
Jakkrit Bobtong, Ifsan Manraden, Jinda Kongcharoen, Siwipa Pruitikanee, and Supattra Puttinaovarat	
Removal of Turbidity and Dissolved Organic Carbon in Surface Water of Water Treatment Plant of Tansum Municipality, Ubon Ratchathani	101
Amornrat Wongklom	
Estimation of Total Suspended Solids in Pung River using Global Precipitation Measurement Data	117
Prawit Uang-aree, Chadaporn Phommasaka Na Sakonnakhon, Thithiya Wongseeda, and Nattapach Buathongjant	
Physical Properties of Yok Denim Nakhon Fabric	130
Jutamat Khunchaikan, Sakorn Chonsakorn, and Rattanaphol Mongkholrattanasit	
Comparison of the Efficiency of Forecasting Techniques for Univariate Models with Seasonal Data	144
Krittaporn Phucharasupa	

Academic Articles

Development of the Bio-Based Economy: Conversion of Rice, Sugar Cane and Oil Palm Residues to Value-Added Products	165
Artit Ausavasukhi, Nipawan Pengklang, Phattraphorn Kijisiri, Ratchadawan Tamklang, and Titiporn Wattanakul	



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลและดอกอัญชัน

Comparison of Dye-Sensitized Solar Cells Performance using Natural Dye Sensitizer Extracted from *Zingiber cassumunar* and *Clitoria ternatea*

สถาพร คำหอม^{1*}

Received: December, 2017; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลและดอกอัญชัน เพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ผลการวิเคราะห์พบว่าสีย้อมธรรมชาติบนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400 – 800 นาโนเมตร การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงของสีย้อมทั้งสองชนิดด้วยเงื่อนไขของค่า pH ในการสกัดคงที่เท่ากับ 7 โดยเปลี่ยนแปลงมวลที่ใช้สกัดต่อปริมาตรตัวทำละลายตั้งแต่ร้อยละ 1 3 5 7 9 11 15 และ 20 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้สีย้อมทั้งสองชนิดเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร การใช้สีย้อมสกัดจากไพลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.493 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.684 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นเมื่อกำหนดค่าร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรให้คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 2.4 4.3 7.0 9.4 และ 11.0 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและ

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, College of Engineering, Rangsit University, Pathumthani

* Corresponding Author E - mail Address: sataporn.k@rsu.ac.th

ดอกอัญชันมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.444 และ 0.700 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 7 และ 4.3 ทั้งสองเงื่อนไขแสดงผลชัดเจนว่าการใช้สีย้อมสกัดจากไพลให้ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงที่ดีกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง; สีย้อมธรรมชาติ; ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

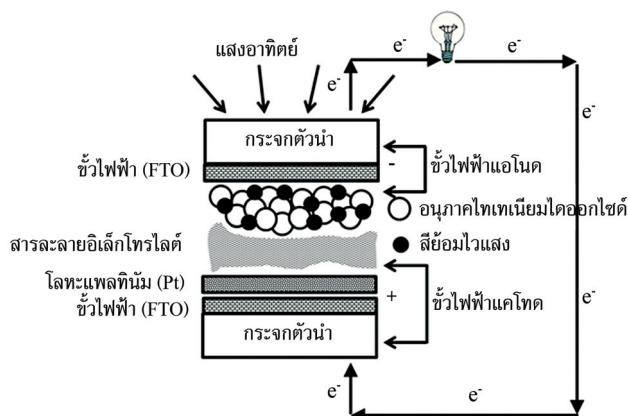
Abstract

This research investigated the use of natural dye sensitizer extracted from *Zingiber cassumunar* and *Clitoria ternatea* for dye-sensitized solar cells (DSCs). The results showed that natural dye sensitizer on TiO_2 absorbed visible light in a region with peak between 400 and 800 nm. Photoelectrochemical properties of two natural dye sensitizers were compared in the extraction conditions at constant pH of 7, with the varying of extraction mass per volume of solvent: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 15, and 20 %w/v. It was found that the highest maximum power of DSCs of both natural dye sensitizers reached to the constant when using of 11 %w/v. Dye sensitizer from *Zingiber cassumunar* showed the highest maximum power of $1.493 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 15 %w/v while dye sensitizer from *Clitoria ternatea* showed the highest maximum power of $0.684 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 5 %w/v. The following experiment at constant of 11 %w/v, with the varying of extraction pH values: 2.4, 4.3, 7.0, 9.4, and 11.0. It was found that the highest maximum power of DSCs using both natural dye sensitizers of 1.444 and $0.700 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at extraction pH 7.0 and 4.3, respectively. From both conditions, the photoelectrochemical properties of DSCs with dye sensitizer from *Zingiber cassumunar* were found to be apparently higher than that of *Clitoria ternatea*.

Keywords: Dye-Sensitized Solar Cells; Natural Dye Sensitizer; Maximum Power

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาอย่างมากในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงคือแนวคิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การประกอบเซลล์ทำโดยใช้กระจกเคลือบติดบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออไรด์จำนวน 2 ชั้นประกบกัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสง ขั้วแอโนดหรืออาจเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) คือกระจกด้านรับแสงและเคลือบอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากดูดซับโมเลกุลของสีย้อมไวแสงจนอิ่มตัว ขั้วแคโทดหรืออาจเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter Electrode) คือกระจกด้านที่เคลือบด้วยชั้นของคาร์บอนหรือโลหะแพลทินัมเพื่อใช้เร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ไอโอไดด์ (I^-) และ ไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) [1] - [2]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ปัจจัยของสีย้อมส่งผลต่อการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การใช้สีย้อมสังเคราะห์ของสารประกอบรูทีเนียมดูดซับบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงประสิทธิภาพได้สูงสุดเท่ากับ 11 - 12 % [3] - [4] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตที่สูงเพราะการใช้โลหะมีตระกูลในสีย้อมสังเคราะห์ทำให้ยังคงเป็นข้อเสียที่น่าจะพัฒนาต่อไป ด้วยเหตุผลนี้การใช้สีย้อมธรรมชาติจึงมีความน่าสนใจในการแก้ปัญหาด้านต้นทุนงานวิจัยการใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จากที่ผ่านมาพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงประสิทธิภาพได้สูงถึง 9.8 % [5] ในส่วนข้อได้เปรียบเกี่ยวกับความยุ่งยากของการสกัดสีย้อมธรรมชาติและปริมาณของการสกัดได้ต่ำยังคงเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณา แต่ด้วยแหล่งของวัตถุดิบที่มีความหลากหลายและข้อดีอื่น ๆ เช่น ความเป็นพิษและเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม ยังคงเป็นสิ่งที่ดึงดูดให้มีการทำวิจัยอยู่เป็นจำนวนมาก นักวิจัยพยายามค้นหาและพัฒนาสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง สารประกอบภายในสีย้อมธรรมชาติ เช่น แอนโทไซยานิน เคอร์คูมิน แคโรทีน แทนนิน และคลอโรฟิลล์ ในพืชหลายชนิดได้ถูกศึกษาถึงการส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกใช้เป็นสีย้อมไวแสง [6] - [9] โดยทั่วไปแอนโทไซยานินถูกพบได้ในผล ดอก และใบของพืช สามารถตอบสนองต่อสีที่หลากหลายในช่วงสีแดงถึงสีน้ำเงิน หมู่คาร์บอนิลและไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอนโทไซยานินสามารถยึดติดกับพื้นผิวรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ทำให้ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของแอนโทไซยานินไปยังแถบการนำกระแส (Conduction Band) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการใช้สีย้อมธรรมชาติที่สกัดจากเปลือกของพรมไม้ดอกพุดในสกุลพุดอง การวิเคราะห์ได้พบหมู่ฟังก์ชันในสีย้อมที่เป็นสารประกอบแอนโทไซยานิน ซึ่งเมื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงแล้วสามารถแสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้เป็นที่น่าพอใจ [11] ด้วยความหลากหลายของวัตถุดิบในการสกัดสีย้อมธรรมชาติดังกล่าวมาข้างต้น ทำให้แม้ในต่างประเทศยังคงมีการศึกษาถึงการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากพืชพื้นเมือง ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงพบว่าสามารถใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ [12] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากว่านหางจระเข้และกระบองเพชรเป็นสีย้อมไวแสง ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยวิธียูวี วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) พบโครงสร้างของคลอโรฟิลล์

และแอนโทไซยานินที่สามารถช่วยในการดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ ให้ผลที่ดีกว่าในการใช้เป็นสีย้อมไวแสง [13] ในแนวคิดที่น่าสนใจคือ การเปรียบเทียบโครงสร้างของ เคอร์คูมินกับโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะส่งผลต่อการใช้งานเป็นสีย้อมไวแสงอย่างไร งานวิจัยที่ผ่านมา ของสารประกอบเคอร์คูมินได้แสดงการดูดกลืนแสงที่มองเห็นในช่วงความยาวคลื่น 420 - 580 นาโนเมตร และยังมียานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากเหง้าของขมิ้นเพื่อใช้เป็นสีย้อม ไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ [14]

ด้วยเหตุที่โมเลกุลของเคอร์คูมินและแอนโทไซยานินมีอยู่มากมายในแหล่งวัตถุดิบทาง ธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการศึกษาการใช้เป็นสีย้อมไวแสง ในงานวิจัยนั้นนอกจากจะศึกษา ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงแล้ว ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมธรรมชาติที่มีโมเลกุลของเคอร์คูมินและแอนโทไซยานิน ซึ่งได้ทำการสกัดจากไหลและดอกอัญชัน ภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่เปลี่ยนแปลงค่าร้อยละโดยมวลต่อ ปริมาตรและค่า pH ที่ใช้ในการสกัด

วิธีดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติ

สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไหลและดอกอัญชันโดยใช้ตัวทำละลายเมทานอล มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ล้างวัตถุดิบด้วยน้ำให้สะอาดแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ขั้นที่ 2 บดวัตถุดิบที่อบแห้งแล้วทำให้เป็นผง

ขั้นที่ 3 นำผงวัตถุดิบใส่ในเมทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นที่ 4 ทำการกรองและเก็บสารละลายไว้ในสภาวะที่บ่มแสง การสกัดมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปร 2 ตัวแปร คือ

1. เปลี่ยนแปลงค่ามวลที่ใช้ในการสกัดตั้งแต่ร้อยละ 1 3 5 7 9 11 15 และ 20 โดยมวลต่อปริมาตร
2. เปลี่ยนแปลงค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 2.4 4.3 7.9 และ 11 โดยใช้สารละลาย 0.1 โมลาริตี ของสารละลายไฮโดรคลอริก และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2. การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ทำความสะอาดกระจกเคลือบดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออไรด์ด้วยเอทานอลและทิ้งให้แห้ง จากนั้นเตรียมส่วนประกอบดังนี้

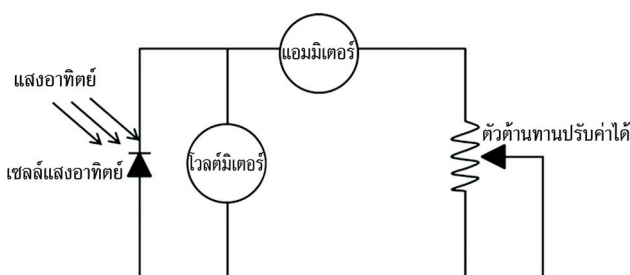
1. แผ่นขั้วไฟฟ้าลบบ เริ่มจากการเตรียมครีมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยผสม อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ กรดอะซิติก พอลิเอทิลีนไกลคอล และสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เข้าด้วยกัน จากนั้นใช้วิธีการดอกเตอร์เบลด์ (Doctor-Blade) ทำฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ บนกระจกตัวนำ ซึ่งจะไดขนาดของฟิล์มบางที่สม่ำเสมอ มีขนาดพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร

2. แผ่นขั้วไฟฟ้าบวก เตรียมโดยทำฟิล์มบางของครีมแพลทินัมบนกระจกตัวนำโดยใช้วิธีการ ดอกเตอร์เบลด์เช่นเดียวกัน

3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เตรียมโดยใช้ไฮโดรเจนและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกันแล้วละลายในเอทิลีนไกลคอล แผ่นขั้วไฟฟ้าลบและขั้วไฟฟ้าบวกจะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อถึงไจอันเย็นตัวแล้ว นำกระจกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จุ่มในสารละลายเมทานอลของสีย้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาล้างด้วยเอทานอลแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำมาประกบกับกระจกฟิล์มแพลงทินมโดยสอดแผ่นไครน์ไวต์ตรงกลาง แล้วทำการหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงไประหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

3. การวัดประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสง

การดูดกลืนแสงของสีย้อมธรรมชาติดูดซับบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงผลวิเคราะห์โดยเครื่องยูวี เทอร์โม (UV-Thermo) การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าฟิลแฟคเตอร์แสดงผลวิเคราะห์โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการต่อวงจรประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และตัวต้านทานปรับค่าได้ ดังรูปที่ 2 การทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงสีขาวขนาด 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar Simulator) ขนาด 300 วัตต์ บันทึกผลโดยเครื่องวัดและบันทึกค่าไฟฟ้า (Voltage Recorder VR-71)



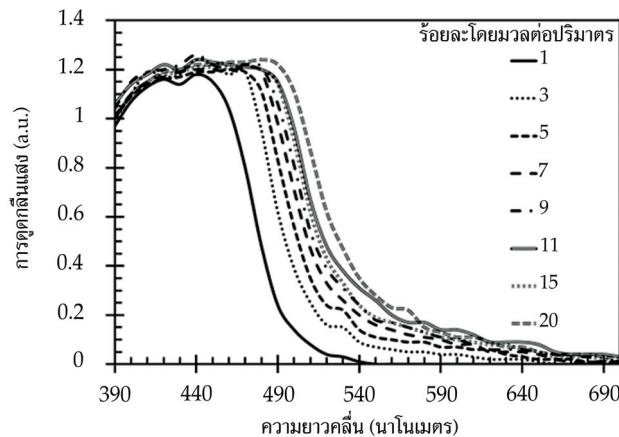
รูปที่ 2 การต่อวงจรเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง

สีย้อมธรรมชาติสกัดจากโพลีแซคคาไรด์แสดงเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมแสดงตำแหน่งการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกันและมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 490 นาโนเมตร โดยอยู่ในช่วงของการมองเห็นซึ่งจะมีความยาวคลื่นระหว่าง 380 - 780 นาโนเมตร เส้นสเปกตรัมมีการขยายความสูงและความกว้างของความยาวคลื่นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละ โดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด บ่งบอกว่ามีความแตกต่างของความเข้มของโมเลกุลสีย้อม โดยเส้นสเปกตรัมจะมีแนวโน้มขยายตัวได้สูงสุดเมื่อใช้การสกัดร้อยละ 20 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากผลไม้ เช่น แบล็คเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่ เชอร์รี่ ราสเบอร์รี่ และ สตรอว์เบอร์รี่ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยความแตกต่างของส่วนประกอบของแอนโทไซยานินในผลไม้แต่ละชนิดเมื่อถูกวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงพบว่าเส้นสเปกตรัมมีรูปร่าง

ที่เหมือนกันและมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในความสูงและความกว้างของค่าความยาวคลื่น [15] ผลของงานวิจัยดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกันกับกรณีของไพลในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามความสามารถการดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างจะส่งผลดีต่อการนำไปใช้งานเป็นสีย้อมไวแสง

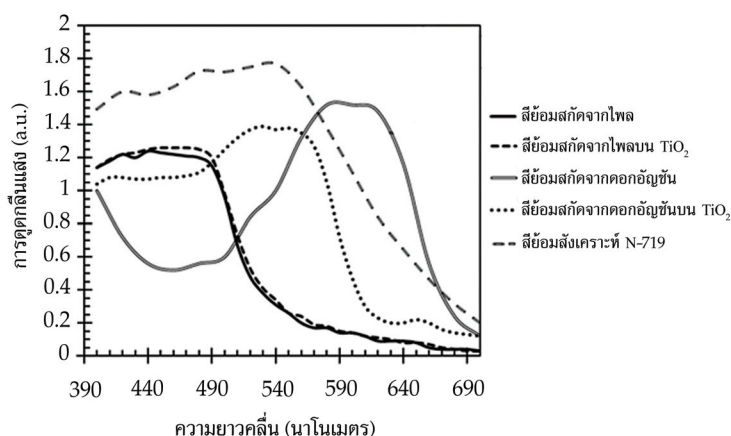


รูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไพลเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด

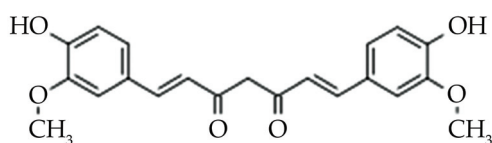
การเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชัน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าสีย้อมสกัดจากไพลก่อนและหลังการดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 390 - 490 นาโนเมตร ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันแสดงความยาวคลื่นที่สูงกว่าโดยอยู่ในช่วงระหว่าง 520 - 610 นาโนเมตร ความแตกต่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบ่งบอกถึงความแตกต่างของสารประกอบในสีย้อมทั้งสองชนิด และสีย้อมสกัดจากไพลมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน แสดงว่าสีย้อมสกัดจากไพลมีการดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ดี [16]

โดยทั่วไปรงควัตถุของพืชในสีย้อมธรรมชาติที่พบส่วนใหญ่ซึ่งสามารถใช้เป็นสีย้อมไวแสงได้ มีอยู่ 4 กลุ่ม 1) คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) 2) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) 3) แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) 4) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ความแตกต่างทางโครงสร้างของรงควัตถุทั้ง 4 ชนิด ทำให้ปรากฏเห็นเป็นสีต่าง ๆ และมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ต่างกันด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสำคัญที่ให้สีเขียว ให้ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ที่ค่าประมาณ 600 nm ขึ้นไป ส่วนฟลาโวนอยด์เป็นรงควัตถุที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้มากมาย ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 400 nm ในขณะที่แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่สำคัญมากอีกชนิดหนึ่งเหมือนกับคลอโรฟิลล์ โดยส่วนใหญ่ปรากฏเป็นสีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงประมาณ 520 - 650 nm และชนิดสุดท้ายแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่อาจปรากฏเป็นสีแดง สีส้ม หรือสีเหลืองและมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงประมาณ 400 - 520 nm [17] เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยฉบับนี้พบว่ามีความเป็นไปได้ที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันจะมีรงควัตถุแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในสีย้อม เพราะมีความสอดคล้องของสีและค่าการดูดกลืนแสง ส่วนในกรณีของ

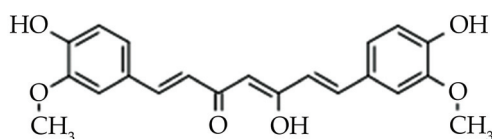
สีย้อมสกัดจากไพลมีค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับรงควัตถุแคโรทีนอยด์ แต่ไพลจัดเป็นพืชในตระกูลเดียวกับมันชันที่ให้รงควัตถุสำคัญเป็นเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับรงควัตถุแคโรทีนอยด์ ดังนั้นลักษณะของสีย้อมสกัดจากไพลจะให้สารประกอบของเคอร์คูมิน ซึ่งคือกลุ่มของฟีนอล (Phenol) ธรรมชาติที่ตอบสนองต่อสีเหลือง แม้ว่าเคอร์คูมินจะมีโครงสร้างหลายรูป แต่รูปแบบอินอล (Enol) ในสถานะของแข็งและสารละลายจะมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีเป็นอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 5 สารนี้จะแสดงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างระหว่าง 420 - 580 นาโนเมตร [16]



รูปที่ 4 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันเปรียบเทียบกับสีย้อมสังเคราะห์ N-719



(ก) รูปแบบคีโต (1, 3-Diketo Form)

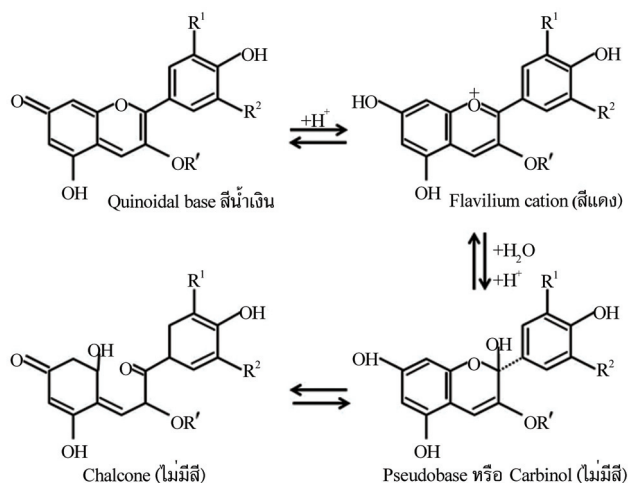


(ข) รูปแบบอินอล (Enol Form)

รูปที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน

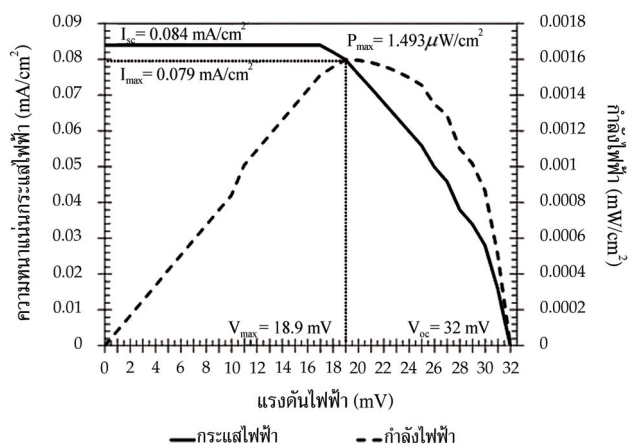
ในกรณีของสีย้อมสกัดจากดอกอัญชันที่มีส่วนประกอบของแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ในเนื้อเยื่อของพืชชั้นสูง ได้แก่ ใบ ลำต้น ราก ดอก และผล เป็นสีที่ละลายน้ำได้และอาจปรากฏเป็นสีแดง ม่วง หรือน้ำเงิน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานและค่า pH ของสารละลาย

รูปแบบของแอนโทไซยานินที่ขึ้นกับค่า pH มี 4 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 6 สำหรับค่า pH เท่ากับ 3 หรือต่ำกว่าจะปรากฏเป็นสีแดง ซึ่งอาจเป็นรูปแบบของ Flavilium Cation และเมื่อค่า pH เป็นกลางหรือเป็นเบสจะปรากฏเป็นสีม่วงหรือสีน้ำเงิน ซึ่งอาจเป็นรูปแบบของ Quinoidal Base นอกจากนี้ยังอาจปรากฏเป็นรูปแบบที่ไม่มีสีได้อีก เช่น Pseudobase หรือ Carbinol และ Chalcone สารในกลุ่มนี้จะแสดงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงในช่วงระหว่าง 520 – 600 นาโนเมตร [18]

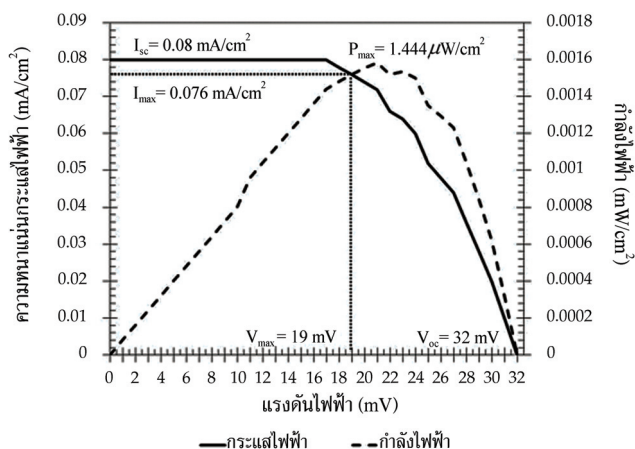


รูปที่ 6 การเปลี่ยนรูปของแอนโทไซยานินในสภาวะค่า pH ที่ต่างกัน

การดูดซับทางเคมีของสีย้อมสกัดจากไหลและดอกอัญชันเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเคอร์คูมินและแอนโทไซยานิน ด้วยเหตุผลว่ากลไกการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นจากการควมแน่นของโปรตอนของแอลกอฮอล์ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ [19] สีย้อมสกัดจากไหลที่ดูดซับบนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่กว้าง แสดงว่าสีย้อมมีการดูดซับได้ดีและมีความแข็งแรงของการดูดซับ ทำให้ส่งเสริมอันตรกิริยาบนพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ [20] นอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไหลที่ดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยในทิศทางของความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันมีแนวโน้มการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นในทิศทางตรงกันข้าม การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นนี้แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก เกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีในรูปแบบ C-O-Ti [10] นั่นอาจเป็นไปได้ว่าอันตรกิริยาของสีย้อมสกัดจากไหลแข็งแรงกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เพราะผลโดยตรงของการยึดติดระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทำให้ช่วยส่งเสริมการดูดกลืนแสงโดยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ [12] ในอีกเหตุผลหนึ่งที่เป็นไปได้คือโครงสร้างของแอนโทไซยานินในสีย้อมสกัดจากดอกอัญชันมีหลายรูปแบบ จึงทำให้เกิดการขัดขวางจากความไม่เป็นระเบียบกับพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จึงทำให้ลดประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังแถบการนำกระแสของไทเทเนียมไดออกไซด์ [21]



(ก) ทำการสกัดที่ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร และค่า pH เท่ากับ 7



(ข) ทำการสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร และค่า pH เท่ากับ 9.4
รูปที่ 7 กราฟ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพล

2. ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชัน กราฟแสดงการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงและผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I_{sc}) ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) และค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) การศึกษาผลของมวลที่ใช้สกัดแสดงผลว่า การใช้สีย้อมสกัดจากไพลที่เงื่อนไขการสกัดร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร ภายใต้ค่า pH เท่ากับ 7 คือสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 0.084 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 32 มิลลิโวลต์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.493 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลแฟคเตอร์ 55.54 %

ในกรณีของการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน สภาวะที่ดีที่สุดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.684 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เงื่อนไขการสักร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ภายใต้ค่า pH เท่ากับ 7 ในส่วนของการศึกษาผลของค่า pH ที่ใช้ในการสกัดสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการใช้เป็นสีย้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ได้กำหนดเงื่อนไขการสักร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรให้คงที่สำหรับไพลและดอกอัญชันที่ใช้สกัด พบว่าค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 9.4 คือสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการสกัดสีย้อมจากไพล แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 0.08 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 32 มิลลิโวลต์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.444 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลแฟคเตอร์ 56.41 % ในกรณีของการสกัดสีย้อมจากดอกอัญชัน สภาวะที่ดีที่สุดคือ ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 4.3 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.700 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองของตัวแปรมวลและค่า pH ที่ใช้สกัดนี้ สามารถกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลเป็นสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดีกว่าการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากดอกอัญชัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมสังเคราะห์ N-719 ยังมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน

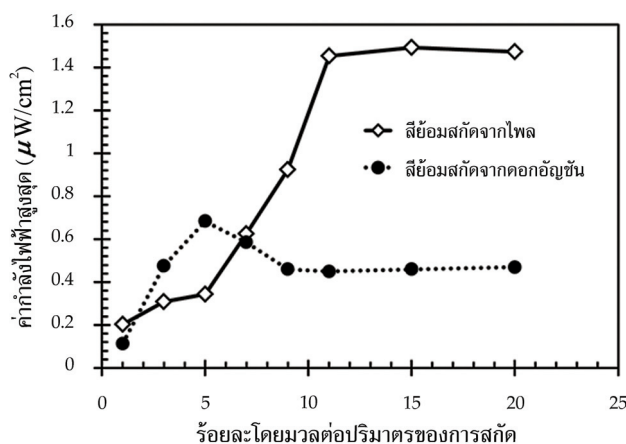
ผลการทดลองที่ช่วยสนับสนุนสามารถพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสังเคราะห์จะมีความกว้างที่ชัดเจนมากที่สุด ด้วยเหตุผลว่าในโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมสังเคราะห์แสดงหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกที่ส่วนปลาย ซึ่งสามารถสนับสนุนความมีเสถียรภาพและความเป็นคู่แรงกระทำทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ นั่นคือการมีพันธะที่ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมในชั้นกระตุ้นไปยังฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] เหตุผลนี้บ่งบอกว่าอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับชั้นฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสำคัญในการส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 ค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันเป็นสีย้อมไวแสง

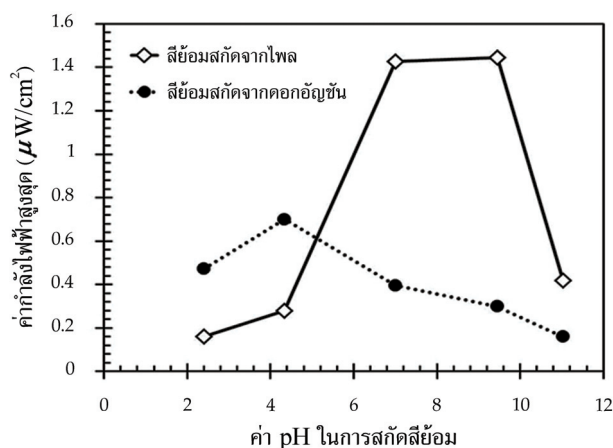
ชนิดของสีย้อมธรรมชาติ (เงื่อนไขในการสกัด)	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	P _{max} (μ W/cm ²)	FF (%)
สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน (ร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 7)	0.004	222	0.684	77.03
สีย้อมสกัดจากไพล (ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 7)	0.084	32	1.493	55.54
สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน (ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 4.3)	0.01	172	0.700	40.69
สีย้อมสกัดจากไพล (ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 9.4)	0.08	32	1.444	56.41
สีย้อมสังเคราะห์ N-719	1.666	148	145	58.81

รูปที่ 8 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันโดยใช้ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดต่างกัน ในกรณีของไพลพบว่าในช่วงแรกค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะแปรผันตรงกับร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดและจะเริ่มคงที่เมื่อใช้การสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรเป็นต้นไป สำหรับกรณีของดอกอัญชันจะมีการแปรผัน

ตรงในช่วงแรกเช่นกัน แต่ในช่วงหลังค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าลดลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่เมื่อใช้การสกัดที่ร้อยละ 9 โดยมีมวลต่อปริมาตรเป็นต้นไป



(ก) ใช้ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดต่างกัน (กำหนดค่า pH ในการสกัดคงที่ = 7)



(ข) ใช้ค่า pH ในการสกัดต่างกัน (กำหนดร้อยละ 11 โดยมีมวลต่อปริมาตรคงที่)
รูปที่ 8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชัน

รูปที่ 8 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันโดยใช้ค่า pH ในการสกัดต่างกัน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการใช้สีย้อมสกัดจากไพลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 2.4 - 9.4 แต่หลังจากค่า pH มากกว่า 9.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าลดลง หมายความว่า การสกัดสีย้อมธรรมชาติจากไพลภายใต้ค่า pH 7 - 9.4 ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสีย้อมที่ดีขึ้นในการนำไปใช้ ในส่วนของการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า pH ในการสกัดมากกว่า 4.3

เป็นที่ทราบกันดีว่าการค้นหาหรือการศึกษาสีย้อมธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงยังคงมีงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อการหาความเหมาะสมของแหล่งวัตถุดิบสำหรับการสกัดสีย้อมเพื่อการใช้งานในพื้นที่หนึ่ง ๆ จากการศึกษาข้อมูลของงานวิจัยต่าง ๆ พบงานวิจัยของ Hamadanian, M. et al. ได้เปรียบเทียบการใช้สีย้อมธรรมชาติจากพืช 9 ชนิด เป็นสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบแรงควัตถุหลักแต่ละชนิดในพืชชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้า ผลที่ได้พบว่า พืช *Consolida Ajacis* ที่มีแรงควัตถุหลัก Delphinidin ให้ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงที่ดีที่สุดจากพืชทั้งหมด 9 ชนิด โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 1.68 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 0.55 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ 65 % จากการเปรียบเทียบสัดส่วนของค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรระหว่างสีย้อมสกัดจาก *Consolida Ajacis* กับสีย้อมสังเคราะห์ N719 คิดเป็น 10.94 % [22] ในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบสัดส่วนของค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรในงานวิจัยนี้ ระหว่างสีย้อมสกัดจากโพลที่สภาวะดีที่สุด ให้ค่า 0.08 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับสีย้อมสังเคราะห์ N719 ให้ค่า 1.666 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นสัดส่วน 4.8 % แม้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีของสีย้อมสกัดจากพืช *Consolida Ajacis* แต่ให้ค่าสัดส่วนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชอีก 8 ชนิด ของงานวิจัย Hamadanian, M. et al. อย่างไรก็ตามปัจจัยที่สามารถสร้างความแตกต่างของค่าทางไฟฟ้า มีความเป็นไปได้หลายปัจจัย เช่น การเก็บรักษาสีย้อมธรรมชาติ [23] การเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์และวิธีการเตรียม [17] การกระจายตัวและความหนาของชั้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกตัวนำ [24] แม้ว่าค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในงานวิจัยนี้อาจไม่ได้เป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ทำในพื้นที่อื่น ๆ แต่ก็นับว่าเป็นการได้มาขององค์ความรู้ในบริเวณพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งของประเทศไทยที่มีความเหมาะสมในการเลือกใช้วัตถุดิบโพลในการสกัดสีย้อมธรรมชาติ

3. การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 2 ในกรณีของสีย้อมสกัดจากโพล การเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดตั้งแต่ 1 - 9 ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มความกว้างของเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สิ่งนี้คือตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ในช่วงค่าร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด 11 - 20 พบการขยายความกว้างของเส้นสเปกตรัมเพียงเล็กน้อย ซึ่งก็ส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน จึงสามารถบอกได้ว่ามวลของพืชที่ใช้ในการสกัดสีย้อมมีค่าจำกัดค่าหนึ่งที่จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ปรากฏดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากโพลที่ดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการเลื่อนตำแหน่งทางด้านบวกและเส้นสเปกตรัมมีลักษณะความยาวคลื่นที่กว้าง แต่ในกรณีของสีย้อมสกัดจากดอกอัญชันให้ผลที่ตรงกันข้าม ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้แสดงว่าในกรณีของสีย้อมสกัดจากโพล อิเล็กตรอนจะสามารถส่งผ่านได้ง่ายระหว่างสีย้อมกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] จึงส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากดอกอัญชันมีตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นสูงกว่า ซึ่งส่งผลกระทบทำให้ความหนาแน่นของกระแสลดลงได้ [25]

โดยทั่วไปการสกัดสีย้อมธรรมชาติภายใต้การใช้ตัวทำละลายแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล จะมีค่า pH ในการสกัดอยู่ในช่วง 4 - 7 การรบกวนระบบด้วยกรดหรือเบสจะส่งผลต่อสารประกอบของสีย้อมธรรมชาติที่สกัดได้ ซึ่งแน่นอนว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแน่นอน [26] จากรูปที่ 10 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่ค่า pH

ในการสัปดาห์ค่าหนึ่ง ผลลัพธ์นี้มีแนวโน้มที่เหมือนกันของสีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชัน ในกรณีของการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เซลล์แสงอาทิตย์จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 4.3 สามารถอธิบายได้ว่า เกี่ยวข้องกับความเสถียรภาพและรูปแบบของแอนโทไซยานิน ที่เกิดขึ้นในสารละลายที่สภาวะค่า pH ต่าง ๆ กัน จากข้อมูลการศึกษาพบว่าแอนโทไซยานินจะมีความเสถียร ที่สุดในสภาวะของกรดและรูปแบบของ Quinonoidal Base สามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดในสภาวะที่เป็นกรด pH 4 - 6 โดยสภาวะนี้จะปรากฏสีม่วงแดงและมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วง 525 - 550 นาโนเมตร ดังนั้นจึงมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ในลักษณะสีย้อมสกัดจาก ดอกอัญชันที่ได้รับและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4 อย่างไรก็ตามในสารละลายที่ค่า pH ไม่ได้อยู่ในช่วง 4 - 6 อาจเกิดรูปแบบของแอนโทไซยานินที่ไม่ได้ส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ มีค่าลดลงได้ปรากฏดังรูปที่ 8 (ข) เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบเคอร์คูมินจากสีย้อมสกัดจากไพล พบว่าเคอร์คูมินส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแอนโทไซยานิน เหตุผลที่เป็นไปได้คือการขยาย การคอนจูเกตของหมู่อะโรมาติก (Aromatic Groups) และอินอลของเคอร์คูมิน ซึ่งทำให้สารประกอบ มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นในช่วงแสงที่มองเห็นได้ นอกจากนี้การมีหมู่ฟีนิล (Phenyl Groups) ที่ส่วนปลายโดยมีหมู่เมทอกซี (Methoxy) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) ในตำแหน่งที่ 3 และ 4 จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปทาง ความยาวคลื่นสูงขึ้น (Bathochromic Shift) สิ่งนี้คือผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะเด่นของสารประกอบ เคอร์คูมิน [27] แต่เมื่อค่า pH ในการสกัดเป็นเบสจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเคอร์คูมินจึงทำให้ค่ากำลัง ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าลดลง แม้ว่าการสร้างสภาวะกรดจะช่วยเพิ่มความเสถียรภาพได้แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของ กรดที่ใช้ด้วยเช่นกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้กรดไฮโดรคลอริกที่อาจส่งผลต่อสถานะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเกิดเป็นความบกพร่องที่พื้นผิว ทำให้การทำงานประสานร่วมกันกับสีย้อมมีประสิทธิภาพลดลง นั้นหมายความว่า การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างกันจะทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร เหตุนี้จึงส่งผลต่อการลดลง ของค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุด [28]

ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายด้าน เช่น การใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ การมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ และมีทางเลือกของการใช้วัสดุที่หลากหลาย แต่ก็ยังพบข้อด้อยที่ต้องพัฒนาอยู่อีกหลายด้านเช่นกัน หนึ่งในนั้นคือเรื่องความคงตัวของเซลล์ ซึ่งไม่ได้ ถูกแสดงไว้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีความพยายามในการพัฒนาความคงตัว ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยทำการศึกษาในหลาย ๆ ด้าน เช่น โครงสร้างโมเลกุลสีย้อม ชนิดตัวทำละลายที่ใช้สกัดสีย้อม อุณหภูมิการสกัดสีย้อม อันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับอนุภาคไทเทเนียม ไดออกไซด์ ตัวทำละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าแพลทินัม เป็นต้น เพื่อค้นหาแนวทาง ที่จะช่วยรักษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานได้ยาวนานขึ้น [17]

สรุปผลการทดลอง

การใช้สีย้อมสกัดจากไพลเป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ที่ดีกว่าการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เหตุผลสนับสนุนคือ สารประกอบเคอร์คูมินในสีย้อมสกัดจากไพล แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง เนื่องจากการมีคอนจูเกตในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยากับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า

เงื่อนไขของการสกัดที่เหมาะสมในการเตรียมสีย้อมสกัดจากไพลเป็นไปได้ 2 แนวทาง คือ

1. ร้อยละ 11 - 15 โดยมวลต่อปริมาตร ที่ค่า pH ในการสกัดคงที่เท่ากับ 7

2. ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร ที่ค่า pH ในการสกัดอยู่ในช่วง 7 - 9 จากการเปรียบเทียบสีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันในงานวิจัยนี้ โดยการศึกษาถึงสารประกอบในโครงสร้างของสีย้อมสามารถสร้างความเข้าใจเพื่อการเลือกใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

References

- [1] Papageorgiou, N., Maier, W. F., and Grätzel, M. (1997). An Iodine/Triiodide Reduction Electrocatalyst for Aqueous and Organic Media. **Journal of The Electrochemical Society**. Vol. 144, Issue 3, pp. 876-884. DOI: 10.1149/1.1837502
- [2] Papageorgiou, N. (2004). Counter-Electrode Function in Nanocrystalline Photoelectrochemical Cell Configurations. **Coordination Chemistry Reviews**. Vol. 248, Issue 13-14, pp. 1421-1446. DOI: 10.1016/j.ccr.2004.03.028
- [3] Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., and Han, L.Y. (2006). Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1 %. **Japanese Journal of Applied Physics**. Vol. 45, Issue 25, pp. L638-L640. DOI: 10.1143/JJAP.45.L638
- [4] Buscaino, R., Baiocchi, C., Barolo, C., Medana, C., Grätzel, M., Nazeeruddin, Md. K., and Viscardi, G. (2008). A Mass Spectrometric Analysis of Sensitizer Solution Used for Dye-Sensitized Solar Cell. **Inorganica Chimica Acta**. Vol. 361, Issue 3, pp. 798-805. DOI: 10.1016/j.ica.2007.07.016
- [5] Zhang, G., Bala, H., Cheng, Y., Shi, D., Lv, X., Yu, Q., and Wang, P. (2009). High Efficiency and Stable Dye-Sensitized Solar Cells with an Organic Chromophore Featuring a Binary π -Conjugated Spacer. **Chemical Communications**. Issue 16, pp. 2198-2200. DOI: 10.1039/b822325d
- [6] Espinosa, R., Zumeta, I., Santana, J. L., Martí'nez-Luzardo, F., Gonzá'lez, B., Docteur, S., and Vigil, E. (2005). Nanocrystalline TiO₂ Photosensitized with Natural Polymers with Enhanced Efficiency from 400 to 600 nm. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 85, Issue 3, pp. 359-369
- [7] Kumara, G. R. A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A., and Tennakone, K. (2006). Shiso Leaf Pigments for Dye-Sensitized Solid-State Solar Cell. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 90, Issue 9, pp. 1220-1226. DOI: 10.1016/j.solmat.2005.07.007
- [8] Furukawa, S., Iino, H., Iwamoto, T., Kukita, K. and Yamauchi, S. (2009). Characteristics of Dye-Sensitized Solar Cells Using Natural Dye. **Thin Solid Films**. Vol. 518, No. 2, pp. 526-529
- [9] Gómez-Ortíz, N. M., Vázquez-Maldonado, I. A., Pérez-Espadas, A. R., Mena-Rejón, G. J., Azamar-Barrios, J. A., and Oskam, G. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes Extracted from Achiote Seeds. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 94, Issue 1, pp. 40-44. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.05.013

- [10] Hao, S., Wu, J., Huang, Y., and Lin, J. (2006). Natural Dyes as Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cell. **Solar Energy**. Vol. 80, Issue 2, pp. 209-214. DOI: 10.1016/j.solener.2005.05.009
- [11] Nishantha, M. R., Yapa, Y. P. Y. P., and Perera, V. P. S. (2012). Sensitization of PhotoelectroChemical Solar Cells with a Natural Dye Extracted from Kopsia Flavida Fruit. In **Proceedings of the 28th Technical Sessions**. March 2012, Kelaniya, Sri Lanka, Institute of Physics - Sri Lanka. pp. 54-58
- [12] Mozaffari, S. A., Saeidi, M., and Rahmanian, R. (2015). Photoelectric Characterization of Fabricated Dye-Sensitized Solar Cell Using Dye Extracted from Red Siahkooti Fruit as Natural Sensitizer. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. Vol. 142, pp. 226-231. DOI: 10.1016/j.saa.2015.02.003
- [13] Ganta, D., Jara, J., and Villanueva, R. (2017). Dye-Sensitized Solar Cells Using Aloe Vera and Cladode of Cactus Extracts as Natural Sensitizers. **Chemical Physics Letters**. Vol. 679, pp. 97-101. DOI: 10.1016/j.cplett.2017.04.094
- [14] Ganesh, T., Kim, J. H., Yoon, S. J., Lee, S., Lee, W., Mane, R. S., Han, J. W., and Han, S. H. (2009). Dye Anchored ZnO Nanoparticles: The Positive and Negative Photoluminescence Quenching Effects. **Journal of Applied Physics**. Vol. 106, Issue 8, DOI: 10.1063/1.3245398
- [15] Teoli, F., Lucioli, S., Nota, P., Frattarelli, A., Matteocci, F., Carlo, A. Di and Caboni, E. (2016). Role of pH and Pigment Concentration for Natural Dye-Sensitized Solar Cells Treated with Anthocyanin Extracts of Common Fruits. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 316, pp. 24-30
- [16] Kolev, T. M., Velcheva, E. A., Stamboliyska, B. A., and Spiteller, M. (2005). DFT and Experimental Studies of the Structure and Vibrational Spectra of Curcumin. **International Journal of Quantum Chemistry**. Vol. 102, Issue 6, pp. 1069-1079
- [17] Shalini, S., Balasundara prabhu, R., Prasanna, S., Mallick, Tapas K., and Senthilarasu, S. (2015). Review on Natural Dye Sensitized Solar Cells: Operation, Materials and Methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 51, Issue C, pp. 1306-1325. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.052
- [18] Lopes, T. J., Yaginuma, S. R., Novy Quadri, M. G., and Bastos Quadri, M. (2011). Evaluation of Red Cabbage Anthocyanins After Partial Purification on Clay. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. Vol. 54, No. 6, pp.1349-1356. DOI: 10.1590/S1516-89132011000600022
- [19] Meng, S., Ren, J., and E. Kaxiras, E. (2008). Natural Dyes Adsorbed on TiO₂ Nanowire for Photovoltaic Applications: Enhanced Light Absorption and Ultrafast Electron Injection. **Nano Letters**. Vol. 8, No. 10, pp. 3266-3272. DOI: 10.1021/nl801644d
- [20] Ma, T., Inoue, K., Noma, H., Yao, K., and Abe, E. (2002). Effect of Functional Group on Photochemical Properties and Photosensitization of TiO₂ Electrode Sensitized by Porphyrin Derivatives. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 152, Issue 1-3, pp. 207-212. DOI: 10.1016/S1010-6030(02)00025-4

- [21] Wongcharee, K., Meeyoo, V., and Chavadej, S. (2007). Dye-Sensitized Solar Cell Using Natural Dyes Extracted from Rosella and Blue Pea Flowers. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 91, No. 7, pp. 566-571
- [22] Hamadani, M., Safaei-Ghomi, J., Hosseinpour, M., and Masoomi, R. (2014). Uses of New Natural Dye Photosensitizers in Fabrication of High Potential Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). **Materials Science in Semiconductor Processing**. Vol. 27, pp. 733-739. DOI: 10.1016/j.mssp.2014.08.017
- [23] Hossain, Md. K., Pervez, M. F., Mia, M. N. H., Mortuza, A. A., Rahaman, M. S., Karim, M. R., Islam, J. M. M., Ahmed, F., and Khan, M. A. (2017). Effect of Dye Extracting Solvents and Sensitization Time on Photovoltaic Performance of Natural Dye Sensitized Solar Cells. **Results in Physics**. Vol. 7, pp. 1516-1523. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.011
- [24] Rajab, F. M. (2015). Effect of Solvent, Dye-Loading Time, and Dye Choice on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells. **Journal of Nanomaterials**. Vol. 2016, p. 8. DOI: 10.1155/2016/3703167
- [25] Narayan, M. and Raturi, A. (2011). Investigation of Some Common Fijian Flower Dyes as Photosensitizers for Dye Sensitized Solar Cellsabstract. **Applied Solar Energy**. Vol. 47, No. 2, pp. 112-117. DOI: 10.3103/S0003701X11020149
- [26] Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., and Ma, T. (2011). Dye-Sensitized Solar Cells using 20 Natural Dyes as Sensitizers. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 219, Issue 2-3, pp. 188-194. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2011.02.008
- [27] Crivello, J. V. and Bulut, U. (2005). Curcumin: A Naturally Occurring Long-Wavelength Photosensitizer for Diaryliodonium Salts. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**. Vol. 43, No. 21, pp. 5217-5231. DOI: 10.1002/pola.21017
- [28] Hao, S., Wu, J., Fan, L., Huang, Y., Lin, J., and Wei, Y. (2004). The Influence of Acid Treatment of TiO₂ Porous Film Electrode on Photoelectric Performance of Dye-Sensitized Solar Cell. **Solar Energy**. Vol. 76, pp. 745-750



การตรวจสอบสภาพถนนคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์ Concrete Pavement Monitoring with Ground Penetrating Radar

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง^{1*} ชนระบ วิชาลัย¹ และวีระพงษ์ พจนพิมล¹

Received: February, 2018; Accepted: May, 2018

บทคัดย่อ

การทรุดตัวของถนนอันเนื่องมาจากโพรงใต้ผิวจราจรที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีต นับเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทางหลวงในประเทศไทย โพรงอากาศที่เกิดขึ้นจะขยายตัวเป็นวงกว้างและสร้างความเสียหายต่อพื้นทางให้มากขึ้นต่อไปได้ การตรวจสอบนับเป็นปัจจัยสำคัญในการบำรุงรักษาโครงสร้างถนน ซึ่ง Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นเครื่องมือที่ทำงานได้รวดเร็วและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นทางจราจรนำไปสู่การพัฒนาและตอบสนองแผนการบำรุงรักษาทางหลวงได้

การศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองการสำรวจด้วย GPR จากโมเดลโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประโยชน์ในการออกแบบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลรวมถึงการสร้างแบบจำลองผิวทางคอนกรีต การทดลองใช้เครื่อง GPR ในการสำรวจบนแบบจำลองและบนทางหลวงจริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าความถี่ 900 MHz เป็นย่านที่เหมาะสมที่สุด ทั้งการจำลองการสำรวจที่ได้จากโมเดลทางคณิตศาสตร์และการวัดค่าจากแบบจำลองที่ได้ทำขึ้น สำหรับการทดลองจริงในภาคสนามพบว่า วิธีสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์สามารถตรวจพบโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตและยืนยันถึงสภาพที่สมบูรณ์ภายหลังการอุดซ่อมโพรงแล้ว

คำสำคัญ : การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์; การทรุดตัว; วิธีการอุดซ่อมโพรง; แบบจำลอง

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

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

Abstract

Pavement subsidences in Thailand have often damaged due to voids beneath the concrete pavement, which are likely prone to more widespread sub pavement erosion and further void development, making their early detection an important aspect of highway maintenance and remediation. As a fast and non-destructive testing tool, Ground Penetrating Radar (GPR) can provide valuable information for the development of road repair and maintenance programs.

This study, GPR forward modeling of concrete pavement model was constructed to test parameters that affected to GPR data collection in the field. Study results indicated that a frequency of 900 MHz is suitable for void detection in both GPR forward modeling and concrete pavement model results. Real data collection in the field using 900 MHz antenna before and after repaired by sub-sealing method also showed significant of sub-base structure improvement at repaired locations.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Settlement; Sub-Sealing; Modeling

บทนำ

Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นวิธีการสำรวจทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินระดับตื้น แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจที่ให้ความละเอียดสูง วิธีการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR เป็นวิธีที่นับว่าประสบผลสำเร็จอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการจัดทำแผนที่โครงสร้างทางธรณีวิทยา ตลอดจนการตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นคอนกรีตโดยกรมทางหลวง [1] เครื่องมือ GPR เป็น เครื่องมือที่ทรงประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อสำรวจใต้พื้นดินอย่างละเอียด และยังใช้งานในกระบวนการควบคุมคุณภาพในงานวิศวกรรมการก่อสร้าง ซึ่งเป็นวิธีการสำรวจที่สามารถทำได้โดยรวดเร็วและไม่ทำลายวัสดุที่ทดสอบ

ระบบการทำงานของเครื่องมือ GPR ประกอบด้วย ส่วนควบคุมที่มีหน่วยความจำและการแสดงผล และส่วนที่ส่งและรับสัญญาณคลื่น โดยประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือจะขึ้นอยู่กับความถี่ กำลังส่ง และการป้องกันคลื่นรบกวนจากภายนอก สายอากาศที่ใช้ในเครื่องมือ GPR เป็นแบบ dipole ประกอบด้วยจำนวนคู่ที่เป็นโลหะ การส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นความถี่อยู่ระหว่าง 50 MHz - 2.5 GHz โดยความลึกการสำรวจจะแปรผกผันกับความถี่ที่ส่งออกมาจากสายอากาศซึ่งมีความลึกการสำรวจตั้งแต่ 0.25 - 50.0 ม. การกระจายตัวของคลื่นไม่เพียงแต่แพร่คลื่นในวัสดุชั้นใต้ผิวดินเท่านั้น แต่สามารถส่งพลังงานบางส่วนไปในอากาศได้อีกด้วย ซึ่งรัศมีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจรบกวนเครื่องมือสื่อสารและสัญญาณโทรคมนาคมบริเวณใกล้เคียงได้ แต่ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของเครื่องมือสำรวจ GPR ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ตลอดจนค่าความชื้นในชั้นดินอีกด้วย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

การศึกษาในครั้งนี้มีที่มาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับถนนคอนกรีต โดยส่วนใหญ่มักจะตรวจพบได้เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นแล้ว หากมีการตรวจสอบพบได้ถึงโพรงที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับพื้นถนนจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถนนได้ อีกทั้งในขั้นตอนการซ่อมแซมไม่สามารถระบุได้ถึงการเติมเต็มของน้ำปูนที่อัดฉีดลงไป ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความถูกต้องในการตรวจสอบโพรงและชั้นวัสดุกันทางด้วยเครื่องมือ GPR โดยมีการจำลองผลการสำรวจ (Simulation) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการสำรวจในภาคสนามบนถนนหลวงที่มีผิวทางเป็นคอนกรีตก่อนและหลังการซ่อมแซมถนนด้วยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อตรวจสอบการเติมเต็มของน้ำปูนใต้พื้นถนนคอนกรีต

ตารางที่ 1 ปัจจัยหลักของประสิทธิภาพระบบ GPR [2]

Wave properties	High frequency	Low frequency
Wave length	Short	Long
Attenuation	High	Low
Resolution	High	Low
Depth of Investigation	Shallow	Deep

ทฤษฎี

1. ทฤษฎีการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุใต้ดิน

หลักการทำงานของ GPR จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ความถี่สูง พลังงานที่ส่งออกมาจากเครื่องสู่ผิวดินจะสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณเมื่อพบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (รูปที่ 1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric) และความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

เมื่อ

- v คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เมตร/วินาที)
- c คือ ความเร็วคงที่ของแสงเท่ากับ 3×10^8 (เมตร/วินาที)
- ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้น ๆ

เมื่อเครื่องมือ GPR ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งสัญญาณ (Transmitter, Tx) ซึ่งอยู่บนผิวดินและสัญญาณถูกรับโดยตัวรับสัญญาณ (Receiver, Rx) ซึ่งวางอยู่บนผิวดินเช่นกัน คลื่นสัญญาณที่ถูกส่งลงไปใต้ผิวดินและสัญญาณนั้นจะถูกสะท้อนกลับโดยวัตถุชั้นต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ผิวดิน (รูปที่ 1) สัญญาณที่รับได้จะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ โดยสามารถหา ค่าความลึกของชั้นวัสดุที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น (d) ตามสมการที่ (2)

$$d = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\tau}{2} \quad (2)$$

เมื่อ τ คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ (วินาที)

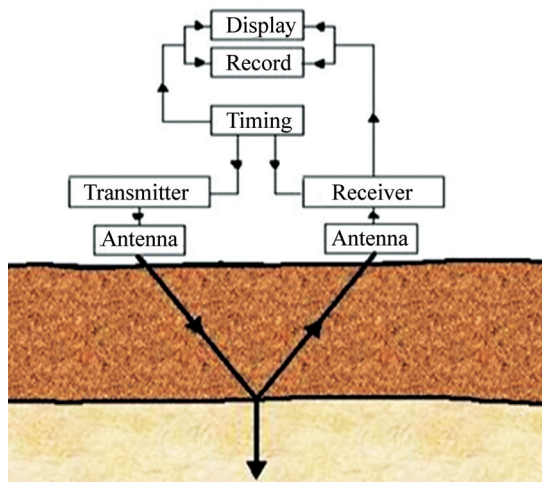
การสะท้อนกลับของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นโลหะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง ดังนั้นวัสดุที่เป็นโลหะใด ๆ ที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน อาทิเช่น ท่อโลหะหรือสายไฟฟ้า อาจถูกตรวจพบได้โดยง่ายกว่าปกติ โดยสามารถอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น กล่าวคือวัสดุสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน คือ มีค่า ϵ_1 และ ϵ_2 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณ (Γ) ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (3)$$

เมื่อ

Γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวัสดุ

ϵ_3 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ n



รูปที่ 1 การทำงานของระบบ GPR (<https://www.slideshare.net>)

ดังนั้น การสะท้อนกลับของคลื่นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ สามารถตรวจพบได้ง่ายเนื่องจากโลหะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการเผยแพร่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของน้ำในดินและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการที่ (4) โดย Topp, G. C. et al. [3] สามารถช่วยให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในชั้นวัสดุใต้ดินที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\epsilon_r^3 \quad (4)$$

โดยที่

θ คือ ค่าร้อยละของส่วนประกอบของน้ำในดิน

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ

เนื่องด้วยเครื่องมือ GPR มีการส่งกระจายคลื่นอยู่ในย่านความถี่เดียวกับความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารและความถี่ที่ใช้ในการแพร่ภาพโทรทัศน์ ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องมือการสำรวจจะถูกจำกัดกำลังส่งที่ควบคุมด้วยกฎหมายและทำการป้องกันการส่งคลื่นรบกวนด้วยวัสดุขั้วคลื่น ดังนั้นเครื่องมือสำรวจที่มีจำหน่าย จะสามารถเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมกับระดับความลึกการสำรวจเป็นหลัก ตารางที่ 2 แสดงความถี่ของสายอากาศของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ GPR ที่แนะนำการใช้งานสายอากาศและระดับความลึกในการสำรวจ

ตารางที่ 2 ความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านต่าง ๆ [4]

Center Frequency	Depth of Penetration	Typical Applications
2600 MHz	0 - 12 in (0.4 m)	Concrete Evaluation
2000 MHz	0 - 12 in (0.4 m)	Concrete Evaluation
1600 MHz	0 - 18 in (0.5 m)	Concrete Evaluation
900 MHz	0 - 3 ft (0 - 1 m)	Concrete Evaluation, Void Detection
400 MHz	0 - 12 ft (0 - 4 m)	Utility, Engineering, Environmental, Void Detection
270 MHz	0 - 18 ft (0 - 6 m)	Utility, Engineering, Geotechnical
200 MHz	0 - 30 ft (0 - 9 m)	Geotechnical, Engineering, Environmental
100 MHz	5 - 50 ft (2 - 15 m)	Geotechnical, Engineering, Mining
15 - 80 MHz	0 - 150 ft (0 - 50 m)	Geotechnical, Geological

อย่างไรก็ตาม ความลึกการสำรวจที่ได้ยังขึ้นอยู่กับค่าความชื้นและค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของชั้นดิน เนื่องด้วย GPR เป็นการสำรวจด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นพื้นที่ที่ทำการสำรวจยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการสำรวจ

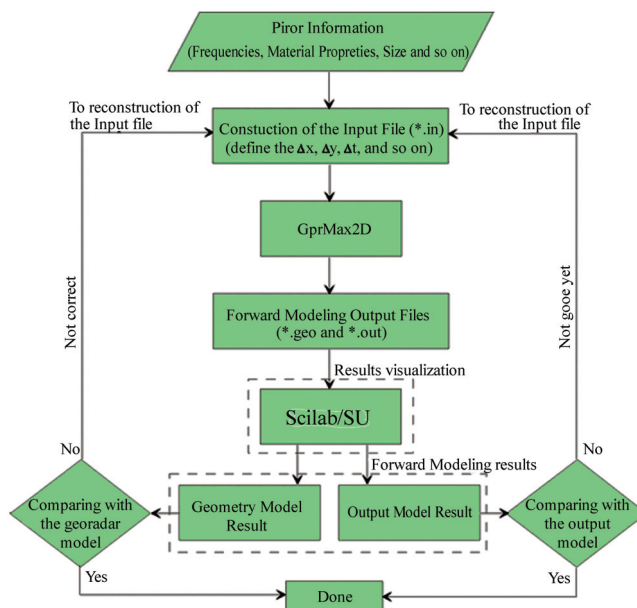
ผลการทดสอบด้วยเครื่อง GPR จะแสดงเป็นรูปภาพโดยมีลักษณะเป็นโทนสีต่าง ๆ ซึ่งสีที่แตกต่างกันแสดงถึงความสูงของยอดคลื่น (Amplitude) ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของชั้นวัสดุ ตามสมการที่ (3)

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน อธิบายได้ดังนี้

1. การจำลองผลการสำรวจ

การจำลองผลการสำรวจโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล เพื่อที่จะให้เหมาะสมที่สุดในการค้นหาโพรงอากาศใต้ผิวทางถนนคอนกรีต สามารถอธิบายถึงวิธีการปฏิบัติงานในการจำลองผลการสำรวจ GPR โดยแบบจำลองที่ทำการสำรวจต้องกำหนดขนาดและรูปตัดตามแนวความลึก ตลอดจนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแต่ละชนิดลงในแบบจำลอง (ตารางที่ 3) แล้วทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม GprMax2D ซึ่งเป็นการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR โดยมีพื้นฐานการประมวลผลเชิงตัวเลขแบบวิธีการ Finite-Difference แบบ Time-Domain พัฒนาโดย Antonis, G. [5] ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสร้างเป็นภาพได้จากโปรแกรมไซแล็บ (Scilab) ตามกระบวนการ ดังรูปที่ 2 เนื่องจาก Scilab เป็นโปรแกรมที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทำซิมูเลชัน (Simulation) ของระบบ



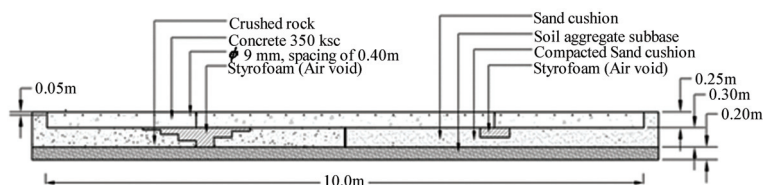
รูปที่ 2 ขั้นตอนการจำลองผลการสำรวจ

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หนา 0.25 ม. กำหนดให้ตำแหน่งที่ติดตั้งฉนวนสไตรโฟม (Styrofoam) คือโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทางแนวการสำรวจประกอบด้วย แบบจำลองแนวสำรวจที่ 1 (รูปที่ 3 ก) มีชั้นวัสดุรองพื้นทางเป็นหินคลุกบดอัดทรายบดอัด และแบบจำลองแนวสำรวจที่ 2 (รูปที่ 3 ข) มีชั้นวัสดุรองพื้นทางเป็นทรายบดอัดเพียงอย่างเดียว ค่าตัวแปรทางกายภาพ (ตารางที่ 3) ใช้ความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ

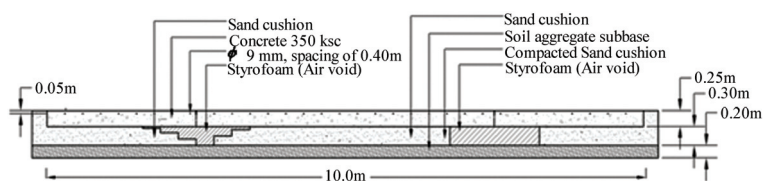
2. การก่อสร้างแบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตและชั้นรองพื้นทางตัวอย่าง

การก่อสร้างแบบจำลองถนนตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 3) กำหนดให้คอนกรีตชั้นผิวทางมีกำลังอัด (Compressive Strength) เท่ากับ 350 กก./ตร.ซม. ตำแหน่งโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทาง มีทั้งแบบชั้นบันไดและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดต่างกัน ติดตั้งแทนด้วยฉนวนสไตรโฟม สำหรับชั้นรองพื้นทาง

จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้นรองพื้นทางหินคลุกบดอัด และชั้นรองพื้นทางทรายบดอัด สำหรับส่วนเพิ่มเติมอื่น ได้ติดตั้งแผ่นเส้นใยธรณี (Geo-Textile) พลาสติกรองพื้นคอนกรีต แผ่นสังกะสีทึบสีมูม เหล็กเสริมคอนกรีต และตะแกรงเหล็ก จากนั้นจึงดำเนินการหล่อคอนกรีตให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด



(ก) แบบจำลองแนวสำรวจที่ 1



(ข) แบบจำลองแนวสำรวจที่ 2

รูปที่ 3 แบบจำลองผิวทางถนนคอนกรีตและชั้นรองพื้นทาง

3. การวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR

การวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D4748-98 [6] โดยใช้ชุดสายอากาศความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ เริ่มทำการสำรวจบนแบบจำลอง (Geo-Model) ด้วยเครื่องมือ GPR ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ 28 วัน ซึ่งเป็นเวลาที่คอนกรีตมีกำลังอัดคงที่ตามการออกแบบในชั้นต้น [7] ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นค่าคงที่ ได้อิเล็กทริกของวัสดุสำหรับการประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสำหรับแบบจำลอง [5], [8]

Materials	Dielectric constant
Air/Styrofoam	1/1.03
Concrete	6
Sand	3
Crushed rock	10
Rebar steel	10,000
Soil aggregate	12
Weathered clay	50

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของเครื่อง GPR

Parameters / Frequency	400 MHz	900 MHz	1.5 GHz
Tx-Rx (mm)	25	25	53
Sample/trace	1024	1024	1024
Bit/sample	16	16	16
Trace length (ns)	12	12	12
Transmission rate (KHz)	100	100	100
Trace/ meter	100	100	100
Meter/mark	1	1	1
Dielectric constant	4.5	4.5	4.5
Band pass filter (MHz)	100 - 800	225 - 2500	400 - 3000

4. การสำรวจด้วย GPR ในสถานที่จริง

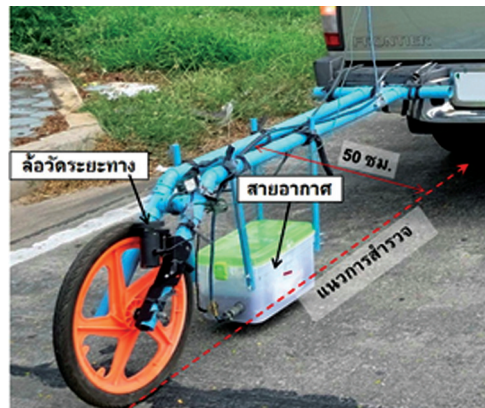
เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดจากการสำรวจผ่านแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงเริ่มดำเนินการสำรวจในสถานที่จริง บนทางหลวงหมายเลข 321 หลักกิโลเมตรที่ 28+000 ถึง 28+300 ช่องการจราจรด้านซ้ายสุด ผิวทางถนนคอนกรีตหนา 0.25 ม. ใช้ทรายหยาบเป็นชั้นรองผิวทางและรองพื้นทางด้วยวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐาน

การสำรวจภาคสนามใช้เครื่องมือ GPR พร้อมระบบวิเคราะห์ทางอัตโนมัติและสายอากาศความถี่ 900 MHz (เป็นค่าความถี่ที่ดีที่สุดจากการวัดค่าแบบจำลองด้วยเครื่องมือ GPR ในข้อ 3. โดยได้ทำการประยุกต์ในการติดตั้งเครื่องมือการสำรวจเข้ากับรถยนต์ (รูปที่ 4) ความเร็วของรถที่ใช้ในการสำรวจไม่เกิน 20 กม./ชม. โดยกำหนดให้แนวการสำรวจขนานกับขอบทางด้านซ้าย ในระยะห่าง 50 ซม. ซึ่งเป็นแนวร่องล้อรถบรรทุกที่เกิดความเสียหายสูงสุด ตามรูปแบบการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ของกรมทางหลวง [1]

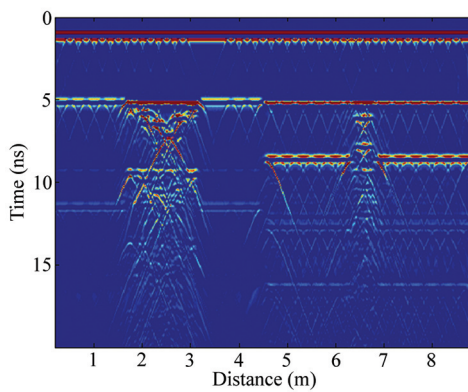
5. การวิเคราะห์และการแปลผลข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR จะได้รับการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Seismic Unix [9] โดยการใช้ฟังก์ชันการประมวลผลต่าง ๆ เพื่อให้ผลการสำรวจที่ได้มีความชัดเจนเพิ่มขึ้น โดยผลการสำรวจด้วยเครื่อง GPR จะแสดงเป็นรูปภาพโดยมีลักษณะเป็นโทนสีเข้มและอ่อนสลับกัน ซึ่งเกิดจากการกระจายสปีบริเวณยอดคลื่นและท้องคลื่น ความเข้มของสีจะแปรผันตรงกับขนาดความสูงของยอดคลื่นที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อน

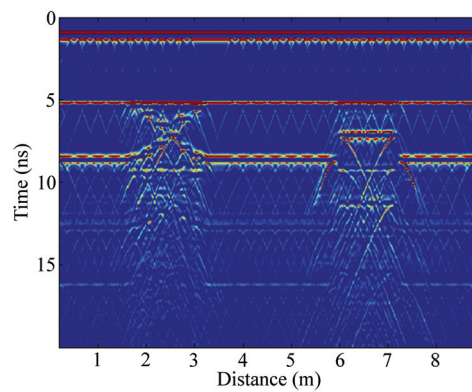
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลการสำรวจ GPR สามารถแปลความหมายได้โดยการพิจารณาจากรูปแบบการสะท้อนกลับของคลื่นที่แสดงในจอแสดงผล (Radargrams) ซึ่งวัตถุที่อยู่ใต้ดินจะแสดงผลการสะท้อนกลับของคลื่น โดยวัตถุกลมหรือวัตถุขนาดเล็กจะแสดงให้เห็นได้ในรูปแบบพาราโบลา จากการศึกษานี้สามารถพบการสะท้อนของขอบชั้นวัสดุ ความสนใจต่อผลการสะท้อนกลับของคลื่นจากรูปทรงของโพรงอากาศ ชั้นของวัสดุในแบบจำลอง และเหล็กเสริมคอนกรีตที่สอดคล้องกันกับรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]



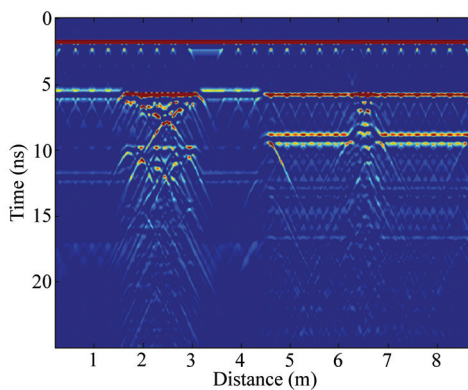
รูปที่ 4 การประยุกต์ในการติดตั้งเครื่องมือการสำรวจเข้ากับรถยนต์



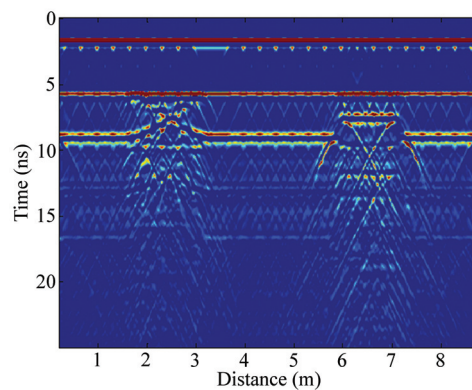
(ก) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 1.5 GHz



(ข) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 1.5 GHz

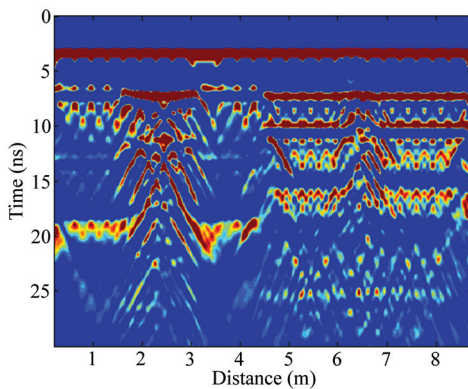


(ค) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 900 MHz

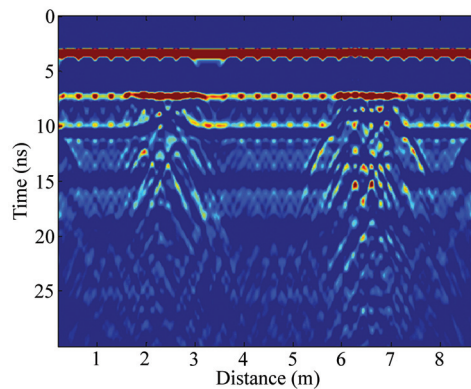


(ง) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 5 จำลองผลการสำรวจด้วย GPR ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



(จ) แนวสำรวจ No.1 ความถี่ 400 MHz



(ฉ) แนวสำรวจ No.2 ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 5 จำลองผลการสำรวจด้วย GPR ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ต่อ)

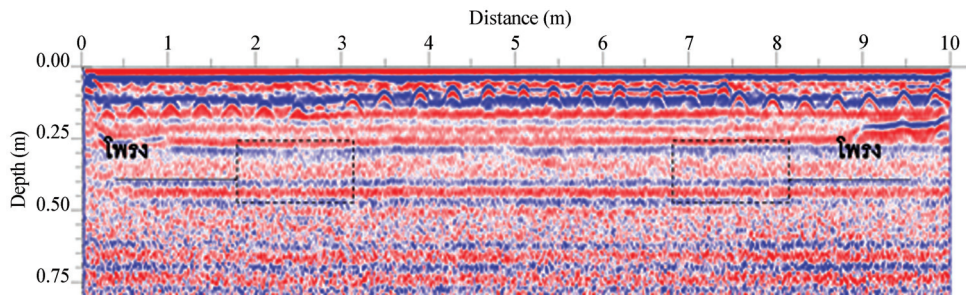
ผลการศึกษา

ผลการศึกษาจากแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ที่ใช้คลื่นความถี่ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ตามลำดับ โดยมีลักษณะการสะท้อนของคลื่นเป็นบริเวณผิวยาวต่อเนื่องของชั้นวัสดุและมีความเข้มของการสะท้อนเป็นไปตามค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยเฉพาะการสะท้อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่แสดงเป็นรูปพาราโบลาได้อย่างชัดเจน

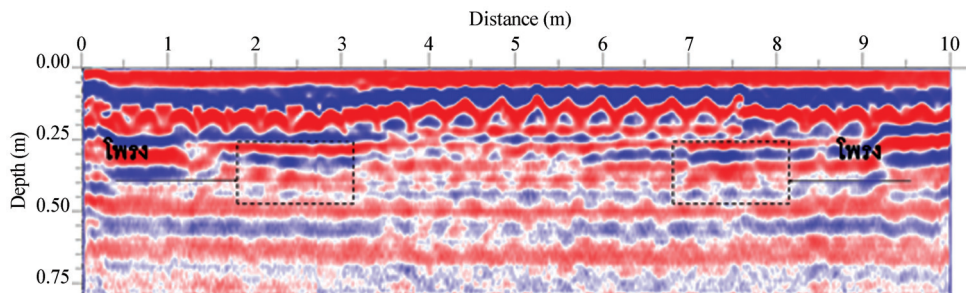
เนื่องจากคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นที่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างของค่าไดอิเล็กทริกของแต่ละวัสดุ กล่าวคือ เมื่อพื้นถนนคอนกรีตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 6 ในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นหินคลุก (Crushed Rock) มีค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ (6 : 10) ส่วนในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นทรายบดอัด (Sand Cushion) มีค่าความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ (6 : 3) จึงทำให้การสะท้อนในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นหินคลุกชัดเจนกว่าในบริเวณที่มีวัสดุรองพื้นเป็นทรายบดอัด

ผลการจำลองสำรวจแสดงการสะท้อนของคลื่น เริ่มจากการสำรวจด้วยคลื่นความถี่ 1.5 GHz ดังรูปที่ 5 (ก) - (ข) สามารถแสดงให้เห็นถึงรูปทรงการสะท้อนกลับของคลื่นอันเกิดขึ้นจากโพรงอากาศ แต่สัญญาณการสะท้อนกลับที่แสดงมีความเข้มน้อย หากพิจารณาถึงการนำไปใช้ในการสำรวจจริงคาดว่าสัญญาณจะถูกกลบตอนลงจากการดูดซับโดยชั้นดิน เมื่อสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านวัตถุตัวนำของชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ดินจะทำให้ไม่สามารถตรวจพบโพรงอากาศที่สร้างขึ้นได้

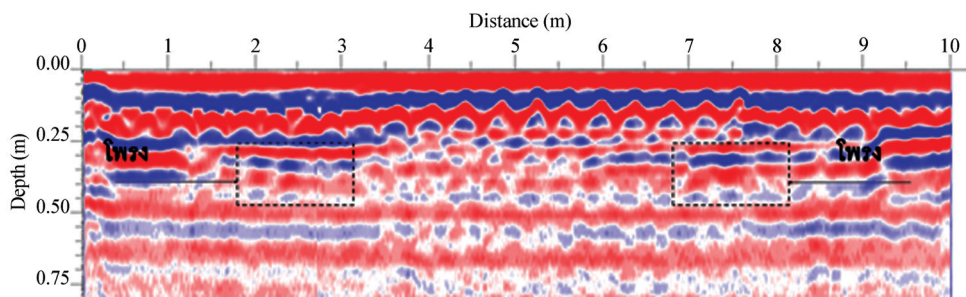
การจำลองผลการสำรวจโดยใช้ความถี่เท่ากับ 900 MHz ให้ผลการสำรวจที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบโพรงใต้ผิวทางจราจร จากรูปที่ 5 (ค) - (ง) โดยสามารถแสดงการสะท้อนกลับของรูปร่างโพรงอากาศที่ได้สร้างขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถจำแนกได้ถึงรูปทรงการสะท้อนกลับของแต่ละชั้นของโพรงอากาศได้เป็นอย่างดี และจากรูปที่ 5 (จ) - (ฉ) ที่ใช้ความถี่ที่มีความยาวคลื่นมากที่สุดคือ 400 MHz ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ชัดเจน ความถี่นี้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงโพรงขนาดเล็กในส่วนปลายทั้งสองของโพรงอากาศแบบขั้นบันได



(ก) 1.5 GHz

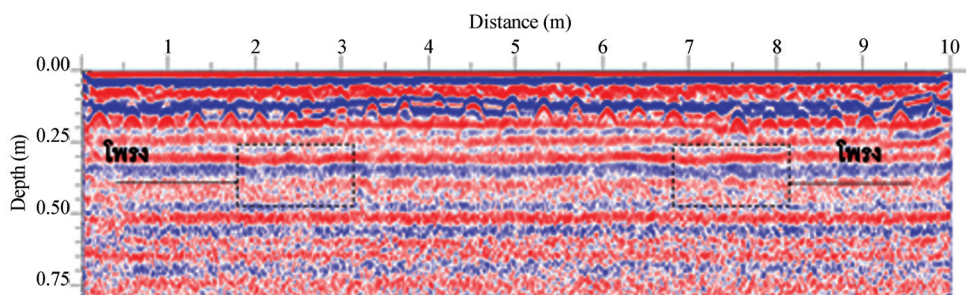


(ข) 900 MHz



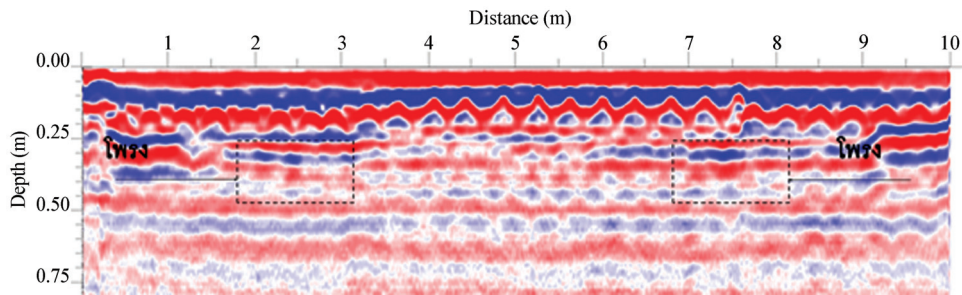
(ค) 400 MHz

รูปที่ 6 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 1 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง

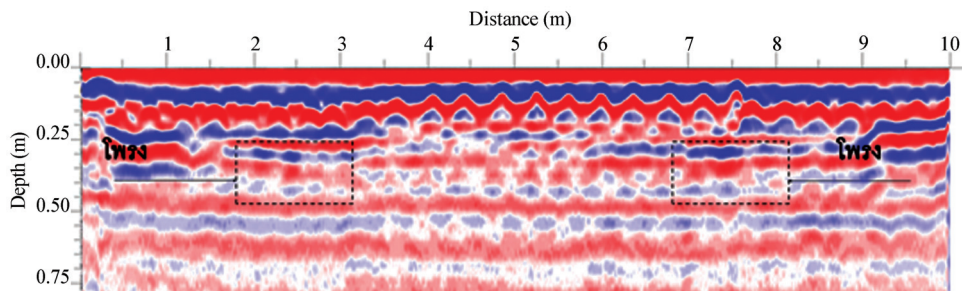


(ก) 1.5 GHz

รูปที่ 7 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 2 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง



(ข) 900 MHz



(ค) 400 MHz

รูปที่ 7 ผลการสำรวจ GPR ตามแนวการสำรวจที่ 2 ของแบบจำลองถนนตัวอย่าง (ต่อ)

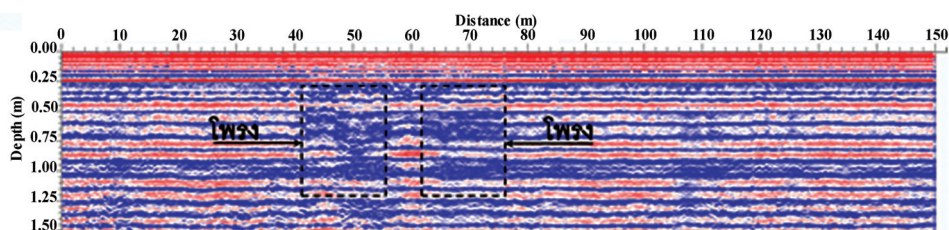
ผลการสำรวจ GPR ของแบบจำลองถนนตัวอย่างที่ได้ทำการเก็บข้อมูลภายหลังการก่อสร้างชั้นผิวทางคอนกรีตเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าผลการสำรวจด้วยสายอากาศความถี่ 1.5 GHz ไม่สามารถแสดงให้เห็นหรือยากที่จะระบุได้ถึงโพรงอากาศใต้แผ่นพื้นถนนที่สร้างไว้ได้ ดังรูปที่ 6 และ 7

ผลการสำรวจ GPR ด้วยสายอากาศความถี่ 900 MHz และ 400 MHz สามารถแสดงให้เห็นถึงโพรงอากาศใต้แผ่นพื้นถนนที่สร้างไว้ไม่ชัดเจนทั้งสองความถี่ เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในชั้นวัสดุทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณลงไปในจนไม่สามารถสะท้อนกลับขึ้นมาได้ จากผลการสำรวจหากไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโพรงแล้ว ยังเป็นการยากในการระบุตำแหน่งและขนาดของโพรงที่ตรวจพบได้

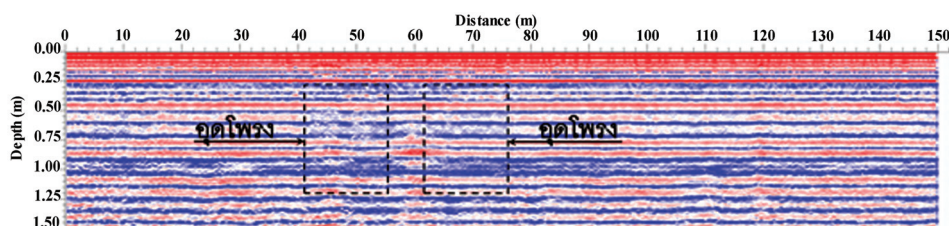
การสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR แบบเคลื่อนที่ได้ ดังรูปที่ 4 บนทางหลวงหมายเลข 321 ผลการสำรวจโพรงอากาศได้พิจารณาจากร่องและหลังกการก่อสร้าง 28 วัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8 ตามหลักการสะท้อนคลื่นที่แปรผันตามค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นวัสดุ พบว่ามีโพรงอากาศเกิดขึ้นได้ผิวจราจรคอนกรีต (ต่ำกว่า 25 ซม.) แสดงเป็นสีน้ำเงิน - ฟ้ำที่ตำแหน่ง 10 40 - 55 65 - 75 110 และ 125 เมตร ตามลำดับ โดยเฉพาะตำแหน่งในกรอบเส้นประ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นทางได้ผิวจราจรเกิดโพรงอากาศมากกว่าผิวทางคอนกรีต ดังรูปที่ 8(ก)

ภายหลังการอัดฉีดน้ำปูนด้วยวิธี Sub-Sealing (มาตรฐานกรมทางหลวง ทล-ม. 327/2543) เพื่อให้ น้ำปูนเข้าไปอุดโพรงอากาศที่อยู่ใต้ผิวทางจราจร หลังจากนั้นต้องใช้เครื่อง GPR ในการตรวจสอบถึงการเติมเต็มโพรงได้พื้นผิวจราจรและประมวลผล ดังรูปที่ 8 (ข) พบว่าสับริเวณดังกล่าวมีความเข้มมากขึ้นเป็นปกติ เนื่องจากการแทนที่ของน้ำปูนทำให้ชั้นที่เป็นโพรงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากผลการ

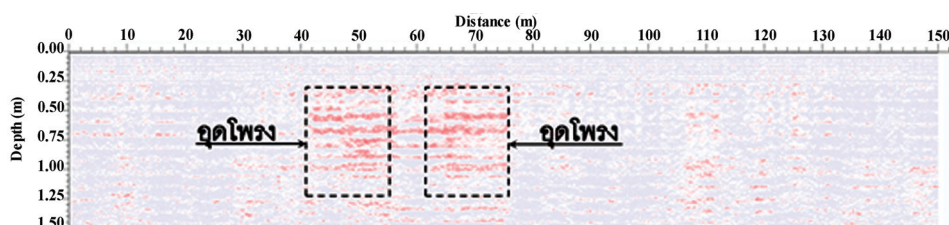
สำรวจแสดงให้เห็นว่าน้ำปูนที่ซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing สามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างในโพรงอากาศได้ผิวทางได้อย่างเต็มที่ เป็นการแก้ไขปรับปรุงแผ่นคอนกรีตที่เสียหายเพียงบางส่วน จากการเกิดโพรงหรือช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตได้ในราคาที่ไม่จำเป็นต้องทุบหรือแผ่นคอนกรีตเดิมออก สุดท้ายคือรูปที่ 8 (ค) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างก่อนซ่อมและหลังซ่อมด้วยวิธีหักลบ (Subtract) ซึ่งจุดที่น้ำปูนเข้าไปแทนช่องว่างของอากาศจะปรากฏเป็นสีเข้ม



(ก) ตำแหน่งโพรงอากาศใต้พื้นทาง ก่อนดำเนินการซ่อม



(ข) การอุดโพรงอากาศ ภายหลังการซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing



(ค) ความแตกต่าง ระหว่างรูป (ก) และ (ข) ภายหลังการอุดซ่อมโพรงอากาศแล้ว
รูปที่ 8 ผลการสำรวจโพรงอากาศด้วยเครื่องมือ GPR ในสถานที่จริง

อภิปรายผล

การจำลองผลการสำรวจโพรงอากาศใต้ผิวทางจราจรด้วยเครื่อง GPR ด้วยความถี่ที่แตกต่างกันคือ 1.5 GHz, 900 MHz และ 400 MHz ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้ย่านความถี่ที่นำไปสู่การแปลผลที่ดีที่สุด ซึ่งในแต่ละพื้นที่ผู้ดำเนินการสำรวจอาจต้องทำการปรับจูนความถี่ที่เหมาะสมสำหรับงานนั้น ๆ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ความถี่ 900 MHz สามารถให้ผลการสำรวจชัดเจนที่สุด สำหรับความถี่ 1.5 GHz มีสัญญาณการสะท้อนกลับที่มีความเข้มต่ำเกินไปการแสดงผลไม่ชัดเจน และความถี่ 400 MHz ไม่สามารถตรวจพบโพรงขนาดเล็กในส่วนของโพรงอากาศที่มีรูปร่างแบบชั้นบันไดได้

แม้ในขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลองถนนตัวอย่างได้ทำการปูรองพื้นด้วยแผ่นพลาสติกก่อนการเทพื้นคอนกรีตก็ยังไม่สามารถควบคุมความชื้นของวัสดุคันทางในถนนคอนกรีตได้ ซึ่งความชื้นส่วนหนึ่งเกิดจากความชื้นที่สะสมตัวอยู่ลึกลงไปใต้ดินที่ซึมขึ้นมาสะสมตัวอยู่ใต้แผ่นพลาสติกตลอดจนการรั่วซึมของแผ่นพลาสติก จึงทำให้ผลการสำรวจที่ได้ไม่ชัดเจน แต่ยังไม่พอที่จะระบุได้ถึงตำแหน่งของโพรงที่สร้างไว้ อย่างไรก็ตาม หากไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโพรงแล้ว ยังเป็นการยากที่จะระบุได้ถึงจุดที่เป็นโพรง

การสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ในสถานที่จริงสามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพของผิวจราจรและพื้นทางก่อนและหลังการซ่อมด้วยวิธี Sub-Sealing โดยการศึกษาแนะนำเสนอเฉพาะกรณีศึกษาบริเวณของโพรงอากาศและสภาพภายหลังการซ่อมที่ชัดเจนเพื่อเป็นแนวทางในการใช้เครื่องมือ GPR เท่านั้น โดยมีได้หมายรวมถึงภาพตัดตลอดเส้นทางการสำรวจ

สรุปผล

การดำเนินการวิจัยและศึกษาเพื่อหาวิธีตรวจสอบโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์และหาวิธีในการซ่อมบำรุงผิวทางจราจร หรือแม้กระทั่งการตรวจสอบภายหลังจากการซ่อมบำรุงผ่านไปแล้วก็ตามพบว่า

1. การจำลองผลการสำรวจ พบว่าคลื่นทั้งสามย่านความถี่ที่ใช้ในการทดลอง สามารถแสดงให้เห็นการสะท้อนของวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในแบบจำลองได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเหล็กเสริมคอนกรีตและรอยต่อในแต่ละชั้นของวัสดุที่มีความแตกต่างกัน
2. โปรแกรม GprMax ที่ใช้ในการจำลองนี้ไม่ได้มีการจำลองการดูดซับคลื่นด้วย ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถแสดงได้ถึงชั้นวัสดุได้แต่อย่างชัดเจนซึ่งแตกต่างจากความจริง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการถูกดูดซับและสูญเสียในระหว่างการเดินทางผ่านชั้นวัสดุต่าง ๆ
3. การก่อสร้างถนนคอนกรีตตัวอย่างยากที่จะควบคุมความชื้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีตจึงทำให้ผลการสำรวจของทุกตัวอย่างความถี่ที่ทำการเก็บข้อมูลหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้ว 28 วัน ไม่ชัดเจนยากที่จะระบุตำแหน่งของโพรงอากาศและรอยต่อของชั้นวัสดุได้ต่างจากแบบจำลองที่ได้จากการจำลองผลการสำรวจด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแยกชั้นวัสดุได้อย่างชัดเจน
4. การสำรวจในภาคสนามได้ทำการสำรวจก่อนและหลังการอัดฉีดน้ำปูนแล้ว 28 วัน พบว่ามีการแทรกตัวของน้ำปูนเข้าสู่ชั้นวัสดุคันทาง โดยพิจารณาได้จากการเปลี่ยนไปของสีในผลการสำรวจซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เพิ่มขึ้น
5. วิธีการสำรวจด้วยเครื่อง GPR นับเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณ และให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้ สามารถตรวจสอบโพรงใต้ผิวจราจรได้อย่างละเอียดถูกต้อง ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับเทคนิคและวิธีการดำเนินงานของผู้ใช้เครื่องมือด้วยเช่นกัน

จากจุดเด่นของวิธีการสำรวจด้วยเครื่อง GPR ดังที่ได้สรุปในเบื้องต้น สามารถนำไปศึกษาพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นทางจราจรในระยะยาวได้ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือ GPR ยังมีขีดจำกัดด้านกำลังส่งที่ถูกจำกัดเพื่อป้องกันการรบกวนระบบการสื่อสารภายนอก ตลอดจนความถี่ที่ใช้กันกล่าวคือ เครื่องมือ GPR สามารถตรวจพบการสะท้อนของชั้นวัสดุที่แตกต่างกันได้เมื่อชั้นวัสดุนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ใช้

ในด้านความลึกของการสำรวจยังขึ้นอยู่กับความถี่ที่เลือกใช้งาน ตลอดจนความชื้นในชั้นวัสดุที่เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณที่ทำให้ความลึกการสำรวจที่ได้ลดลง โดยเฉพาะพื้นถนนคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลที่ตั้งอยู่บนดินเหนียวอ่อนที่มีความชื้นในดินสูง

References

- [1] Bancha, F., Vijitachara, S., Saree, S., Sakechai, A., and Pornchai, S. (2004). **Measurement of Cavity Filling Under Concrete Slabs by GPR and FWD**. Report No. 211. Bureau of Road Research and Development. Department of Highways. Ministry of Transport. Thailand. (In Thai)
- [2] Sato, M. (2005). **Short Course Lecture Note on GPR and Its Application to Environmental Study**. Lecture note of the Short course on Ground Penetration Radar and Electric Imaging for Solving Engineering Problem. AIT Bangkok, Thailand. 7-9 November 2005. Asian Institute of Technology. Thailand.
- [3] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Line. **Water Resources**. Vol. 16, pp. 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574
- [4] GSSI. (2017). **Antennas Manual**. Geophysical Survey Systems, Inc. Access (4 April 2018). Available (<http://www.geophysical.com>)
- [5] Antonis, G. (2006). **GprMax2D/3D simulator Version 2.0**. Access (20 November 2017). Available (<http://www.gprmax.com/code/UserGuideV2.pdf>)
- [6] ASTM D4748-98. (2002). **Standard Test Method for Determining Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar**. Annual Book of ASTM Standards 2002, Section 04: Construction Soil and Rock (I). American Society for Testing and Materials. Vol. 04.08.
- [7] Wiwattanachang, N., Giao, P. H., and Vichalai, C. (2015). Crack Detection in Fiber Concrete by Electrical Imaging Methods. **The 4th International Symposium on the Fusion science and Technologies (ISFT2015)**. RUS. Pra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand.
- [8] Chatterjee, R. (1989). **Antenna Theory and Practice**. 2nd ed. New Age International Inc.
- [9] CWP/SU. (2011). Seismic Un*x Release No. 43. An open source software package for seismic research and processing. **Center for Wave Phenomena**. Colorado School of Mines. Access (22 November 2017). Available (<http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes>)
- [10] SEGJ. (2004). Application of geophysical methods to engineering and environmental problems. **Society of Exploration Geophysicists of Japan**. Japan.



ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

Biomass Pellets Electrical Power Generation System by Using Gasification Technology

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์^{1*}

Received: May, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ระบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ชุดสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ มอเตอร์สร้างแรงขับเคลื่อนเพื่อใช้แก้ปัญหาเรื่องการเกิดไพรงของเชื้อเพลิงภายในเตาแก๊สซิไฟเออร์ และระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อให้ระบบเกิดความปลอดภัยและง่ายต่อการใช้งาน ระบบที่สร้างขึ้นนี้ผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สได้อย่างต่อเนื่อง เพราะสามารถเติมเชื้อเพลิงเข้าระบบได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงาน เชื้อเพลิงที่ระบบใช้เป็นชีวมวลอัดเม็ดที่มีขนาดเล็ก ง่ายต่อการลำเลียงเข้าเตา ให้พลังงานสูงและมีความชื้นต่ำ การทดสอบระบบทำโดยการเผาชีวมวลอัดเม็ดในเตาแก๊สซิไฟเออร์เพื่อผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส ใช้ชีวมวลอัดเม็ดปริมาตร 20 ลิตร สามารถผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สได้ประมาณ 40 นาที การสิ้นเปลืองเตาทุก ๆ 10 นาที สามารถแก้ปัญหาการเกิดไพรงของเชื้อเพลิงในเตาได้ เมื่อเชื้อเพลิงใกล้หมดสามารถบ่อนเชื้อเพลิงชุดใหม่เข้าเตาแก๊สซิไฟเออร์โดยไม่ต้องหยุดการทำงาน ระบบจึงสามารถจ่ายโปรคิวเซอร์แก๊สให้กับเครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 590 วัตต์

คำสำคัญ : ระบบผลิตไฟฟ้า; เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด; แก๊สซิฟิเคชัน; โปรคิวเซอร์แก๊ส;

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Nakhon Pathom

* Corresponding Author E - mail Address: jensak.eak@rmutr.ac.th

Abstract

This research is a development of the biomass pellets power generation system by using gasification technology. This system consisted of a screws conveyer transporting fuel into the gasifier stove. Motor vibration to deal with the cavity of fuel that occurs inside the gasifier stove and control cabinets in the system for ease of use and to ensure safety. The system can produce producer gas continuously because they can refuel without stopping the system. The experiment use biomass pellets to testing system because it's easy to transport fuel into gasifier stove. High energy and low humidity. The experiment is burning biomass pellets in a gasifier stove to produce producer gas. Used 20-liter biomass pellet can produce producer gas for about 40 minutes. The cavity of fuel sole by vibrate the stove every 10 minutes. When fuel is exhausted, new fuel is fed into the gasifier by screw conveyor. The system is able to continuously supply producer gas to the generator engine. The generator can supply a maximum power of 590 watts to load.

Keywords: Power Generation; Biomass Pellet; Gasification; Producer Gas

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในประเทศนั้นเพิ่มสูงขึ้นทุกปีตามอัตราการเติบโตของเศรษฐกิจ ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้นพื้นที่ชนบทหลายแห่งในประเทศก็ยังไม่มีความพร้อมในการใช้พลังงานไฟฟ้าใช้ ในปัจจุบันพื้นที่ชนบทที่ยังไม่มีไฟฟ้าการผลิตไฟฟ้าอาจใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้พลังงานจากน้ำมัน หรือพลังงานจากน้ำ เช่น ลำธารหรือน้ำตก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ การใช้พลังงานทดแทน เช่น แสงอาทิตย์หรือพลังงานลมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงเวลาการใช้งาน ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีเศษวัสดุเหลือจากการเกษตรมากมาย ซึ่งชีวมวลเหล่านี้เป็นพลังงานทดแทน (Renewable Energy) ที่สามารถนำมาเผาไหม้ให้ความร้อนได้โดยตรง เมื่อแปรรูปเชื้อเพลิงเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะทำให้ปริมาณความร้อนของชีวมวลสม่ำเสมอและสูงขึ้น ลดปริมาตรของเชื้อเพลิง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น [1]



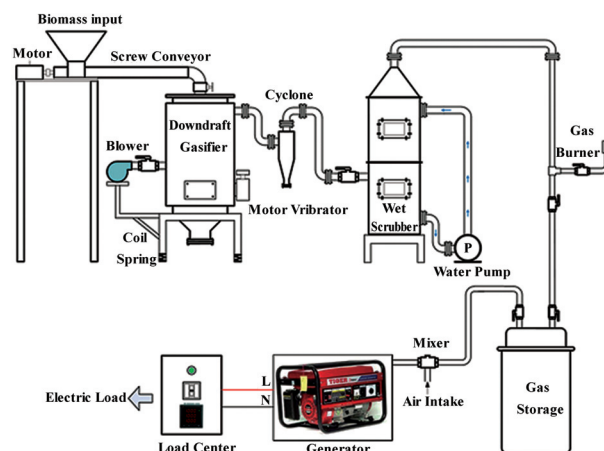
รูปที่ 1 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellets) [2] เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูงจึงมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีกว่าชีวมวลทั่วไป และยังผลิตได้จากวัสดุที่หลากหลาย เช่น เหง้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด เปลือกยูคาลิปตัส เศษวัสดุไม้แปรรูปจากการทำเฟอร์นิเจอร์ ไม้ยืนต้นตาย รวมถึงกิ่งไม้ที่ได้จากการตัดแต่งอีกด้วย ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 1

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการย่อยและลดความชื้น แล้วนำมาอัดเป็นแท่ง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 - 10 มิลลิเมตร ความยาว 20 - 50 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำไปลดอุณหภูมิ โดยรักษาความชื้นให้อยู่ระหว่างร้อยละ 8 - 15 จึงทำให้ได้ค่าความร้อนสูง เหมาะกับการนำไปใช้งาน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) และยังใช้ในเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทำให้ได้เปรียบเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่นทั้งในด้านพื้นที่จัดเก็บ และด้านการขนส่งระยะทางไกล ชีวมวลอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงถึง 600 - 650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความร้อน 6,000 - 6,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ทำให้มีการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ จึงสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกต้นเหตุของสภาวะโลกร้อนได้ [3] - [4] แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมาเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แล้วนำโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เดินเครื่องยนต์ต้นกำลังสำหรับการใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็ก และหาวิธีการบ่อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซิฟิเคอร์อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดการทำงาน of เตาเพื่อให้ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง [5] - [6]

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบสร้างและทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันที่ประกอบด้วย เตาแก๊สซิฟิเคอร์แบบอากาศไหลลง ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงอัดเม็ด ระบบสั่นสะเทือนเพื่อสร้างแรงเฉยทำให้เชื้อเพลิงไม่ก่อตัวเป็นโพรงทำให้เตาสามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สได้อย่างต่อเนื่อง ระบบทำความสะอาดแก๊ส ระบบกักเก็บแก๊ส และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แผนภาพรวมของระบบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพรวมของระบบ

กระบวนการผลิตโปรติวเซอร์แก๊ส

การเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นโปรติวเซอร์แก๊สจะใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง (Down Draft) เพราะเตาชนิดนี้สามารถผลิตแก๊สที่ไม่มีส่วนประกอบออกมากนัก ปกติโปรติวเซอร์แก๊สที่ได้จะมีความร้อนสูง ต้องทำความสะอาดและลดอุณหภูมิลงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องกำจัดฝุ่นขนาดใหญ่ออกโดยใช้ไซโคลน และกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กออกอีกครั้งพร้อมลดความร้อนลงด้วยกระบวนการดักจับด้วยการสเปรย์น้ำในเครื่องพ่นจับแบบเปียก (Wet Scrubber) และกรองด้วยตัวกรองก่อนส่งเข้าผสมกับอากาศให้ได้สัดส่วนเพื่อป้อนเข้าเครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป [7] - [8]

การออกแบบระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาใช้การทำงานของกลไกแบบสกรูลำเลียง (Screw Conveyor) ชุดสกรูแบบนี้เหมาะสำหรับใช้ขนถ่ายวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ด สามารถใช้งานได้ทั้งในแนวนอนหรือแนวลาดเอียง สร้างได้ง่ายเพราะมีส่วนประกอบเพียง 3 ชิ้น คือ รางตัวถัง เกลียวสกรูขนถ่าย และตัวต้นกำลังขับเคลื่อน ในงานวิจัยนี้ใช้สกรูลำเลียงแบบระนาบ มีความสูงจากพื้นถึงถังรับเชื้อเพลิง 275 เซนติเมตร ความยาวของชุดสกรู 97 เซนติเมตร ความกว้าง 12 เซนติเมตร และความกว้างของถังรับเชื้อเพลิง 50 เซนติเมตร โดยติดตั้งตัวต้นกำลังเป็นมอเตอร์เกียร์ ขนาด 1/4 แรงม้า

การออกแบบระบบกำจัดกาเกิดโพรงของเชื้อเพลิง

เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็ก เมื่อใส่ลงในเตาแก๊สซิไฟเออร์จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเกาะตัวกันและเมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนท้องเผาไหม้จะกลายเป็นขี้เถ้าตกลงด้านล่าง แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงที่เกาะตัวกันแน่นจึงทำให้เกิดโพรงของเชื้อเพลิงขึ้นภายในเตาทำให้โปรติวเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นไม่มีความต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องกำจัดกาเกิดโพรงของเชื้อเพลิงโดยการออกแบบให้เตาสามารถสั่นเขย่าได้ตามเวลาที่ตั้งไว้ดังรูปที่ 3 โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้



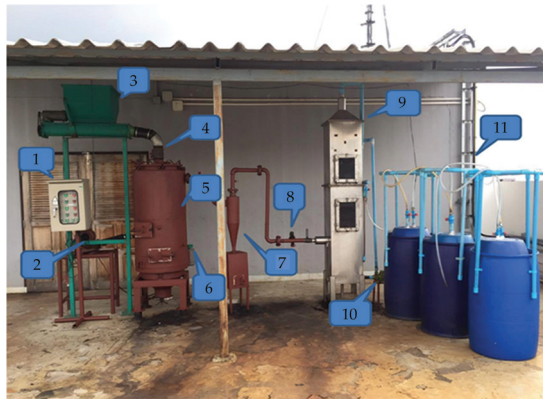
รูปที่ 3 การติดตั้งชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน (ก) ชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน (ข) การติดตั้งชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน (ค) ติดตั้งขาเตาแบบสปริง

1. ชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ติดตั้งกับลูกเบี้ยวที่แกนของมอเตอร์ เมื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนจะเกิดแรงสั่นสะเทือนช่วยให้เชื้อเพลิงไหลลงไม่ก่อตัวเป็นโพรง อีกทั้งยังทำให้ขี้เถ้าตกลงจากท้องเผาไหม้ลงสู่ส่วนเก็บขี้เถ้าอีกด้วย

2. ขาเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบสปริง การออกแบบและสร้างส่วนขาของเตาแก๊สซิไฟเออร์ ที่สามารถรองรับการสั่นสะเทือนของเตาได้นั้น จะใช้ขาแบบสปริงรองรับน้ำหนักของเตา เพื่อทำให้เตาแก๊สซิไฟเออร์

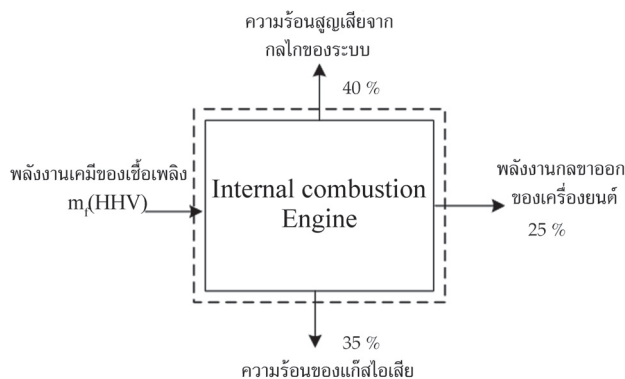
เกิดการเขย่าในลักษณะขึ้นลงเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนจากชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน การใช้ซาสปริงแบบนี้จะทำให้การสั่นของเตาเพิ่มมากขึ้นกว่าการติดตั้งเตาแบบยึดแน่นกับพื้น

3. การเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยข้อต่อแบบอ่อน เนื่องจากมีการสร้างแรงสั่นสะเทือนที่ตัวเตาแก๊สซิไฟเออร์ จึงต้องใช้ข้อต่อแบบอ่อนติดตั้งเชื่อมต่อกับส่วนประกอบอื่นที่ติดกับเตา เนื่องจากต้องทำการเขย่าเตาให้เกิดการสั่นสะเทือนหากติดตั้งอุปกรณ์ส่วนอื่นแบบยึดแน่นกับตัวเตาอาจทำให้เกิดการชำรุดเสียหายและเกิดการรั่วไหลของแก๊สได้



รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

จากรูปที่ 4 อุปกรณ์ที่ปรากฏตามหมายเลขในรูป คือ (1) ตู้คอนโทรล (2) พัดลมโบลเวอร์ (3) สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง (4) วาล์วปิดกั้นแก๊สย้อนกลับ (5) เตาแก๊สซิไฟเออร์ (6) มอเตอร์สั่นสะเทือน (7) ไซโคลน (8) หัวจุดทดสอบแก๊ส (9) เครื่องพ่นจับแบบเปียก (10) ป้อนน้ำ และ (11) ถังเก็บแก๊ส



รูปที่ 5 สมมติฐานประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์

ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ระบบต้องการ [9]

ความต้องการเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5 ซึ่งโดยปกติแล้วเครื่องยนต์ประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานกลได้ร้อยละ 25

ที่เหลือจะสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนในตัวเครื่องยนต์ร้อยละ 40 และสูญเสียเป็นแก๊สร้อนในรูปไอเสียร้อยละ 35 ดังนั้นจากสมการสมดุลพลังงานจึงสามารถหาพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (1)

$$m_f HHV = \text{Heat loss to body}(40\%) + \text{Exhaust heat}(35\%) + \text{Mechanical}(25\%) \quad (1)$$

ซึ่งเมื่อกำหนดให้พลังงานกลที่ต้องขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้ามีค่า 2.2 kW แล้วทำให้ค่าพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ต้องการมีค่าดังสมการที่ (2)

$$m_f HHV = \frac{2.2}{0.25} = 8.8 \text{ kW} = 31.68 \text{ MJ / hr} \quad (2)$$

ค่า HHV เป็นค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (High Heating Value) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการของดulongค์ (Dulong's formula) ดังนี้

$$HHV = 4.185 \times \left[8,080(C) + 34,200 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,500(S) \right] \text{ kJ / kg} \quad (3)$$

ซึ่งค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง พบว่าค่า HHV ของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวล มีค่าประมาณ 4,133 - 4,624 kJ/kg ดังนั้นจากค่าความต้องการเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดังกล่าวนี้ จะได้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของโปรตีนเซอร์แก๊ส ที่เครื่องยนต์ต้องการเท่ากับสมการที่ (4)

$$m_f = \frac{31.68}{4.133} = 7.665 \text{ kg / hr} \quad (4)$$

ขั้นตอนการทดลอง

การเริ่มเดินระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

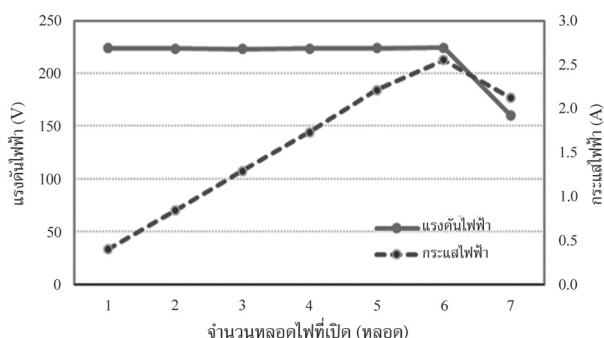
1. นำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดใส่ลงในเตาแก๊สซิฟิเคชันทางช่องเติมเชื้อเพลิงด้านบน
2. จุดไฟให้เชื้อเพลิงติดแล้วปิดฝาเตาด้านหน้า (รูปที่ 6) เปิดพัดลมเพื่อเติมอากาศเข้าห้องเผาไหม้ของเตาแก๊สซิฟิเคชัน
3. เมื่ออุณหภูมิของเตาสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสทำให้เกิดโปรตีนเซอร์แก๊สที่ติดไฟได้ แก๊สจะไหลผ่านไซโคลนและเวทสกรับเบอร์เพื่อแยกฝุ่นละอองออก
4. ทดสอบว่าแก๊สติดไฟหรือไม่ (รูปที่ 6) หากแก๊สติดไฟได้แล้วเปิดวาล์วให้โปรตีนเซอร์แก๊สไหลเข้าสู่ถังเก็บแก๊ส
5. เมื่อได้แก๊สปริมาณมากพอ เปิดวาล์วให้โปรตีนเซอร์แก๊สไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสตาร์ทเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า
6. จ่ายไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นให้กับโหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ และวัดปริมาณต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพร้อมบันทึกผลการทดลอง



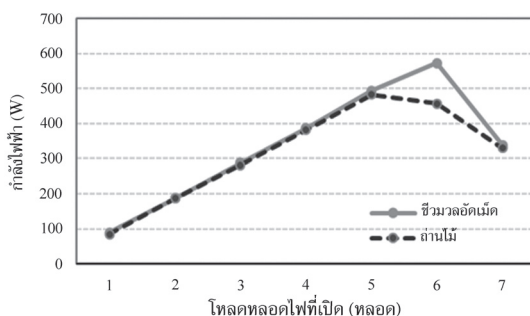
รูปที่ 6 การจุดเตาแก๊สซิไฟเออร์เพื่อเริ่มต้นผลิตแก๊สและการจุดทดสอบว่าแก๊สติดไฟหรือไม่

ผลการวิจัย

ทดสอบเดินเครื่องระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 2.2 กิโลวัตต์ โดยใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้ จากการทดลองใช้โหลดเป็นหลอดอินแคนเดสเซนต์ขนาด 100 วัตต์ ต่อขนานกันโดยมีสวิตช์ปิด - เปิด ควบคุมให้สามารถเพิ่มจำนวนการขนานกันของหลอดได้ ทำการเดินระบบผลิตไฟฟ้าแล้วเริ่มจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้หลอดไฟ 1 หลอด จดบันทึกค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า หลังจากนั้นเพิ่มจำนวนหลอดไฟขึ้นอีกครั้งละ 1 หลอด ทำซ้ำเดิมจนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายพลังงานเพิ่มได้ (เครื่องดับ) ข้อมูลที่บันทึกได้แสดงดังรูปที่ 7

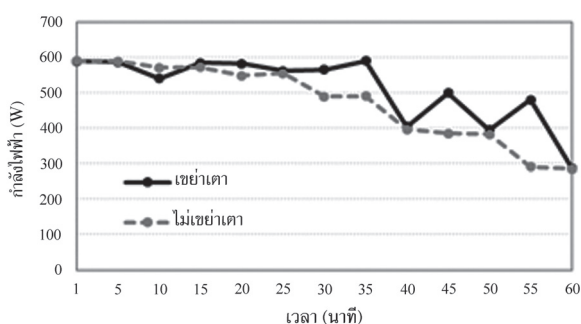


รูปที่ 7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด



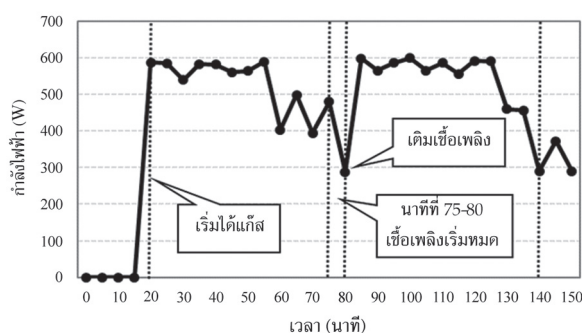
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและถ่านไม้

พิจารณากราฟกำลังไฟฟ้ารูปที่ 8 พบว่าการใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงนั้นระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้โหลดหลอดอินแคนเดสเซนต์ขนาด 100 วัตต์ ได้ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุด 572 วัตต์ ที่จำนวนหลอดไฟ 6 หลอด และเมื่อเปิดหลอดไฟหลอดที่ 7 กำลังไฟฟ้าจะตกลงเหลือ 320 วัตต์ และถ้าจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นอีกระบบจะไม่สามารถคงค่ากำลังไฟฟ้าไว้ได้ เครื่องยนต์ต้นกำลังจะเกิดการสะดุดและดับทำการทดลองซ้ำโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงพบว่าระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 482 วัตต์ นั้นแสดงว่าโปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้จากชีวมวลอัดเม็ดมีความเข้มข้นมากกว่าโปรตีนเซอร์ที่ได้จากถ่านไม้ เครื่องยนต์ต้นกำลังจึงเดินเครื่องได้กำลังงานที่มากกว่า



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้แบบเขย่าเตาและไม่เขย่าเตา

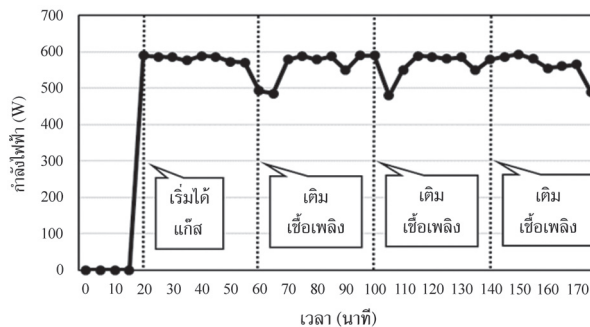
การทดสอบชุดสร้างแรงสั่นสะเทือนว่าใช้แก้ปัญหาการเกิดโพรงของเชื้อเพลิงได้หรือไม่นั้น ได้ทำการทดสอบเดินระบบผลิตไฟฟ้าโดยเติมเชื้อเพลิงเพียงครั้งเดียวเป็นเวลา 60 นาที ทำการทดลอง 2 แบบ คือ แบบเปิดชุดสร้างแรงสั่นสะเทือนทุก 5 นาที และแบบไม่เปิดชุดสร้างแรงสั่นสะเทือน นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 9 พบว่าการเขย่าเตาทุก 5 นาที สามารถลดปัญหาการเกิดโพรงของเชื้อเพลิงได้ ทำให้ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้เมื่อเติมเชื้อเพลิงชีวมวลทุก 60 นาที

การทดสอบหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องจ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่องได้ทำการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าโดยเติมเชื้อเพลิงปริมาณ 20 ลิตร ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ความเข้มข้นของโปรตีนเซอร์แก๊สจะอยู่ในระดับที่สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์ต้นกำลังได้ หลังจากนั้นเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าทุก 5 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที จึงทำการเติมเชื้อเพลิง

เข้าระบบอีกครั้ง เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกได้ตามรูปที่ 10 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะเริ่มลดลงในช่วงนาทีที่ 75 - 80 เนื่องจากเชื้อเพลิงได้เผาไหม้ใกล้หมด และเมื่อเติมเชื้อเพลิงเข้าระบบอีกครั้งในปริมาณเท่าเดิมค่ากำลังไฟฟ้าจึงกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จากรูปที่ 11 เมื่อทำการทดลองซ้ำโดยปรับเวลาการเติมเชื้อเพลิงให้เร็วขึ้นเป็นทุก 40 นาที ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบอยู่ที่ประมาณ 20 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้เมื่อเติมเชื้อเพลิงชีวมวลทุก 40 นาที

อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองผลิตไฟฟ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงมากจึงสามารถให้พลังงานได้มากกว่าเชื้อเพลิงถ่านไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า
2. หากทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีความชื้นต่ำโดยการตากแดดก่อนการใช้งานจะช่วยให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้สูงมากยิ่งขึ้น
3. รูปทรงของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเล็กค่อนข้างเท่ากันทุกชิ้นจึงสามารถที่นำเข้าระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงแบบสกรูลำเลียงได้ และสามารถสร้างความต่อเนื่องในการผลิตแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ระบบลำเลียงเชื้อเพลิงสามารถกำหนดปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างแน่นอนตามระยะเวลาที่ต้องการ
5. การสั่นเขย่าจากชุดมอเตอร์สร้างแรงสั่นสะเทือนสามารถจัดการกับปัญหาการเกิดโพรงของเชื้อเพลิงภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างดี

จึงสรุปได้ว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าทางเลือกใหม่ ระบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจ่ายให้กับเครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 2.2 kW ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้คือ 590 W

บทสรุป

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสามารถใช้ผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สได้ดีด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ดี แต่เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดนั้นเกิดความชื้นได้ง่ายหากมีการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม การนำเชื้อเพลิงไปตากแดดเพื่อลดความชื้นก่อนการใช้งานก็เป็นวิธีการแก้ปัญหาเรื่องความชื้นที่ดีวิธีหนึ่ง เมื่อระบบใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะเกิดการสะสมของน้ำมันดิน (Tar) ภายในท่อแก๊สจึงควรทำการถอดท่อล้างแก๊สมาทำความสะอาดเป็นระยะ ระบบที่สร้างขึ้นทำการทดสอบความเข้มของแก๊สได้ยากเพราะที่หัวจุดทดสอบอยู่ในที่โล่งจึงควรสร้างอุปกรณ์ป้องกันลมเพื่อง่ายต่อการจุดทดสอบความเข้มของแก๊ส เนื่องจากการเก็บโปรคิวเซอร์แก๊สโดยใช้ถังเก็บแก๊สที่สร้างขึ้นจากถังพลาสติกขนาด 200 ลิตร 3 ถังต่ออนุกรมกันทำให้พื้นที่ในการจัดเก็บน้อยและมีความดันของแก๊สเท่ากับความดันบรรยากาศ ทำให้การป้อนโปรคิวเซอร์แก๊สเข้าเครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้ไม่เพียงพอกับความต้องการของเครื่องยนต์ จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นหากปรับปรุงโดยเพิ่มขนาดของถังเก็บโปรคิวเซอร์แก๊สให้ใหญ่ขึ้นและใช้ปั๊มโคอะเพรอมัดแก๊สให้มีความดันมากขึ้นก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยเรื่องนี้จากงบประมาณเงินแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2560 ทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Porn, M., Loy, J., and Pitoon, T. (2005). **Production of Fuel Solid from Rice-Straw and Maize-Cob**. Independent Study. Master of Science, Narasuan University.
- [2] Biomass pellets Optimize the combustion. (2013). Reduce Transportation Costs. **Journal of Energy Policy**. Vol. 102, (October-December 2013) (in Thai)
- [3] Wood pellets (2015). **Biomass Pellets**. Access (20 February 2015). Available (<http://www.sahacogen.com>)
- [4] Biomass Energy (2015). **Biomass**. Access (20 February 2015). Available (<http://www.espthailand.com>)
- [5] Gas Transformation. (2010). **What is Syngas**. Access (20 February 2015). Available (<http://biofuel.org.uk/what-is-syngas.html>)
- [6] Ministry of Energy. (2016). **Practical Training Handbook of Renewable Energy**. Biomass Gasification (Theoretical part) February, 2016

- [7] Jensak, E., Chaiyan T., and Nath J. (2010). The Potential of Cassava Biomass in Matter of Gas Production for Electrical Power Generation. **The 20th Thaksin University Conference**. 16-18 September 2010. Hatyai Songkla. (in Thai)
- [8] Songkot, P., Jirapong, T., Teeramate, P., Umnart, B., and Jensak, E. (2014) Biomass Electrical Power Generation System by Using Gasification Technology. **The 7th Thailand Renewable Energy for Community Association Conference**. 12-14 November 2014, RMUTR. (in Thai)
- [9] Jensak, E. and Nath J. (2010). Feasibility Study of Electrical Generation from Wet Cassava Pulp by using Gasification Technology. **The 6th Conference on Energy Network of Thailand (ENETT 6th)**. 5-7 May 2010 SWU, Petchburi. (in Thai)



การพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม The Development of a Dual-Axis Solar Tracking System Using the Optimization Method

เดือนแรม แพ่งเกี้ยว^{1*} เอกรัฐ ชะอุมเอี้ยค¹ อาทิตย์ ทัดทาน¹ เอกชัย เอ็งเล้ง¹ และอลงกรณ์ จันทรธีราข¹

Received: May, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเข้มของแสงอาทิตย์แบบ 4 จุด ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดถูกนำไปคำนวณหาทิศทางของดวงอาทิตย์ด้วยสมการหาค่าความเหมาะสม เพื่อประมวลผลสัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ตามเงื่อนไขด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอวีอาร์ (AVR) ทำให้ระบบสามารถติดตามดวงอาทิตย์ในตำแหน่งที่มีความเข้มแสงมากที่สุดได้อย่างแม่นยำและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 21.5 โวลต์ โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเดิมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน จากผลการวิจัยพบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนมีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 4.28 % ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 44.04 % และค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 47.24 % เมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เคลื่อนที่ จากผลการดำเนินงานแสดงให้เห็นว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นระบบติดตามดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อีกหลากหลาย

คำสำคัญ : ระบบติดตามดวงอาทิตย์; ประสิทธิภาพทางพลังงาน; เซลล์แสงอาทิตย์; วิธีการหาค่าที่เหมาะสม

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok

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

Abstract

This paper presents the development of a dual-axis solar tracking system with four-point of light intensity comparison method. The maximum of light intensity is used to calculate direction of the sun with the optimization equation. The data of light intensity is processed to control the motor by the AVR microcontroller. Dual-axis solar tracking system will track the sun in highest light position precisely and produce the maximum power. In this research, a dual-axis solar tracking system applied with 5 watts 21.5 volt photovoltaic module, which compares the electrical energy values between a solar panel fixed installation modules and the proposed modules. As for the experiment results, it was found that the dual-axis solar tracking system increased the voltage by 4.28 %, the electric current increased by 44.04 % and electric power increased by 47.24 % compared with a solar panel fixed installation modules. The result showed that the developed dual-axis solar tracking system can increase efficiency of the electrical energy. Moreover, the developed tracking system can be applied to other devices as well.

Keywords: Solar Tracking System; Energy Efficiency; Photovoltaic Module; The Optimization Method

บทนำ

ระบบติดตามดวงอาทิตย์เป็นระบบที่นำมาใช้สำหรับนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ทั้งในรูปความร้อนหรือการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีวิธีการที่แตกต่างกัน [1] อาทิ ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบพาสซีฟ (Passive Controlled Unit) เป็นระบบที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหลวและการถ่ายเทมวลของเหลวเป็นแรงยกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Module) ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ข้อดีของระบบคือ ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องการการบำรุงรักษาน้อยเมื่อเทียบกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ระบบอื่น แต่ระบบดังกล่าวมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor Controlled Unit) เป็นระบบที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณตำแหน่งและใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุมการติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ข้อดีของระบบคือ มีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่ระบบมีความยุ่งยากและการสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง และในปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงร่วมกับวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ (Electro Optically Controlled Unit) ซึ่งใช้อุปกรณ์ตรวจจับรังสีหรือค่าความเข้มแสงที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มแสง เช่น โฟโตไดโอด (Photo Diode) โฟโตทรานซิสเตอร์หรือตัวต้านทานแปรค่าตามแสง (Light Independent Resistor, LDR) เป็นต้น ข้อดีของวิธีการติดตามดวงอาทิตย์ของระบบนี้คือ มีความแม่นยำสูงและความแม่นยำของการติดตามดวงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง ซึ่งนักวิจัยหลายท่าน

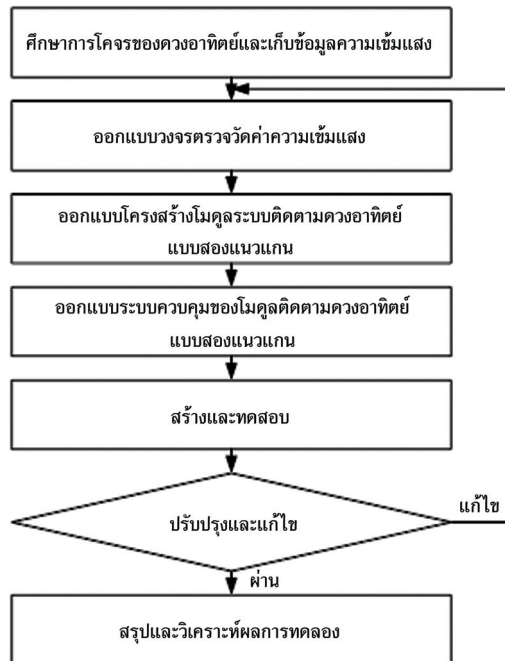
นำเสนอหลักการควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้อุปกรณ์ดังกล่าวที่แตกต่างกัน เช่น การควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วยการปรับมุมองศาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [2] - [3] การควบคุมทิศทางของระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วยเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงมุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4] เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบติดตามดวงอาทิตย์อาจไม่จำเป็นต้องติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา เนื่องจากการติดตามดวงอาทิตย์ในบางช่วงเวลาส่งผลดีต่อค่าพลังงานมากกว่า เช่น การนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมีสองชนิด คือ การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า (Photovoltaic) และการใช้ระบบรวมแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า (Concentrating Solar Power) เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นขนานที่ 6 - 10 องศาเหนือ แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นโลกเฉลี่ยประมาณ 4 - 5 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งหากสามารถปรับพื้นที่รับแสงให้ติดตามแสงอาทิตย์ได้ตลอดเวลาจะสามารถรับแสงได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1.3 - 1.5 เท่า [5] - [6] การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นกำลังไฟฟ้านั้นยังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ คือ ร้อยละ 5 - 17 เนื่องจากการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ยังเป็นแบบดั้งเดิมคือ แบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์หรือการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว [7] ในการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องมีระบบติดตามการเคลื่อนที่เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถติดตามการเคลื่อนที่หรือการโคจรของดวงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำและสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกำลังไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [8] - [10] นักวิจัยหลายท่านจึงให้ความสนใจการพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน อาทิ ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี และเอกชัย ดีศิริ [11] นำเสนอระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนโดยใช้หลักการบังเงาของฉากกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่า ผลตอบสนองทางเวลาของระบบอยู่ที่ 35 องศาต่อวินาที และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.5 องศา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากปริมาณแสง การวางตำแหน่งของโฟโตทรานซิสเตอร์ และความคลาดเคลื่อนของเฟืองทด จากนั้นมีการพัฒนากลไกเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ได้อัตโนมัติ โดยใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งให้ชุดควบคุมการขับเคลื่อนทำงาน ผลการศึกษาพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ให้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่าแผงที่วางคงที่ในแนวอนน้อยร้อยละ 13 [12] นอกจากนี้มีการนำเสนอการพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ โดย กรธรรม สิริกุล และอภิญญา บุญประกอบ [13] ซึ่งใช้วิธีการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยสมการเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเข้มเพื่อปรับตำแหน่งละเลียดผลปรากฏว่าสามารถชี้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำและมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 องศา ระบบดังกล่าวควบคุมการทำงานและสั่งงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ดังนั้น จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยการเปรียบเทียบความเข้มของแสงอาทิตย์แบบ 4 จุด ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดจะถูกนำไปคำนวณหาทิศทางของดวงอาทิตย์ด้วยสมการหาค่าความเหมาะสม เพื่อประมวลผลสัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ตามเงื่อนไขด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอวีอาร์ (AVR) ทำให้ระบบสามารถติดตามดวงอาทิตย์ในตำแหน่งที่มีความเข้มแสงมากที่สุดได้อย่างแม่นยำและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การเก็บข้อมูลความเข้มแสงเพื่อออกแบบวงจรตรวจวัดค่าความเข้มแสง การออกแบบโครงสร้างโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน และการออกแบบระบบควบคุมโมดูลติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 1 และแสดงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

วงจรตรวจจับค่าความเข้มแสง

การออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนใช้หลักการเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงอาทิตย์แบบ 4 จุด ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดถูกนำไปคำนวณหาทิศทางของดวงอาทิตย์ด้วยสมการหาค่าความเหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ LDR สำหรับตรวจจับค่าความเข้มแสง ซึ่ง LDR ไวต่อแสงในช่วงคลื่น 400 - 1,000 นาโนเมตร ค่าดังกล่าวครอบคลุมช่วงคลื่นที่ไวต่อตามนุษย์ (400 - 700 นาโนเมตร) หมายรวมถึง LDR ไวต่อแสงอาทิตย์และแสงจากหลอดไส้หรือหลอดเรืองแสง เนื่องจากการนำเซนเซอร์ที่เป็นปริมาณทางฟิสิกส์เปลี่ยนเป็นความต้านทานมาใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และจากคุณสมบัติของ LDR เมื่อต่อเข้ากับตัวต้านทาน R_1 ในลักษณะวงจรแบ่งแรงดันดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ด้วยสมการที่ (1) ดังนั้น เมื่อค่าความต้านทานของ LDR มีค่ามาก เนื่องจากมีแสงตกกระทบน้อยทำให้แรงดันที่ขา V_{out} มีค่าต่ำ และเมื่อค่าความต้านทานของ LDR มีค่าน้อย เนื่องจากมีแสงตกกระทบบ่อยทำให้แรงดันที่ขา V_{out} มีค่าสูง คุณสมบัติของตัวต้านทานแปรค่าตามแสงแสดงดังรูปที่ 3

$$V_{output} = \left(\frac{R_{LDR}}{R_1 + R_{LDR}} \right) \times V_s \quad (1)$$

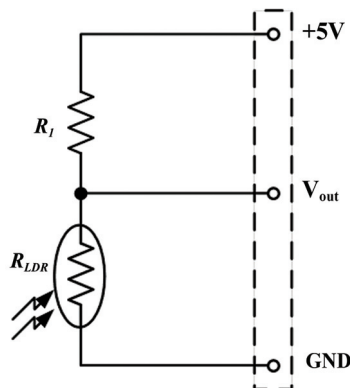
เมื่อ

V_{output} คือ ค่าแรงดันที่ขาเอาต์พุต (โวลต์)

R_{LDR} คือ ค่าความต้านทานของ LDR (โอห์ม)

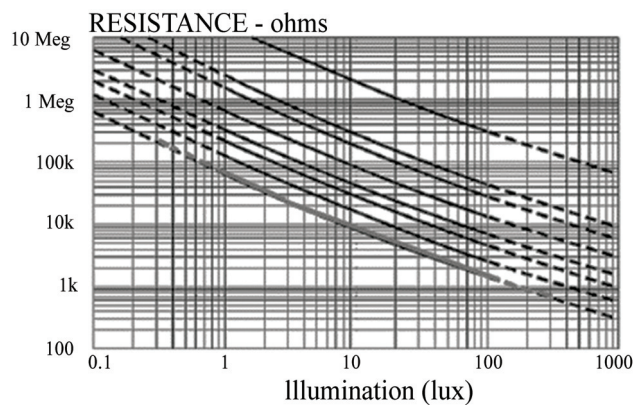
R_1 คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

V_s คือ ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายมีค่าคงที่เท่ากับ 5 โวลต์



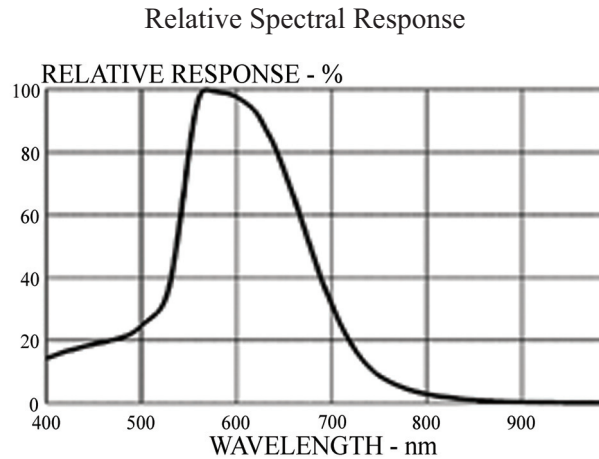
รูปที่ 2 วงจรตรวจวัดความเข้มแสงอาทิตย์

Resistance vs. Illumination



(ก) ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานต่อความสว่าง

รูปที่ 3 กราฟคุณสมบัติของตัวต้านทานแปรค่าตามแสง [14]



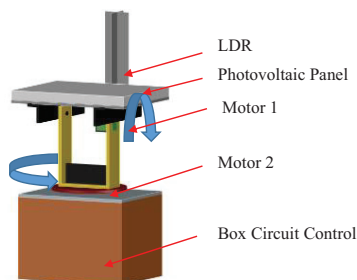
(ข) การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง

รูปที่ 3 กราฟคุณสมบัติของตัวต้านทานแปรค่าตามแสง [14] (ต่อ)

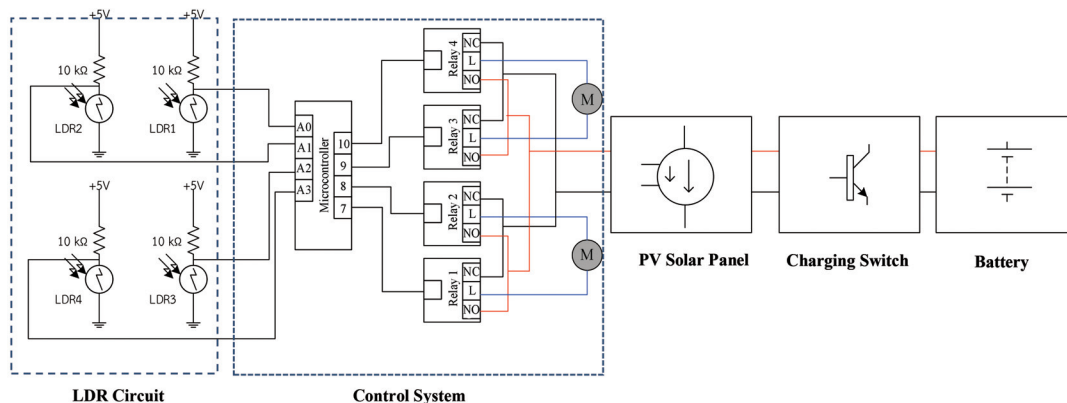
การออกแบบโครงสร้างโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน

การออกแบบโครงสร้างโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนซิลิคอน (Mono Crystalline Silicon Solar Cell) ขนาดกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ แรงดันพิกัด 21.5 โวลต์ กระแส 0.29 แอมแปร์ แสดงแบบจำลองสามมิติ (3-D model) ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ LDR แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เซอร์โวมอเตอร์ และวงจรควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ งานวิจัยนี้ใช้ LDR ทั้งหมด 4 จุด สำหรับเป็นอินพุตรับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ข้อมูลอินพุตดังกล่าวถูกประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วยสมการเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงของ LDR ทั้ง 4 จุด เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแนวแกน X และแนวแกน Y ค่าพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จเพื่อชาร์จพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่แสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5

เมื่อพิจารณาความแตกต่างด้านต้นทุนของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนที่พัฒนาขึ้นพบว่า ต้นทุนด้านอุปกรณ์เพิ่มขึ้น 680 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลแบบเดิม เนื่องจากการเพิ่มอุปกรณ์ LDR เซอร์โวมอเตอร์ และวงจรควบคุมการทำงาน



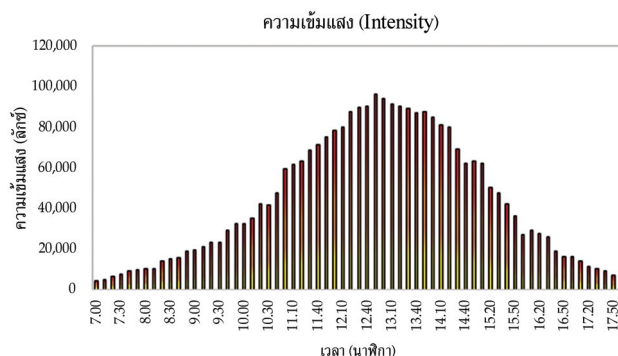
รูปที่ 4 โมดูลสามมิติ (3-D Model) ของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน

การออกแบบระบบควบคุมของโมดูลติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน

การตรวจวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ทำการตรวจวัด ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชญ์โลก เก็บข้อมูลทั้งหมด 7 วัน วันละ 11 ชั่วโมง เริ่มตั้งแต่เวลา 07.00 - 18.00 น. ซึ่งทำการตรวจวัด ทุก ๆ 10 นาที แสดงผลการตรวจวัดค่าความเข้มแสงดังรูปที่ 6 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า ค่าความเข้มแสง สูงสุดมีค่าเท่ากับ 96,067 ลักซ์ ที่เวลา 12.50 น. ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4,197 ลักซ์ ที่เวลา 07.00 น. และมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 43,400 ลักซ์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวถูกนำไปใช้กำหนดค่าอินพุตสำหรับการสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ แบบสองแนวแกนและเงื่อนไขการหยุดทำงานของระบบ



รูปที่ 6 การตรวจวัดความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลา

การออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์กำหนดอินพุตของระบบ คือ LDR1, LDR2, LDR3 และ LDR4 ซึ่งทำการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลให้แก่ AVR Microcontroller จากนั้นระบบทำการประมวลผลตามเงื่อนไขค่าความเหมาะสมดังสมการที่ (2) - (5) และส่งข้อมูลเอาต์พุตเพื่อควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้ระบบสามารถติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ให้ค่าพลังงานสูงสุด

$$V_{up} = \frac{(V_{LDR1} + V_{LDR2})}{2} \quad (2)$$

$$V_{down} = \frac{(V_{LDR3} + V_{LDR4})}{2} \quad (3)$$

$$V_{left} = \frac{(V_{LDR1} + V_{LDR3})}{2} \quad (4)$$

$$V_{right} = \frac{(V_{LDR2} + V_{LDR4})}{2} \quad (5)$$

จากสมการที่ (2) - (5) สามารถหาผลต่างสำหรับการควบคุมมอเตอร์ 1 และมอเตอร์ 2 ได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$M_1 = V_{up} - V_{down} = \left(\frac{V_{LDR1} + V_{LDR2}}{2} \right) - \left(\frac{V_{LDR3} + V_{LDR4}}{2} \right) \quad (6)$$

$$M_2 = V_{left} - V_{right} = \left(\frac{V_{LDR1} + V_{LDR3}}{2} \right) - \left(\frac{V_{LDR2} + V_{LDR4}}{2} \right) \quad (7)$$

โดยที่

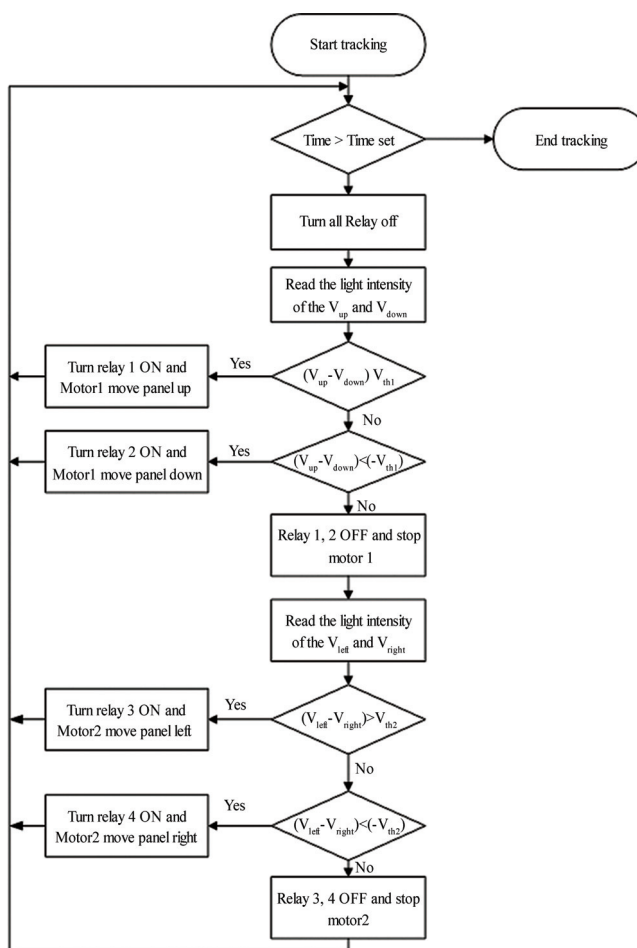
- V_{up} คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันสำหรับควบคุมมอเตอร์ 1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
- V_{down} คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันสำหรับควบคุมมอเตอร์ 1 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- V_{left} คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันสำหรับควบคุมมอเตอร์ 2 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
- V_{right} คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันสำหรับควบคุมมอเตอร์ 2 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- V_{LDR1} คือ ค่าแรงดันของ LDR1
- V_{LDR2} คือ ค่าแรงดันของ LDR2
- V_{LDR3} คือ ค่าแรงดันของ LDR3
- V_{LDR4} คือ ค่าแรงดันของ LDR4

ผังงานระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนแสดงดังรูปที่ 7 และสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นระบบตรวจสอบเวลา โดยกำหนดเวลาที่ระบบทำงานต้องน้อยกว่าเวลา 18.00 น.
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีเลย์ทุกตัวอยู่ในสภาวะปิด
- ขั้นตอนที่ 3 ระบบรับค่าความเข้มแสงของ LDR_{up} และ LDR_{down} นำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของ LDR_{up} และ LDR_{down} กับค่าที่กำหนด (V_{th1}) หากค่าความแตกต่างดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดระบบสั่งให้มอเตอร์ 1 ทำงานในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และหากมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด มอเตอร์ 1 ทำงานในทิศทางตรงข้าม และมอเตอร์ 1 หยุดการทำงานเมื่อไม่เกิดค่าความแตกต่างเกินกว่าค่าที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 4 ระบบรับค่าความเข้มแสงของ LDR_{left} และ LDR_{right} นำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของ LDR_{left} และ LDR_{right} กับค่าที่กำหนด (V_{th2}) หากค่าความแตกต่างดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดระบบสั่งให้มอเตอร์ 2 ทำงานในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และหากมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด มอเตอร์ 2 ทำงานในทิศทางตรงข้าม และมอเตอร์ 2 หยุดการทำงานเมื่อไม่เกิดค่าความแตกต่างเกินกว่าค่าที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 5 ระบบติดตามดวงอาทิตย์จะทำงานวนซ้ำทุกขั้นตอน และหยุดการทำงานของระบบเมื่อเวลาปัจจุบันมากกว่าค่าเวลาที่กำหนด



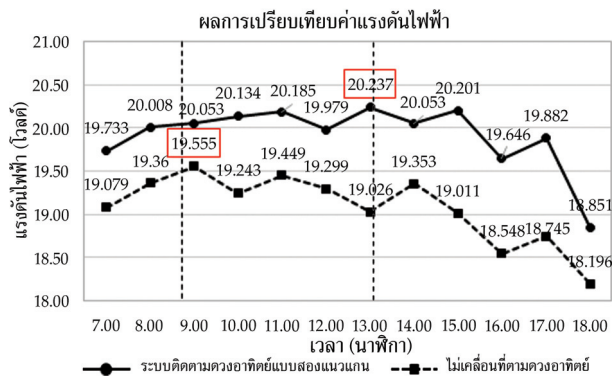
รูปที่ 7 ฟังก์ชันระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

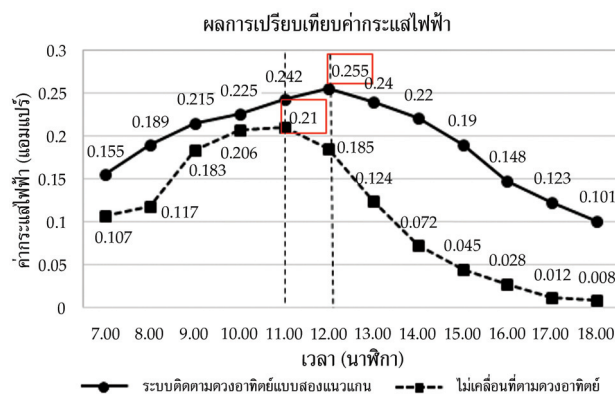
จากการออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเข้มของแสงอาทิตย์แบบ 4 จุด ทำการประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 5 วัตต์ 21.5 โวลต์ แสดงโมดูลดังรูปที่ 8 โดยผลการเปรียบเทียบค่าพลังงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่าพลังงานสะสม ตั้งแต่เวลา 07.00 - 18.00 น. ของโมดูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์และโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนแสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 โมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

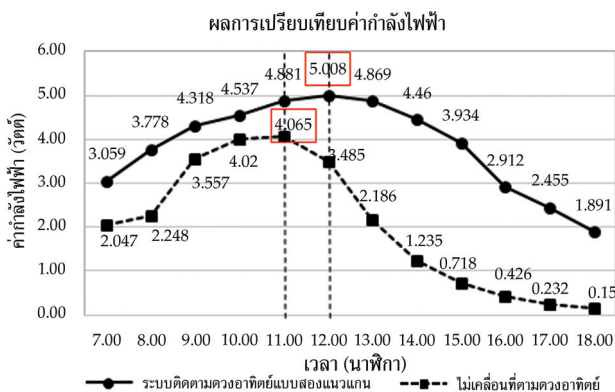


(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า



(ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าในแต่ละช่วงเวลาของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน



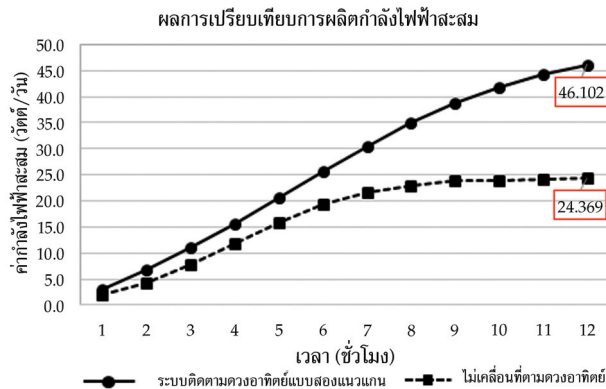
(ค) ค่ากำลังไฟฟ้า

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าในแต่ละช่วงเวลาของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน (ต่อ)

จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนดังรูปที่ 9 (ก) พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 19.555 โวลต์ ที่ช่วงเวลา 09.00 น. และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนมีค่าเท่ากับ 20.237 โวลต์ ที่ช่วงเวลา 13.00 น. ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนดังรูปที่ 9 (ข) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.21 แอมแปร์ ที่ช่วงเวลา 11.00 น. และกระแสไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนมีค่าเท่ากับ 0.255 แอมแปร์ ที่ช่วงเวลา 12.00 น. ค่ากระแสไฟฟ้าของโมดูลที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงเวลา 09.00 - 14.00 น. กล่าวคือ มีช่วงเวลายาวนานกว่าโมดูลแบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์ และจากผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนดังรูปที่ 9 (ค) พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 4.065 วัตต์ ที่ช่วงเวลา 11.00 น. และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนมีค่าเท่ากับ 5.008 วัตต์ ที่ช่วงเวลา 12.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าของโมดูลที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงเวลา 09.00 - 14.00 น. สอดคล้องกับค่าปริมาณความเข้มแสงและมีช่วงเวลายาวนานกว่าโมดูลแบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์ เนื่องจากสามารถผลิตค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เพียงบางช่วงเวลาเท่านั้น

ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน ซึ่งประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนซิลิคอน ขนาดกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ แรงดันพิกัด 21.5 โวลต์ กระแส 0.29 แอมแปร์ แสดงผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานเฉลี่ยดังตารางที่ 1 ซึ่งโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน ขณะทำการทดสอบมีค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูงกว่า โมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนมีค่าเท่ากับ 19.889 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.193 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.850 วัตต์ และค่าแรงดัน

ไฟฟ้าเฉลี่ยของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 19.072 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.108 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.031 วัตต์ ซึ่งคิดเป็นค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 0.817 โวลต์ 0.085 แอมแปร์ และ 1.819 วัตต์ ตามลำดับ และคิดเป็นผลต่างจากค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้ 4.10 44.04 และ 47.24 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งค่าพลังงานสะสมตลอดทั้งวันซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ 11 ชั่วโมง พบว่าโมดูลระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนสามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ถึง 21.733 วัตต์ คิดเป็นผลต่างได้ 47.14 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมของโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระหว่างโมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ แรงดันพิกัด 21.5 โวลต์ กระแส 0.29 แอมแปร์

พารามิเตอร์ (หน่วย)	โมดูลแบบไม่เคลื่อนที่ ตามดวงอาทิตย์	โมดูลระบบติดตาม ดวงอาทิตย์ แบบสองแนวแกน	ค่าความแตกต่าง
แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)	19.072	19.889	0.817 (ผลต่าง 4.28 %)
กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	0.108	0.193	0.085 (ผลต่าง 44.04 %)
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (วัตต์)	2.031	3.850	1.819 (ผลต่าง 47.24 %)
พลังงานไฟฟ้าสะสม (วัตต์/วัน)	24.369	46.102	21.733 (ผลต่าง 47.14 %)

สรุปผลการวิจัย

ผลการพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเข้มของแสงอาทิตย์เพื่อนำไปคำนวณหาทิศทางของดวงอาทิตย์ด้วยสมการหาค่าความเหมาะสม และทำให้ระบบสามารถติดตาม

ดวงอาทิตย์ในตำแหน่งที่มีความเข้มแสงมากที่สุดได้อย่างแม่นยำและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งประยุกต์ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 5 วัตต์ 21.5 โวลต์ โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเดิมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกน จากผลการวิจัยพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เคลื่อนที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 19.072 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.108 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.031 วัตต์ และระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแนวแกนสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 19.889 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.193 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.850 วัตต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 4.28 % ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 44.04 % และค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 47.24 % เมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่เคลื่อนที่ จากผลการดำเนินงานแสดงให้เห็นว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นระบบติดตามดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อีกหลากหลาย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านวัสดุ อุปกรณ์การวิจัย พื้นที่ทำวิจัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

References

- [1] P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov. (2004). Design and Construction of a System for Sun-tracking. **Renewable Energy**. Vol. 29, No. 3, pp. 393-402. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00196-4
- [2] B. Khadidja, K. Dris, A. Boubeker and S. Noureddine. (2014). Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian region, Example of Ouargla. **Energy Procedia**. Vol. 50, pp. 610-618
- [3] Chow, L. S. and Abiera, M. (2013). Optimization of Solar Panel with Solar Tracking and Data Logging. **IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)**. 16 -17 December 2013. Putrajaya, Malaysia. pp. 15-19. DOI: 10.1109/SCoReD.2013.7002532
- [4] C. Alexandru. (2013). Design and Optimization of a Monoaxial Tracking System for Photovoltaic Modules. **Journal of Solar Energy**. Vol. 2013, p. 6. DOI: 10.1155/2013/586302
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. (2015). **Solar Energy**. Annual Report 2015 Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Access (12 April 2018). Available (http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=774&filename=index)

- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. (2014). **Solar System**. Summary of Solar Energy Systems by Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Access (12 April 2018). Available (<http://www.dede.go.th>)
- [7] Sadeque, F. and Ahsan, Md. Q. (2014). Design and Implementation of a Single-Axis Automatic Solar Tracking System. **GUB Journal of Science and Engineering**. Vol. 1, Issue 1, pp. 1-5
- [8] C. Alexandru. (2014). A Comparative Analysis Between the Tracking Solutions Implemented on a Photovoltaic String. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**. Vol. 6, Issue 5, pp. 1-17. DOI: 10.1063/1.4899078
- [9] I. Stamatescu, G. Stamatescu, N. Arghira, I. Făgărăan and S. S. Iliescu. (2014). Fuzzy Decision Support System for Solar Tracking Optimization. **12th International Conference on Development and Application Systems**. Suceava, Romania, May 15-17. pp. 16-20
- [10] J. Zhao and Z. Liand and T. Ai. (2015). Research on Optimization of Output Characteristics of Solar Power System Based on Novel Incremental Conductance Method. **8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)**. 12 May 2016. Hangzhou, China. pp. 138-142. DOI: 10.1109/ISCID.2015.230
- [11] P. Thanapat and D. Akekachai. (2007). **The Sun Tracking System Using a CPLD-based Position Sensor**. Access (12 April 2018). Available (<https://www.researchgate.net/publication/283291092>)
- [12] Somphop, P. (2015). Automation Control Solarcell. **Princess of Naradhiwats University Journal**. Vol. 7, No. 1, pp. 81-91
- [13] Korntham, S. and Apinya, B. (2013). The Development of A Low-cost Solar Tracking System for Renewable Energy Applications. **Bulletin of Applied Science**. Vol. 2, No. 2, pp. 90-99
- [14] Adafruit. (2018). **Photocells and Measuring Light**. Access (12 April 2018). Available (<https://learn.adafruit.com/photocells/measuring-light>)



ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่ออัตราการแห้ง คุณภาพทางกายภาพ และ
สมบัติการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสน

Effect of Drying Temperatures on Drying Rate, Physical and Antioxidative Properties of *Sesbania javanica* Mig. Flowers

วิจิตรา เหลียวตระกูล^{1*} ฐาณิ จิรสติอนุสรณ์¹ ณัฐธิดา เอี่ยมนิล¹ และวชิรญา เหลียวตระกูล¹

Received: May, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ต่ออัตราการแห้ง คุณภาพทางกายภาพ และสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสน (*Sesbania javanica* Miq.) ในดอกโสนสดมีสารประกอบฟีนอลิก และแทนนิน รวมทั้งมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เมื่อทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิจาก 50 เป็น 70 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการแห้งเพิ่มขึ้นจาก 0.023 กรัม/นาท เป็น 0.049 กรัม/นาท แต่ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) ของดอกโสนลดลง ($p < 0.05$) ดอกโสนอบแห้งมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดคงเหลือร้อยละ 17 - 24 เมื่อเทียบกับดอกโสนสด โดยดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 366.89 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิก และปริมาณแทนนิน 714.29 มิลลิกรัมสมมูลย์ของกรดแทนนิกต่อดอกโสน 100 กรัม (น้ำหนักฐานแห้ง) รองลงมาคือ ดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้น ดอกโสนมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูง

คำสำคัญ : ดอกโสน; อัตราการแห้ง; ฟีนอลิก; กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

¹ Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Huntra, Phra Nakhon Si Ayutthaya

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

Abstract

This research aims to study the effect of drying temperatures (50, 60 and 70 °C) on drying rate, physical and antioxidative properties of hot-air dried *Sesbania* (*Sesbania javanica* Mig.) flowers. The fresh *Sesbania* flowers contained phenolic compounds, tannin, and antioxidative properties. When the drying temperature rose from 50 to 70 °C, drying rate increased from 0.023 to 0.049 g/ min, whereas the moisture content, water activity, lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*) of dried *Sesbania* flowers significantly decreased ($p < 0.05$). The total phenol content of dried *Sesbania* flowers remained 17 - 24 % compared to the fresh *Sesbania* flowers. In addition, the active ingredients and antioxidant activity of *Sesbania* flowers dried at 70 °C were the highest value ($p < 0.05$). The total phenol and tannin contents of *Sesbania* flowers dried at 70 °C were 366.89 mg gallic acid equivalent, and 714.29 mg tannic acid equivalent/ 100 g (dry basis), followed by *Sesbania* flowers dried at 60 and 50 °C, respectively. In conclusion, *Sesbania* flower has the potential to develop into a health food product due to a high of biological active ingredients and antioxidant activity.

Keywords: *Sesbania* Flower; Drying Rate; Phenolic; Antioxidative Properties

บทนำ

โสน (*Sesbania javaica* Miq.) มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนของทวีปเอเชีย และแพร่กระจายจากอินเดียมายังประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และไทย โสนมักพบในพื้นที่ที่มีน้ำขัง ดอกเป็นช่อเชิงลด หรือเป็นช่อกระจุก ออกที่ปลายกิ่ง ช่อใบ และช่อกิ่ง กลีบดอกโสนมีสีเหลือง [1] ดอกโสน 100 กรัม ให้พลังงาน 54 กิโลแคลอรี มีปริมาณโปรตีน 3.6 กรัม ไขมัน 0.4 กรัม คาร์โบไฮเดรต 9.1 กรัม เส้นใย 3.9 กรัม แคลเซียม 51 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 56 มิลลิกรัม เหล็ก 8.2 มิลลิกรัม วิตามินเอ 334 ไมโครกรัม ไทอามีน 0.26 มิลลิกรัม ไรโบฟลาวิน 0.40 มิลลิกรัม ไนอาซิน 2.8 มิลลิกรัม วิตามินซี 24 มิลลิกรัม [2] นอกจากนี้ในดอกโสนยังพบเบต้าแคโรทีน 34.3 ไมโครกรัม และสารเคอเซทิน ไกลโคไซด์ (Quercetin 3-2 (G)-rhamnosylrutinoside) ทำให้ดอกโสนมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ และมีฤทธิ์ด้านการก่อกลายพันธุ์ในเซลล์เพาะเลี้ยง [3] - [4]

ปัจจุบันผู้บริโภคสนใจอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะพืชผักผลไม้ เนื่องจากสารที่พบในพืช (Phytonutrients) เช่น รงควัตถุและสารฟีนอลิก เป็นสารที่เข้าไปทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่พบมากในพืชผัก มีบทบาทสำคัญเพราะมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ต้านการแพ้ มีคุณสมบัติในการสลายลิ่มเลือด และเป็นสารต้านการเกิดมะเร็ง อีกทั้งสามารถลดความดันโลหิต โดยมีฤทธิ์ขยายหลอดเลือด และป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Peroxidation) ในเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการกำจัด

ออกซิเจน เพื่อป้องกันการเป็นโรคต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวสัมพันธ์กับลักษณะของการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่าง ๆ อาทิเช่น โรคมะเร็ง โรคอัลไซเมอร์ โรคหัวใจ รวมทั้งโรคที่เกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟีนอลิก เช่น สารฟีนอล กรดฟีนอล และโพลีฟีนอล ทำหน้าที่แตกต่างกันไปในพืช อาจทำหน้าที่เป็นสารรงควัตถุ หรือส่งผลกระทบต่อรสชาติ หรือเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย [5] - [8] โดยทั่วไปสารต้านอนุมูลอิสระในพืชผักจะมีปริมาณลดลงในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและการเก็บรักษา เนื่องจากความไม่คงตัวของสารต้านอนุมูลอิสระ [9]

ดอกโสนมีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น เมื่อนำมาแปรรูปเป็นดอกโสนทำแห้ง นอกจากจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของดอกโสนได้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เชิงอาหารเพื่อสุขภาพที่สะดวกในการบริโภคและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ รวมทั้งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในตลาดอาหารเพื่อสุขภาพต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งดอกโสนต่ออัตราการทำแห้ง คุณภาพทางกายภาพ และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสน โดยศึกษาการทำแห้งดอกโสนด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การทำแห้งดอกโสน

นำดอกโสนสดที่โตเต็มที่จากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาทำความสะอาดและคัดเลือกสิ่งปนเปื้อนออก เด็ดขั้ว และนำมาทำแห้งด้วยเตาอบลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยชั่งน้ำหนักของดอกโสนทุก ๆ 20 นาที ตลอดระยะเวลาการทำแห้ง จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ท่า 3 ชั่วโมงในแต่ละอุณหภูมิ จากนั้นนำมาคำนวณหาอัตราการทำแห้ง และกราฟการทำแห้ง (Drying Curve) ของดอกโสน

2. การวิเคราะห์ทางด้านกายภาพและเคมี

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธี Hot-Air Oven [10] และวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity, A_w) ด้วยเครื่อง AquaLab รุ่น Series 4TE (Decagon, USA) วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำดอกโสนสดและดอกโสนอบแห้งมาวิเคราะห์ค่าสีในระบบฮันเตอร์ (Hunter) ด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter โดยวัดสีค่า L^* เป็นค่าความสว่าง ค่า a^* เป็นค่าสีแดงและเขียว และค่า b^* เป็นค่าสีเหลืองและน้ำเงิน ก่อนการวัดค่าสีทุกครั้งต้องทำการปรับมาตรฐานเครื่อง แล้วจึงทำการวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างจำนวน 5 ซ้ำ จากนั้นคำนวณเป็นค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไป (Total Color Change) ตามสมการที่ (1) [11] เมื่อค่าสี L^*_0 , a^*_0 และ b^*_0 หมายถึง ค่าสีของดอกโสนสด และค่าสี L^* , a^* และ b^* หมายถึง ค่าสีของดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

$$Total\ color\ change = \sqrt{(L^*_0 - L^*)^2 + (a^*_0 - a^*)^2 + (b^*_0 - b^*)^2} \quad (1)$$

การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

การสกัดตัวอย่าง

สกัดตัวอย่างด้วยวิธี Cold Extraction ดัดแปลงจาก [12] - [13] ดังนี้ ซึ่งตัวอย่าง 20 กรัม เติมน้ำเย็นความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร บดผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที กรองและนำส่วนใสเก็บในที่มืดอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ทำการสกัดตัวอย่างละ 3 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดตามวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Assays [14] โดยผสมสารสกัดจากตัวอย่าง 0.3 มิลลิลิตร กับสารละลาย Folin-Ciocalteu's 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น Na_2CO_3 (ร้อยละ 7.5) 1.2 มิลลิลิตร เขย่าให้สารผสมกัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกของตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง (mg Gallic Acid Equivalent (GAE)/ 100 g)

การวิเคราะห์ปริมาณแทนนิน

การวิเคราะห์ปริมาณแทนนินตามวิธี Colormetric Assay ดัดแปลงจาก [15] โดยนำสารสกัด 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 7.5 มิลลิลิตร สารละลาย Folin-Ciocalteu's 0.5 มิลลิลิตร และสารละลาย Na_2CO_3 (ร้อยละ 35) 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบแทนนินเทียบกับสารมาตรฐานกรดแทนนิก รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแทนนิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง (mg Tannic Acid Equivalent (TAE)/ 100 g)

การวิเคราะห์กิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์ความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH ดัดแปลงจาก [12] โดยนำสารสกัด 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 0.6 mM ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร นำมาเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง (mg GAE/ 100 g) ส่วนการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์อนุมูลอิสระ ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) [14] โดยนำสารสกัดจากตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 0.2 M ที่ pH 6.6 ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร และสารละลาย Potassium Ferricyanide (ร้อยละ 1) 2.5 มิลลิลิตร นำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เติมน้ำกลั่น Trichloro-Acetic Acid (ร้อยละ 10) 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดส่วนผสมมา 2.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร และเติม FeCl_3 (ร้อยละ 1) 0.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร (A_{700})

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

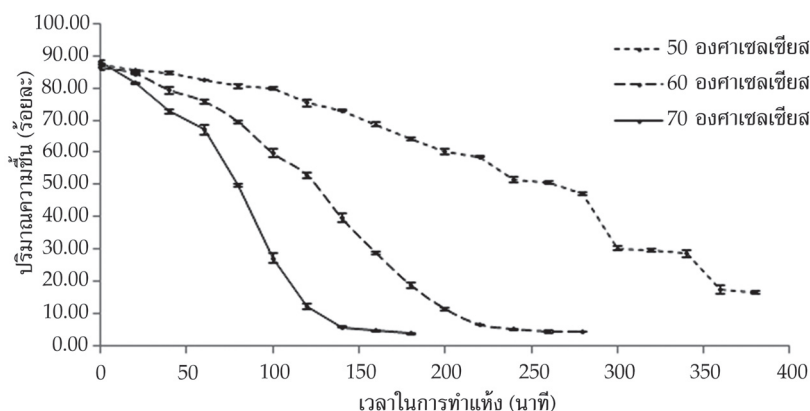
คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนสด

จากการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนสดแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าดอกโสนสดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแทนนิน และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูง ในดอกโสนสด 100 กรัม มีปริมาณความชื้น 89.03 กรัม มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 58.26 mg GAE/ 100 g (น้ำหนักฐานเปียก) (ตารางที่ 1) ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดใกล้เคียงกับดอกแค (*Sesbania grandiflora*) [16] และมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าดอกแคนา (*Dolichandrone serrulata* (DC.) Seem) และดอกฟักทอง (*Cucurbita moschata* Decne.) [4] ในดอกโสนยังพบสารเคอราเซทินไกลโคไซด์ ที่มีฤทธิ์ต้านการก่อกลายพันธุ์ในเซลล์เพาะเลี้ยง ช่วยหยุดยั้งการแบ่งตัวของเซลล์มะเร็ง ช่วยระงับการอักเสบ และช่วยป้องกันอันตรายของเซลล์ปกติต่อความเครียดจากกระบวนการต้านอนุมูลอิสระ [3] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าดอกโสนมีพื้นที่รับประทานได้อีกหลายชนิด เช่น ดอกกระเจียวแดง ดอกมะรุ้ม และดอกส้มลม มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยเสริมสร้างสุขภาพลดการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง และช่วยในเรื่องของระบบย่อยอาหาร [17] - [18]

ดอกโสนสดมีความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH และความสามารถในการรีดิวซ์อนุมูลอิสระ ด้วยวิธี FRAP เท่ากับ 7.79 mg GAE/ 100 g และ 0.58 (ตารางที่ 1) ซึ่งความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากพืชขึ้นขึ้นอยู่กับกลไกการต้านอนุมูลอิสระ โดยทั่วไปจะนิยมวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของพืชอย่างน้อย 2 วิธี เพื่อประเมินผลกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดจากพืชทั้งหมดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากความซับซ้อนของสารฟลักซ์เคมีในพืชชนิดนั้น ๆ [19]

ตารางที่ 1 คุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนสด

คุณลักษณะ	ดอกโสนสด
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	89.03±0.11
ค่า A_w	0.9949±0.0008
ค่าสี L^* (ค่าความสว่าง)	85.37±2.85
a^* (ค่าสีแดงและเขียว)	18.84±1.50
b^* (ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน)	62.62±2.64
ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/ 100 g) (Wet basis)	58.26±0.05
ปริมาณแทนนิน (mg TAE/ 100 g) (Wet basis)	64.46±0.32
DPPH (mg GAE/ 100 g) (Wet basis)	7.79±0.04
FRAP (A_{700})	0.58±0.00



รูปที่ 1 กราฟการทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่ออัตราการทำแห้งของดอกโสน

จากรูปที่ 1 แสดงกราฟการทำแห้งดอกโสนที่ทำแห้งด้วยเตาอบลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักที่คงที่พบว่า เมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เวลาในการทำแห้งสั้นลง โดยอุณหภูมิการทำแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยที่สุด (180 นาที) รองลงมาคือการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (280 นาที) และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (380 นาที) ใช้เวลาในการทำแห้งนานที่สุด เมื่อทำแห้งดอกโสนน้ำหนักของดอกโสนลดลงมาเรื่อย ๆ จนน้ำหนักคงที่ และพบว่าเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อัตราการทำแห้งของดอกโสนเพิ่มขึ้น โดยการทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีอัตราการทำแห้งของดอกโสนเป็น 0.023 0.031 และ 0.049 กรัม/นาที ตามลำดับ

เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งดอกโสนสูงขึ้น มีผลทำให้เวลาในการทำแห้งลดลง แต่อัตราการทำแห้งจะมากขึ้น เนื่องจากดอกโสนมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86.90 ผิวสัมผัสของดอกโสนจะมีลักษณะเปียกชื้น เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับดอกโสน ทำให้อุณหภูมิพื้นที่ผิวมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อนใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ น้ำภายในดอกโสนจะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่ดอกโสนได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากดอกโสนอย่างต่อเนื่อง ความชื้นและน้ำหนักเฉลี่ยของดอกโสนจะลดลงเป็นส่วนกับเวลาในการทำแห้ง จนการทำแห้งมีความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการทำแห้งเริ่มลดลง ความชื้นในดอกโสนเหลือน้อย จนแพร่ไปยังผิวหน้าของดอกโสนอย่างต่อเนื่อง ผิวหน้าของดอกโสนเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิของดอกโสนสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการทำแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล น้ำในดอกโสนไม่สามารถระเหยออกได้อีก น้ำหนักของดอกโสนจึงคงที่ ดังนั้นการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้น จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในระหว่างการทำแห้งได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น [20] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 - 65 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง [21]

ตารางที่ 2 คุณภาพทางด้านกายภาพ และเคมีของดอกโสนทำแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

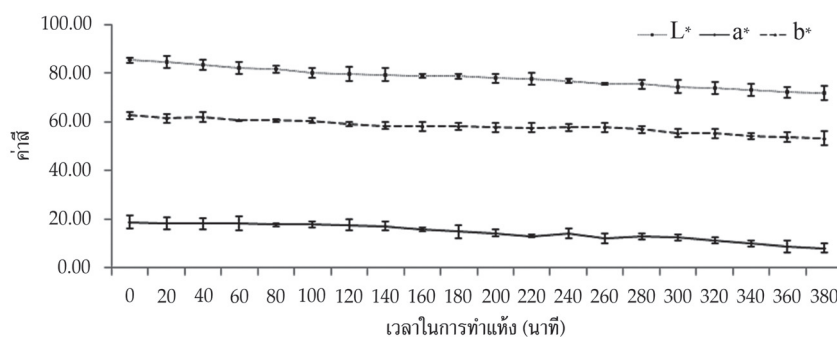
คุณลักษณะ	อุณหภูมิที่ทำแห้งดอกโสน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	19.29±1.48 ^a	9.16±0.23 ^b	6.88±0.17 ^b
ค่า A_w	0.6077±0.0078 ^a	0.4215±0.0270 ^b	0.3648±0.0120 ^c
ค่าสี L^* (ค่าความสว่าง)	71.66±2.88 ^a	68.31±3.08 ^{ab}	67.27±1.31 ^b
ค่าสี a^* (ค่าสีแดงและเขียว) ^{ns}	8.19±2.77	7.91±2.07	7.56±1.12
ค่าสี b^* (ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน)	53.39±1.82 ^a	48.78±2.53 ^b	50.10±3.38 ^{ab}
Total color change	21.53±2.91 ^a	14.04±2.45 ^b	11.67±1.81 ^b

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

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

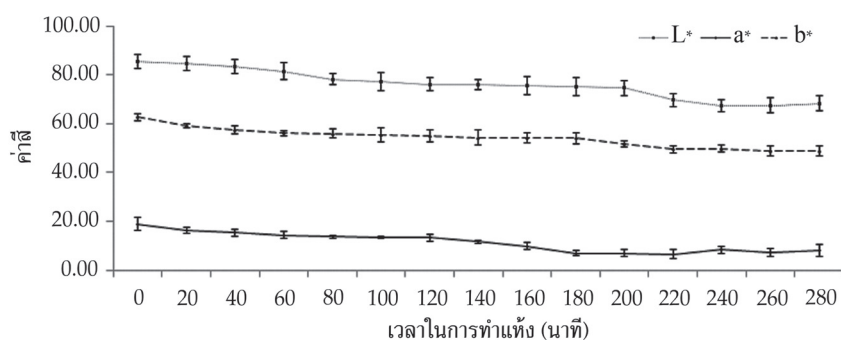
ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของดอกโสน

จากตารางที่ 2 เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้นจาก 50 - 70 องศาเซลเซียส จนดอกโสนมีน้ำหนักที่คงที่ ทำให้ปริมาณความชื้นของดอกโสนลดลงจากดอกโสนสดที่มีความชื้นร้อยละ 89.03 ลดลงเป็นร้อยละ 19.29 9.16 และ 6.88 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่า A_w ของดอกโสนโดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งสูงขึ้นจาก 50 เป็น 70 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า A_w ของดอกโสนอบแห้งลดลงเป็น 0.6077 0.4215 และ 0.3648 ตามลำดับ เทียบกับดอกโสนสดที่มีค่า A_w เท่ากับ 0.9949 เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระจะระเหยได้ง่ายกว่าน้ำผูกพัน ดังนั้นเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิสูง น้ำอิสระในดอกโสนจึงระเหยได้อย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการทำแห้ง ทำให้ปริมาณน้ำอิสระในดอกโสนลดลง นอกจากนี้เมื่อผลิตภัณฑ์มีค่า A_w ต่ำ จะทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น เนื่องจากค่า A_w หรือปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตและเป็นน้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ นั้น เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหาร

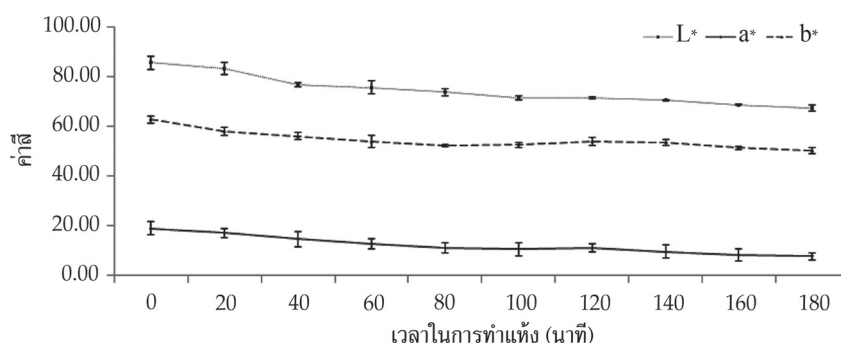


(ก) 50 องศาเซลเซียส

รูปที่ 2 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



(ข) 60 องศาเซลเซียส



(ค) 70 องศาเซลเซียส

รูปที่ 2 ค่าสี L*, a* และ b* ของดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ระยะเวลาในการทำแห้งที่นานขึ้นและอุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าสี L*, a* และ b* ของดอกโสนอบแห้งลดลงตามรูปที่ 2 โดยค่าสี L* (ค่าความสว่าง) ค่าสี a* (ค่าสีแดงและเขียว) และค่าสี b* (ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน) ของดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาการทำแห้งนานขึ้น ค่าความสว่างจะลดลง โดยผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำกว่าที่ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า และจากตารางที่ 2 พบว่าค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส เทียบกับดอกโสนสดพบว่าอุณหภูมิที่ทำแห้งดอกโสน 50 องศาเซลเซียส มีค่าสีทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากสีที่เปลี่ยนแปลงไปของดอกโสนไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งด้วย เมื่อใช้อุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลาในการทำแห้งดอกโสนมาก จะทำให้สีของดอกโสนมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งสูง แต่ระยะเวลาในการทำแห้งดอกโสนน้อย จะทำให้ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดมีค่าน้อยลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทำแห้งเชิง เมื่ออุณหภูมิการทำแห้งเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของขิงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) [22] อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงมีผลให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ (Non-Enzymatic Browning

Reaction) เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Millard Reaction) เป็นต้น [23] และมีรายงานว่า การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ล้าโยบแห้งจะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น [24]

ผลของอุณหภูมิในการทำแห้งต่อสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสน

ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 3) พบว่าการทำแห้งมีผลทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนลดลง โดยอุณหภูมิในการทำแห้งดอกโสนมีผลต่อความสามารถในการจับอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH เมื่อทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิ 50 - 70 องศาเซลเซียส ค่า DPPH ของดอกโสนอบแห้งสูงขึ้นจาก 90.36 เป็น 93.38 mg GAE/ 100 g (น้ำหนักฐานแห้ง) อย่างไรก็ตามค่า DPPH ของดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันคือ 90.36 - 90.73 mg GAE/ 100 g ซึ่งน้อยกว่าดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความร้อนในการอบแห้งต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนานถึง 280 - 380 นาที สารต้านอนุมูลอิสระอาจสลายตัวมากกว่าดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จึงส่งผลทำให้ดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่า DPPH มากกว่าดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อดอกโสนทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50 เป็น 70 องศาเซลเซียส ความสามารถในการรีดิวซ์อนุมูลอิสระ ด้วยวิธี FRAP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยค่า FRAP เพิ่มขึ้นจาก 1.30 เป็น 2.42 เนื่องจากมีรายงานว่าในดอกโสนมีวิตามินซี 24 มิลลิกรัม/ 100 กรัม [2] ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายได้ในน้ำ (Hydrophilic Antioxidants) และมีเบต้าแคโรทีนในปริมาณสูงถึง 307 มิลลิกรัม/กิโลกรัม [4] ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายได้ในไขมัน (Lipophilic Antioxidants) มีบทบาทในการป้องกันกระบวนการออกซิเดชันของออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (Singlet Oxygen) และอนุมูลอิสระเพอรอกไซด์ จึงเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพมาก [25] เมื่อวิเคราะห์สมบัติการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ FRAP จึงแสดงผลว่าดอกโสนแห้งมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

ตารางที่ 3 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนทำแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Dry Basis)

คุณลักษณะ	อุณหภูมิที่อบดอกโสน (องศาเซลเซียส)		
	50	60	70
ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/ 100 g)	255.93±1.97 ^c	355.11±1.38 ^b	366.89±0.71 ^a
ปริมาณแทนนิน (mg TAE/ 100 g)	490.19±0.00 ^c	635.91±0.00 ^b	714.29±0.00 ^a
DPPH (mg GAE/ 100 g)	90.36±0.05 ^b	90.73±0.05 ^b	93.38±0.04 ^a
FRAP (A ₇₀₀)	1.30±0.01 ^c	2.04±0.02 ^b	2.42±0.02 ^a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

หลังจากการทำแห้งดอกโสน พบว่าดอกโสนมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพลดลงเมื่อเทียบกับดอกโสนสด และจากตารางที่ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้น ทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ของดอกโสนอบแห้งสูงขึ้น โดยปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด รองลงมาคือดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดคงเหลือเทียบกับดอกโสนสดเป็นร้อยละ 23.99 23.22 และ 16.74 (366.89 355.11 และ 255.93 mg GAE/ 100 g, น้ำหนักฐานแห้ง) ตามลำดับ เนื่องจากการทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสนั้น ใช้เวลาในการทำแห้งสั้นมากเมื่อเทียบกับการทำแห้งดอกโสนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้สารต้านอนุมูลอิสระสลายตัวน้อยกว่า งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi, Y. et al. [26] พบว่า ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระในเห็ดชิตาเกะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารฟีนอลิกบางชนิดในผักผลไม้ถูกสกัดออกมาได้ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน นอกจากนี้ความร้อนอาจทำให้เกิดสารประกอบจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพได้ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Nicoli, M. C. et al. [27] ในมะเขือเทศและการศึกษาของ Kusznierevicz, B. et al. [28] ในน้ำกะหล่ำปลี

จากตารางที่ 3 ยังพบว่าปริมาณแทนนินของดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด รองลงมาคือดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณแทนนินเป็น 714.29 635.91 และ 490.19 mg TAE/ 100 g (น้ำหนักฐานแห้ง) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณแทนนินของดอกโสนนี้ใกล้เคียงกับปริมาณแทนนินของแอปเปิ้ล และพริก แต่น้อยกว่าปริมาณแทนนินในดอกกุหลาบ (*Rosa canina*) ชาดำและชาเขียว ซึ่งแทนนินนั้นเป็นโพลีฟีนอลที่ละลายน้ำได้ มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ แต่ปริมาณแทนนินที่ความเข้มข้นสูงอาจทำหน้าที่เป็นสารต้านคุณค่าทางโภชนาการ (Anti-Nutritional) ได้ [29] - [30] นอกจากนี้มีรายงานว่าดอกโสนอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 360 นาที ด้วยเตาอบลมร้อนมีปริมาณเบต้าแคโรทีนมากกว่าที่อุณหภูมิ 55 - 70 องศาเซลเซียส เมื่อนำดอกโสนอบแห้งไปเสริมในผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนด์วิช ทำให้มีปริมาณเส้นใย ค่าความแข็ง และค่าความแน่นเพิ่มขึ้น รวมทั้งได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคอีกด้วย [31]

บทสรุป

ดอกโสนสดมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง และมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยดอกโสน 100 กรัม มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด 58.26 mg GAE และปริมาณแทนนิน 64.46 mg TAE เมื่อนำดอกโสนมาทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งดอกโสนเพิ่มขึ้น เวลาในการทำแห้งจะลดลง เนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในระหว่างการทำแห้งได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้อัตราการแห้งเพิ่มขึ้นจาก 0.023 เป็น 0.049 กรัม/นาที เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณความชื้นและค่า A_w ของดอกโสนลดลง และเมื่อเวลาการทำแห้งนานขึ้น ค่าความสว่างจะลดลง ส่วนปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนอบแห้งพบว่า การทำแห้งทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนลดลงเมื่อเทียบกับดอกโสนสด อย่างไรก็ตามพบว่าดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของดอกโสนมากขึ้น (เทียบกับน้ำหนักฐานแห้ง) โดยดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณแทนนินค่า DPPH และค่า FRAP มากที่สุด ($p < 0.05$) รองลงมาคือดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และดอกโสนที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นดอกโสนอบแห้งมีความเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป โดยอาจพัฒนาเป็นเครื่องดื่มชาดอกโสนเพื่อสุขภาพ หรือเสริมในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ดอกโสนได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ได้เอื้อเฟื้อเพื่อทอ้งปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

References

- [1] Leelasuphapong, N. (2015). *Sesbania Flower Chocolate Balls Product Development*. **Ramkhamhaeng Research Journal of Sciences and Technology**. Vol. 18, No. 1, pp. 25-36 (in Thai)
- [2] Nutrition Division, Department of Health. (2001). **Nutritive Values of Thai Foods**. pp. 24. War Veterans Organization Press, Bangkok, Thailand (in Thai)
- [3] Tangvarasittichai, S., Sriprang, N., Harnroongroj, T., and Changbumrung, S. (2005). Antimutagenic Activity of *Sesbania javanica* Miq. Flower DMSO Extract and its Major Flavonoid Glycoside. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health**. Vol. 36, No. 6, pp. 1543-1551
- [4] Kijparkorn, S., Plaimast, H., and Wangsoonoen, S. (2010). Sano (*Sesbania javanica* Miq.) Flower as a Pigment Source in Egg Yolk of Laying Hens. **Thai Journal of Veterinary Medicine**. Vol. 40, No. 3, pp. 281-287
- [5] Parr, A. J. and Bolwell, G. P. (2000). Phenols in the Plant and in Man. The Potential for Possible Nutritional Enhancement of the Diet by Modifying the Phenols Content or Profile. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 80, No. 7, pp. 985-1012
- [6] Maestri, D. M., Nepote, V., Lamarque, A. L., and Zygodlo, J. A. (2006). Natural Products as Antioxidants. In **Phytochemistry: Advances in Research**. Imperato F., eds. pp. 105-135. Research Signpost, Kerala, India
- [7] Tesoriere, L., Allegra, M., Gentile, C., and Livrea, M. A. (2009). Betacyanins as Phenol Antioxidants. Chemistry and Mechanistic Aspects of the Lipoperoxyl Radical-Scavenging Activity in Solution and Liposomes. **Free Radical Research**. Vol. 43, No. 8, pp. 706-717. DOI: 10.1080/10715760903037681

- [8] Ignat, I., Volf, I., and Popa, V. I. (2011). A Critical Review of Methods for Characterisation of Polyphenolic Compounds in Fruits and Vegetables. **Food Chemistry**. Vol. 126, pp. 1821-1835. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.026.
- [9] Murcia M. A., Jiménez A. M., and Martínez-Tomé M. (2009). Vegetables Antioxidant Losses During Industrial Processing and Refrigerated Storage. **Food Research International**. Vol. 42, No. 8, pp. 1046-1052. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.04.012
- [10] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis of the Association of the Official Analysis Chemists**. Arlington: Association of Official Analytical Chemists.
- [11] Maskan, M. (2006). Production of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Juice Concentrate by Various Heating Methods: Colour Degradation and Kinetics. **Journal of Food Engineering**. Vol. 72, Issue 3, pp. 218-224
- [12] Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I., and Ho, J. A. A. (2006). Antioxidant and Antiproliferative Activities of Red Pitaya. **Food Chemistry**. Vol. 95, Issue 2, pp. 319-327. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.01.002
- [13] Mahattanatawee, K., Manthey, J. A., Luzio, G., Talcott, S. T., Goodner, K., and Baldwin, E. A. (2006). Total Antioxidant Activity and Fiber Content of Select Florida-Grown Tropical Fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 54, Issue 19, pp. 7355-7363. DOI: 10.1021/jf060566s
- [14] Lim, Y. Y., Lim, T. T., and Tee, J. J. (2007). Antioxidant Properties of Several Tropical Fruits: A Comparative Study. **Food Chemistry**. Vol. 103, Issue 3, pp. 1003-1008
- [15] Tambe, V. D. and Bhambar, R. S. (2014). Estimation of Total Phenol, Tannin, Alkaloid and Flavanoid in *Hibiscus tiliaceus* Linn. Wood Extracts. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**. Vol. 2, Issue 4, pp. 41-47
- [16] Munde-Wagh, K. B., Wagh, V. D., Toshniwal, S. S., and Sonawane B. R. (2012). Phytochemical, Antimicrobial Evaluation and Determination of Total Phenolic and Flavonoid Contents of *Sesbania grandiflora* Flower Extract. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**. Vol. 4, Issue 4, pp. 229-232
- [17] Siritrakulsak, P., Chutichudet, P., Chutichudet, B., Plainsirichai, M., and Boontiang, K. (2013). Antioxidant Activity of Fifteen Edible Flowers in Maha Sarakham Province. **Khon Kaen Agricultural Journal**. Vol. 41, Suppl. 1, pp. 607-611
- [18] Gowri, S. and Vasantha, K. (2010). Antioxidant Activity of *Sesbania grandiflora* (Pink Variety) L. Pers. **International Journal of Engineering Science and Technology**. Vol. 2, No. 9, pp. 4350-4356
- [19] Chu, Y. H., Chang, C. L., and Hsu, H. F. (2000). Flavonoid Content of Several Vegetables and Their Antioxidant Activity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 80, Issue 5, pp. 561-566

- [20] Yomsungnoen, Y., Waiprib, Y., Sootanan, R., and Tongta, A. (2010). Effects of Temperature and Velocity of Superheated Steam on Moisture Content and Color of Dried Ginger. **Agricultural Science Journal**. Vol. 41, No. 3/1(Suppl.), pp. 429-432 (in Thai)
- [21] Nadee, A., Tirawanichakul, Y., and Tirawanichakul, S. (2012). Drying Kinetics of Pandanus Leaf by Infrared Radiation Combine Hot Air and Hot Air. **Burapha Science Journal**. Vol. 17, No. 2, pp. 130-138 (in Thai)
- [22] Janhiran, A. and Chirnakorn, S. (2006). Ginger Drying Using Superheated Steam. In **The 3rd Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Annual Conference**. pp. 11-17 (in Thai)
- [23] Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S., and Prachayawarakorn, S. (2007). Influences of Drying Medium and Temperature on Drying Kinetics and Quality Attributes of Durian Chip. **Journal of Food Engineering**. Vol. 78, Issue 1, pp. 198-205
- [24] Masiri, P. and Namsanguan, Y. (2007). Effect of Temperature on Color Change of Longan without Stone Undergoing Superheated Steam and Hot Air Drying. **Agricultural Science Journal**. Vol. 38, No. 5, pp. 375-378 (in Thai)
- [25] Stahl, W. and Sies, H. (2003). Antioxidant Activity of Carotenoids. **Molecular Aspects of Medicine**. Vol. 24, No. 6, pp. 345-351
- [26] Choi, Y., Lee, S. M., Chun, J., Lee, H. B., and Lee, J. (2006). Influence of Heat Treatment on the Antioxidant Activities and Polyphenolic Compounds of Shiitake (*Lentinus edodes*) Mushroom. **Food Chemistry**. Vol. 99, No. 2, pp. 381-387
- [27] Nicoli, M. C., Anese, M., Parpinel, M. T., Franceschi, S., and Lerici, C. R. (1997). Loss and/or Formation of Antioxidants During Food Processing and Storage. **Cancer Letters**. Vol. 114, Issue 1-2, pp. 71-74. DOI: 10.1016/S0304-3835(97)04628-4
- [28] Kusznierevicz, B., Smiechowska, A., Bartoszek, A., and Namiesni, J. (2008). The Effect of Heating and Fermenting on Antioxidant Properties of White Cabbage. **Food Chemistry**. Vol. 108, Issue 3, pp. 853-861. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.11.049
- [29] Atanassova, M. and Christova-Bagdassarian, V. (2009). Determination of Tannins Content by Titrimetric Method for Comparison of Different Plant Species. **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**. Vol. 44, No. 4, pp. 413-415
- [30] Khasnabis, J., Rai, C., and Roy, A. (2015). Determination of Tannin Content by Titrimetric Method from Different Types of Tea. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**. Vol. 7, No. 6, pp. 238-241
- [31] Panichakornkul, W. (2016). Effects of Drying Temperatures on Quality of Dried Sesbania Flowers (*Sesbania javatica* Miq) and It's Application in Bread. **VRU Research and Development Journal Science and Technology**. Vol. 11, No. 1, pp. 47-55 (in Thai)



ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันต่อการเจริญเติบโตและการผลิต
токсин Pir ของเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio parahaemolyticus* สายพันธุ์
ก่อโรค Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND)
**Effect of Diurnal Temperature Change on Growth and Pir
Toxin Production of *Vibrio parahaemolyticus* Causing Acute
Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND)**

นิอร จิรพงษ์อรกุล^{1*} อรณิชา รัตนภรณ์² พงศ์พันธุ์ แพรกทอง^{1,3} และกิตติชนม์ อุเทนะพันธ์¹

Received: May, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงกุ้งขาวของประเทศไทยประสบกับปัญหาโรคระบาด Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 เป็นต้นมา ทำให้ผลผลิตกุ้งขาวลดลงเป็นจำนวนมาก โดยสาเหตุของโรค AHPND คือ การติดเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio parahaemolyticus* สายพันธุ์ที่มีพลาสมิดและยีนผลิต毒素 Photorhabdus Insect-related (Pir) A และ Pir B ซึ่งมีรายงานวิจัยที่แสดงถึงอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงต่อการแพร่ระบาดของโรค การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวในรอบวัน รวมถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND จากผลการสำรวจอุณหภูมิน้ำในรอบวันในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวจังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2560 สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิปกติ (24 - 30 °C) (2) การเปลี่ยนแปลง

¹ Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Science, Prince of Songkla University

³ Pak Panang Basin Royal Fisheries Development Center

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

ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (22 - 27 °C) และ (3) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิผันแปร (22 - 30 °C) และเมื่อเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ทั้ง 3 รูปแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญจำเพาะพบว่า การเจริญเติบโตของแบคทีเรียไม่มีความแตกต่าง ในขณะที่อัตราการเจริญจำเพาะมีความแตกต่างกัน และช่วงอุณหภูมิผันแปรโดยเฉพาะช่วงที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 °C ส่งผลให้แบคทีเรียมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด นอกจากนี้ผลการศึกษาโปรตีน รวมถึงทอกซิน Pir A และ Pir B ในน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยวิธี SDS-PAGE พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อการเจริญเติบโต การสร้างสารพิษ และอาจรวมถึงความสามารถในการก่อโรคของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ผลที่ได้ถือเป็นองค์ความรู้สำคัญสำหรับการจัดการระบบการเลี้ยงหรือการจัดการฟาร์มกุ้งเพื่อลดความสูญเสียจากโรค AHPND

คำสำคัญ : โรค Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND); แบคทีเรีย *Vibrio parahaemolyticus*; การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวัน; ทอกซิน Photorhabdus insect-related (Pir); อัตราการเจริญจำเพาะ

Abstract

The culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in Thailand has encountered an acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) since 2013 resulting in a devastating reduction of white shrimp production. The infection of *Vibrio parahaemolyticus* of which strains carrying plasmids with the genes encoding the Photorhabdus insect-related (Pir) A toxin and Pir B toxin are considered as a cause of this epidemic disease. Recently, a number of environmental factors have been reported to influence the spread of disease. This research work aimed to study the variation patterns of water temperature in white shrimp culturing pond throughout the day and night. The effect of the diurnal temperature change on the growth of AHPND-causing *V. parahaemolyticus* was also determined. After collecting the data of water temperature in white shrimp culturing ponds in 2017, we classified the temperature variation patterns into 3 major groups; (1) normal temperature range (24 - 30 °C), (2) low temperature range (22 - 27 °C) and (3) fluctuating temperature range (22 - 30 °C). These 3 diurnal temperature patterns were set to continually culture *V. parahaemolyticus* strain causing AHPND for 24 h and the comparative analysis of bacterial growth and specific growth rate was performed. The results showed that the bacterial growths were similar while the specific growth rates were different. The fluctuating temperature range especially that of the variation range of 3 °C caused the greatest specific growth rate. Moreover, the produced proteins including Pir A and Pir B toxins in the bacterial culture media in 3 temperature patterns were also determined via SDS-PAGE. The obtained results suggested that the temperature change could affect the growth and toxin production as well as involve in

pathogenicity of AHPND-causing *V. parahaemolyticus*. This knowledge leads to the cultural and farm management practices to efficient reduce losses caused by the AHPND.

Keywords: Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND); *Vibrio parahaemolyticus*; Diurnal Temperature Change, Photorhabdus Insect-related (Pir) Toxin, Specific Growth Rate

บทนำ

ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์รวมถึงบทความทางวิชาการต่าง ๆ ในปัจจุบันได้มีการรายงานถึงการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและอุณหภูมิของโลกรวมถึงผลกระทบที่น่าจะเกิดขึ้นในหลายมิติ [1] นำไปสู่การพัฒนาและการศึกษาถึงผลกระทบต่าง ๆ อย่างจริงจังโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการผลิตอาหาร เนื่องจากอาหารเป็นปัจจัยสำคัญของการดำรงชีวิตของประชากรโลก ซึ่งการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นกิจกรรมหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เพราะส่วนใหญ่ยังจำเป็นต้องเลี้ยงกลางแจ้ง สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง ซึ่งปัจจัยสิ่งแวดล้อมถือเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดที่สำคัญ และมีอิทธิพลต่อสัตว์น้ำ โดยมีผลกระทบมากต่อการเจริญเติบโตและสภาวะภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ

หนึ่งในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นอาชีพสำคัญของเกษตรกรไทยคือ การเพาะเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) จากสถิติของกรมประมงในปี พ.ศ. 2558 พบว่าปริมาณการเพาะเลี้ยงรวมถึงผลผลิตของกุ้งขาวคิดเป็นมากกว่า 90 % ของกุ้งทั้งหมดที่เลี้ยงในประเทศไทย [2] อย่างไรก็ตาม ในช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2556 ได้มีอุบัติการณ์ของโรคสำคัญในกุ้งขาวที่เพาะเลี้ยงในประเทศไทย คือ โรค Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) ซึ่งแรกเริ่มให้ชื่อโรคนี้นว่า Early Mortality Syndrome (EMS) จากสภาพของกุ้งที่ตายอย่างรวดเร็ว [3] - [4] โรค AHPND ทำให้เกิดการสูญเสียด้านผลผลิตกุ้ง และกระทบต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างมาก โดยสาเหตุของโรคนี้เกิดจากกุ้งติดเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio parahaemolyticus* สายพันธุ์ที่มีพลาสมิดและยื่นผลิตทอกซิน Photorhabdus Insect-related (Pir) A และ Pir B หรืออาจเรียกทอกซินนี้ว่า Tox A และ Tox B [3], [5] - [7] ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยที่มุ่งเน้นในการจัดการและควบคุมโรค AHPND ในหลายแง่มุม เช่น การจัดการฟาร์มและบ่อเลี้ยง ระบบน้ำเวียน การควบคุมคุณภาพน้ำ การจัดการอาหาร และลูกพันธุ์กุ้งที่มีคุณภาพ [8] - [9] ชนิดและสายพันธุ์ของแบคทีเรียในบ่อเลี้ยงและในตัวกุ้งที่เป็นโรค [10] รวมถึงการพัฒนาการตรวจติดตามแบคทีเรียและพลาสมิดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรค [5] - [6], [11] ในขณะการศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดโรค สุขภาพกุ้ง และชนิด/จำนวนจุลชีพ จะให้ความสำคัญที่คุณภาพน้ำ pH และตะกอนดิน [12] - [13] แต่ผลกระทบของอุณหภูมิโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงในสภาวะการเลี้ยงกุ้งต่อการเจริญเติบโตและความรุนแรงของเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่ทำให้เกิดโรคนี้นั้นยังมีน้อยมาก แม้ว่าจะมีการรายงานถึงภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกที่ชัดเจนมาก

Lafferty, K. D. รายงานถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออุบัติการณ์ของโรคหลายชนิด [14] ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อการเกิดโรคอาจเกิดจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการลดลงของระดับภูมิคุ้มกันในสัตว์น้ำ [15] รวมถึงกระตุ้นให้เชื้อก่อโรคสร้างโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรงต่าง ๆ เช่น เชื้อแบคทีเรีย *Aeromonas* spp. ซึ่งสามารถเจริญได้ระหว่างอุณหภูมิ 4 - 42 °C พบว่าการเปลี่ยนแปลง

ของอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อการผลิตโปรตีนความรุนแรงของเชื้อ *Aeromonas* spp. [16] นอกจากนี้ Guerreiro, I. et al. ได้แสดงให้เห็นว่าโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรงของเชื้อแบคทีเรีย เช่น Serin-metalloprotease, S-layer และ flagellins มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการแสดงออกตามปัจจัยอุณหภูมิ [15] ในขณะที่ผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตและความรุนแรงของเชื้อแบคทีเรียสกุล *Vibrio* ยังจำกัดอยู่ในแง่ของการปนเปื้อนในอาหาร โดยเฉพาะอาหารทะเล หรือศึกษาในสายพันธุ์ก่อโรคที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรง [17] - [20] แต่ยังไม่มีการรายงานถึงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเชื้อ *Vibrio* spp. ที่เกี่ยวข้องกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากสภาวะภูมิอากาศทางภาคใต้ในปัจจุบัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันอยู่เป็นประจำ และแตกต่างค่อนข้างชัดเจนในแต่ละช่วงฤดู ซึ่งภูมิอากาศในภาคใต้จะแบ่งเป็น 3 ช่วงหลัก ๆ คือ ช่วงฤดูร้อน ที่อากาศร้อนตลอดทั้งวันซึ่งจัดเป็นช่วงอุณหภูมิปกติ ช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกตลอดทั้งวันและมีอุณหภูมิต่ำในบางรอบวัน และช่วงที่มีฝนตกสลับกับแดดออก ซึ่งแบบสุดท้ายนี้จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิในรอบวันมีการเปลี่ยนแปลงกะทันหันหรือผันแปรอย่างชัดเจน ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวในรอบวัน ในปี พ.ศ. 2560 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แท้จริงโดยสำรวจในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวเขตอำเภอปากพนัง และอำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นบริเวณหลักแห่งหนึ่งของการเลี้ยงกุ้งขาวในภาคใต้ และนำข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในรอบวันที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ มาทำการออกแบบโปรแกรมกำหนดอุณหภูมิในการเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ทำให้เกิดโรค AHPND เพื่อศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงในหลอดทดลอง (*in vitro*) แล้วติดตามการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญจำเพาะของแบคทีเรีย โดยในการศึกษานี้ได้ทำการติดตามแบบ Real-Time คือ วัดค่า Optical Density แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเลี้ยงโดยไม่ต้องทำการหยุดเครื่องเพื่อเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ และสามารถวัดค่าได้ทุก ๆ 10 นาที ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้การเก็บผลมีความละเอียดสูงขึ้น อีกทั้งยังลดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อน (Contamination) ระหว่างการสุ่มเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาโปรตีนในน้ำเลี้ยงของเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงในช่วงอุณหภูมิที่ได้จากการเลียนแบบอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงจริง โดยวัดปริมาณโปรตีนและศึกษารูปแบบโปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเติมเต็มองค์ความรู้สำคัญสำหรับการจัดการระบบการเลี้ยงหรือการจัดการฟาร์มกุ้งเพื่อลดความสูญเสียจากโรค AHPND

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำในรอบวันในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำในรอบวันในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว โดยเก็บจากบ่อในพื้นที่อำเภอปากพนังและอำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวนพื้นที่ละ 1 บ่อต่อฤดูกาล จำนวน 3 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อนระหว่างเดือนมกราคม - เมษายน จัดเป็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิปกติ การเปลี่ยนฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน ระหว่างเดือนพฤษภาคม - สิงหาคม หรือช่วงอุณหภูมิผันแปร และฤดูฝนระหว่างเดือนกันยายน - ธันวาคม หรือช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยเลือกเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอัตโนมัติ รุ่น 175 T2 (Testo) กำหนดการบันทึกข้อมูลอากาศและน้ำทุก 10 นาที จากบ่อที่อยู่ใน

ระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาว โดยเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลา 1 รอบการเลี้ยงกุ้ง (80 - 116 วัน) จากนั้นเลือกข้อมูลอุณหภูมิในน้ำในรอบวันที่มีสภาวะอากาศตามข้อกำหนดของแต่ละฤดูกาล (อ้างอิงอุณหภูมิอากาศจากข้อมูลสาธารณะที่บันทึกโดยสถานีตรวจอากาศนครศรีธรรมราช) คือ

- ฤดูร้อน ต้องไม่พบฝนตกและอุณหภูมิอากาศในช่วงระหว่าง 26 ถึงมากกว่า 34 °C
- การเปลี่ยนฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน ต้องมีฝนตกในวันนั้น ๆ และอุณหภูมิอากาศระหว่าง 24 ถึงมากกว่า 34 °C
- ฤดูฝน ต้องมีอุณหภูมิอากาศระหว่าง 22 ถึงไม่เกิน 32 °C

โดยในแต่ละฤดูกาลได้ทำการสุ่มเลือกวันตามข้อกำหนดของอุณหภูมิอากาศ จำนวน 20 วันต่อบ่อ โดยนำข้อมูลอุณหภูมิในน้ำที่มีความซ้ำกันจากการสุ่มวันที่มีสภาวะอากาศตามที่กำหนดข้างต้นในแต่ละฤดูกาล จำนวน 10 วันต่อบ่อ (n = 20) มาคำนวณค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในทุกชั่วโมงตั้งแต่เวลา 07.00 - 06.00 น. ของวันรุ่งขึ้น

2. การแยกเชื้อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND

นำตัวอย่างกุ้งขาวที่แสดงอาการของโรค AHPND โดยมีลักษณะไม่ตอบสนองต่อสิ่งเร้า ดับ (Hepatopancreas) มีสีซีดและหดตัว ไม่มีอาหารในลำไส้ [21] มาแยกแบคทีเรียจากตับ โดยวิธี Streak Plate บนอาหาร Thiosulfate Citrate Bile-Salts Sugar (TCBS, Difco) แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 18 - 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการสุ่มเลือกโคโลนีแบคทีเรียสีเขียวบนอาหาร TCBS จำนวน 10 โคโลนี มาย้ายเลี้ยงบนอาหาร Crome (HiCrome™ Vibrio Agar, HiMedia) โดยโคโลนีที่ขึ้นบนอาหาร Crome มีสีเขียวปนน้ำเงิน (Bluish-Green) ซึ่งยืนยันเบื้องต้นว่าเชื้อแบคทีเรียที่เลือกมาเป็น *V. parahaemolyticus* หลังจากนั้นนำเชื้อแต่ละโคโลนีมาเลี้ยงในอาหาร Tryptic Soy Broth (TSB, Difco) ที่เติม 1.5 % (w/v) NaCl (อาหาร TSB⁺) นำไปเลี้ยงโดยเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อแยกเอาเฉพาะเซลล์แบคทีเรียสำหรับสกัด DNA ซึ่งสกัด DNA โดยใช้ DNAzol® reagent (Invitrogen) หลังจากนั้นตรวจสอบปริมาณและคุณภาพของ DNA ที่สกัดได้ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง A₂₆₀ และ A_{260/280}

ทำการตรวจสอบว่าแบคทีเรียทั้ง 10 โคโลนีที่สุ่มเลือกมาเป็น *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND โดยการทำ Multiplex PCR ด้วย Specific Primers ที่จำเพาะต่อเชื้อ *V. parahaemolyticus* พลาสมิด และยีน Pir ตามวิธีตรวจมาตรฐานของกรมประมง (ตรวจสอบเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ EMS/AHPND) โดยมีรายละเอียด Primer และสารในการทำปฏิกิริยา multiplex PCR ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ทำการเพิ่มปริมาณ DNA ด้วยเครื่อง T100™ Thermal Cycler (Bio-Rad) โดยโปรแกรมในการทำ PCR อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีการตรวจของกรมประมง คือ Initial Denaturation ที่ 94 °C เป็นเวลา 3 นาที ตามด้วยการทำปฏิกิริยาจำนวน 29 รอบ Denaturation ที่อุณหภูมิ 94 °C เวลา 30 วินาที Annealing ที่ 60 °C 30 วินาที และ Extension ที่ 72 °C 30 วินาที และ Final Extension ที่ 72 °C 5 นาที จากนั้นนำ PCR Products ที่ได้ไปแยกด้วย 1.5 % (w/v) Agarose Gel Electrophoresis

3. การเตรียมเชื้อ *V. parahaemolyticus* สำหรับทดสอบ

เตรียมหัวเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND จำนวน 1 ไอโซเลต โดยเริ่มจากเลี้ยงบนอาหาร TSA⁺ บ่มที่ 30 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วแกะเชื้อ 1 หลู มาเลี้ยงในอาหาร

TSB⁺ ปริมาตร 1 mL เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วขยายเป็น 10 mL ในหลอดเซนตริฟิวจ์ขนาด 15 mL ด้วยลักษณะการเลี้ยงเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น หลังจากนั้นขยายปริมาตรการเลี้ยงโดยนำหัวเชื้อปริมาตร 2 mL ผสมกับอาหาร TSB⁺ 14 mL และ น้ำเกลือ 1.5 % (w/v) NaCl 14 mL แล้วนำไปเลี้ยงในเครื่อง RTS-1C Personal Bioreactor (Biosan) สำหรับศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียต่อไป

4. การศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *V. parahaemolyticus* โดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียจากข้อ 3. ในเครื่อง RTS-1C Personal Bioreactor (Biosan) ที่ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิ 3 รูปแบบ คือ (1) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิปกติ (2) ช่วงอุณหภูมิต่ำ และ (3) ช่วงอุณหภูมิผันแปร (รูปแบบอุณหภูมิและช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ออกแบบตามข้อมูลอุณหภูมิในรอบวัน) ช่วงโปรแกรมละ 3 ชั่วโมง โดยกำหนดให้เครื่องอ่านค่า Optical Density (แปลผลกลับเป็นปริมาณแบคทีเรีย) ทุก ๆ 10 นาทีต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแสดงผลเป็นการเจริญเติบโต (Growth Curve) และอัตราการเจริญจำเพาะ (Specific Growth Rate)

ตารางที่ 1 Primer ที่ใช้ในการทำ Multiplex PCR

Primer Name	Primer Sequence (5' to 3')	Target	PCR Product	References
Vp.flae-79F	5'-GCAGCTGATCAAAACGTTGAGT-3'	<i>V. parahaemolyticus</i>	897 bp	[21]
Vp.flae-934R	5'-ATTATCGATCGTGCCACTCAC-3'			
TUMSAT-Vp1F	5'-CGCAGATTTGCTTTTGTGAA-3'	Plasmid (pVA1)	500 bp	[11]
TUMSAT-Vp1R	5'-AGAAGCTGGCCGAAGTGATA-3'			
TUMSAT-Vp3F	5'-GTGTTGCATAATTTTGTGCA-3'	Pir toxin	360 bp	[11]
TUMSAT-Vp3R	5'-TTGTACAGAAACCACGACTA-3'			

ตารางที่ 2 สารเคมีในการทำปฏิกิริยา Multiplex PCR

PCR components	Volume (μL)/ Reaction	Final concentration
DNA free water	5.60	
2X KAPA2G Fast Multiplex Mix (Sigma-Aldrich)	10.00	1X (contains 3 mM MgCl ₂)
10 μM F/R Mix Primer (Vp.flae, Vp1, Vp3)	2.40	0.2 μM each
DNA template	2.00	
Total	20.00	

5. การวิเคราะห์โปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus*

5.1 การเตรียมน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus*

หลังจากเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* ในอุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ โดยมีอาหาร TSB⁺ ผสมกับ 1.5 % (w/v) NaCl ในอัตราส่วน 1:1 เป็นชุดควบคุม (Negative Control) เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนและรูปแบบโปรตีนของอาหารเลี้ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แยกเซลล์ออกโดยนำน้ำเลี้ยงเชื้อไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำเฉพาะส่วนใสที่ได้กรองผ่าน Whatman® filter syringe เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45 µm (GE Healthcare) โดยทำวิธีเดียวกันนี้กับอาหารเลี้ยงเชื้อในชุดควบคุม หลังจากนั้นเก็บน้ำเลี้ยงที่ปลอดเชื้อแบคทีเรียไว้ที่ -20 °C (แบ่งน้ำเลี้ยง (Aliquot) ออกเป็นส่วน ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการ Freeze-Thaw)

5.2 การวัดปริมาณโปรตีน

วัดปริมาณโปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อทุกตัวอย่างรวมถึงอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุมด้วยวิธีเบรคฟอร์ด [22] โดยผสมสารละลายเบรคฟอร์ดกับตัวอย่างน้ำเลี้ยง บ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 10 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 nm คำนวณหาปริมาณโปรตีนในตัวอย่างน้ำเลี้ยงโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลาย Bovine Serum Albumin (BSA)

5.3 การวิเคราะห์รูปแบบโปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อ

ทำการวิเคราะห์โปรตีนที่เชื้อ *V. parahaemolyticus* ผลิตและหลั่งออกมาในน้ำเลี้ยงเชื้อและอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม ด้วยวิธีพอลิอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโตรโฟรีซิสแบบแปลงสภาพ หรือ Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) (ดัดแปลงจากวิธีของ [23]) โดยเตรียมน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* และอาหารชุดควบคุม ผสมกับ Sample Buffer ที่มี β-mercaptoethanol เป็นองค์ประกอบ ทำการแยกโปรตีนด้วยเจลที่มีความเข้มข้น 12.5 % และให้กระแสไฟ 100 โวลต์ เป็นเวลาประมาณ 45 นาที (หรือรอจน Tracking Dye เคลื่อนที่ไปจนถึงขอบล่างของแผ่นเจล) แล้วย้อมแถบโปรตีนบนแผ่นเจลด้วยสี Coomassie Brilliant Blue และเปรียบเทียบขนาดของแถบโปรตีนด้วยโปรตีนมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักโมเลกุล (Low Molecular Weight Calibration kit for SDS Electrophoresis, GE Healthcare)

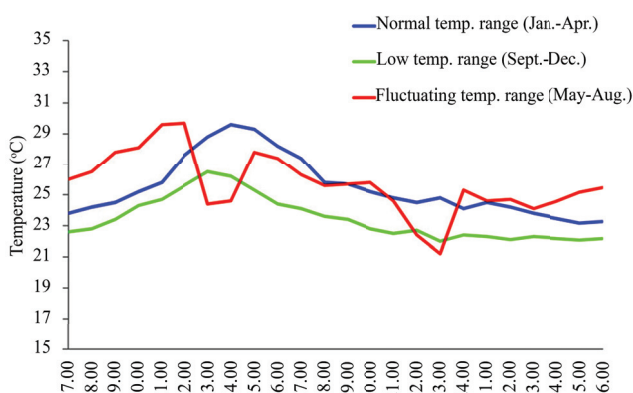
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. อุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวในรอบวัน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำในรอบวันในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่เป็นตัวแทนแต่ละฤดูกาลจากการกำหนดสภาวะอากาศ (รายละเอียดในวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ ข้อ 1.) ผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 07.00 - 06.00 น. ของวันใหม่ เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่การทำงานของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวที่เก็บข้อมูลในช่วงฤดูร้อนซึ่งมีสภาวะอากาศปกติมีค่าต่ำสุดที่ 23.2 °C และสูงสุดที่ 29.6 °C (อุณหภูมิน้ำระหว่าง 24 - 30 °C) โดยในช่วงเวลาระหว่าง 07.00 - 14.00 น. ของรอบวันมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 11.00-14.00 น. หลังจากเวลา 14.00 น. อุณหภูมิน้ำจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิ 24±1 °C ระหว่างช่วงเวลา 21.00 - 09.00 น. ของวันใหม่

ช่วงอุณหภูมิผันแปรระหว่างเปลี่ยนฤดูจากฤดูร้อนสู่ฤดูฝน มีอุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวต่ำสุดที่ 21.2 °C และสูงสุดที่ 29.7 °C แต่พบการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิน้ำจากฝนตก และอุณหภูมิน้ำจะเพิ่มสูงขึ้น 3 - 4 °C หลังจากฝนหยุดตก (อุณหภูมิน้ำระหว่าง 22 - 30 °C) ในขณะที่ฤดูฝนซึ่งน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวมีอุณหภูมิต่ำจะมีอุณหภูมิน้ำต่ำสุดที่ 22.1 °C และสูงสุดที่ 26.5 °C (อุณหภูมิน้ำระหว่าง 22 - 27 °C) โดยมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันใกล้เคียงกับฤดูร้อนแต่อุณหภูมิต่ำกว่า 1 - 3 °C (รูปที่ 1) ซึ่งจากการเก็บข้อมูลสถิติการเกิดโรค AHPND สังเกตว่าในช่วงการเลี้ยงแต่ละรอบสภาพอากาศในช่วงเวลาที่มีการผันแปรของอุณหภูมิในรอบวัน จะมีโอกาสพบการแพร่ระบาดของโรค AHPND สูงกว่า

แม้ว่าช่วงอุณหภูมิในรอบวันจะใกล้เคียงกัน แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิผันแปรที่มีการขึ้นลงมากกว่า 1 ครั้งในรอบวันและพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงอย่างฉับพลัน ดังนั้นข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จึงถูกนำมาใช้อ้างอิงในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวัน (เปรียบเทียบในรูปแบบช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน) ต่อการเจริญเติบโตและการผลิตโปรตีนของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ในห้องปฏิบัติการ

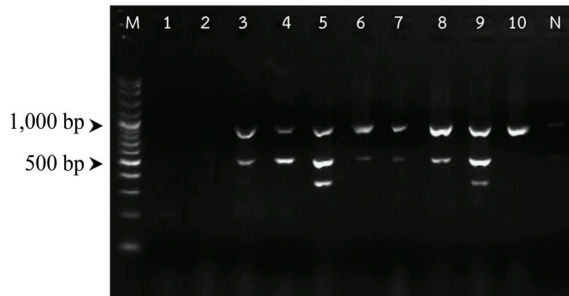


รูปที่ 1 อุณหภูมิน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวในรอบวันจากบ่อเลี้ยงกุ้งขาวในจังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2560

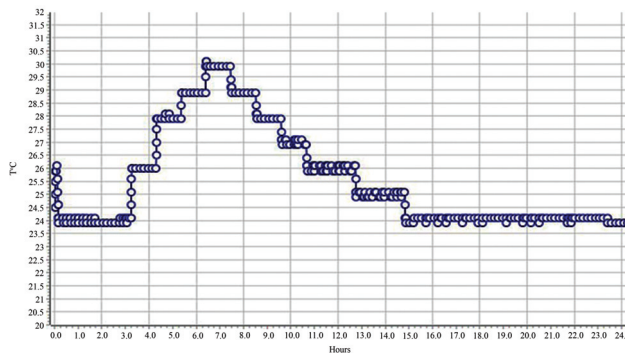
2. การตรวจสอบเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND

ในการตรวจสอบเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ด้วยวิธี Multiplex PCR โดยใช้ primer 3 คู่ที่จับตำแหน่งจำเพาะต่างกันและเพิ่มจำนวน DNA ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยแถบขนาด 890 bp เกิดจากการเพิ่มจำนวนด้วยการจับจำเพาะของคู่ primer Vp.fluE ซึ่งจำเพาะต่อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* [21] ในขณะที่แถบขนาด 500 bp เกิดจากการจับจำเพาะของคู่ primer TAMSAT-Vp1 โดยแถบที่ปรากฏจะแสดงถึงการมีอยู่ของพลาสมิด pVA1 ซึ่งมีรายงานว่าพลาสมิดที่เกี่ยวข้องกับโรค AHPND (AHPND-Associated Plasmid) โดยพลาสมิดสามารถส่งผ่านตัวเองไปยังเซลล์อื่น ๆ (Self-Transmissible Plasmid) เนื่องจากมีกลุ่มยีน Conjugative Transfer และ Plasmid Mobilization [24] และแถบ DNA ขนาด 360 bp ที่ได้จากการจับจำเพาะของคู่ primer TAMSAT-Vp3 จะแสดงถึงการมีอยู่ของยีน *Pir* [11] ดังนั้น ผลบวกที่จะแสดงว่าเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่ทดสอบเป็นสายพันธุ์ก่อโรค AHPND จะต้องปรากฏแถบ DNA ทั้ง 3 แถบข้างต้น

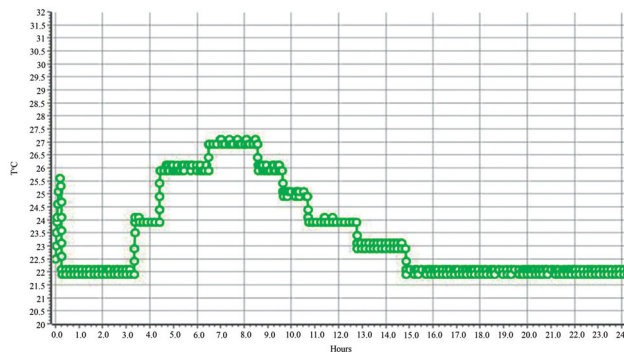
เมื่อตรวจสอบเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่แยกได้จากตับของกุ้งขาวป่วยที่แสดงอาการของโรค AHPND จำนวน 10 ไอโซเลต ด้วยวิธี Multiplex PCR (รูปที่ 2) พบว่ามีเพียง 2 ไอโซเลตที่มีแถบ DNA ครบทั้ง 3 แถบ คือ ไอโซเลตที่ 5 และ 9 ผู้วิจัยจึงเลือกเชื้อ *V. parahaemolyticus* ไอโซเลตที่ 5 สำหรับศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตและการผลิตทอกซินต่อไป



รูปที่ 2 ผลการทำ Agarose Gel Electrophoresis ของการตรวจสอบเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ด้วยวิธี Multiplex PCR (M = Molecular Weight Marker (100 bp Plus, Vivantis), 1-10 = DNA ของเชื้อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* ไอโซเลตที่ 1-10 และ N = Negative Control, ใส่ DEPC-treated H₂O แทน DNA)

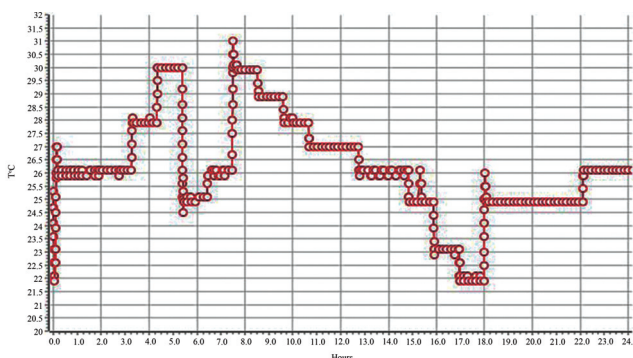


(ก) ช่วงอุณหภูมิปกติ

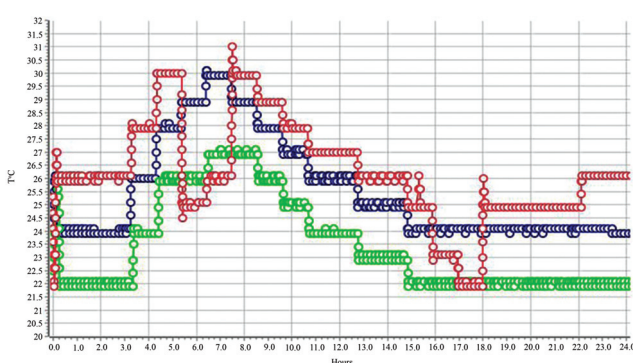


(ข) ช่วงอุณหภูมิต่ำ

รูปที่ 3 โปรแกรมอุณหภูมิสำหรับเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่ออกแบบตามข้อมูลอุณหภูมิในรอบวัน



(ค) ช่วงอุณหภูมิผันแปร



(ง) รวมช่วงอุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ

○ Normal temp. range

○ Low temp. range

○ Fluctuating temp. range

รูปที่ 3 โปรแกรมอุณหภูมิสำหรับเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่ออกแบบตามข้อมูลอุณหภูมิในรอบวัน (ต่อ)

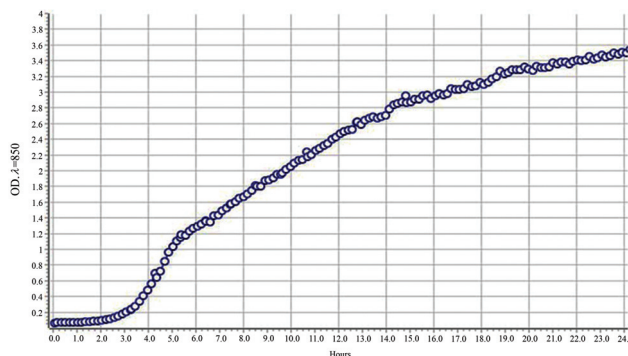
3. การเจริญเติบโตของเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อได้ข้อมูลอุณหภูมิในรอบวันจากการเก็บข้อมูลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ ช่วงอุณหภูมิปกติ ช่วงอุณหภูมิต่ำ และช่วงอุณหภูมิผันแปร (รูปที่ 1) นำมาสร้างโปรแกรมอุณหภูมิในการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND โดยใช้เครื่อง RTS-1C Personal Bioreactor (Biosan) ที่สามารถตั้งอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ ควบคุมการเขย่า และอ่านค่า Optical Density เพื่อแสดงถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้อย่างต่อเนื่อง โดยโปรแกรมอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ทั้ง 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งช่วงอุณหภูมิปกติ (24 - 30 °C รูปที่ 3 (ก)) และช่วงอุณหภูมิต่ำ (22 - 27 °C รูปที่ 3 (ข)) จะมีลักษณะใกล้เคียงกันต่างกันเพียงแค่ช่วงอุณหภูมิเท่านั้น ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิผันแปร (22 - 30 °C รูปที่ 3 (ค)) จะมีการแกว่งของอุณหภูมิในแต่ละช่วงอย่างชัดเจน โดยในช่วงบางช่วงจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 3 °C ผันแปรอย่างรวดเร็ว

ข้อมูลค่า Optical Density ที่วัดทุก ๆ 10 นาที สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟการเจริญเติบโตได้ทันที และสามารถคำนวณเป็นอัตราการเจริญจำเพาะได้ โดยคิดเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า Optical Density ในช่วงเวลาหนึ่ง พบว่ากราฟการเจริญเติบโตของ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์

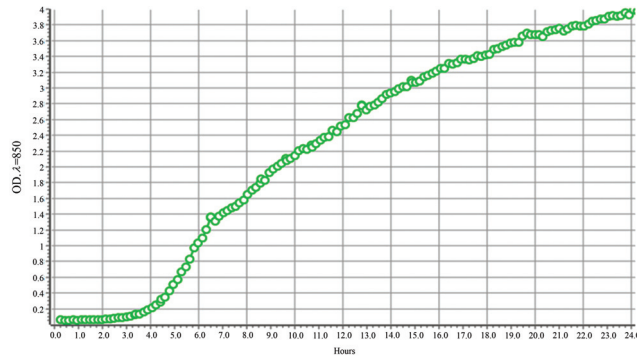
ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ (รูปที่ 4) มีความใกล้เคียงกันมากโดยแสดงช่วง Lag Phase และ Exponential Phase เหมือนกัน แต่ระยะเวลาในช่วง Lag Phase มีความแตกต่างกัน โดยแบคทีเรียที่เลี้ยงในช่วงอุณหภูมิต่ำจะมีช่วง Lag Phase ที่ยาวที่สุด ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิผันแปร มีช่วง Lag Phase สั้นที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นในการเลี้ยง โดยพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้แบคทีเรียมีช่วง Lag Phase สั้นกว่า สอดคล้องกับการศึกษาการเจริญเติบโตของ *V. parahaemolyticus* และ *V. vulnificus* ที่เลี้ยงในอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าระยะเวลาในช่วง Lag Phase แปรผกผันกับอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากการที่แบคทีเรียเจริญเติบโตในอุณหภูมิต่ำจะต้องใช้เวลาในช่วงปรับสภาพหรือ Lag Phase ยาวนานขึ้น [19]

เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญจำเพาะของ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงภายใต้อุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ (รูปที่ 5) พบความแตกต่างของกราฟอย่างชัดเจน โดยในช่วงอุณหภูมิผันแปรพบอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด 2 ช่วงหลัก ซึ่งช่วงที่มีการเจริญจำเพาะสูงสุดช่วงแรกอยู่ในช่วงระยะเวลาใกล้เคียงกับการเลี้ยงที่อุณหภูมิอื่น ๆ และเป็นช่วงที่อุณหภูมิมีการขึ้นลง (รูปที่ 3) แต่ในอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด ในช่วงที่ 2 เกิดขึ้นเฉพาะในการเลี้ยงด้วยช่วงอุณหภูมิผันแปรเท่านั้น พบความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเลี้ยงที่มีการขึ้นลงเช่นเดียวกัน ซึ่งช่วงที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 °C ส่งผลให้แบคทีเรียมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด เป็นที่น่าสังเกตว่าการผันแปรหรือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้มีอัตราการเจริญจำเพาะที่สูงขึ้น ในขณะที่จะไม่พบความแตกต่างเมื่อพิจารณาจากการเจริญเติบโตทั่วไป เนื่องจากการเจริญเติบโตเป็นการวัดค่า Optical Density ของเซลล์แบคทีเรียแสดงถึงปริมาณแบคทีเรียที่สะสมต่อเนื่องไป ไม่สะท้อนถึงความสามารถในการเจริญเติบโต หรือการแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวนได้ [25] ในขณะที่ยอดการศึกษาที่ผ่านมา ได้ทำการศึกษาเฉพาะผลของอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ๆ หรือส่วนต่างของอุณหภูมิ ต่อการเจริญเติบโต และอัตราการเจริญจำเพาะของแบคทีเรียเท่านั้น โดยไม่ได้แสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลงในช่วงการเลี้ยง [26] - [28] การวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาครั้งแรกที่ติดตามผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างฉับพลันต่อการเจริญเติบโตแบบ Real-Time ของแบคทีเรีย และผลการวิจัยแสดงอย่างชัดเจนว่าการขึ้น/ลงของอุณหภูมิจะส่งผลต่ออัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดอย่างชัดเจน

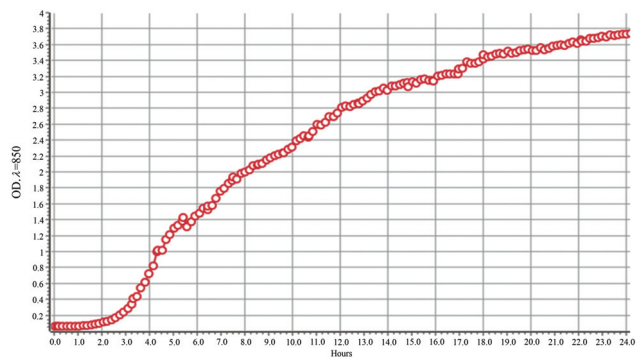


(ก) ช่วงอุณหภูมิปกติ

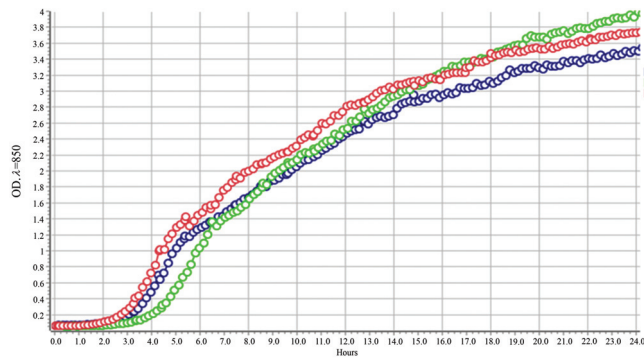
รูปที่ 4 การเจริญเติบโต (Growth Curve) ของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ



(ข) ช่วงอุณหภูมิต่ำ



(ค) ช่วงอุณหภูมิผันแปร



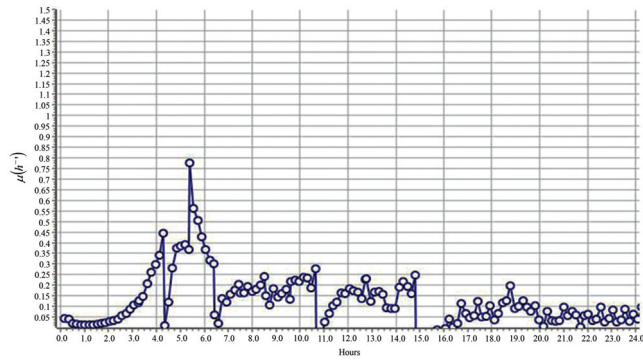
(ง) รวมช่วงอุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ

○ Normal temp. range

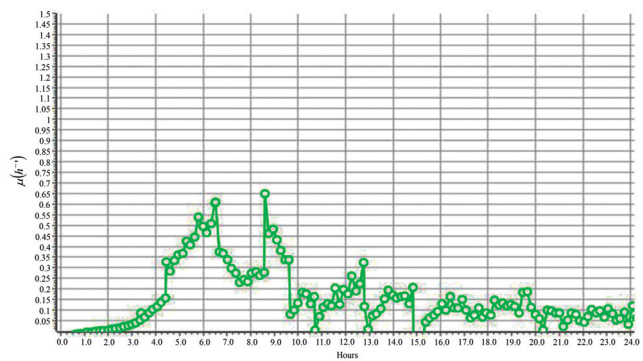
○ Low temp. range

○ Fluctuating temp. range

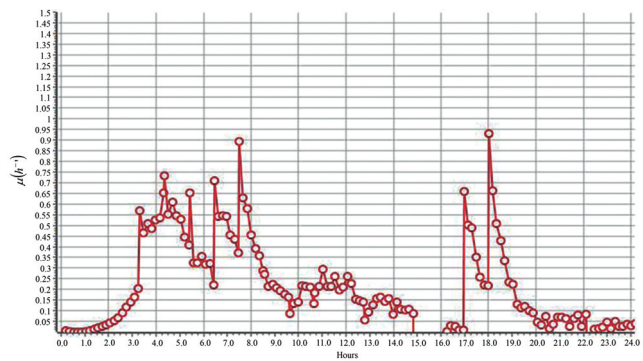
รูปที่ 4 การเจริญเติบโต (Growth Curve) ของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)



(ก) ช่วงอุณหภูมิปกติ

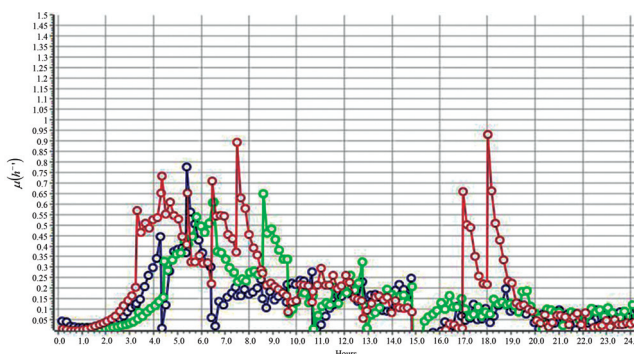


(ข) ช่วงอุณหภูมิต่ำ



(ค) ช่วงอุณหภูมิผันแปร

รูปที่ 5 อัตราการเจริญจำเพาะ (Specific Growth Rate) ของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ



(ง) รวมช่วงอุณหภูมิทั้ง 3 รูปแบบ

○ Normal temp. range

○ Low temp. range

○ Fluctuating temp. range

รูปที่ 5 อัตราการเจริญจำเพาะ (Specific Growth Rate) ของเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

4. การวิเคราะห์โปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND

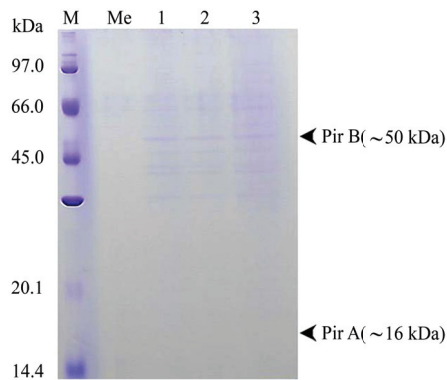
เมื่อนำน้ำเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงในอาหารผสม TSA⁺ และ 1.5 % (w/v) NaCl ในอัตราส่วน 1:1 ในอุณหภูมิต่าง ๆ ทั้ง 3 รูปแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวัดปริมาณโปรตีนพบว่า โปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่ช่วงอุณหภูมิผันแปร มีความเข้มข้นมากที่สุด รองลงมาคือ ช่วงอุณหภูมิปกติ และช่วงอุณหภูมิต่ำ ตามลำดับ ในขณะที่อาหารเลี้ยงเชื้อมีโปรตีนน้อยมาก (ตารางที่ 3) ซึ่งสอดคล้องกับผลโปรตีนในเจล SDS-PAGE ซึ่งมีความเข้มข้นของแถบโปรตีนมากที่สุดในช่องของน้ำเลี้ยงที่ช่วงอุณหภูมิผันแปร และน้อยที่สุดในช่องอาหารเลี้ยงเชื้อ (รูปที่ 6) แสดงให้เห็นว่าการที่เชื้อแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น และมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงจะผลิต Extracellular Protein ออกมามาก

ตารางที่ 3 ปริมาณโปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิต่าง ๆ

	อาหารเลี้ยงเชื้อ	ช่วงอุณหภูมิปกติ	ช่วงอุณหภูมิต่ำ	ช่วงอุณหภูมิผันแปร
โปรตีน (μg/mL)	0.91±0.16	11.54±0.48	7.77±0.00	26.46±1.86

เมื่อพิจารณาแถบโปรตีนในน้ำเลี้ยงต่าง ๆ พบแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50 kDa ในอาหารที่มีการเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND โดยไม่พบในอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งน่าจะเป็นทอกซิน Pir B ตรงกับรายงานที่แสดงถึงขนาดของทอกซิน Pir B หรือ Tox B ประมาณ 50 kDa และเป็นโปรตีนหลักที่สามารถตรวจพบในน้ำเลี้ยงหรืออาหารเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่มี plasmid ที่มียีน *Pir B* [5] - [6] ในการศึกษาครั้งนี้พบแถบโปรตีนขนาด 16 kDa บางมาก โดยมีรายงานว่าแถบโปรตีนทอกซิน Pir A หรือ Tox A ขนาดประมาณ 16 kDa จะต้องตรวจพบได้ในน้ำเลี้ยงหรืออาหารเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND เช่นกัน อย่างไรก็ตาม

Lee, C.-T. et al. ได้ให้ข้อสังเกตว่าในน้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND จะตรวจพบโปรตีน Pir B ในปริมาณมากกว่า Pir A มาก [24]



รูปที่ 6 การวิเคราะห์โปรตีนในน้ำเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND ที่เลี้ยงในอุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยวิธี SDS-PAGE แล้วย้อมด้วย Coomassie Brilliant Blue เมื่อ M = Molecular Weight Marker, ME = อาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม (อาหาร TSB⁺ ผสมกับ 1.5 % (w/v) NaCl ในอัตราส่วน 1:1), ช่องหมายเลข 1, 2 และ 3 = น้ำเลี้ยงเชื้อ *V. parahaemolyticus* ที่เลี้ยงในช่วงอุณหภูมิปกติ ช่วงอุณหภูมิต่ำ และช่วงอุณหภูมิผันแปร ตามลำดับ

การก่อให้โรคหรืออาการของ AHPND ในกุ้งเกิดจากผลการทำงานของทอกซิน Pir ที่เชื้อแบคทีเรียผลิตและหลั่งออกมาภายนอกเซลล์เท่านั้น เนื่องจากเมื่อใช้ Cell-Free Medium ที่มีเพียงทอกซิน Pir ทดสอบกับกุ้งพบว่าสามารถทำให้เกิดอาการของโรค AHPND ได้ [6], [24] โดยกุ้งที่ได้รับทอกซิน Pir A และ B หรือ Pir B แสดงอาการของโรค แต่กุ้งที่ได้รับเฉพาะทอกซิน Pir A ไม่แสดงอาการ [24] มีรายงานว่าโปรตีนทอกซินทั้ง 2 ชนิดนี้มีรูปแบบการทำงานคล้ายคลึงกับทอกซิน Cry ที่ผลิตโดยแบคทีเรีย *Bacillus thuringiensis* ซึ่งทำลายเซลล์เป้าหมายด้วยการทำให้เกิด Pore-Forming เนื่องจากโครงสร้างของทอกซิน Pir B คล้ายกับ Domain I และ Domain II และ Pir A คล้ายกับ Domain III ของทอกซิน Cry ซึ่งเข้าจับกับตัวรับ (Receptor) บนเซลล์เป้าหมายเกิดเป็น Complex แล้วทำให้เกิด Pore-Forming ที่เซลล์เป้าหมาย รวมถึงเป็นการส่งสัญญาณ (Signal Transduction Pathway) กระตุ้นให้เกิดการตายของเซลล์ (Cell Death) [24], [29] ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้การแสดงออกของยีน *Pir A* และ *Pir B* รวมถึงการผลิตโปรตีนทอกซิน Pir A และ Pir B เปลี่ยนแปลงไปก็จะส่งผลต่อความรุนแรงในการเกิดโรค AHPND เช่นกัน

สรุปผลการวิจัย

จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำในรอบวันในบ่อเลี้ยงกุ้งชาวดลอดปี พ.ศ. 2560 สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ 3 รูปแบบ คือ (1) ช่วงอุณหภูมิปกติ (24 - 30 °C) (2) ช่วงอุณหภูมิต่ำ (22 - 27 °C) และ (3) ช่วงอุณหภูมิผันแปร (22 - 30 °C) โดยเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาตั้งโปรแกรมในการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

V. parahaemolyticus สายพันธุ์ก่อโรค AHPND พบว่ากราฟการเจริญเติบโตของแบคทีเรียไม่ต่างกัน แต่มีความแตกต่างในระยะเวลาช่วง Lag Phase และรูปแบบของอัตราการเจริญจำเพาะมีความแตกต่างกัน โดยเมื่ออุณหภูมิมีความแตกต่าง 3 °C จะทำให้แบคทีเรียมีอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด นอกจากนี้รูปแบบอุณหภูมิในการเลี้ยงที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อ Extracellular Protein รวมถึงทอกซิน Pir ที่แบคทีเรียผลิตและหลั่งออกภายนอกเซลล์ โดยพบว่าการเลี้ยงภายใต้ช่วงอุณหภูมิผันแปรที่มีการขึ้นลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันจะส่งผลให้มีการผลิตโปรตีนสูงสุด โดยสูงกว่าช่วงอุณหภูมิปกติและช่วงอุณหภูมิต่ำคิดเป็น 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการผลิตโปรตีนของแบคทีเรีย *V. parahaemolyticus* สายพันธุ์ก่อโรค AHPND เนื่องจากโปรตีนทอกซิน Pir เป็นตัวแปรหลักในการทำให้เกิดโรคหรือความรุนแรงของโรค AHPND ดังนั้น ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่ช่วยในการจัดการระบบการเลี้ยงหรือการจัดการฟาร์มกุ้งเพื่อลดความสูญเสียจากโรค AHPND

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งชาวในจังหวัดนครศรีธรรมราชที่อนุเคราะห์ให้คณะผู้วิจัยติดตั้งอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูล โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้เป็นวิทยานิพนธ์ของนายพงศ์พันธุ์ แพรกทอง นักศึกษาปริญญาโท สาขาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการจัดการทรัพยากรประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

References

- [1] Karvonen, A., Rintamäki, P., Jokela, J., and Valtonen, E. T. (2010). Increasing Water Temperature and Disease Risks in Aquatic Systems, Climate Change Increases the Risk of Some, but Not All, Diseases. **International Journal for Parasitology**. Vol. 40, Issue 13, pp. 1483-1488. DOI: 10.1016/j.ijpara.2010.04.015
- [2] Fisheries Statistics Analysis and Research Group, Fisheries Development Policy and Strategy Division. (2017). Statistics of Marine Shrimp Culture 2015. **Department of Fisheries Ministry of Agriculture and Cooperatives**. No. 2, pp. 1-46 (in Thai)
- [3] Tran, L., Nunan, L., Redman, R. M., Mohney, L. L., Pantoja, C. R., Fitzsimmons, K., and Lightner, D. V. (2013). Determination of the Infectious Nature of the Agent of Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome Affecting Penaeid Shrimp. **Diseases of Aquatic Organisms**. Vol. 105, Issue 1, pp. 45-55
- [4] Joshi, J., Srisala, J., Truong, V. H., Chen, I. T., Nuangsaeng, B., Suthienkul, O., Lo, C. F., Flegel, T. W., Sritunyalucksana, K., and Thitamadee, S. (2014). Variation in *Vibrio parahaemolyticus* Isolates from a Single Thai Shrimp Farm Experiencing an Outbreak of Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND). **Aquaculture**. Vol. 428-429, pp. 297-302. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.03.030

- [5] Dangtip, S., Sirikharin, R., Sanguanrut, P., Thitamadee, S., Sritunyalucksana, K., Taengchaiyaphum, S., Mavichak, R., Proespraiwong, P., and Flegel, T. W. (2015). AP4 Method for Two-Tube Nested PCR Detection of AHPND Isolates of *Vibrio parahaemolyticus*. **Aquaculture Reports**. Vol. 2, pp. 158-162. DOI: 10.1016/j.aqrep.2015.10.002
- [6] Sirikharin, R., Taengchaiyaphum, S., Sanguanrut, P., Chi, T. D., Mavichak, R., Proespraiwong, P., Nuangsaeng, B., Thitamadee, S., Flegel, T. W., and Sritunyalucksana, K. (2015). Characterization and PCR Detection of Binary, Pir-Like Toxins from *Vibrio parahaemolyticus* Isolates That Cause Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) in Shrimp. **PLOS ONE**. Vol. 10(5). DOI:10.1371/journal.pone. 0126987
- [7] Xiao, J., Liu, L., Ke, Y., Li, X., Liu, Y., Pan, Y., Yan, S., and Wang, Y. (2017). Shrimp AHPND-Causing Plasmids Encoding the PirAB Toxins as Mediated by PirAB-Tn903 are Prevalent in Various *Vibrio* species. **Scientific Reports**. Vol. 7, Article number: 42177. DOI: 10.1038/srep42177
- [8] Boonyawiwat, V., Patanasatienkul, T., Kasornchandra, J., Poolkhet, C., Yaemkasem, S., Hammell, L., and Davidson, J. (2017). Impact of Farm Management on Expression of Early Mortality Syndrome/Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (EMS/AHPND) on Penaeid Shrimp Farms in Thailand. **Journal of Fish Diseases**. Vol. 40, Issue 5, pp. 649-659. DOI: 10.1111/jfd.12545
- [9] Chumpol, S., Kantachote, D., Nitoda, T. and Kanzaki, H. (2017). The Roles of Probiotic Purple Nonsulfur Bacteria to Control Water Quality and Prevent Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) for Enhancement Growth with Higher Survival in White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during Cultivation. **Aquaculture**. Vol. 473, pp. 327-336. DOI: 10.1016/j.aquaculture. 2017.02.033
- [10] Chen, W. -Y., Ng, T. H., Wu, J. -H., Chen, J. -W., and Wang, H. -C. (2017). Microbiome Dynamics in a Shrimp Grow-Out Pond with Possible Outbreak of Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease. **Scientific Reports**. Vol. 7, No. 1, Article number: 9395. DOI: 10.1038/s41598-017-09923-6
- [11] Tinwongger, S., Proespraiwong, P., Thawonsuan, J., Sriwanayos, P., Kongkumnerd, J., Chaweepack, T., Mavichak, R., Unajak, S., Nozaki, R., Kondo, H., and Hirono, I. (2014). Development of PCR Diagnosis for Shrimp Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND) Strain of *Vibrio parahaemolyticus*. **Fish Pathology**. Vol. 49, Issue 4, pp. 159-164. DOI: 10.3147/jsfp.49.159
- [12] Thakur, D. P. and Lin, C. K. (2003). Water Quality and Nutrient Budget in Close Shrimp (*Penaeus monodon*) Culture Systems. **Aquaculture Research**. Vol. 27, No. 3, pp. 159-176
- [13] Akazawa, N. and Eguchi, M. (2017). Pond Sludge and Increased pH Cause Early Mortality Syndrome/Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (EMS/AHPND) in Cultured White Shrimp. **Borneo Journal of Marine Science and Aquaculture**. Vol. 1, pp. 92-96

- [14] Lafferty, K. D. (2009). The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases. **Ecology**. Vol. 90, Issue 4, pp. 888-900. DOI: 10.1890/08-0079.1
- [15] Guerreiro, I., Pérez-Jiménez, A., Costas, B., and Oliva-Teles, A. (2014). Effect of Temperature and Short Chain Fructooligosaccharides Supplementation on the Hepatic Oxidative Status and Immune Response of Turbot (*Scophthalmus maximus*). **Fish & Shellfish Immunology**. Vol. 40, Issue 2, pp. 570-576. DOI: 10.1016/j.fsi.2014.08.017
- [16] Yu, H. B., Kaur, R., Lim, S. M., Wang, X. H., and Leung, K. Y. (2007). Characterization of Extracellular Proteins Produced by *Aeromonas hydrophila* AH-1. **Proteomics**. Vol. 7, No. 3, pp. 436-449. DOI: 10.1002/pmic.200600396
- [17] Yoon, K. S., Min, K. J., Jung, Y. J., Kwon, K. Y., Lee, J. K., and Oh, S. W. (2008). A Model of the Effect of Temperature on the Growth of Pathogenic and Nonpathogenic *Vibrio parahaemolyticus* Isolated from Oysters in Korea. **Food Microbiology**. Vol. 25, Issue 5, pp. 635-641. DOI: 10.1016/j.fm.2008.04.007
- [18] Chase, E. and Harwood, V. J. (2011). Comparison of the Effects of Environmental Parameters on Growth Rates of *Vibrio vulnificus* Biotypes I, II, and III by Culture and Quantitative PCR Analysis. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 77, No. 12, pp. 4200-4207. DOI: 10.1128/AEM.00135-11
- [19] Kim, Y. W., Lee, S. H., Hwang, I. G., and Yoon, K. S. (2012). Effect of Temperature on Growth of *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus* in Flounder, Salmon Sashimi and Oyster Meat. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. Vol. 9, No. 12, pp. 4662-4675. DOI: 10.3390/ijerph9124662
- [20] Mudoh, M. F., Parveen, S., Schwarz, J., Rippen, T., and Chaudhuri, A. (2014). The Effects of Storage Temperature on the Growth of *Vibrio parahaemolyticus* and Organoleptic Properties in Oysters. **Frontiers in Public Health**. Vol. 2, DOI: 10.3389/fpubh.2014.00045
- [21] Tarr, C. L., Patel, J. S., Pühr, N. D., Sowers, E. G., Bopp, C. A., and Strockbine, N. A. (2007). Identification of *Vibrio* Isolates by a Multiplex PCR Assay and rpoB Sequence Determination. **Journal of Clinical Microbiology**. Vol. 45, No. 1, pp. 134-140. DOI: 10.1128/JCM.01544-06
- [22] Bradford, M. M. (1979). A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Proteins Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. **Analytical Biochemistry**. Vol. 72, Issue 1-2, pp. 248-254
- [23] Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of Structural Proteins during Assembly of Head of Bacteriophage T4. **Nature**. Vol. 227, pp. 680-685

- [24] Lee, C. -T., Chen, I. -T., Yang, Y. -T., Ko, T. -P., Huang, Y. -T., Huang, J. -Y., Huang, M. -F., Lin, S. -J., Chen, C. -Y., Lin, S. -S., Lightner, D. V., Wang, H. -C., Wang, A. H., Wang, H. -C., Hor, L. -I., and Lo, C. -F. (2015). The Opportunistic Marine Pathogen *Vibrio parahaemolyticus* Becomes Virulent by Acquiring a Plasmid that Expresses a Deadly Toxin. In **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. Vol. 112, No. 34, pp. 10798-10803. DOI: 10.1073/pnas.1503129112
- [25] Maier, R. M. (2000). Bacterial Growth. In **Environmental Microbiology**. Maier, R.M., Pepper, I.L. and Gebra C.P., eds. pp. 43-59. Academic Press
- [26] Zwietering, I., De Wit, J. C., Cuppers, H. G. A. M., and Van 't Riet, K. (1994). Modeling of Bacterial Growth with Shifts in Temperature. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 60, No. 1, pp. 204-213
- [27] Van Derlinden, E., Bernaerts, K., and Van Impe, J. F. (2008). Dynamics of *Escherichia coli* at Elevated Temperatures: Effect of Temperature History and Medium. **Journal of Applied Microbiology**. Vol. 104, No. 2, pp. 438-453. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2007.03592.x
- [28] Zotta, T., Guidone, A., Ianniello, R. G., Parente, E., and Ricciardi, A. (2013). Temperature and Respiration Affect the Growth and Stress Resistance of *Lactobacillus plantarum* C17. **Journal of Applied Microbiology**. Vol. 115, No. 3, pp. 848-858. DOI: 10.1111/jam.12285
- [29] Soberón, M., Pardo, L., Muñoz-Garay, C., Sánchez, J., Gómez, I., Porta, H., and Bravo, A. (2010). Pore Formation by Cry Toxins. **Advances in Experimental Medicine and Biology**. Vol. 677, pp. 127-142



ระบบเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุ

Getting Lost Monitoring System for the Elderly Patients

จักรกริช โบบทอง¹ อีฟชั่น ทมานระเด็น¹ จินดา คงเจริญ^{1*} ศิวิภา พฤตมณี¹ และสุพัตรา พุฒินาวรัตน์¹

Received: February, 2018; Accepted: May, 2018

บทคัดย่อ

แนวโน้มของประชากรผู้สูงอายุเพิ่มขึ้น การเข้าสู่วัยสูงอายุย่อมเกิดปัญหาการเจ็บป่วยทั้งโรคทางกายและทางสมอง เช่น โรคอัลไซเมอร์ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออาการหลงทิศทางและอาจเกิดปัญหาสูญหายของผู้สูงวัยได้จากปัญหาดังกล่าวนี้อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ป่วยสูงอายุ บทความนี้จึงได้พัฒนาแอปพลิเคชันการเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุบนโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์สำหรับผู้ดูแล โดยใช้ Geo-fence ในการกำหนดขอบเขตพื้นที่ในการเฝ้าระวัง ผู้ดูแลสามารถติดตามพิกัดตำแหน่งที่อยู่ปัจจุบันของผู้ป่วยจากอุปกรณ์ GPS ในแอปพลิเคชันและทำงานร่วมกับฐานข้อมูล Firebase ในการบันทึกข้อมูลผู้ป่วยและพิกัดปัจจุบัน โดยระบบจะแจ้งเตือนผ่านโทรศัพท์มือถือให้ผู้ดูแลได้ทันทีที่กรณีผู้ป่วยออกนอกเขตกำหนดซึ่งผลการทดสอบระบบในสถานการณ์จำลองพบว่า เมื่อผู้ป่วยออกจากขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวัง ระบบสามารถส่งข้อความสั้นและเสียงแจ้งเตือนตามที่ผู้ดูแลกำหนดได้ภายใน 5 วินาที ประโยชน์ของระบบดังกล่าวช่วยอำนวยความสะดวกในการเฝ้าดูแลผู้ป่วยในเครือญาติ ตลอดจนลดภาระค่าใช้จ่ายพยาบาลเฝ้าดูแลผู้ป่วยที่บ้านหรือส่งผู้ป่วยไปยังสถานพยาบาล อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันการสูญหายในคนและสัตว์เลี้ยงได้

คำสำคัญ : ระบบเฝ้าระวัง; แอปพลิเคชัน; ผู้ป่วยสูงอายุ

¹ Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus

* Corresponding Author E - mail Address: jinda.suv@psu.ac.th

Abstract

Nowadays aging population groups were increasing rapidly. There could be many problems that the elderly people might face such as illness, physical and mental diseases. One of the major problems was Alzheimer's disease that was misplacing things, having problem with loss of memory and wandering. Those significantly impacted quality of life for caregivers. This research developed the monitoring system for the elderly patients. The development was implemented for smartphones using Android Operating System for caregivers. Geo-fence was used to locate the areas stored in the server and monitor the patient's entry and exit of the fence with GPS technology which identified the current location of the patients in real-time and stored the location in a Firebase database. Moreover, this system will send an alert via smartphones to the caregivers when the patients were outside the virtual fence. The test results in this situation showed that if the patient's entering or exiting the fence, the system can send the short messages and sound to the caregivers within 5 minutes. The advantages of this application were self-care service and reducing the burden on healthcare cost such as employing nurses to take care of the patients at home or sending the patients to healthcare. This system can be applied to other fields related to the monitoring of people and animals.

Keywords: Monitoring System; Application; Elderly Patients

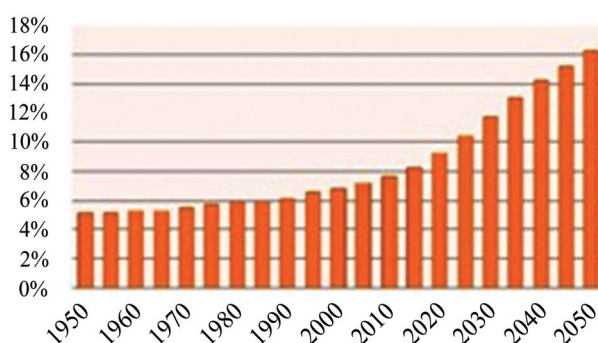
บทนำ

ในยุคปัจจุบันประชากรมีแนวโน้มอายุยืนยาวนำไปสู่สังคมผู้สูงอายุมากขึ้นเมื่อเทียบกับอดีต เช่น เพิ่มจากร้อยละ 7.6 ในปี ค.ศ. 2010 เป็นร้อยละ 9.0 ในปี ค.ศ. 2020 ดังรูปที่ 1 และคาดว่าจะเพิ่มเกือบสองเท่าประมาณ 16.2 % ในปี ค.ศ. 2050 [1] การเปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าสู่ผู้สูงอายุย่อมส่งผลให้เกิดปัญหาทั้งโรคทางกายและทางสมอง เช่น โรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's Disease) เป็นภาวะสมองเสื่อม (Dementia) ที่พบบ่อยในผู้สูงอายุมากกว่า 65 ปี เป็นภาวะความผิดปกติของสมองที่เสื่อมถอยลงจากเดิมในเรื่องความสามารถทางความคิดและการแสดงออก [2] ลักษณะอาการเด่นของโรคนี้คือความจำเสื่อมหรือหลงลืมในเรื่องที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน เช่น ลืมกินข้าว ลืมซื้อคน จนกระทั่งลืมบ้านที่อยู่อาศัย เป็นต้น โรคนี้จัดเป็นโรคที่รักษาไม่หายและจัดเป็นอาการป่วยระยะสุดท้าย ซึ่งอาจก่อให้เกิดการได้รับความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายและการสูญหายในผู้ป่วยของครอบครัว

ปัจจุบันระบบเทคโนโลยีสารสนเทศมีความก้าวหน้าและทันสมัย การนำระบบเทคโนโลยีสารสนเทศมาเพื่อสนับสนุนคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยสูงอายุ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาให้ผู้ป่วยสามารถทำกิจวัตรประจำวันได้อย่างปกติ รวมทั้งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้ดูแลผู้ป่วยโดยการนำนวัตกรรมการดูแลสุขภาพผ่านโทรศัพท์มือถือและระบบเครือข่ายไร้สายมาใช้เฝ้าระวังผู้ป่วย อย่างเช่น Rajesh, K. M. et al. [3] พัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนในกรณีที่เกิดภาวะฉุกเฉิน โดยมีเซ็นเซอร์ที่เชื่อมต่อกับผู้ป่วยสูงอายุใน

การรับข้อมูลสัญญาณชีพ เช่น อัตราการเต้นหัวใจ อุณหภูมิของร่างกาย คลื่นไฟฟ้าหัวใจ เป็นต้น และมีการประมวลผลและส่งค่าให้กับผู้ใช้สมาร์ตโฟน โดยการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังสมาร์ตโฟนของผู้ดูแล เป็น SMS MMS หรือโทรเพื่อให้ผู้ดูแลสามารถเข้ามาดูแลผู้สูงอายุในทันที Cristian, R. et al. [4] ออกแบบและพัฒนาระบบการตรวจเฝ้าระวังในผู้ป่วยสูงอายุและผู้ป่วยโรคเรื้อรังอย่างโรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการดูแลสุขภาพผ่านระบบทางไกลโดยใช้การจัดการด้านการเตือนภัย และระบบการตรวจสอบติดตามผู้ได้รับการดูแล โดยสัญญาณจะถูกส่งมาที่ศูนย์กลางของระบบทันทีเมื่อมีเหตุฉุกเฉินหรือความผิดปกติเกิดขึ้นภายในบ้าน [5] Surasak, W. et al. [6] ได้พัฒนาระบบสนับสนุนการจัดการพฤติกรรมการเดินทางของผู้สูงอายุโดยใช้เทคนิคการประมวลผลข้อมูลสารสนเทศร่วมกับเทคโนโลยีจีพีเอสในการระบุตำแหน่ง โดยระบบดังกล่าวได้พัฒนามาเป็นเว็บไซต์ Responsive ซึ่งฟังก์ชันการระบุตำแหน่งผ่านเว็บอาจจะไม่แม่นยำเท่ากับใน Mobile Application เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงข้อมูลพิกัดปัจจุบันในเว็บไม่สามารถตรวจสอบพิกัดได้ตลอดเวลาตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ ดังนั้นผู้ใช้จึงมีความจำเป็นต้องคลิกปุ่มอัปเดตพิกัดใหม่ทุกครั้งที่ต้องการทราบพิกัดล่าสุด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความล่าช้าในการแสดงผลของตำแหน่ง ณ ปัจจุบัน นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการติดตามพฤติกรรมของผู้ป่วยเป็นรายบุคคล หากมีผู้ป่วยจำนวนมาก การเฝ้าระวังกลุ่มผู้ป่วยดังกล่าวค่อนข้างลำบาก ซึ่งการจัดการผู้ป่วยตามโรงพยาบาลหรือสถานพยาบาลมักพบเป็นกลุ่มผู้ป่วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนโดยนำพิกัดจากสัญญาณ GPS มาใช้ในการระบุตำแหน่งปัจจุบันได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว ตลอดจนผู้ดูแลสามารถติดตามเฝ้าระวังกลุ่มของผู้ป่วยที่มีมากกว่าหนึ่งคนขึ้นไป

Percentage of elderly people in the world



รูปที่ 1 เปอร์เซนต์ของประชากรผู้สูงอายุในช่วงปี ค.ศ. 1950 - 2050 [1]

Geo-fence เป็นการกำหนดขอบเขตพื้นที่หรือสร้างรั้วอาณาเขตที่ต้องการในรูปแบบวงกลม รูปหลายเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม และมีการประยุกต์ใช้งาน Geo-fence ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการบริหารการจัดการ ใช้ติดตามพิกัดตำแหน่งยานพาหนะในสถานที่ที่กำหนด ด้านการจัดการทรัพยากรมนุษย์ เช่น หากพนักงานพยายามที่จะเข้าไปในเขตที่ห้ามเข้า บัตรประจำตัวพนักงานจะทำการแจ้งเตือนเพื่อความปลอดภัย และด้านการโฆษณา เช่น เมื่อลูกค้าเข้ามาในพื้นที่ที่กำหนด จะมีการแจ้งเตือนเกี่ยวกับโปรโมชั่นต่าง ๆ เป็นต้น การใช้ Geo-fence มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มศักยภาพความสัมพันธ์ทางธุรกิจและง่ายต่อการติดตามยานพาหนะบนถนน จนนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการรักษความปลอดภัยในสถานการณ์ต่าง ๆ ส่วนข้อเสียคือ จะต้องได้รับการยินยอมจากผู้ใช้งาน การใช้งานจีพีเอสส่งผลให้พลังงานของแบตเตอรี่หมดเร็วและมีข้อจำกัดอยู่ในเขตที่กำหนด [7]

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยี Geo-fence มากำหนดขอบเขตพื้นที่ที่เฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุ และมีการส่งสัญญาณแจ้งเตือนผู้ดูแลผู้ป่วยในกรณีที่ผู้ป่วยออกนอกเขตที่กำหนด ซึ่งอาจนำไปใช้เพื่อป้องกันความเสี่ยงในกรณีที่เกิดการพลัดหลงของผู้สูงอายุที่ป่วยด้วยโรคอัลไซเมอร์ เป็นต้น ประโยชน์ของระบบดังกล่าวช่วยอำนวยความสะดวกในการดูแลและพึ่งตนเองของผู้สูงอายุ ตลอดจนผู้ดูแลผู้ป่วยก็สามารถช่วยเหลือผู้สูงอายุได้ทันทั่วทั้งที่ ลดภาระค่าใช้จ่ายในการจ้างพยาบาลมาดูแลผู้ป่วยที่บ้าน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

Google Map API เป็น API ที่ช่วยให้สามารถวางข้อมูลลงบนแผนที่ของ Google ที่กำหนดไว้สามารถสร้างเว็บและแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่น่าสนใจด้วยแพลตฟอร์มการทำแผนที่ที่มีประสิทธิภาพของ Google รวมทั้งดึงภาพจากดาวเทียม ภาพ Street View โปรไฟล์ระดับความสูง เส้นทางการขับขี่ ข้อมูลประชากรในรูปแบบแผนที่ การวิเคราะห์ และฐานข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ในวงกว้างและแม่นยำ

Firebase เป็นบริการ Backend และแพลตฟอร์มครบวงจรสำหรับนักพัฒนาแอป และโปรแกรมประยุกต์บนเว็บแพลตฟอร์มที่มีเครื่องมือและโครงสร้างพื้นฐานที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักพัฒนาสามารถผสมผสานและสร้างแอปพลิเคชันที่มีคุณภาพสูงตรงตามความต้องการ

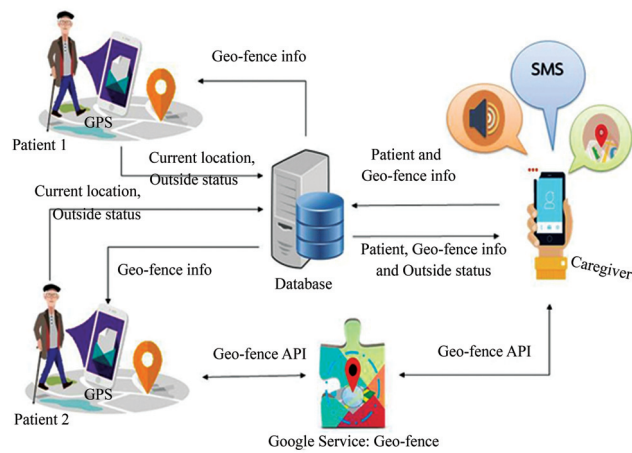
Geocoding คือ กระบวนการเปลี่ยนที่อยู่ในรูปแบบข้อความเป็นพิกัดทางภูมิศาสตร์แล้วสามารถใช้ตำแหน่งนั้นบนแผนที่ผ่านการร้องขอ HTTP การใช้ข้อมูลภายใน Geocoding ใช้เวลาและทรัพยากรสูง ซึ่งต้องมีที่อยู่ก่อนที่จะทำการแปลง Geocode และเก็บผลลัพธ์ไว้ในแคชของเครื่องเพื่อที่จะได้นำข้อมูลนั้นไปใช้ประโยชน์รูปแบบของ JavaScript Object Notation (JSON) และ XML

2. แนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบ

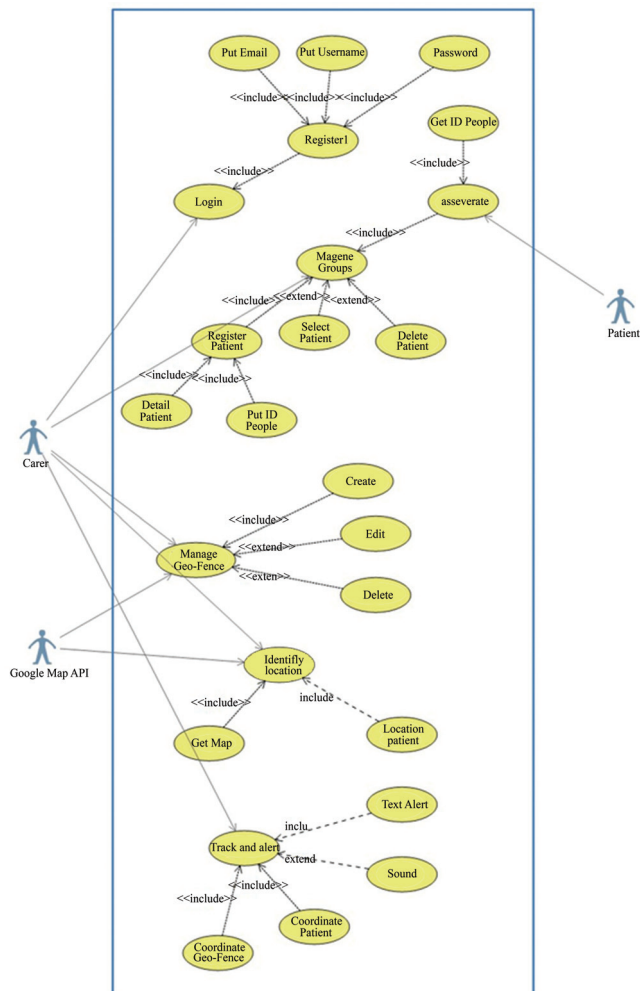
ภาพรวมของระบบ ผู้ดูแลผู้ป่วยสามารถสร้างและกำหนดขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวังบันทึกไว้ใน Server และอุปกรณ์ทดสอบระบบ Android ของผู้ป่วยที่ติดตั้งแอปพลิเคชันนี้จะทำการส่งพิกัดตำแหน่งไปบันทึกใน Server จากนั้นระบบตรวจสอบพิกัดตำแหน่งของอุปกรณ์ผู้ป่วยว่าอยู่ในหรือนอกพิกัดของขอบเขตพื้นที่ที่กำหนดไว้ หากพิกัดของอุปกรณ์ผู้ป่วยอยู่นอกขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด ระบบจะแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันบนมือถืออย่างอัตโนมัติไปยังเครื่องของผู้ดูแลผู้ป่วยในรูปแบบของข้อความสั้นและเสียง ซึ่งการเฝ้าระวังผู้ป่วยมีประสิทธิภาพมากเมื่ออยู่ภายนอกอาคารโดยระบุตำแหน่งของเป้าหมายด้วย GPS (Global Positioning System) โดยผู้ดูแล 1 คน สามารถดูแลผู้ป่วยได้มากกว่า 1 คน แสดงดังรูปที่ 2

การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

ระบบเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุมีผู้ใช้งาน 2 กลุ่ม คือ ผู้ดูแลผู้ป่วย และผู้ป่วย โดยฟังก์ชันการทำงานของผู้ดูแลสามารถสมัครสมาชิกและเข้าสู่ระบบ จัดการกลุ่มของผู้ป่วย กำหนดขอบเขตพื้นที่ และตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันของผู้ป่วย ส่วนผู้ป่วยสามารถลงทะเบียนเพื่อเชื่อมต่อกับเครื่องผู้ดูแล และระบบแสดงพิกัดปัจจุบันของผู้ป่วยไปยังเครื่องของผู้ดูแล ซึ่งแผนภาพการทำงานของผู้ใช้งานระบบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบ

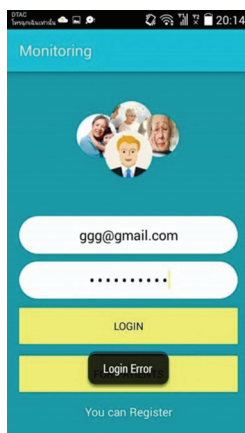


รูปที่ 3 Use Cases Diagram ของระบบ

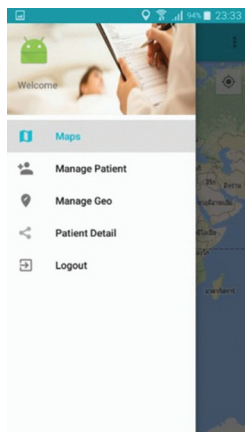
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. แอปพลิเคชันในส่วนของผู้ดูแลผู้ป่วย

การสมัครสมาชิกและเข้าสู่ระบบของผู้ดูแลผู้ป่วย ผู้ดูแลสามารถสร้างบัญชีใหม่โดยกรอกข้อมูล Username Email และ Password ซึ่งระบบจะตรวจสอบความซ้ำซ้อนกันของ Email ที่ใช้ หากไม่พบระบบจะให้ผู้ดูแลทำการสมัครสมาชิกได้ ผู้ดูแลสามารถเข้าสู่ระบบโดยใช้ Email และ Password ที่สร้างไว้ จากนั้นระบบนำข้อมูลไปตรวจสอบ หากข้อมูลที่กรอกไม่ถูกต้องระบบจะแสดง Error ให้ผู้ดูแลได้แก้ไข (รูปที่ 4) เมื่อเข้าสู่ระบบ เมนูหลักแสดงดังรูปที่ 5

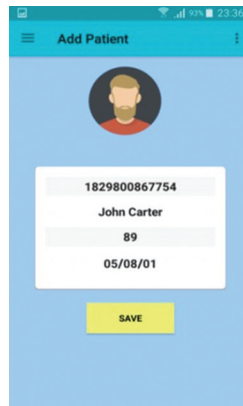


รูปที่ 4 การเข้าสู่ระบบผิดพลาด

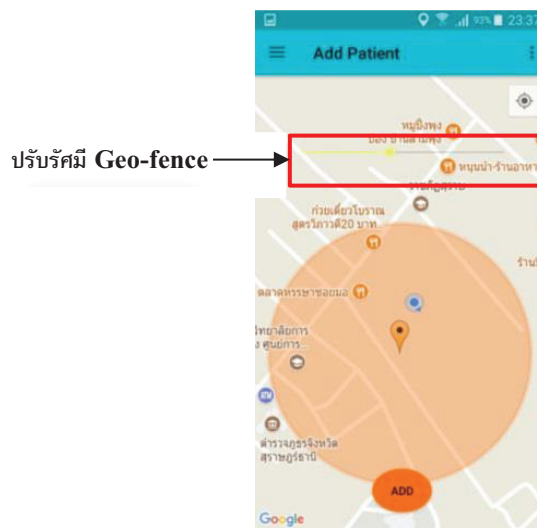


รูปที่ 5 เมนูหลักของระบบ

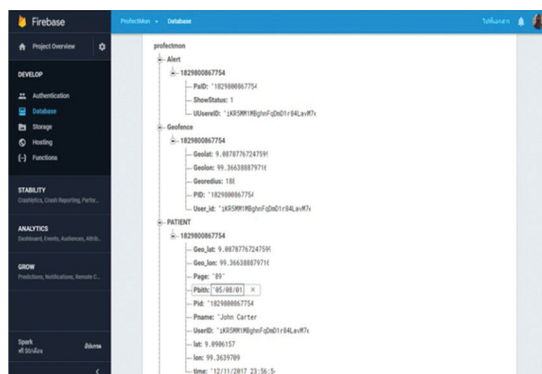
การจัดการกลุ่มของผู้ป่วย ระบบให้ผู้ดูแลสามารถลงทะเบียนผู้ป่วย โดยใช้เลขบัตรประจำตัวประชาชนเป็นคีย์หลัก (Primary Key) ตลอดจนผู้ดูแลสามารถจัดการ (เพิ่ม ลบ หรือแก้ไข) ข้อมูลส่วนตัวของกลุ่มผู้ป่วย (รูปที่ 6) โดยผู้ดูแล 1 คน สามารถจัดการผู้ป่วยได้มากกว่า 1 คนขึ้นไป



รูปที่ 6 การจัดการกลุ่มผู้ป่วย



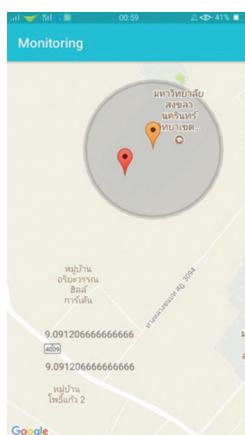
รูปที่ 7 การสร้าง Geo-fence



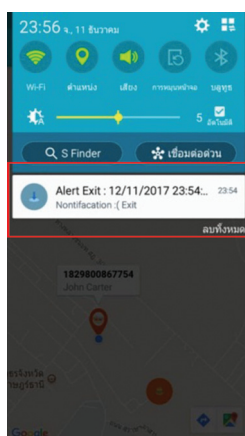
รูปที่ 8 การจัดเก็บข้อมูล

การกำหนดขอบเขตพื้นที่ ผู้ดูแลสามารถเลือกตำแหน่งในแผนที่เพื่อที่จะสร้าง Geo-fence โดยระบบเรียกใช้ Google Map API รับพิกัดตำแหน่งที่จะกำหนดจุดศูนย์กลางในการสร้างขอบเขตพื้นที่ และเรียกใช้การกำหนดขอบเขตพื้นที่แบบวงกลม ตลอดจนผู้ดูแลสามารถปรับศูนย์กลางในการสร้าง Geo-fence ไว้เป็นขอบเขตในการเฝ้าระวังการสูญหายของผู้ป่วย (รูปที่ 7) และนำเข้าค่าพิกัด ค่ารัศมีของ ขอบเขตพื้นที่ส่งไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล (รูปที่ 8)

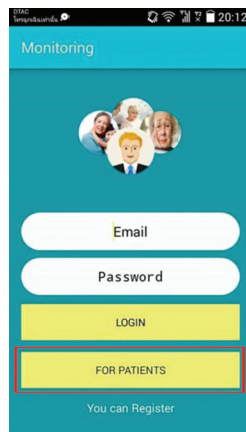
การตรวจสอบตำแหน่งของผู้ป่วย และแจ้งเตือนเมื่อผู้ป่วยออกนอกพื้นที่ที่กำหนด ระบบสามารถ ตรวจสอบพิกัดของผู้ป่วยกับพิกัดขอบเขตพื้นที่ที่กำหนดไว้ (รูปที่ 9) โดยใช้บริการ Google Map API เพื่อทำการแสดง Map ในระบบ พร้อมทั้งโหลดข้อมูลขอบเขตพื้นที่และพิกัดตำแหน่งทั้งหมดในฐานข้อมูล ตลอดจนแสดงข้อมูลบน Map ของผู้ดูแล และตรวจสอบพิกัดของผู้ป่วยเข้าหรือออกนอกขอบเขตพื้นที่ รูปที่ 10 แสดงการแจ้งเตือนด้วยข้อความที่ส่งไปยังผู้ดูแลในกรณีที่ผู้ป่วยออกนอกขอบเขตพื้นที่



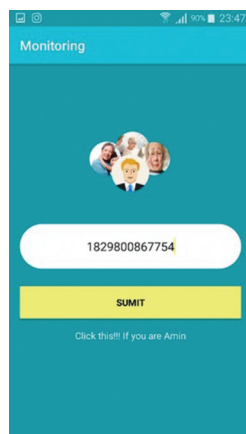
รูปที่ 9 ตรวจสอบพิกัดผู้ป่วยกับขอบเขต



รูปที่ 10 การแจ้งเตือน



รูปที่ 11 การเข้าใช้งานระบบของผู้ป่วย



รูปที่ 12 การลงทะเบียนเพื่อเชื่อมต่อกับเครื่องผู้ดูแล



รูปที่ 13 ตำแหน่งของผู้ป่วยคลาดเคลื่อนเมื่ออยู่ในที่อัศจรรย์

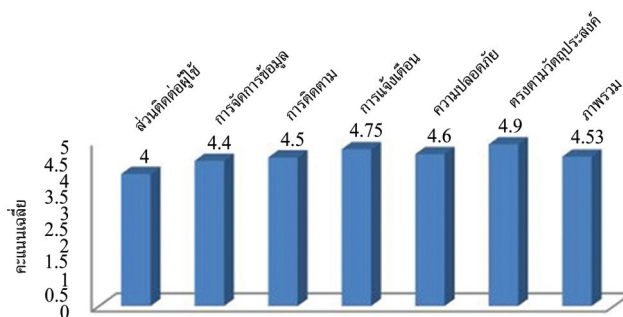
2. การพัฒนาในส่วนของผู้ป่วย

การเข้าใช้งานระบบในเครื่องของผู้ป่วยหน้าหลักแสดงดังรูปที่ 11 โดยผู้ดูแลสามารถกรอกเลขประจำตัวประชาชนของผู้ป่วยที่ตรงกับที่ลงทะเบียนไว้ (รูปที่ 12) เพื่อให้ข้อมูลเชื่อมต่อกับเครื่องผู้ดูแล จากนั้นระบบแสดงพิกัดปัจจุบันของผู้ป่วยไปให้กับเครื่องของผู้ดูแล

3. ผลการทดสอบระบบ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยในสถานการณ์จำลอง เมื่อกำหนดขอบเขตระยะทาง 3 เมตร ในบริเวณพื้นที่โล่ง จำนวน 10 ครั้ง พบว่าเวลาที่ใช้ในการแจ้งเตือนเฉลี่ย 5 วินาทีเมื่อออกนอกเขต ซึ่งระบบแสดงผลการเคลื่อนที่ของผู้ป่วยในหน้าจอของผู้ดูแลได้แบบเรียลไทม์ โดยมีอัตราการส่งและรับข้อมูล 1 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล ในที่นี้ นอกจากพิกัดละติจูด (Latitude) และลองจิจูด (Longitude) แล้วความเสถียรของอินเทอร์เน็ตก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทั้งในส่วนของการแจ้งเตือนและติดตามแบบเรียล - ไทม์ ผลการทดสอบระบบในอาคารที่อาศัยสัญญาณอินเทอร์เน็ตและสัญญาณ GPS พบว่าการแสดงตำแหน่งของผู้ป่วยในแอปพลิเคชันนั้น จะคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งปัจจุบัน (รูปที่ 13) การที่ระบบไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากมีวัตถุมกีดกันการส่งสัญญาณระหว่างตัวอุปกรณ์กับดาวเทียม ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการระบุตำแหน่งที่ตั้ง โดยระบบนี้มีข้อจำกัดเรื่องอินเทอร์เน็ตในการส่งข้อมูลของจุดพิกัดของผู้ป่วยและการส่งแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแล หากมีสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่ไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้การค้นหาลักษณะของผู้ป่วยและการแจ้งเตือนเกิดความล่าช้าทำให้ผู้ดูแลนั้นไม่สามารถรู้ได้ในทันที นอกเหนือจากนี้แอปพลิเคชันจำเป็นต้องเปิดใช้งานตลอดเวลาเพื่อทราบจุดพิกัดของผู้ป่วย โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตระยะทางที่ใกล้เคียงเมื่อผู้ป่วยเดินออกนอกเขตรั้วที่กำหนด ผู้ดูแลจะทราบจากการแจ้งเตือน การเข้าถึงผู้ป่วยอยู่ไม่ไกล การช่วยเหลือสามารถทำได้อย่างทันท่วงที ซึ่งเป็นการป้องกันก่อนสูญหาย หากกำหนดขอบเขตระยะทางไกลกว่าที่ผู้ดูแลจะทราบผู้ป่วยอาจเดินหลงทางไปที่ต่างไกล การช่วยเหลือไม่ทันการณ์ อาจเผชิญกับผู้ป่วยสูญหายต่อไปได้

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ คือ บุคคลทั่วไป และนักศึกษา จำนวน 20 คน โดยสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงคนที่บ้านมีผู้สูงอายุในการดูแลเป็นตัวแทนของผู้ดูแลในประเด็นต่าง ๆ 6 ประเด็น ดังนี้ 1) ความเหมาะสมของการใช้งานส่วนติดต่อผู้ใช้ 2) ความสามารถในการตอบสนองของแอปพลิเคชันในส่วนการจัดการข้อมูล 3) ความสามารถ ในส่วนการติดตาม 4) ความสามารถ ในส่วนการแจ้งเตือน 5) ความปลอดภัยของข้อมูลในผู้ใช้งานแอปพลิเคชัน 6) การใช้งานแอปพลิเคชันตรงตามวัตถุประสงค์ เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถาม มีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) ตามวิธีของลิเคิร์ท (Likert) และการแปลผลคะแนนเฉลี่ย 5 ระดับ [8] มีดังนี้ 4.51 - 5.00 พึงพอใจระดับมากที่สุด 3.51 - 4.50 พึงพอใจระดับมาก 2.51 - 3.50 พึงพอใจระดับปานกลาง 1.51 - 2.50 พึงพอใจระดับน้อย และ 1.00 - 1.50 พึงพอใจระดับน้อยที่สุด



รูปที่ 14 ผลการประเมินของผู้ใช้งานระบบ

จากรูปที่ 14 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.53) โดยการใช้งานแอปพลิเคชันตรงตามวัตถุประสงค์ ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุดเป็นลำดับแรก (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.90) รองลงมาคือ การตอบสนองของแอปพลิเคชันในส่วนการแจ้งเตือนให้กับผู้ดูแล (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.75) และประเด็นที่ผู้ใช้งานพึงพอใจเป็นลำดับสุดท้าย คือ ความเหมาะสมของการใช้งานส่วนติดต่อผู้ใช้

บทสรุป

ระบบเฝ้าระวังการสูญหายในผู้ป่วยสูงอายุมีความสามารถในการตรวจสอบพิกัดของผู้ป่วยกับขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด และมีการแจ้งเตือนให้กับผู้ดูแลในกรณีที่ผู้ป่วยได้ออกนอกเขตได้จริง ผลการทดสอบพบว่า ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแจ้งเตือนไม่ล่าช้า ระบบที่พัฒนาขึ้นมาได้นำเทคโนโลยี Geo-fence มาประยุกต์ใช้ในการกำหนดขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวัง ซึ่ง Geo-fence ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับความเคลื่อนไหวของผู้ใช้งานข้อมูลจากความเสี่ยงภัยพิบัติต่าง ๆ เช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม พายุ เป็นต้น โดยผู้ใช้งานสร้างรั้วเสมือนทางภูมิศาสตร์ในการกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดภัยพิบัติเก็บไว้ในเซิร์ฟเวอร์พร้อมทั้งตรวจสอบการเข้าออกจากขอบเขตของผู้ใช้ [9] ตลอดจนระบบดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันการสูญหายในสัตว์เลี้ยง รถยนต์และจักรยานยนต์ เป็นต้น ข้อเสนอแนะในงานวิจัยครั้งต่อไปคืออุปกรณ์ที่ใช้ของผู้ป่วยสำหรับงานวิจัยนี้อาจมีขนาดใหญ่ พกพายาก ในอนาคตควรพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก พกพาง่าย และไม่เป็นสิ่งที่น่ารำคาญ อย่างเช่น กำไลข้อมือ ตลอดจนควรนำระบบดังกล่าวไปทดสอบใช้จริงกับผู้ป่วยสูงอายุในโรงพยาบาลหรือตามบ้าน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยนี้

References

- [1] Saisakul, C., Anthony, S. A., Atkins, and Hongnian, Y. (2010). Perception of Smart Home Technologies to Assist Elderly People. In **Proceedings of the 4th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA 2010)**. Paro, Bhutan, pp. 90-97
- [2] Tancharoenrat, A. (2010). Alzheimer Disease. **Journal of Education Naresuan University**. Vol. 12, No. 2, pp. 169-182
- [3] Rajesh, K. M., Goutham, P., Vivek, J., Galla, M., and Athul, A. T. (2014). Smartphone Based Continuous Monitoring System for Home-bound Elders and Patients. In **2014 International Conference on Communication and Signal Processing**. pp. 1173-1177. DOI: 10.1109/ICCSP.2014.6950039
- [4] Cristian, R., Hariton, C., Gladiola, A., Razvan-Alin, C., and Felix, A. (2011). An Integrated System for Wireless Monitoring of Chronic Patients and Elderly People. In **15th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**. pp. 1-4
- [5] Rodríguez, M. J., Maria, T. A., Francisco, G., Gómez, E. J., Andrés, M., and Dopico, A. (1995). A Home Telecare Management System. **Journal of Telemedicine and Telecare**. Vol. 1, Issue 2, pp. 86-94. DOI: 10.1177/1357633X9500100204
- [6] Surasak, W., Korawat, T., and Watsawee, S. (2015). I'm Wandering: A Prototype Wandering Management System Using Geo-Stream Technique. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. Vol. 8, No. 2, pp. 112-121
- [7] Reclus, F. and Drouard, K. (2009). Geofencing for Fleet & Freight Management. In **2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST)**. pp. 353-356. DOI: 10.1109/ITST.2009.-5399328
- [8] Boonchom Srisa Ard. (2013). **Statistical Methods for Research**. 5th edition. Bangkok: Suweeriyasan.
- [9] Akira, S. and Ushio, I. (2016). **Using Geofencing for a Disaster Information System**. Graduate School of Engineering Tokyo Denki University Tokyo, Japan.



การกำจัดความขุ่นและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดิน
ของระบบการผลิตน้ำประปาเทศบาลตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี

Removal of Turbidity and Dissolved Organic Carbon in Surface Water of Water Treatment Plant of Tansum Municipality, Ubon Ratchathani

อมรรัตน์ วงษ์กลม^{1*}

Received: February, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลและน้ำประปาของระบบการผลิตน้ำประปาเทศบาลตาสุม อำเภอตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี เก็บตัวอย่าง 2 ช่วง คือ ช่วงฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์ 2559) และช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือนมิถุนายน กรกฎาคม และ ตุลาคม 2559) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน ความแรงไอออนและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผิวดิน จากการศึกษาพบว่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ ยกเว้นน้ำผิวดินที่เก็บในช่วงฤดูน้ำหลากจะมีความขุ่นสูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดินโดยอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนใช้สารสร้างตะกอน 4 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์รัสซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ทดสอบโดยใช้เครื่องจาร์เทสด้วยการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที พบว่าการใช้ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนและระดับ pH ที่เหมาะสมจะสามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ สารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดินได้

¹ Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

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

ในขณะที่ความแรงไอออนของน้ำจะมีผลต่อการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดิน ในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาวเพียงเล็กน้อย การเติม FeCl_3 20 mg/L FeSO_4 10 mg/L Alum 20 mg/L และ PACl 20 mg/L ในน้ำผิวดินและควบคุม pH เท่ากับ 7 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงถึงร้อยละ 93.72 50.27 93.92 และ 96.36 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายสูงถึงร้อยละ 79.54 61.95 79.02 และ 79.32 ตามลำดับ โดยความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายของน้ำผิวดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค

คำสำคัญ : ความขุ่น; สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย; น้ำผิวดิน

Abstract

The objective of this research was to study physical and chemical qualities of surface water from Moon river, and tap water from Water Treatment Plant of Tansum Municipality, Ubon Ratchathani. Samples were collected in two periods including in the dry season (February 2016) and rainy season (June, July, and October 2016). The effects of coagulants types and concentrations, pH and ionic strength on removal of turbidity and dissolved organic carbon content in surface water were studied. It was found that surface water from Moon river, and tap water from Water Treatment Plant were in the range of water quality except surface water collected in the rainy season. The effects on removal of turbidity and dissolved organic carbon content in surface water by chemical precipitation process were studied. The coagulants used in these experiments were ferric chloride, ferrous sulfate, aluminium sulphate and polyaluminium chloride. The jar test was used with 100 rpm rapid mixing for 10 minutes, follow by slow mixing 30 rpm for 20 minutes and setting for 60 minutes. It was found that the use of optimized type and concentration of coagulants and pH levels were affected on removal of turbidity and dissolved organic carbon content in surface water while the ionic strength was affected in the condition without a little amount of lime. The addition of FeCl_3 20 mg/L, FeSO_4 10 mg/L, Alum 20 mg/L and PACl 20 mg/L at pH 7 could be high efficiency removal of turbidity and total organic carbon content in surface water. The percentages of removal of turbidity were 93.72, 50.27, 93.92 and 96.36, respectively. The percentages of removal of dissolved organic carbon were 79.54, 61.95, 79.02 and 79.32, respectively. Turbidity and dissolved organic carbon were in the quality of tap water by Provincial Waterworks Authority.

Keywords: Turbidity; Dissolved Organic Carbon; Surface Water

บทนำ

ประปาเทศบาลตาสุม อำเภอตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี มีระบบการผลิตน้ำประปาที่ใช้น้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน แต่การใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินมักพบปัญหาต่าง ๆ เช่น การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ และความขุ่นในน้ำอาจมาจากสภาพพื้นที่หรือสภาพของฤดูกาลที่ส่งผลทำให้ดัชนีคุณภาพของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ความขุ่นของน้ำหรือการเจือจางขององค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนสภาพขององค์ประกอบของน้ำอาจส่งผลต่อปริมาณการใช้สารเคมีสำหรับผลิตน้ำประปา เช่น การเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการสร้างและการรวมตะกอน การใช้สารที่เป็นกรดและเบสสำหรับปรับสภาพของค่าความเป็นกรด - ด่าง การใช้สารคลอรีนเพื่อใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค [1] - [2] การเติมปริมาณสารเคมีมากเกินไปหรือน้อยไปอาจส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อผลิตน้ำประปาและประสิทธิภาพการผลิตน้ำประปา นอกจากนี้การใช้สารเคมีบางชนิดอาจทำให้มีปริมาณของตะกอนมากขึ้นและยากต่อการกำจัดตะกอนหรืออาจใช้พื้นที่ในการบำบัดเพิ่มขึ้น

สำหรับกระบวนการสร้างและการรวมตะกอน น้ำดิบที่สูบน้ำมาแล้วจะนำมาผสมกับสารเคมี เช่น สารสร้างตะกอน (สารส้ม) และปูนขาวเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารส้มจะช่วยให้มีการรวมตะกอน ส่วนสารละลายปูนขาวจะช่วยปรับความเป็นด่างรวมทั้งยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ การศึกษาประสิทธิภาพของการรวมตะกอนกับปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการรวมตะกอน การเติมสารเคมีช่วยสร้างตะกอนและกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการรวมตะกอนอาจส่งผลให้สารอินทรีย์ที่เกิดปฏิกิริยากับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคได้ แล้วทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ขึ้น ซึ่งสารที่เกิดขึ้นเป็นสารก่อมะเร็งที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ [2] - [3] ปัจจุบันที่มีผลต่อกระบวนการเกิดสารกลุ่ม THMs ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ปริมาณคลอรีน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำกับคลอรีน ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำ อุณหภูมิของน้ำและปริมาณความเข้มข้นของโบรมีนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดสารประกอบกลุ่ม THMs [4] การป้องกันการเกิดสารกลุ่ม THMs สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเปลี่ยนแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณน้อย การเลือกสารเคมีในการฆ่าเชื้อโรคชนิดอื่น เช่น การใช้โอโซนหรือแสงอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีน แต่อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนก็ยังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือไวรัสในน้ำได้และง่ายต่อการควบคุมดูแลระบบประปา ดังนั้นการจัดการที่ต้นเหตุคือ การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำจึงง่ายกว่าการเปลี่ยนแปลงระบบสารเคมี การกำจัดสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยการสร้างและการรวมตะกอน [5] - [6] การเกิดออกซิเดชันทางเคมี และการกรองโดยผ่านเยื่อบาง [7] การกรองโดยผ่านเยื่อบางเป็นวิธีที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการบำบัดน้ำในขั้นต้น ก่อนนำมาผ่านแผ่นเยื่อบางเพื่อยืดอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อบางและเป็นการลดต้นทุนในการผลิตน้ำสะอาด การกำจัดหรือการลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารประกอบของโลหะหรือเกลือของโลหะที่ละลายน้ำแล้วได้ประจุบวก เมื่อรวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำที่แตกตัวให้ประจุลบเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งเป็นของแข็งแยกตัวออกจากน้ำ [8] - [10] ก่อนที่จะทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนต่อไป ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวกต่อการจัดการและค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ โครงการวิจัยจึงมุ่งศึกษาคุณภาพน้ำ

ทางกายภาพและทางเคมี [11] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved Organic Carbon, DOC) ในน้ำผิวดินด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้วิธี Jar test [12] ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน ความแรงไอออนและระดับความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำผิวดิน [13] - [15] เพื่อใช้ในการดำเนินระบบการผลิตน้ำประปาของประปาเทศบาลตาสุม อำเภอตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. เก็บตัวอย่างน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา และน้ำประปาของการประปาเทศบาลตาสุม อำเภอตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี 2 ช่วง คือ ช่วงฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์ 2559) และช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือนมิถุนายน กรกฎาคม และเดือนตุลาคม 2559) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการ

เก็บตัวอย่างน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลโดยใช้แรงดันจากปั๊มสูบน้ำในเดือนกรกฎาคม 2559 (รูปที่ 1) เก็บใส่ถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร จำนวน 10 ถัง เพื่อทดสอบการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยเก็บรักษาตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิ 4 °C ดำเนินการทำการ Jar test ภายใน 24 วัน สำหรับวิเคราะห์ความขุ่น และภายใน 7 วัน สำหรับการวิเคราะห์สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย ดำเนินการทดลองสภาวะละ 5 ซ้ำ



รูปที่ 1 ท่อสูบน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลเข้าสู่ระบบการผลิตน้ำประปา

2. วิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพ ได้แก่ ความขุ่น และวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด - ด่าง ค่าความเป็นด่าง ค่าความเป็นกรด ความกระด้างทั้งหมด คลอไรด์ ซัลเฟต ไนเตรต ฟอสเฟต เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และตะกั่ว [11] ของน้ำผิวดินและน้ำประปา โดยดำเนินการทดลอง 5 น้ำ

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (DOC) ในน้ำผิวดินโดยอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยใช้เครื่อง Jar test

3.1 ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนที่ใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Alum} ; \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$) เพอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) เพอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และพอลิอะลูมิเนียม

คลอไรด์ (PACl, Polyaluminium chloride 18 % Al_2O_3) เข้มข้น 10 20 40 60 80 และ 100 mg/L [16] - [17] โดยใช้การกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที [12]

3.2 ความแรงไอออน โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.01 0.02 0.04 0.06 0.08 และ 0.1 mol/L เพื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ให้ผลการตกตะกอนได้ดีที่สุด

3.3 ความเป็นกรด - ด่าง โดยปรับสภาพน้ำผิวดินให้มี pH 4 7 และ 10 [17] เพื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ให้ผลการตกตะกอนได้ดีที่สุด

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผิวดินและน้ำประปา

จากตารางที่ 1 และ 2 เป็นผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูลที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาและน้ำประปาของการประปาเทศบาลตำบล อำเภอตำบล จัหวัดอุบลราชธานี ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน และคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค พบว่าค่าความเป็นกรด ค่าความเป็นด่าง ปริมาณคลอไรด์ ปริมาณซัลเฟต ปริมาณไนเตรท ปริมาณฟอสเฟต ค่าความกระด้างทั้งหมด มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2 (แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทั้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการอุปโภคและบริโภคโดยไม่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน การอนุรักษ์สัตว์น้ำ การประมง การว่ายน้ำ และกีฬาทางน้ำ) และมาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาคส่วนค่าความเป็นกรด - ด่าง ความขุ่น และโลหะหนัก จะมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินและมาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาคในช่วงฤดูน้ำหลาก ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงฤดูน้ำหลากจะเกิดการพัดพาเอาตะกอนท้องน้ำและสารอินทรีย์มาจำนวนมาก จึงทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และความขุ่นในน้ำ และส่งผลต่อค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่หรือสภาพของฤดูกาลจะส่งผลทำให้ดัชนีคุณภาพของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ และส่งผลต่อปริมาณการใช้สารเคมีเพื่อการผลิตน้ำประปา

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผิวดินที่ใช้ผลิตน้ำประปาของประปาเทศบาลตำบล อำเภอตำบล จัหวัดอุบลราชธานี

ปัจจัยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ ในแหล่งน้ำผิวดิน	ปริมาณที่ตรวจวัดได้			
		กุมภาพันธ์	มิถุนายน	กรกฎาคม	ตุลาคม
ค่าความเป็นกรด (mg/L)	ไม่ระบุ	9.88	12.41	5.13	8.00
ค่าความเป็นด่าง (mg/l as CaCO_3)	ไม่ระบุ	42.05	46.65	28.08	32.13
คลอไรด์ (mg/L)	ไม่ระบุ	1.73	2.18	1.16	16.73
ซัลเฟต (mg/L)	ไม่ระบุ	0.658	0.324	2.965	4.177

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำผิวดินที่ใช้ผลิตน้ำประปาของประปาเทศบาล
ตาสุม อำเภอตาสุม จังหวัดอุบลราชธานี (ต่อ)

ปัจจัยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ ในแหล่งน้ำผิวดิน	ปริมาณที่ตรวจวัดได้			
		กุมภาพันธ์	มิถุนายน	กรกฎาคม	ตุลาคม
ไนเตรท (mg/L)	ไม่เกิน 5.0 mg/L	0.287	0.330	0.432	0.309
ฟอสเฟต (mg/L)	ไม่ระบุ	0.018	0.021	0.008	0.036
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as CaCO ₃)	ไม่ระบุ	58.33	44.86	27.02	31.95
ค่าความเป็นกรด - ด่าง	5 - 9	6.620	6.450	6.550	6.670
ความขุ่น (NTU)	ไม่เกิน 5 NTU	1.66	0.62	4.56	14.80
เหล็ก (Fe, mg/L)	ไม่ระบุ	0.213	0.470	0.808	0.834
แมงกานีส (Mn, mg/L)	ไม่เกิน 1.00 mg/L	0.033	0.210	n.d.	n.d.
สังกะสี (Zn, mg/L)	ไม่เกิน 1.00 mg/L	0.203	0.117	1.762	1.173
ตะกั่ว (Pb, mg/L)	ไม่เกิน 0.05 mg/L	0.038	0.050	0.067	0.017

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีของน้ำประปาของประปาเทศบาลตาสุม อำเภอตาสุม
จังหวัดอุบลราชธานี

ปัจจัยบ่งชี้คุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ ประปา	ปริมาณที่ตรวจวัดได้			
		กุมภาพันธ์	มิถุนายน	กรกฎาคม	ตุลาคม
ค่าความเป็นกรด (mg/L)	ไม่ระบุ	3.850	3.940	8.930	3.720
ค่าความเป็นด่าง (mg/l as CaCO ₃)	ไม่ระบุ	20.43	21.24	10.15	18.87
คลอไรด์ (mg/L)	ไม่เกิน 250 mg/L	1.67	2.58	1.42	17.78
ซัลเฟต (mg/L)	ไม่เกิน 250 mg/L	4.66	5.66	4.54	5.71
ไนเตรท (mg/L)	ไม่เกิน 50 mg/L	0.170	0.241	0.176	0.075
ฟอสเฟต (mg/L)	ไม่ระบุ	0.0056	0.0081	0.0029	0.0340
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as CaCO ₃)	ไม่เกิน 300 mg/L	58.74	82.69	41.62	54.37
ค่าความเป็นกรด - ด่าง	6.5 - 8.5	6.150	5.170	5.450	6.580
ความขุ่น (NTU)	ไม่เกิน 4 NTU	0.89	0.86	0.62	0.76
เหล็ก (Fe, mg/L)	ไม่เกิน 0.30 mg/L	0.185	0.067	0.283	0.886
แมงกานีส (Mn, mg/L)	ไม่เกิน 0.30 mg/L	0.028	0.230	0.023	n.d.
สังกะสี (Zn, mg/L)	ไม่เกิน 3.0 mg/L	0.127	0.327	0.093	0.075
ตะกั่ว (Pb, mg/L)	ไม่เกิน 0.01 mg/L	0.038	0.033	0.094	0.034

หมายเหตุ: มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011

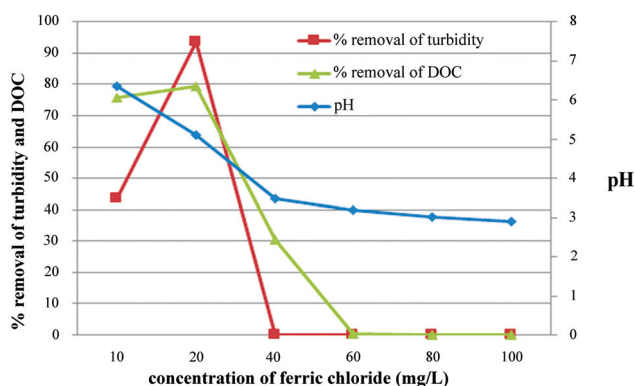
2. ผลของชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC

จากการนำน้ำผิวดินมาทดสอบกรณีไม่เติมปูนขาวร่วมกับการเติม FeCl_3 พบว่า เมื่อเติม FeCl_3 ลงไปในน้ำผิวดิน (ความขุ่น 14.80 NTU, ค่า DOC 26.88 mg/L) ที่ระดับความเข้มข้น 10 - 100 mg/L จะทำให้ค่า pH ของน้ำผิวดิน (pH 6.67) มีค่า pH ต่ำลงถึง 2.90 ซึ่งการเติม FeCl_3 20 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 93.72 (0.93 NTU) และประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 79.54 (5.50 mg/L) ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ FeCl_3 เป็น 40 - 100 mg/L จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและประสิทธิภาพการกำจัด DOC ลดลง (ความขุ่น 14.2 - 16.5 NTU, DOC 18.72 - 37.79 mg/L) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ซึ่งที่ระดับความเข้มข้น 40 - 100 mg/L จะเป็นระดับความเข้มข้นที่มากเกินไปของการกำจัดความขุ่นและ DOC ตัวอย่างน้ำผิวดินจะมีสีน้ำตาลอมส้มของ FeCl_3 และได้ตะกอนสีน้ำตาลแดง จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ FeCl_3 20 mg/L เพื่อทำการทดสอบต่อไป

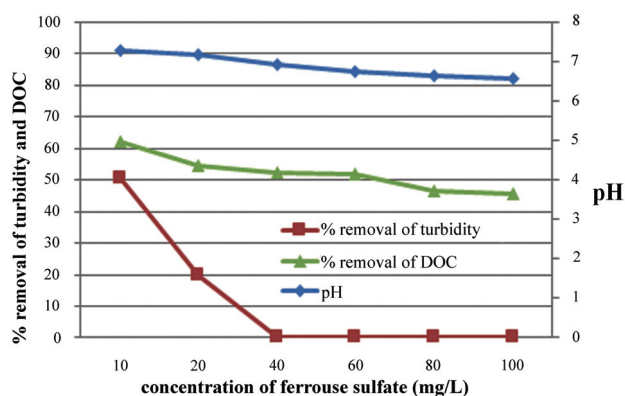
การเติม FeSO_4 10 - 100 mg/L ลงในน้ำผิวดินในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาวจะทำให้ค่า pH ของน้ำผิวดิน (pH 6.67) มีค่า pH ต่ำลงถึง 6.55 ซึ่งการเติม FeSO_4 10 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 50.27 (7.36 NTU) และมีประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 61.95 (10.23 mg/L) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ FeSO_4 20 - 100 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ลดลง (ความขุ่น 11.9 - 29.5 NTU, DOC 12.20 - 14.61 mg/L) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นของ FeSO_4 เป็น 20 - 100 mg/L เป็นระดับความเข้มข้นมากเกินไปของการกำจัดความขุ่นและ DOC จะทำให้ตัวอย่างน้ำมีสีน้ำตาลอมส้มของ FeSO_4 จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ FeSO_4 10 mg/L เพื่อทำการทดสอบต่อไป

การเติม $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ (Alum) 10 - 100 mg/L ลงในน้ำผิวดินในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาวจะทำให้ค่า pH ของน้ำผิวดิน (pH 6.67) มีค่า pH ต่ำลงถึง 4.25 ซึ่งการเติม Alum 20 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 93.92 (0.90 NTU) และมีประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 79.02 (5.64 mg/L) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Alum 40 - 100 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลงเพียงเล็กน้อย (ความขุ่น 2.8 - 3.58 NTU, DOC 5.71 - 5.82 mg/L) คือ ร้อยละ 75.81 - 81.09 และ 78.35 - 78.76 ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ Alum 20 mg/L เพื่อทำการทดสอบต่อไป

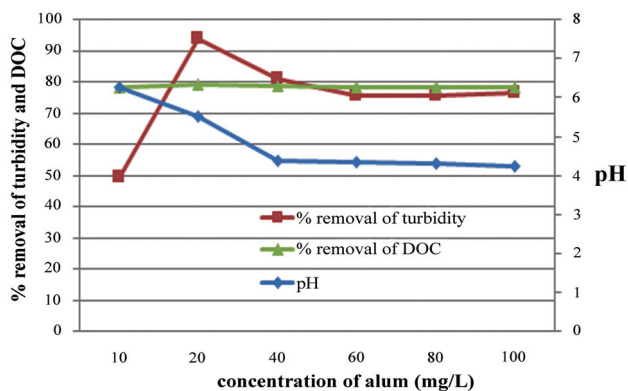
การเติม PACl 10 - 100 mg/L ลงในน้ำผิวดินในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาวจะทำให้ค่า pH ของน้ำผิวดิน (pH 6.67) มีค่า pH ต่ำลงที่ pH 5.13 ซึ่งการเติม PACl 10 - 40 mg/L จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 78.72 - 96.36 (ความขุ่น 0.548 - 3.15 NTU) และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายร้อยละ 73.70 - 79.32 (DOC 5.56 - 7.07 mg/L) และที่ระดับความเข้มข้น 20 mg/L จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC สูงที่สุด คือ ร้อยละ 96.36 (0.548 NTU) และร้อยละ 79.32 (5.56 mg/L) ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl 60 - 100 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ลดลงเพียงเล็กน้อยร้อยละ 64.40 - 70.21 (4.41 - 5.27 NTU) และร้อยละ 58.37 - 72.47 ดังแสดงในรูปที่ 2 (ง) จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ PACl 20 mg/L เพื่อทำการทดสอบต่อไป



(ก) FeCl_3

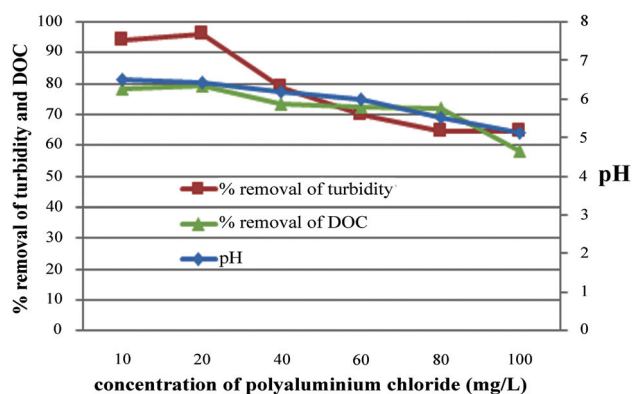


(ข) FeSO_4



(ค) Alum

รูปที่ 2 ผลของชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ในน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูล

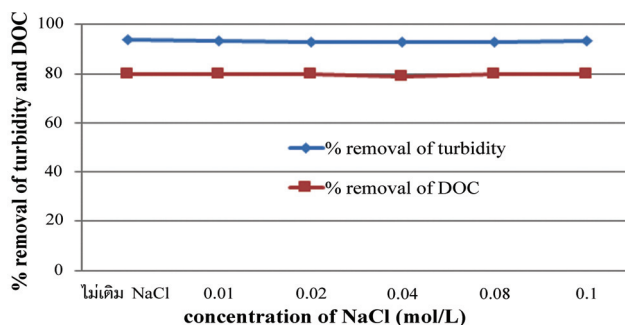


(ง) PACl

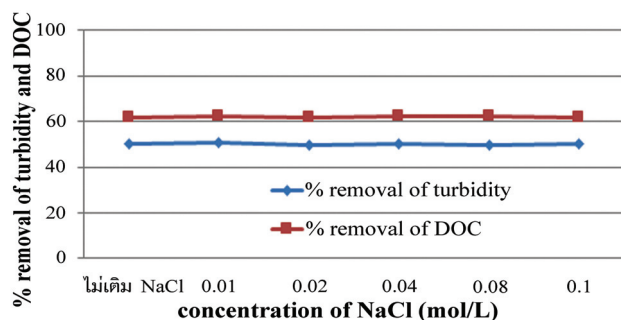
รูปที่ 2 ผลของชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ในน้ำผิวดินจากแม่น้ำมูล (ต่อ)

3. ผลของความแรงไอออนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC

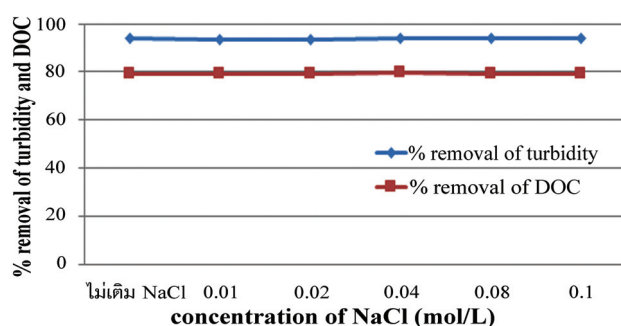
การศึกษาค้างนี้จะปรับให้น้ำผิวดินมีความแรงไอออนด้วยสารละลาย NaCl 0.01 - 0.1 mol/L เพื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุดและสามารถลดความขุ่นและปริมาณ DOC ในน้ำผิวดินได้สูงที่สุด จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า การเติม FeCl_3 20 mg/L (รูปที่ 3 ก) FeSO_4 10 mg/L (รูปที่ 3 ข) Alum 20 mg/L (รูปที่ 3 ค) และ PACl 20 mg/L (รูปที่ 3 ง) ในน้ำผิวดินที่ปรับให้มีความแรงประจุด้วยสารละลาย NaCl 0.01 - 0.1 mol/L จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ในน้ำผิวดินที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในสถานะที่ไม่มีการเติมปูนขาว เพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 92.64 - 93.72, 49.67 - 50.68, 93.38 - 94.19 และ 96.09 - 96.36 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 79.02 - 79.91, 61.57 - 62.54, 78.95 - 79.62 และ 79.06 - 79.84 ตามลำดับ โดยที่ความขุ่นของน้ำผิวดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค กำหนดให้ค่าความขุ่นของน้ำไม่เกิน 4 NTU ยกเว้น การเติม FeSO_4 10 mg/L ให้ความขุ่นมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค

(ก) FeCl_3 20 mg/L

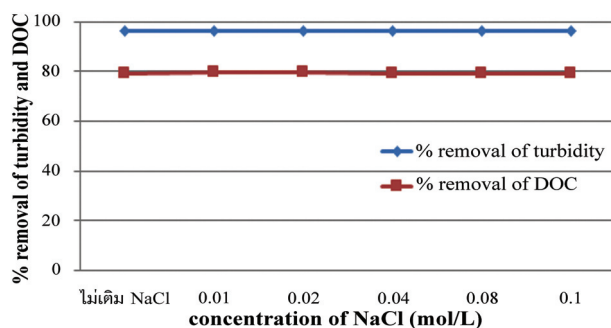
รูปที่ 3 ผลของความแรงไอออนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC เมื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุด



(ข) FeSO_4 10 mg/L



(ค) Alum 20 mg/L



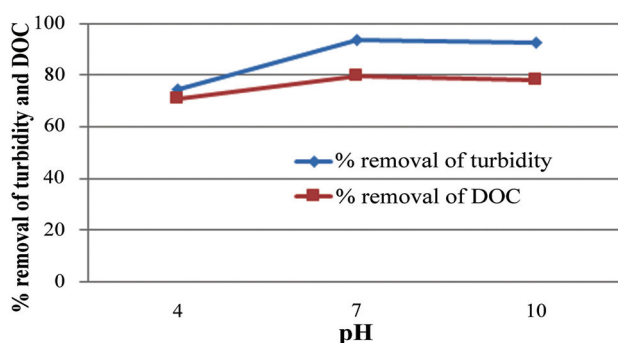
(ง) PACl 20 mg/L

รูปที่ 3 ผลของความแรงไอออนต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC เมื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุด (ต่อ)

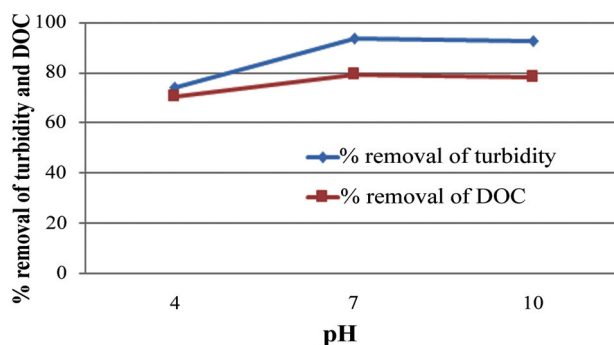
4. ผลของความเป็นกรด - ด่างต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC

การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด - ด่างต่อการลดค่าความขุ่นและปริมาณ DOC โดยปรับสภาพน้ำผิวดินให้มี pH 4 7 และ 10 เพื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุด จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า การเติม FeCl_3 20 mg/L (ก) FeSO_4 10 mg/L (ข) Alum 20 mg/L (ค) และ PACl 20 mg/L (ง) ในน้ำผิวดินที่ปรับ pH 7 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ในน้ำผิวดินที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาว

ได้สูงที่สุด ในขณะที่เมื่อควบคุม pH ของน้ำผิวดินที่ pH 4 และ 10 จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ลดลงโดยการใช้ FeCl_3 20 mg/L FeSO_4 10 mg/L Alum 20 mg/L และ PACl 20 mg/L จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงถึงร้อยละ 93.72, 50.27, 93.92 และ 96.36 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัด DOC สูงถึงร้อยละ 79.54, 61.95, 79.02 และ 79.32 ตามลำดับ โดยที่ความขุ่นของน้ำผิวดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค กำหนดให้ค่าความขุ่นของน้ำไม่เกิน 4 NTU ยกเว้น การเติม FeSO_4 10 mg/L ทำให้ความขุ่นมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค

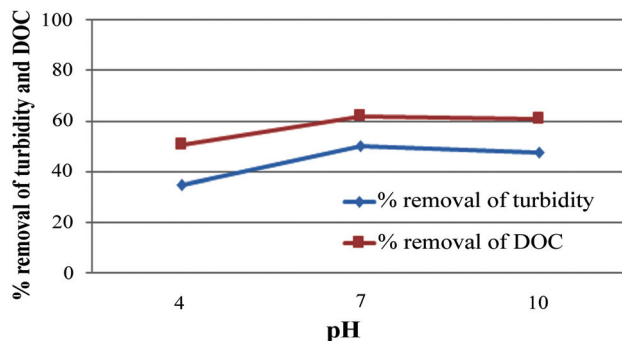


(ก) FeCl_3 20 mg/L

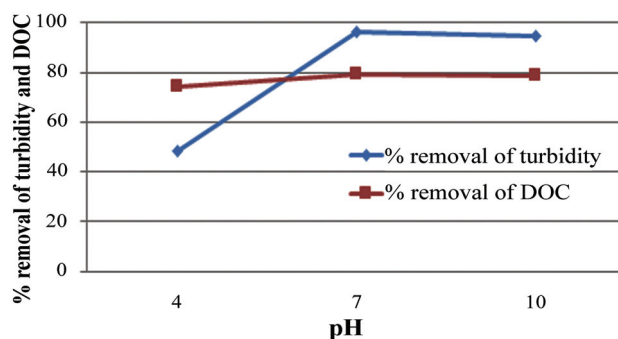


(ข) FeSO_4 10 mg/L

รูปที่ 4 ผลของความเป็นกรด - ด่างต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC เมื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุด



(ค) Alum 20 mg/L



(ง) PACl 20 mg/L

รูปที่ 4 ผลของความเป็นกรด - ด่างต่อการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC เมื่อทดสอบกับสารสร้างตะกอนที่ระดับความเข้มข้นที่ให้ผลการตกตะกอนดีที่สุด (ต่อ)

การอภิปรายผล

จากการนำน้ำผิวดินมาทดสอบกรณีไม่เติมปูนขาวโดยมีการเติม FeCl_3 20 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 93.72 ซึ่งทำให้ค่าความขุ่นของน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค (ต้องไม่เกิน 4 NTU) และประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 79.54 ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ FeCl_3 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและประสิทธิภาพการกำจัด DOC ลดลง โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ FeCl_3 มากเกินไป (40 mg/L) จะทำให้ตัวอย่างน้ำในระบบบำบัดมีสีน้ำตาลแดงของ FeCl_3 และเกิดตะกอนสีน้ำตาลจมตัวอยู่ใต้ท้องน้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizzo, L. et al. [9] ได้ทำการศึกษาผลของ FeCl_3 ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ FeCl_3 ระหว่าง 10 - 60 mg/L จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง

การเติม FeSO_4 10 - 100 mg/L ลงในน้ำผิวดินในสถานะที่ไม่มีการเติมปูนขาวจะทำให้ค่า pH ของน้ำผิวดิน (pH 6.67) มีค่า pH ต่ำลงถึง 6.55 ซึ่งการเติม FeSO_4 10 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยสามารถลดความขุ่นได้ 7.36 NTU ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ

ของการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งกำหนดให้ค่าความขุ่นของน้ำไม่เกิน 4 NTU และมีปริมาณ DOC 10.23 mg/L ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ FeSO_4 เป็น 20 - 100 mg/L จะทำให้ความขุ่น (11.9 - 29.5 NTU) และปริมาณ DOC เพิ่มขึ้น (DOC 9.370 - 12.20 mg/L) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นของ FeSO_4 เป็น 20 - 100 mg/L เป็นระดับความเข้มข้นมากเกินไปของการกำจัดความขุ่นและ DOC จะทำให้ตัวอย่างน้ำมีสีน้ำตาลอมส้มของ FeSO_4 จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ FeSO_4 10 mg/L เพื่อทำการทดสอบต่อไป

จากการนำน้ำผิวดินมาทดสอบกรณีไม่เติมปูนขาวโดยมีการเติม Alum 20 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 93.92 และมีประสิทธิภาพการกำจัด DOC ร้อยละ 79.02 สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Qin, J. et al. [8] ได้ทำการศึกษากระบวนการ Coagulation เพื่อบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) ในน้ำของประเทศสิงคโปร์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Alum ในการทำ Jar test ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Alum เป็น 40 - 100 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ลดลงเพียงเล็กน้อย โดยความขุ่นและปริมาณ DOC มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค (ต้องไม่เกิน 4 NTU) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gregor, J. E. et.al. [13] พบว่า ความขุ่นมีค่าลดลงและเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Alum เนื่องจากในการเติม Alum ในช่วงแรกเป็นกลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) คือ เมื่อถึงจุดที่สารสร้างตะกอน (Coagulant) เพียงพอในการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์แล้วการเติม Coagulant เพิ่มขึ้นอีกจะไม่ทำให้ความขุ่นของน้ำเปลี่ยนแปลง

จากการนำน้ำผิวดินมาทดสอบกรณีไม่เติมปูนขาวโดยมีการเติม PACl 20 mg/L จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC สูงที่สุด คือ ร้อยละ 96.36 และ 79.32 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl 60 - 100 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ลดลง คือ ร้อยละ 64.60 - 78.72 และ 58.37 - 73.70 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความขุ่นและ DOC ระหว่าง 4.41 - 5.27 NTU และ 7.40 - 11.19 mg/L ตามลำดับ โดยความขุ่นที่ได้มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคที่ระบุไว้ว่าความขุ่นต้องไม่เกิน 4 NTU ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhonglian, Y. et al. [14] ได้ทำการศึกษาการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์โดยกระบวนการ Coagulation ด้วย PACl และ Alum กรณีศึกษาแม่น้ำเหลือง ประเทศจีนพบว่า ทั้ง PACl และ Alum มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ในรูป DOC

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารสร้างตะกอนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ FeCl_3 , FeSO_4 , Alum และ PACl พบว่า ช่วงความขุ่นของน้ำดิบระหว่าง 10 - 20 NTU สารสร้างตะกอนทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและ DOC ร้อยละ 50.27 - 96.36 และ 61.95 - 79.54 ตามลำดับ ซึ่งการใช้ Alum และ PACl จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ได้ดีที่สุดและใกล้เคียงกัน แต่การใช้ Alum จะมีต้นทุนการบำบัดต่ำกว่าการใช้ PACl ที่ระดับความเข้มข้น 20 mg/L ส่วน FeCl_3 จะไม่ค่อยนิยมใช้เนื่องจากเมื่อใช้ระดับความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้สีน้ำที่ได้จากการบำบัดมีสีน้ำตาลแดงทำให้คุณภาพน้ำทางกายภาพของน้ำประปาไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yupaporn, A. et al. [17] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายในน้ำผิวดินโดยใช้สารสร้างตะกอน

3 ชนิด ได้แก่ FeCl_3 , Alum และ PACl ที่ช่วงความเข้มข้น 10 - 90 mg/L พบว่า สารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC 49.87 - 95.93 % และ 53.41 - 71.59 % ตามลำดับ โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาที่อาศัยสารสร้างตะกอนจะสามารถลดค่าความขุ่นและ DOC ได้สูงกว่ากระบวนการผลิตน้ำประปาแบบเดิมขององค์การบริหารส่วนตำบลลำโรง จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งไม่มีการเติมปูนขาวช่วยเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำผิวดินในระบบการผลิตน้ำประปา

ในน้ำผิวดินที่ปรับให้มีความแรงประจุด้วยสารละลาย NaCl 0.01 - 0.1 mol/L จะไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC ที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาว โดยการเติม FeCl_3 20 mg/L จะทำให้ความขุ่นและ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1.012 - 1.091 NTU และ 5.40 - 5.64 mg/L การเติม FeSO_4 10 mg/L จะทำให้ความขุ่นและ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 7.30 - 7.45 NTU และ 10.07 - 10.33 mg/L การเติม Al_2SO_4 20 mg/L จะทำให้ความขุ่นและ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.88 - 0.98 NTU และ 5.48 - 5.66 mg/L และการเติม PACl 20 mg/L จะทำให้ความขุ่นและ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.56 - 0.59 NTU และ 5.42 - 5.63 mg/L โดยที่ความขุ่นของน้ำผิวดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค กำหนดให้ค่าความขุ่นของน้ำไม่เกิน 4 NTU ยกเว้นการเติม FeSO_4 10 mg/L ทำให้ความขุ่นมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค

การเติม FeCl_3 20 mg/L (ความขุ่น 0.93 NTU, DOC 5.5 mg/L) Alum 20 mg/L (ความขุ่น 0.90 NTU, DOC 5.64 mg/L) และ PACl 20 mg/L (ความขุ่น 0.55 NTU, DOC 5.56 mg/L) ในน้ำผิวดินที่ปรับ pH 7 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและปริมาณ DOC โดยที่ความขุ่นของน้ำผิวดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค กำหนดให้ค่าความขุ่นของน้ำไม่เกิน 4 NTU ยกเว้นการเติม FeSO_4 10 mg/L ทำให้ความขุ่นมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค คือ มีค่าความขุ่น 7.36 NTU และ DOC 10.23 mg/L ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yupaporn, A. et al. [17] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำผิวดินโดยควบคุม pH เริ่มต้นของน้ำผิวดินที่ pH 4 7 และ 10 พบว่า กระบวนการตกตะกอนด้วยสารสร้างตะกอนชนิด FeCl_3 , Alum และ PACl ควรมีค่า pH เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย เนื่องจาก pH จะเป็นตัวกำหนดการแตกตัวเป็นไอออนของสารสร้างตะกอนในน้ำที่ pH เป็นกลางหรือกรดอ่อน สารสร้างตะกอนมักจะแตกตัวให้ไอออนประจุบวกมาก ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์สูงและน้ำไม่ควรมี pH สูงหรือเป็นด่าง เพราะจะได้ไอออนที่มีประจุลบมากเกินไป ซึ่งไม่มีผลในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (มีประจุเหมือนอนุภาคคอลลอยด์) นอกจากนี้ pH ที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 4 ชนิด ยังใกล้เคียงกับค่า pH เฉลี่ยของน้ำผิวดิน ซึ่งจะเป็นผลดีในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการปรับ pH ของน้ำผิวดิน และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายโดยอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในระบบการผลิตน้ำประปา

สรุป

การใช้ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนและระดับ pH ที่เหมาะสมจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ DOC ในน้ำผิวดิน ในขณะที่ความแรงไอออนของน้ำจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ

DOC ที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในสภาวะที่ไม่มีการเติมปูนขาวเพียงเล็กน้อย โดยการเติม FeCl_3 20 mg/L FeSO_4 10 mg/L Alum 20 mg/L และ PACl 20 mg/L ที่ระดับ pH 7 จะทำให้มีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นและ DOC ได้สูงที่สุด คือ ร้อยละ 93.72 และ 79.54 (FeCl_3 20 mg/L) ร้อยละ 50.27 และ 61.95 (FeSO_4 10 mg/L) ร้อยละ 93.92 และ 79.02 (Alum 20 mg/L) 96.36 และ 79.32 (PACl 20 mg/L) ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559

References

- [1] Tokmak, B., Capar, G., Dilek, R. B., and Yetis, U. (2003). Trihalomethanes and Associated Potential Cancer Risks in the Water Supply in Ankara, Turkey. **Environmental Research**. Vol. 96, Issue 3, pp. 345-352. DOI: 10.1016/j.envres.2003.11.005
- [2] Wang, G. S., Deng, Y. C., and Lin, T. F. (2007). Cancer Risk Assessment from Trihalomethanes in Drinking Water. **Science of the Total Environment**. Vol. 387, Issue 1-3, pp. 86-95. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.07.029
- [3] Ottawa, Ontario. (2006). **Trihalomethanes, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document**. Federal-Provincial-Territorial Committee on health and the Environment, Health Canada
- [4] Duong, H. A., Berg, M., Pha, H. V., Gallard, H., Giger, W., and Gunten, U. (2003). Trihalomethanes Formation by Chlorination of Ammonium and Bromide-Containing Groundwater in Water Supplies of Hanoi, Vietnam. **Water Research**. Vol. 37, Issue 13, pp. 3242-3252. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00138-6
- [5] Abbas, H. S., Abdul-Fattah, M. A., and Saadi, D. A. N. (2009). Natural Organic Matter Removal from Tigris River Water in Baghdad, Iraq. **Desalination**. Vol. 245, Issue 1-3, pp. 155-168. DOI: 10.1016/j.desal.2008.06.017
- [6] Amuda, O. S. and Amoo, I. A. (2006). Coagulation/Flocculation Process in the Treatment of Abattoir Wastewater. **Desalination**. Vol. 196, Issue 1-3, pp. 22-31. DOI: 10.1016/j.desal.2005.10.039
- [7] Zularisam, A. W., Ismail, A. F., and Razman, S. (2006). Behaviours of Natural Organic Matter in Membrane Filtration for Surface Water Treatment-Areview. **Desalination**. Vol. 194, Issue 1-3, pp. 211-231. DOI: 10.1016/j.desal.2005.10.030

- [8] Qin, J., Maungm, H. O., Kiran, A. K., Frans, K., and Peter, M. (2006). Impact of Coagulation pH on Enhanced Removal of Natural Organic Matter in Treatment of Reservoir Water. **Separation and Purification Technology**. Vol. 49, Issue 3, pp. 295-298. DOI: 10.1016/j.seppur.2005.09.016
- [9] Rizzo, L., Belgiornom, V., Gallo, M., and Merric, S. (2005). Removal of THM Precursors form a High-Alkaline Surface Water by Enhanced Coagulation and Behavior of THMFP Toxicity on *D. Magma*. **Desalination**. Vol. 176, Issue 1-3, pp. 177-188. DOI: 10.1016/j.desal.2004.10.020
- [10] Sharp E. L., Jarvis P., Parsons S. A. and Jefferson B. (2006). Impact of fractional character on the coagulation of NOM. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Vol. 286, Issue 1-3, pp. 104-111. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.009
- [11] APHA/AWWA, WPCP. (2005). **Collection and Preservation of Samples**. In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. Edited by M.A.H. Franson American Public Health Association, Washington, D.C
- [12] Wongklom, A. (2016). Total Hardness Removal of Groundwater by Chemical Precipitation Process. **SNRU Journal of Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 216-223
- [13] Gregor, J. E., Nokesm, C. J., and Fenton, E. (1997). **Optimising Natural Organic Matter Removal from Low Turbidity Waters by Controlled pH Adjustment of Aluminium Coagulation**. Institute of Environmental Science and Research Limited, Christchurch, New Zealand. 2949-2957
- [14] Zhonglian, Y., Baoyu, G., and Qinyan, Y. (2010). Coagulation Performance and Residual Aluminum Speciation of $Al_2(SO_4)_3$ and Polyaluminum Chloride (PAC) in Yellow River Water Treatment. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 165, pp. 122-132
- [15] Kabsch-Korbutowicz M. (2005). Effect of Al Coagulation Type on Natural Organic Matter Removal Efficiency in Coagulation/Ultrafiltration Process. **Desalination**. Vol. 185, Issue 1-3, pp. 327-333. DOI: 10.1016/j.desal.2005.02.083
- [16] Musikavong, C., Suraphong, W., Tana, F. M., and Prasert, P. (2005). Reduction of Organic Matter and Trihalomethane Formation Potential in Reclaimed Water from Treat Industrial Estate Wastewater by Coagulation. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 127, Issue 1-3, pp. 48-57. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.06.042
- [17] Yupaporn, A., Teerawan, B., and Nanthaphorn, S. (2011). **Improvement of Coagulation-Flocculation Process for Water Supply System of Samrong Sub District Administrative Organization at Samrong District, Ubon Ratchathani Province**. (Research Report). Ubon Ratchathani Rajabhat University. (in Thai).



การประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงด้วยข้อมูลการตรวจวัด
ฝนทั่วโลก

Estimation of Total Suspended Solids in Pung River using Global Precipitation Measurement Data

ประวิทย์ อ่องอารีย์^{1*} ขวัญพร พรหมสาขา¹ ทิตยา วงศ์สีดา¹ และณัฐพัชร์ บัวทองจันทร์¹

Received: February 2018; Accepted: March, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในลำน้ำพุงด้วยข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก (GPM) โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตามความยาวลำน้ำ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มกับปริมาณของแข็งแขวนลอยด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ และสร้างตัวแบบการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงด้วยการจัดการข้อมูลวิธีกลุ่ม (GMDH) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบที่ใช้ข้อมูลจีพีเอ็มเป็นตัวแปรนำเข้า ผลการศึกษาพบว่าค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวลำน้ำ โดยบริเวณต้นน้ำพบปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำกว่าบริเวณปลายน้ำ นอกจากนี้ข้อมูลจีพีเอ็มมีราย 3 7 และ 14 วัน มีความสัมพันธ์กับค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระดับปานกลาง และพบว่าการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มเป็นตัวแปรนำเข้าของตัวแบบประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงมีประสิทธิภาพปานกลาง โดยให้ค่าประมาณและค่าข้อมูลจริงไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทดสอบอยู่ระหว่าง 0.41 - 0.89

คำสำคัญ : ของแข็งแขวนลอย; ตัวแบบคอมพิวเตอร์; ลำน้ำ; การจัดการข้อมูลวิธีกลุ่ม; จีเอ็มดีเอช

¹ Faculty of Science and Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: prawit@snru.ac.th

Abstract

The object of this research was investigated the possibility of using Global Precipitation Measurement Data (GPM) for estimating total suspended solids (TSS) in Pung River. The longitudinal change of TSS and the correlations between GPM data and TSS were examined. Moreover, the estimating models of TSS, which use GPM data as input data were developed, by using a Group Method of Data Handling (GMDH). The results indicated that the TSS levels in Pung River change along the length of the channel, the upstream location had TSS value lower than the end of the river. Intermediate level of relationship between 3-days, 7-days, and 14-days of GPM precipitation and TSS values were disclosed. The TSS models using GPM data as input data had moderate efficiency; the estimated values and the actual values varied in the same way. The validated models had the coefficient of determination of 0.41 - 0.89.

Keywords: Suspended Solids; Computational Model; Channel; Group Method of Data Handling; GMDH

บทนำ

ลำน้ำพุงเป็นลำน้ำหลักในกลุ่มน้ำพุงอันมีต้นกำเนิดของสายน้ำในพื้นที่อำเภอกุศุดาบ จังหวัดสกลนคร ซึ่งมีสภาพพื้นที่เป็นที่ราบลอนคลื่น สลับกับเทือกเขา ลำน้ำพุงจึงมีความลาดชันสูงในช่วงต้นน้ำ และเป็นที่ตั้งของเขื่อนน้ำพุงในการกักเก็บน้ำและผลิตไฟฟ้า และทอดตัวผ่านพื้นที่อำเภอภูพาน อำเภอเต่างอย อำเภอโคกศรีสุพรรณ และอำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร ก่อนที่ไหลสู่ทะเลสาบหนองหาร รวมความยาวตลอดลำน้ำกว่า 64 กิโลเมตร ลำน้ำพุงจึงเป็นดังสายเลือดหลักที่หล่อเลี้ยงให้ความชุ่มชื้นแก่จังหวัดสกลนครตอนล่าง และยังเป็นต้นน้ำสำคัญที่เติมเต็มทะเลสาบหนองหาร ซึ่งเป็นทะเลสาบน้ำจืดใหญ่ที่สุดเป็นลำดับสองของประเทศไทยและมีพื้นที่กว่า 77,000 ไร่ ทะเลสาบหนองหารจึงเป็นแหล่งน้ำสำคัญในการหล่อเลี้ยงเมืองสกลนครและยังเป็นแหล่งรองรับน้ำหลากเพียงแห่งเดียวของเมืองสกลนคร จึงสำคัญต่อทั้งวิถีชีวิตและสภาพสิ่งแวดล้อมของท้องถิ่น

อย่างไรก็ตามลำน้ำพุงมีแนวพาดผ่านเทือกเขาภูพานลงสู่บริเวณที่ราบเชิงเขา โดยมีเปลี่ยนแปลงระดับความสูงการไหลจาก 300 เมตร (ร.ท.ก.) สู่ระดับ 190 เมตร (ร.ท.ก.) อย่างรวดเร็วภายในระยะทางเพียง 12 กิโลเมตร กระแสน้ำในลำน้ำตอนต้นจึงมีความเร็วสูงและมักเกิดการกัดเซาะดินชายตลิ่ง ส่งผลให้เกิดปริมาณของแข็งแขวนลอยในลำน้ำเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ที่ดินปัจจุบันได้ใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณลุ่มน้ำนี้มีอย่างหลากหลาย ทั้งเป็นพื้นที่เพาะปลูกพืช เลี้ยงสัตว์ อยู่อาศัย พาณิชยกรรม ป่าเสื่อมโทรม และป่าอนุรักษ์ ซึ่งต่างเป็นกิจกรรมของมนุษย์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมในหลายประเด็น [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนในแม่น้ำ เนื่องจากการใช้ที่ดินในลักษณะพื้นดินโล่ง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อน [2] รวมทั้งการบุกรุกเบิกแผ้วถางที่ดินซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากป่า

ที่มีพืชพันธุ์ปกคลุมเป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ของมนุษย์ ส่งผลต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เกิดจากการกัดกร่อนหน้าดินได้เช่นกัน [3] นอกจากนี้การใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรประเภทการเพาะปลูกยังคงเป็นสาเหตุหลักของปริมาณตะกอนในลำน้ำ [4] การเกิดพายุฝนหรือฤดูมรสุมยังส่งเสริมผลให้เกิดตะกอนจากการใช้ดินที่เปิดโล่งและพัดพาตะกอนไปยังแหล่งน้ำได้ [5] การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกยังอาจส่งผลให้ปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่มีแนวโน้มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีการกัดเซาะหน้าดินมากขึ้นตามปริมาณน้ำที่มากขึ้น เกิดการพัดพาของแข็งแขวนลอยจากหน้าดินในพื้นที่เกษตรกรรมหรือพื้นที่ป่าเสื่อมโทรมลงสู่ลำน้ำพุ และไหลพัดพาลงสู่ทะเลสาบหนองหาร นำไปสู่เกิดภาวะการทับถมและตื้นเขินในทะเลสาบหนองหาร ก่อให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการใช้ประโยชน์ของชุมชนท้องถิ่นโดยรอบทะเลสาบหนองหาร

การวิจัยนี้เล็งเห็นความสำคัญของทะเลสาบหนองหารซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญในท้องถิ่นและกำลังประสบปัญหาการตื้นเขินที่ทวีความรุนแรงขึ้น ส่งผลให้ประชาชนในท้องถิ่นได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลปริมาณฝนที่ได้จากการข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก (Global Precipitation Measurement: GPM) เพื่อประมาณค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids: TSS) ในลำน้ำพุ โดยทำการสร้างตัวแบบทางคอมพิวเตอร์ (Computational Model) เพื่อเผยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 2 ด้วยการจัดการข้อมูลวิธีกลุ่ม (Group Method of Data Handling) หรือจีเอ็มดีเอช (GMDH) ซึ่งเป็นวิธีการทางเหมือนข้อมูลวิธีการหนึ่ง โดยคาดหวังว่าผลที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุ และนำไปสู่การทำนายปริมาณตะกอนที่ไหลลงสู่หนองหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม่นยำและสามารถแก้ไขปัญหาการตื้นเขินของทะเลสาบหนองหารได้ต่อไปในอนาคต

การตรวจวัดฝน

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเป็นข้อมูลทางอุทก - อุตุนิยมวิทยาที่มีการตรวจวัดและใช้งานในการศึกษาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากปริมาณน้ำฝนเป็นความชุ่มชื้นหลักที่หล่อเลี้ยงมนุษยชาติมาตั้งแต่อดีต อย่างไรก็ตามปริมาณฝนที่มากเกินไปเกินความต้องการก็อาจส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินได้เช่นกัน ฝนจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาหรือทำนายค่าทางอุทก-อุตุนิยมวิทยาที่มักถูกนำมาใช้งานอยู่เสมอ

การตรวจวัดปริมาณฝนมีการพัฒนามาอย่างยาวนานโดยในปัจจุบันมีวิธีการที่เป็นที่นิยม 3 วิธีการได้แก่

1. การตรวจวัดปริมาณน้ำฝนภาคพื้นดิน วิธีการนี้เป็นวิธีการดั้งเดิมและพื้นฐานที่สุด โดยมีวิธีการที่นิยมใช้งาน เช่น การใช้มาตรวัดน้ำฝน (Rain Gauges) ดิสโดรมิเตอร์ (Disdrometer) และเรดาร์ภาคพื้นดิน (Ground Radar) เป็นต้น แม้วิธีการนี้จะถูกใช้อย่างยาวนานแต่ยังเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบันเนื่องจากให้ผลที่แม่นยำ อีกทั้งยังมีการพัฒนารูปแบบการวัดให้มีความแม่นยำสูงขึ้นอยู่เสมอ เช่น การพัฒนามาตรวัดฝนขนาด 100 ตารางเมตร [6] หรือการพัฒนากลุ่มมาตรวัดฝนที่ควบคุมคุณภาพด้วยการสื่อสารระยะไกลแบบเชื่อมต่อด้วยคลื่นไมโครเวฟ [7] เป็นต้น

2. การตรวจวัดด้วยข้อมูลดาวเทียม วิธีการนี้เป็นวิธีการโดยอ้อมโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากดาวเทียมที่โคจรในระดับต่ำหลากหลายรูปแบบ เช่น การถ่ายภาพช่วงคลื่นมองเห็นด้วยตา (Visible) การถ่ายภาพแบบอินฟราเรด หรือการตรวจวัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น [8] ซึ่งวิธีการเหล่านี้มิได้วัด

ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงพื้นโลกโดยตรงแต่ใช้วิธีการคำนวณและประมาณค่าจากข้อมูลที่ได้รับจากดาวเทียม วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ได้ดีกว่าการตรวจวัดด้วยสถานีภาคพื้นและยังสามารถแสดงผลเชิงเวลาได้อีกด้วย ปัจจุบันมีระบบข้อมูลฝนจากดาวเทียมที่เป็นที่นิยมใช้งาน เช่น GPM TMPA 3B42 PERSIANN-CDR และ RRFA-S เป็นต้น [9] - [11]

การตรวจวัดฝนทั่วโลกหรือจีพีเอ็ม (Global Precipitation Measurement: GPM) เป็นระบบการตรวจวัดฝนด้วยข้อมูลดาวเทียมแบบใกล้เวลาจริง (Near Real Time) โดยพัฒนามาจากโครงการตรวจวัดฝนในภูมิภาคเขตร้อน (Tropical Rainfall Measuring Mission) หรือทีอาร์เอ็มเอ็ม (TRMM) ที่ปฏิบัติการตรวจวัดฝนด้วยข้อมูลดาวเทียมในเขตภูมิภาคเขตร้อนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 - 2015 ระบบจีพีเอ็มนี้ประกอบด้วย ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติวงโคจรต่ำหลายดวงจากชาติต่าง ๆ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส และอินเดีย จึงสามารถประมาณค่าฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกภูมิภาคทั่วโลกตั้งแต่ละติจูด 60° เหนือ ถึง 60° ใต้ อย่างไรก็ตามระบบนี้มีดาวเทียมสำคัญซึ่งเป็นผลผลิตจากการร่วมมือระหว่างองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NASA) และองค์การวิจัยและพัฒนาการสำรวจอวกาศญี่ปุ่น (JAXA) คือ ดาวเทียมจีพีเอ็มหลัก (GPM Core Satellite) ซึ่งได้ติดตั้งอุปกรณ์ขั้นสูงสำหรับการประมาณค่าฝน 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องจับภาพด้วยไมโครเวฟ (Microwave Imager) และเรดาร์ตรวจจับฝนแบบสองความถี่ (Dual-Frequency Precipitation Radar) [12] จึงนับว่าดาวเทียมนี้เป็นดาวเทียมตรวจวัดฝนที่มีประสิทธิภาพสูงดวงหนึ่ง

3. การตรวจวัดฝนด้วยแบบจำลองฝน วิธีการนี้เป็นการประมาณค่าฝนจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ และคำนวณด้วยตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อิงวิธีการทางสถิติ ความน่าจะเป็น และทฤษฎีทางอุทก - อุตุนิยมวิทยา วิธีการนี้นอกจากสามารถบ่งบอกปริมาณฝนทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลาในทุกภูมิภาคทั่วโลก ปัจจุบันมีแบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ แบบจำลองจีซีเอ็ม (General Circulation Model: GCM) และแบบจำลองการแยกแยะวิเคราะห์ (Reanalysis Model) อย่างไรก็ตามข้อมูลจากแบบจำลองฝนยังไม่สามารถให้ข้อมูลในเวลาจริงหรือใกล้เคียงเวลาจริง เนื่องจากต้องอาศัยการรวบรวมข้อมูล อีกทั้งต้องใช้เวลาในการคำนวณและปรับแก้ข้อมูลเป็นระยะเวลานาน ทั้งนี้ทั่วไปแล้วข้อมูลฝนจากแบบจำลองจะใช้เวลาประมาณ 120 วันในการประมาณค่า

บทความวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวัดฝนทั่วโลก เนื่องจากเป็นระบบตรวจวัดน้ำฝนที่สามารถให้ข้อมูลได้ในทุกภูมิภาคทั่วโลกแบบใกล้เคียงเวลาจริง มีความละเอียดของการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ละเอียดถึง 0.1 องศา และให้ข้อมูลฝนเชิงพื้นที่อันแม่นยำและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง

การจัดการข้อมูลวิธีการกลุ่ม

การจัดการข้อมูลวิธีการกลุ่มหรือจีเอ็มดีเอช (Group Method of Data Handling: GMDH) เป็นหนึ่งในวิธีการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) ด้วยคอมพิวเตอร์ นิยมใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง โดยมีฟังก์ชันพื้นฐานในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดังสมการที่(1)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i f_i \quad (1)$$

ฟังก์ชันพื้นฐานของจีเอ็มดีเอชที่มีความยืดหยุ่นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครือข่ายประสาท (Artificial Neural Networks) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรู้จักกันในชื่อเครือข่ายแบบพหุนาม (Polynomial Neural Networks) หรือพีเอ็นเอ็น (PNN) [13] โดยมีฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นที่นิยมและรู้จักกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ฟังก์ชันพหุนามของโคโมโกรอฟ-กาบอร์ (Kolmogorov-Gabor Polynomial) [14] ดังสมการที่ (2)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

การวิจัยนี้มีพื้นที่ศึกษาบริเวณลุ่มน้ำพุงช่วงหลังเขื่อนน้ำพุงจนถึงทะเลสาบหนองหาร โดยมีพื้นที่ประมาณ 778 ตารางกิโลเมตร ลุ่มน้ำนี้มีความลาดเอียงไปทางทิศตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือ และเชื่อมต่อกับแม่น้ำโขงผ่านลุ่มน้ำก่ำ ลุ่มน้ำพุงเป็นลุ่มน้ำขนาดเล็กมีลำน้ำพุงซึ่งมีความยาวประมาณ 64 กิโลเมตร เป็นลำน้ำสายหลัก มีจุดกำเนิดจากเทือกเขาภูพานและไหลมาทางทิศตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือ ก่อนที่จะไหลขึ้นไปทางทิศเหนือลงสู่ทะเลสาบหนองหารบริเวณอำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร ดังแสดงในรูปที่ 1 (เส้นประแสดงขอบเขตลุ่มน้ำพุง) บริเวณช่วงตอนต้นของลำน้ำพุงเป็นบริเวณเทือกเขาจึงมีความลาดชันของการไหลสูงถึงร้อยละ 1 ส่งผลให้กระแสน้ำในลำน้ำพุงมีความเร็วการไหลค่อนข้างสูง และอาจก่อให้เกิดการกัดเซาะหน้าดินกลายเป็นของแข็งแขวนลอยพัดพาสูงท้ายน้ำสำหรับช่วงกลางน้ำและท้ายน้ำนั้น ลำน้ำพุงได้ทอดตัวผ่านบริเวณที่ราบเชิงเขา จึงมีความชันน้อยกว่าช่วงต้นน้ำโดยมีความชันเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.3 และมีลักษณะลำน้ำเป็นแบบทางน้ำโค้งคดซึ่งเป็นลักษณะของลำน้ำที่มักพบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ลำน้ำพุงช่วงนี้มีลักษณะการใช้ที่ดินเป็นการใช้เพื่อการเกษตรและที่คันทิ้งร้าง ดังนั้นจึงอาจมีโอกาสเกิดการกัดเซาะหน้าดินกลายเป็นของแข็งแขวนลอยลงสู่ลำน้ำพุงได้เช่นเดียวกัน

2. ขั้นตอนการศึกษา

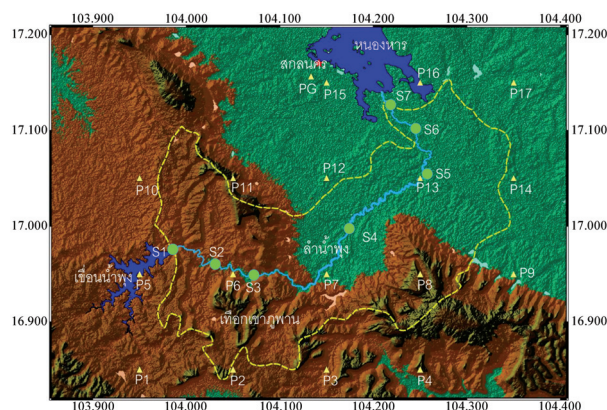
การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาความเป็นไปได้ของการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงด้วยข้อมูลฝน จึงเลือกใช้ข้อมูลฝนจากระบบจีพีเอ็มแบบใกล้เวลาจริง 18 ชั่วโมง (GPM IMERG Late-Run) เนื่องจากสามารถบอกรายละเอียดปริมาณฝนเชิงพื้นที่ได้ดีกว่าการใช้ข้อมูลฝนจากสถานีมาตรวัดฝนแบบจุดเดียว (Single Point Station) และสามารถให้ข้อมูลได้ใกล้เคียงเวลาจริงซึ่งได้ดำเนินการศึกษาครอบคลุมทั้งฤดูแล้งและฤดูฝนเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคม - กันยายน พ.ศ. 2560 ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษา 4 ขั้นตอนดังนี้

2.1 ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตามความยาวลำน้ำพุงเพื่อวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงจากลำน้ำพุงในบริเวณที่มีสะพานพาดผ่านลำน้ำพุงจำนวน 6 สถานี (สถานี S2 - S7) และจากบริเวณต้นน้ำอีก 1 สถานี (สถานี S1) ดังแสดงในรูปที่ 1 ทุก 14 วัน และทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยวิธีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [15]

2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและข้อมูลฝนจากมาตรวัดฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างและความสัมพันธ์ของข้อมูลฝนระหว่างสถานีตรวจวัดฝนที่อยู่ใกล้จุดข้อมูลของจีพีเอ็มมากที่สุด ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนคร (สถานี PG) และจุด P15 สำหรับข้อมูลจากจีพีเอ็ม ดังรูปที่ 1

2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่ายระหว่างตัวแปรทั้งสองเพื่อแสดงทิศทางและระดับความสัมพันธ์ที่มีต่อกัน

2.4 สร้างตัวแบบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุด้วยการจัดการข้อมูลวิธีกลุ่มแบบเครือข่ายประสาท (GMDH Neural Network) ด้วยซอฟต์แวร์ GMDH Shell DS รุ่น 3.8.3 โดยออกแบบให้มีชั้นการคำนวณ (Layer) เท่ากับ 5 ชั้น แต่ละชั้นมีจำนวนโนด (Node) เท่ากับ 10 โหนด ซึ่งการสร้างตัวแบบความสัมพันธ์สำหรับประมาณค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตลอดทั้งความยาวลำน้ำตั้งแต่สถานี S2 - S7 นี้ ใช้ข้อมูลจีพีเอ็มที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาน้ำจำนวน 17 จุด (จุด P1 - P17) ดังรูปที่ 1 ข้อมูลที่ถูกใช้เป็นตัวแปรนำเข้าเป็นข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 3 7 และ 14 วัน ของทั้ง 17 จุด โดยข้อมูลเหล่านี้จำนวนร้อยละ 60 ถูกสุ่มเป็นข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ในการสร้างตัวแบบ และข้อมูลที่เหลืออีกร้อยละ 40 ถูกใช้เป็นข้อมูลทดสอบความแม่นยำของตัวแบบ



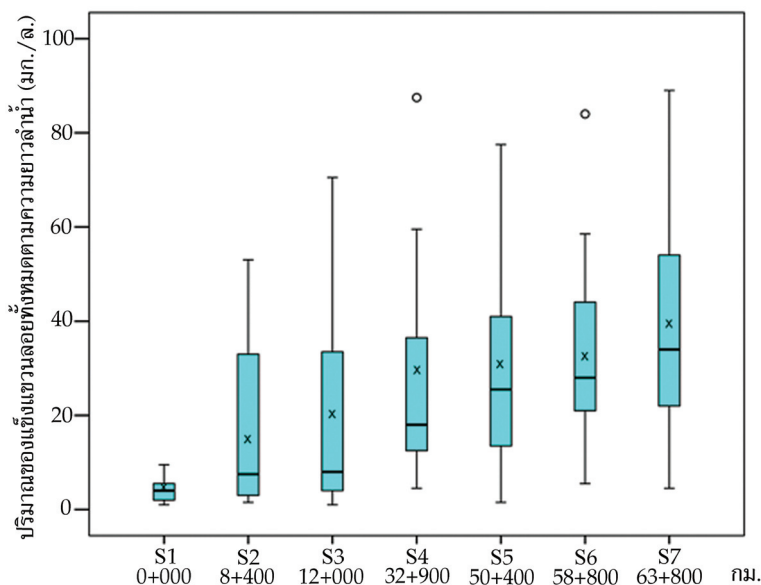
- ▲ คือ ตำแหน่งข้อมูลฝน (จุด P1 - P17 เป็นตำแหน่งข้อมูลฝนจากจีพีเอ็ม และสถานี PG เป็นข้อมูลฝนจากสถานีตรวจวัดฝนภาคพื้นของกรมอุตุนิยมวิทยา)
 - คือ ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในลำน้ำพุ
- รูปที่ 1 บริเวณพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งข้อมูลฝน และตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยตามความยาวลำน้ำพุ

จากการเก็บตัวอย่างน้ำในลำน้ำพุทุก 14 วัน ตั้งแต่วันที่ 25 มีนาคม - 23 กันยายน พ.ศ. 2560 จำนวน 13 ครั้ง ณ บริเวณสถานี S1 - S7 ดังรูปที่ 1 (ยกเว้นวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เนื่องจากเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมจังหวัดสกลนครจึงไม่สามารถเก็บตัวอย่างน้ำได้) พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอย

ทั้งหมดบริเวณสถานี S1 - S7 มีค่าเท่ากับ 4.3 15.8 20.5 29.0 29.8 32.5 และ 39.4 มก./ล. ตามลำดับ โดยสามารถแสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเทียบกับความยาวลำน้ำพุได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งสังเกตได้ว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดบริเวณต้นน้ำจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณปลายน้ำ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวลำน้ำ



รูปที่ 2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตามความยาวลำน้ำพุ

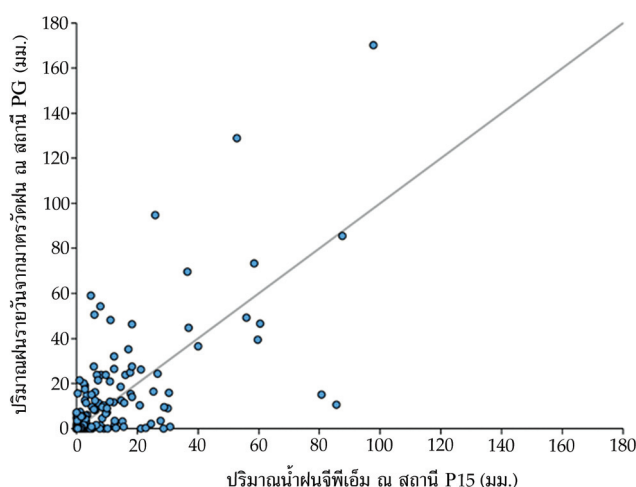
นอกจากนี้พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดจากสถานีหนึ่งไปยัง สถานีหนึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.5 4.7 8.5 0.8 2.7 และ 6.9 มก./ล. ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับระยะ ทางการไหลของน้ำ พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเท่ากับ 1.36 1.31 0.41 0.04 0.32 และ 1.38 มก./ล.-กม. ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าช่วงการไหลจากสถานี S3 ไปยัง S6 มีการอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้นค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ช่วงสถานี S4 ไปยัง S5 ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากเพียง 0.04 มก./ล.-กม. ทั้งนี้อาจเป็นผล อันเนื่องมาจากลำน้ำพุช่วงดังกล่าวมีลักษณะการไหลของลำน้ำเป็นแบบทางน้ำโค้งตัว (Meandering Channel) ซึ่งมักเกิดขึ้นในลำน้ำที่มีการไหลจากบริเวณที่สูงสู่บริเวณที่ราบอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการกวัด ของกระแสน้ำเพื่อสลายพลังงานและรักษาเสถียรภาพการไหล ลักษณะทางน้ำแบบนี้มักเกิดในบริเวณช่วง กลางน้ำหรือท้ายน้ำ และมักเกิดการทับถมของตะกอนบริเวณโค้งน้ำด้านหนึ่งและเกิดการกัดเซาะบริเวณ โค้งน้ำอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากความเร็วการไหลในหน้าตัดการไหลเดียวกันมีความแตกต่างกันสูง [16] ด้วยเหตุนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำช่วงนี้จึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำ เนื่องจากเกิดการกัดเซาะ และทับถมของตะกอนและของแข็งแขวนลอยไปพร้อมกัน ซึ่งแตกต่างกับช่วงต้นน้ำ (สถานี S1 - S3) ที่มีลักษณะ ของลำน้ำเป็นแบบการไหลลัดเลาะตามช่องเขาและร่องน้ำ และช่วงท้ายน้ำ (สถานี S6 - S7) ที่มีลักษณะ ของลำน้ำค่อนข้างตรง จึงทำให้ตะกอนและของแข็งแขวนลอยในลำน้ำทั้ง 2 ช่วงนี้เกิดการตกตะกอนและทับถม ได้น้อย ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยมีการเพิ่มขึ้นสูงกว่าบริเวณการลำน้ำแบบโค้งตัว

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตามระยะทาง

พารามิเตอร์	สถานีต้นทาง, สถานีปลายทาง					
	S1, S2	S2, S3	S3, S4	S4, S5	S5, S6	S6, S7
ระยะทาง (กม.)	8.4	3.6	20.9	17.5	8.4	5.0
การเปลี่ยนแปลง (มก./ล.)	11.5	4.7	8.5	0.8	2.7	6.9
อัตราการเปลี่ยนแปลง (มก./ล.-กม.)	1.36	1.31	0.41	0.04	0.32	1.38

2. ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและข้อมูลฝนรายวัน

ข้อมูลฝนที่ถูกเลือกใช้ในการประมาณค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุสำหรับการศึกษานี้คือข้อมูลฝนจากระบบจีพีเอ็มแบบใกล้เวลาจริง 18 ชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อมูลฝนรายวันเชิงพื้นที่แบบความละเอียด 0.1 องศา การวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบข้อมูลฝนนี้กับปริมาณฝนรายวันที่ตรวจวัดด้วยมาตรวัดฝน โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลจีพีเอ็มจุดที่ P15 กับข้อมูลฝนรายวันของสถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนคร (จุด PG) เนื่องจากทั้ง 2 มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 1 ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลทั้งสองมีความแตกต่างกันมากโดยจุดความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งสองไม่อยู่ในแนวเส้นเฉียงความสัมพันธ์แบบ 1 ต่อ 1 ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งสองมีความคลาดเคลื่อนไปจากกันสูง ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากข้อมูลฝนจากระบบจีพีเอ็มเป็นข้อมูลแบบใกล้เวลาจริงซึ่งอาจมีการคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลแบบเสร็จสมบูรณ์ (Final Run) [17] นอกจากนี้แม้สถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนครจะตั้งอยู่บริเวณเดียวกันจุดข้อมูลฝนของจีพีเอ็มจุดที่ P15 แต่ทั้งสองมีระยะทางห่างกันถึง 2 กิโลเมตร จึงอาจทำให้ข้อมูลฝนมีความคลาดเคลื่อนไปจากกันได้ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยสหสัมพันธ์เพียร์สันโปรดักส์โมเมนต์ พบว่าข้อมูลทั้งสองมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.69 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันปานกลาง [18] อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและฝนที่ตรวจวัดด้วยมาตรวัดฝน

3. ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 3 7 และ 14 วัน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันโปรดักส์โมเมนต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงของสถานี S2 - S7 กับข้อมูลจีพีเอ็มเฉลี่ยราย 1 3 7 และ 14 วัน มีค่าพิสัยสัมบูรณ์ในช่วง 0.026 - 0.21, 0.11 - 0.45, 0.26 - 0.43 และ 0.31 - 0.57 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 วันในระดับต่ำ และมีความสัมพันธ์สูงขึ้นกับข้อมูลจีพีเอ็มราย 3 7 และ 14 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์ของข้อมูลจีพีเอ็มราย 7 และ 14 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่าความสัมพันธ์ของข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 วันอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นที่รับน้ำต้องใช้เวลา รวมตัว (Time of Concentration) ระยะหนึ่งก่อนที่จะพัดพาของแข็งแขวนลอยลงสู่ลำน้ำ ดังนั้นปริมาณฝนราย 1 วัน จึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระดับต่ำกว่าข้อมูลฝนระยะคาบเวลาอื่น เนื่องจากการไหลรวมตัวของน้ำหลากจากบริเวณพื้นที่รับน้ำลงสู่ลำน้ำมีระยะเวลาน้อยกว่าคาบเวลาอื่น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาทิศทางความสัมพันธ์ยังพบว่าข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 วัน เป็นตัวแปรเดียวที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากฝนที่ตกในระยะ 1 วัน มีระยะเวลารวมตัวต่ำจึงมีช่วงระยะเวลาของการไหลลงสู่ลำน้ำอย่างจำกัด เมื่อเทียบกับน้ำหลากที่เกิดจากฝนที่มีระยะเวลารวมตัวที่สูงกว่า การกัดเซาะและพัดพาของแข็งแขวนลอยจึงเกิดเพียงเล็กน้อย ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำไหลหลากที่เกิดจากฝนราย 1 วัน จึงมีความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในลำน้ำ และเกิดการเจือจางให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในลำน้ำมีค่าลดน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ความสัมพันธ์ข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 วันติดลบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงกลางน้ำและท้ายน้ำที่มักมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำสูง

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลจีพีเอ็มเฉลี่ยและปริมาณของแข็งแขวนลอย ณ สถานีต่าง ๆ

ระยะเวลาฝนรวม	สถานี S2	สถานี S3	สถานี S4	สถานี S5	สถานี S6	สถานี S7
1 วัน	0.17	0.19	-0.026	-0.20	-0.21	-0.14
3 วัน	0.45	0.42	0.27	0.11	0.12	0.16
7 วัน	0.33	0.29	0.26	0.34	0.43	0.35
14 วัน	0.50	0.57*	0.40	0.38	0.31	0.39

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4. การสร้างตัวแบบการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยข้อมูลจีพีเอ็ม

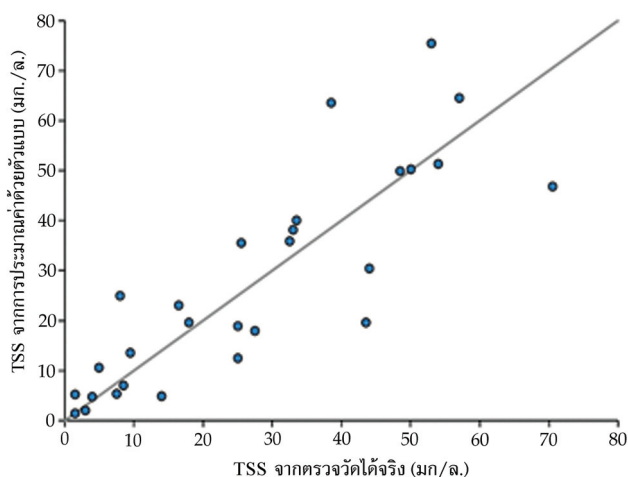
จากข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 3 7 และ 14 วัน และข้อมูลปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงสามารถนำมาสร้างเป็นตัวแบบสำหรับการประมาณค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุง ณ สถานีต่าง ๆ จำนวน 6 ตัวแบบ ได้แก่ ตัวแบบของสถานี S2 S3 S4 S5 S6 และ S7 โดยในขั้นตัวแบบเรียนรู้ (Model Learning) ตัวแบบของสถานี S2 - S7 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

อยู่ในระดับสูงมาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.00 0.99 1.00 0.99 0.94 และ 0.99 ตามลำดับ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ต่ำเพียง 0.00 0.21 0.00 1.56 4.85 และ 0.02 มก./ล. ตามลำดับ และเมื่อทดสอบตัวแบบด้วยข้อมูลที่ตัวแบบไม่เคยพบมาก่อน พบว่าตัวแบบสามารถประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในระดับปานกลางค่อนข้างสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทดสอบตัวแบบของสถานี S2 - S7 เท่ากับ 0.72 0.73 0.89 0.41 0.68 และ 0.72 ตามลำดับ และมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 6.28 10.57 7.47 9.04 6.35 และ 9.75 มก./ล. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

นอกจากนี้การทดสอบแบบตัวแบบทั้ง 6 ตัวแบบ ด้วยแผนภาพการกระจายข้อมูลจริง (Actual Data) และค่าทำนาย (Prediction Data) จากตัวแบบพบว่าข้อมูลฝนจากระบบจีพีเอ็ม มีศักยภาพในการใช้ประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุได้ในระดับปานกลาง โดยค่าจากการทำนายและข้อมูลจริงมีแนวโน้มทิศทางไปในทางเดียวกัน แต่มีกระจายตัวออกห่างจากเส้นคาดหวังความสัมพันธ์ 1 ต่อ 1 (เส้นทึบ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลที่มีค่าสูงจะมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนสูงกว่าข้อมูลที่มีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงอาจมีตัวแปรอื่นส่งอิทธิพลต่อปริมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุที่ได้ใช้นำเข้ามาเป็นตัวแปรในการศึกษานี้ เช่น อัตราการไหล ความเร็วน้ำ ขนาดของอนุภาค ความชื้นในดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพตัวแบบการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุ ณ สถานีต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ตัวแบบการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุ ณ สถานี					
	S2	S3	S4	S5	S6	S7
R ² ตัวแบบเรียนรู้	1.00	0.99	1.00	0.99	0.94	0.99
MAE ตัวแบบเรียนรู้ (มก./ล.)	0.00	0.21	0.00	1.56	4.85	0.02
R ² ทดสอบตัวแบบ	0.72	0.73	0.89	0.41	0.68	0.72
MAE ทดสอบตัวแบบ (มก./ล.)	6.28	10.57	7.47	9.04	6.35	9.75



รูปที่ 4 แผนภาพการกระจายข้อมูลจริงและค่าทำนายจากตัวแบบ

สรุป

ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงช่วงต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ในช่วงต้นน้ำบริเวณเขื่อนน้ำพุงมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่ำ แต่เมื่อลำน้ำพุงไหลผ่านเทือกเขาภูพานลงสู่บริเวณที่ราบเชิงเขาพบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงบริเวณที่ไหลผ่านเทือกเขาและบริเวณท้ายน้ำมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูงกว่าช่วงกลางน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากบริเวณช่วงกลางน้ำลำน้ำพุง (ช่วงสถานี S4 - S5) มีลักษณะลำน้ำเป็นแบบโค้งตัวัด ส่งผลให้เกิดการกัดเซาะและทับถมตะกอนไปพร้อมกัน ซึ่งแตกต่างกับช่วงต้นน้ำที่ลำน้ำทอดตัวลัดเลาะไปตามช่องเขาและท้ายน้ำที่ลำน้ำค่อนข้างตรง ลำน้ำในช่วงต้นน้ำและท้ายน้ำจึงมีการตกตะกอนทับถมน้อยกว่าจึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูงกว่าช่วงกลางน้ำ

นอกจากนี้พบว่าข้อมูลจีพีเอ็มรายวันและข้อมูลฝนจากมาตรวัดฝนรายวันมีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง อีกทั้งยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มราย 3 7 และ 14 วันกับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดอยู่ในระดับปานกลางเช่นกัน อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจีพีเอ็มราย 1 วันนั้นมีความสัมพันธ์กันต่ำ

การสร้างตัวแบบการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงด้วยข้อมูลจีพีเอ็ม ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนลำน้ำพุง พบว่าตัวแบบที่ได้มีความสามารถในการประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้ถูกต้องในระดับปานกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) การทดสอบอยู่ระหว่าง 0.41 - 0.89 และมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.28 - 10.57 มก./ล. ดังนั้นข้อมูลฝนจากระบบจีพีเอ็มจึงมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำมาใช้เป็นตัวแปรนำเข้าในการประมาณค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุง อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาเพิ่มเติมจำนวนตัวอย่างให้มากขึ้นเพื่อให้ตัวแบบมีปริมาณข้อมูลในการเรียนรู้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น และสามารถปรับปรุงตัวเองให้มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อข้อมูลที่ไม่เคยพบ ซึ่งจะส่งผลให้การประมาณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำพุงมีความแม่นยำมากขึ้น รวมทั้งพิจารณาการใช้ตัวแปรอื่นเข้ามาร่วมในการสร้างตัวแบบ เช่น อัตราการไหล ความเร็วของน้ำ ความชื้นในดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น เพื่อให้ตัวแบบมีความครอบคลุมไปยังตัวแปรที่อาจมีอิทธิพลต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในลำน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์หนองหารศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร และได้รับการสนับสนุนข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยา และขอขอบพระคุณสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่สนับสนุนการใช้ห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัย

References

- [1] Camacho, C. and Pérez-Barahona, A. (2015). Land use Dynamics and the Environment. **Journal of Economic Dynamics and Control**. Vol. 52, pp. 96-118. DOI: 10.1016/j.jedc.2014.11.013
- [2] Bussi, G., Dadson, S. J., Prudhomme, C., and Whitehead, P. G. (2016). Modelling the Future Impacts of Climate and Land-Use Change on Suspended Sediment Transport in the River Thames (UK). **Journal of Hydrology**. Vol. 542, pp. 357-372. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.010
- [3] van Maren, D. S., Oost, A. P., Wang, Z. B., and Vos, P. C. (2016). The Effect of Land Reclamations and Sediment Extraction on the Suspended Sediment Concentration in the Ems Estuary. **Marine Geology**. Vol. 376, pp. 147-157. DOI: 10.1016/j.margeo.2016.03.007
- [4] Tiecher, T., Minella, J. P. G., Caner, L., Evrard, O., Zafar, M., Capoane, V., Le Gall, M., and Santos, D. (2017). Quantifying Land use Contributions to Suspended Sediment in a Large Cultivated Catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Vol. 237, pp. 95-108. DOI: 10.1016/j.agee.2016.12.004
- [5] Abbott, S., Julian, J. P., Kamarinas, I., Meitzen, K. M., Fuller, I. C., McColl, S. T., and Dymond, J. R. (2017). State-Shifting at the Edge of Resilience: River Suspended Sediment Responses to Land use Change and Extreme Storms. **Geomorphology**. Vol. 305, pp. 49-60. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.09.004
- [6] Grimaldi, S., Petroselli, A., Baldini, L., and Gorgucci, E. (2018). Description and Preliminary Results of a 100 Square Meter Rain Gauge. **Journal of Hydrology**. Vol. 556, pp. 827-834. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.076
- [7] Bianchi, B., Rieckermann, J., and Berne, A. (2013). Quality Control of Rain Gauge Measurements Using Telecommunication Microwave Links. **Journal of Hydrology**. Vol. 492, pp. 15-23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.042
- [8] Islam, T., Hu, Y., Kokhanovsky, A., and Wang, J. (2018). **Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation**. Chapter 11 - Measurement of Precipitation from Satellite Radiometers (Visible, Infrared, and Microwave): Physical Basis, Methods, and Limitations Atul K. Varma, pp. 223-248. 1st Edition. Elsevier.
- [9] Gado, T. A., Hsu, K., and Sorooshian, S. (2017). Rainfall Frequency Analysis for Ungauged sites Using Satellite Precipitation Products. **Journal of Hydrology**. Vol. 554, pp. 646-655. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.043
- [10] Darand, M., Amanollahi, J., and Zandkarimi, S. (2017). Evaluation of the Performance of TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) Estimation Over Iran. **Atmospheric Research**. Vol. 190, pp. 121-127. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.02.011

- [11] Tan, M. L. and Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR Satellite Precipitation Products Over Malaysia. **Atmospheric Research**. Vol. 202, pp. 63-76. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.006
- [12] Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L. A. T., Angelis, C., Salio, P., Kidd, C., Huffman, G., and de Castro, M. (2012). Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications. **Atmospheric Research**. Vol. 104, pp. 70-97. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.10.021
- [13] Dorn, M., Braga, A. L. S., Llanos, C. H., and Coelho, L. S. (2012). A GMDH Polynomial Neural Network-Based Method to Predict Approximate Three - Dimensional Structures of Polypeptides. **Expert Systems with Applications**. Vol. 39, Issue 15, pp. 12268-12279. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.04.046
- [14] Schmidhuber, J. (2015). **Deep Learning in Neural Networks: An Overview**. Neural Networks, Vol. 61, pp. 85-117
- [15] Rice, E. W. and American Public Health Association (Eds.). (2012). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (22. ed). Washington, DC: American Public Health Association
- [16] Nelson, J. M. and Smith, J. D. (1989). **Flow in Meandering Channels with Natural Topography**. In Ikeda, S. and Parker G. (Eds.), River Meandering. American Geophysical Union
- [17] Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., and Chen, J. (2017). Evaluation of the GPM IMERG Satellite-Based Precipitation Products and the Hydrological Utility. **Atmospheric Research**. Vol. 196, pp. 151-163. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.020
- [18] Hinkle, D. E., Wiersma, W., and Jurs, S. G. (2002). **Applied Statistics for the Behavioral Sciences** (5 edition). Boston: Houghton Mifflin



สมบัติทางกายภาพของผ้ายอกเดนิมนคร

Physical Properties of Yok Denim Nakhon Fabric

จุฑามาศ ขุนไชยการ¹ สาคร ชลสาคร^{1*} และรัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์²

Received: March, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบการทอผ้ายอกนครด้วยเส้นด้ายพุ่ง 3 ชนิด เส้นด้ายที่ย้อมให้มีเจดสีอินดิโก และทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้ายอกเดนิมนคร โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) มีปัจจัยในการทดลอง คือ ชนิดของเส้นด้าย ได้แก่ ผ้ายอกพอลิเอสเตอร์ และผ้ายอกผสมเรยอน การพัฒนารูปแบบการทอผ้ายอกนครด้วยลวดลายดอกพิกุลและวิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ด้วยมาตรฐานการทดสอบ ASTM และ AATCC ผลการพัฒนารูปแบบการทอผ้ายอกนครพบว่า เส้นด้ายพุ่งทั้ง 3 ชนิด สามารถใช้ทอผ้าผืนจนกลายเป็นผ้ายอกเดนิมนคร ชนิดใหม่ที่มีเอกลักษณ์ ศิลปะความเป็นไทย มีสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรง และผลิตได้รวดเร็ว ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์ มีขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด และความไม่สม่ำเสมอมากที่สุด 1104.70 ดีเนียร์ 1.87 กรัมต่อดีเนียร์ และร้อยละ 11.20 ตามลำดับ ผ้ายอกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์ มีความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดในแนวเส้นด้ายพุ่ง น้ำหนัก และความหนามากที่สุด 861.49 นิวตัน 424.51 กรัมต่อตารางเมตร และ 1.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในแนวเส้นด้ายพุ่งพบว่า ผ้ายอกเดนิมนครผ้ายอก มีจำนวนเส้นด้ายมากที่สุด 44 เส้นต่อตารางนิ้ว ผลการทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาดของผ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่าเส้นด้ายทั้งแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง มีค่าเฉลี่ยมากกว่า 125 นิวตัน และผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างและการตกติดสีบนผ้าขาวพบว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีสีซีดจางลงเล็กน้อยและสีตกติดน้อยอยู่ในระดับ 4.5

คำสำคัญ : ผ้าทอ; ผ้าเดนิม; ผ้ายอกนคร; สมบัติทางกายภาพ

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 objectives of this study were to develop weaving process of yoknakhon fabric with three types of weft indigo dyed yarns and test their physical properties. In the experiment, Completely Randomized Design (CRD) was factor and the following three types of yarns: cotton, polyester, and cotton rayon blend were used in the weaving process development with dokpikul pattern. The testing of the physical properties of the end product was then carried out by means of ASTM and AATCC standard testing. From the development of the weaving style of the city, it was found that the three types of yarn could be used to weave the denim city cloth. This new style cloth was unique, having Thai art properties with prominent strength. And the production was fast. From the physical properties test, it was found that the polyester yarn had the most tensile strength and yarn evenness of 1104.70 denier, 1.87 gram per denier and 11.20 percent respectively whereas the yok denim nakhon polyester fabric had the maximum tensile strength in weft range length and thickness of 861.49 newton, 424.51 gram per square meter, and 1.60 millimeter respectively. Concerning the test of the yarn number of count in the weft direction, it was found that yok denim nakhon cotton fabric had the largest yarn number of 44 threads per square inch. From the test of weaving tensile strength in warp and weft direction of the three fabrics, it was found that the average strength was more than 125 newton. In relation to color fastness to washing and color staining, the color fade and the color shade of the three fabrics appeared to be at the slight level of 4.5.

Keywords: Weave; Denim Fabric; Yok Nakhon Fabric; Physical Properties

บทนำ

ผ้ายกนคร เป็นศิลปะการทอพื้นบ้านที่มีลักษณะการผสมผสานด้วยคุณค่าและประโยชน์ใช้สอย และมีเอกลักษณ์ชัดเจน องค์ประกอบสำคัญของผ้ายกนคร คือ ความคิด ฝีมือ ความเรียบง่าย และความงามบนพื้นฐานของธรรมชาติสิ่งแวดล้อม สังคม ขนบธรรมเนียมประเพณีและความเชื่อ ผ้ายกนครถือเป็นศิลปะพื้นบ้านของจังหวัดนครราชสีมา มีความเก่าแก่และมีความประณีตงดงาม [1] การทอผ้าเป็นงานที่ต้องใช้เวลามากในการผลิต มีกรรมวิธีที่เป็นเอกลักษณ์สามารถถ่ายทอดศิลปะ และความรู้สึกลงไปบนผืนผ้าได้ ผ้าทอจะสะท้อนให้เห็นคุณค่า การทอผ้าเป็นหัตถกรรมและศิลปะที่ได้ผสมผสานกับวิถีชีวิต เดิมทีผ้ายกนครผลิตเพื่อใช้สอยในครัวเรือน แต่ปัจจุบันได้พัฒนามาเป็นการผลิตเพื่อจำหน่ายทำให้เกิดรายได้ มีการใช้เทคโนโลยีมาช่วยเพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการผลิต ส่งผลให้คุณค่าด้านศิลปะลดน้อยลงไป เนื่องจากผู้ผลิตคำนึงถึงผลผลิตมากกว่าฝีมือและคุณภาพ จนทำให้ขาดการทำนุบำรุงส่งเสริม นอกจากนี้การส่งเสริมหรือสืบทอดศิลปะการทอผ้า และกรรมวิธีการทอที่ยากใช้เวลานาน ทำให้ผู้ทอคิดว่าจะได้รายได้ไม่คุ้มกับความเหนื่อยและความพยายาม ผู้ทอที่เหลือส่วนใหญ่จึงเป็นผู้สูงอายุ ส่วนคนในวัยหนุ่มสาว มักจะหันไปประกอบอาชีพอื่น

ที่มีรายได้ดีกว่าอีกปัญหาหนึ่งก็คือ การขาดการสนับสนุน และส่งเสริมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง [2] และเพื่อไม่ให้ผ้ายัคเคนหรือการสืบทอดศิลปะการทอผ้ายัคเคนต้องสูญหาย ควรพัฒนารูปแบบการทอหรือลวดลายการทอให้มีความทันสมัยมากขึ้น และสามารถเพิ่มโอกาสหรือต่อยอดให้กับกลุ่มทอผ้าอีกด้วย

ผ้าเดนิม เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเครื่องแต่งกายที่เป็นเอกลักษณ์ มียอดขายรายเฉลี่ย 1,000 ล้านบาทต่อปี สามารถผลิตเป็นยีนส์ที่สวมใส่ได้ง่าย อิทธิพลของด้านผลิตภัณฑ์มีผลต่อพฤติกรรม การซื้อกางเกงยีนส์ของผู้บริโภคมาก จะเห็นได้ว่าส่วนของปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ที่มีอิทธิพลมากที่สุด คือ มีความทันสมัยอยู่เสมอ ทุกยุค ทุกสมัย ส่วนของปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ที่มีอิทธิพลมาก คือ กางเกงยีนส์สามารถสวมใส่ได้หลายโอกาส รองลงมาคือ เนื้อผ้ามีคุณภาพดี ทนทานใช้ได้นาน รูปทรงกางเกงที่ทันสมัย ในการออกแบบและการทอนั้น ผ้าเดนิมมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ลายผ้าและความหนาแน่นของเนื้อผ้าที่ต้องการ เช่น ลายสอง ลายตัวน ลายลูกฟูก และลายกางปลา เป็นต้น ผ้าเดนิมที่มีเนื้อหนา เกิดจากการทอด้วยเส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ ผ้าจะมีความแข็งแรง ทนทาน ส่วนผ้าเดนิมที่มีเนื้อบาง เกิดจากการทอด้วยเส้นด้ายขนาดเล็ก ผ้าจะมีความแข็งแรง ทนทาน น้อยกว่า นอกจากนี้ในด้านการตัดเย็บผ้าเดนิมยังมีรูปแบบเฉพาะตัว คือ เป็นการตัดเย็บโดยใช้เส้นด้ายขนาดใหญ่ ที่มีความเหนียวเป็นพิเศษ ใช้ฝีเข็มแบบตะเข็บคู่ รวมทั้งใช้ซิปและกระดุมที่ทำจากโลหะ ผ้าเดนิมที่ตัดเย็บเสร็จแล้ว สามารถนำไปผ่านการตกแต่งเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความสวยงามและน่าใช้ที่มากยิ่งขึ้น เช่น การซักล้าง ช่วยให้สีซีดจางลงและเห็นรอยตะเข็บได้ชัดเจนขึ้นหรือทำการตกแต่งให้ผ้านุ่มขึ้น เป็นต้น [3] ซึ่งความนิยมของผ้าเดนิมสำหรับคนไทยยังคงมีมากขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบ ลวดลาย และสีสันท ในการผลิตผ้าเดนิม ส่วนใหญ่ใช้เส้นด้ายฝ้ายและสเปนเด็กซ์ ส่งผลให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผ้าเดนิมมีลักษณะรูปแบบ ลวดลายน้อยมาก ผู้ผลิตไม่ได้นำถึงรูปแบบที่มีความทันสมัย แต่คำนึงถึงยอดในผลผลิต จนทำให้ผู้บริโภคมีทางเลือกใช้ผ้าเดนิมน้อยลง [4] ควรมีการพัฒนาแบบการทอผ้าเดนิมที่มีความทันสมัย เนื้อผ้ามีคุณภาพดี ทนทานต่อการใช้งานได้ดี และสามารถสวมใส่ได้หลายโอกาส

สิ่งทอที่ดีจำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติให้ตรงความต้องการและเหมาะสมต่อการใช้งาน ในการนำสิ่งทอมาผลิตเป็นเสื้อผ้า นั้น อย่างน้อยต้องมีความแข็งแรงและความหนาที่เพียงพอ เนื่องจากในการใช้งานของสิ่งทอนั้น ต้องทนต่อแรงดึงขาด แรงฉีกขาด และความคงทนของสีต่อการซักล้าง ซึ่งการทดสอบสมบัติทางกายภาพของสิ่งทอนั้นมีหลายประการ เช่น การทดสอบเส้นด้าย สามารถทดสอบหาขนาด ความแข็งแรง และความไม่สม่ำเสมอ และในการทดสอบผืนผ้า สามารถทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด น้ำหนัก จำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาว ความหนา และความคงทนของสีต่อการซักล้าง เป็นต้น [5] ความจำเป็นในการทดสอบสมบัติของสิ่งทอ ก่อนการใช้งานนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สิ่งทอมีสมบัติที่เหมาะสมและสมเหตุสมผลต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้การทดสอบสิ่งทอจะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการสิ่งทอที่มีคุณภาพสูง ช่วยลดความเสี่ยง ปกป้องผลประโยชน์ทั้งของผู้ผลิต ผู้บริโภค สร้างจุดขายให้กับสินค้า เพิ่มความได้เปรียบในการแข่งขันทางการตลาด สร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัย ตลอดจนเป็นการกระตุ้นให้ผู้ประกอบการมีความมุ่งมั่นที่จะพัฒนาสินค้าให้มีคุณภาพ [6] และเมื่อมีการผลิตผืนผ้าชนิดใหม่เกิดขึ้น ควรนำผืนผ้าไปทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนทุกครั้ง เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

ดังนั้น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผ้ายัคเคนมินคร โดยเริ่มจากการพัฒนารูปแบบการทอด้วยเส้นด้ายพุ่ง 3 ชนิด คือ ฝ้าย พอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมเรยอน เส้นด้ายที่ย้อมให้สีแดงสีอินดิโก

มาทอเป็นผ้ายกนครด้วยลวดลายดอกพิกุล ที่สามารถทอได้เร็วขึ้นและทันสมัย สืบทอดคุณค่าด้านศิลปะของผ้ายกนครด้วยเส้นด้ายที่ใช้ผลิตผ้าเดนิม และทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้ายกเดนิมนคร จนกลายเป็นผืนผ้าชนิดใหม่ที่มีลวดลายผ้ายกนครและมีการผสมผสานเส้นด้ายที่ใช้ผลิตผ้าเดนิมเพื่อเพิ่มจุดเด่นให้กับผืนผ้า เช่น ผืนผ้ามีความแข็งแรง ทนต่อแรงดึงขาด แรงฉีกขาด และมีความคงทนของสีต่อการซักล้าง ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนารูปแบบผ้าเดนิมที่มีความทันสมัย ให้แก่ผู้บริโภค ควรค่าแก่การศึกษานูรักษ์ สืบทอดศิลปหัตถกรรมไทย และสามารถเพิ่มโอกาสหรือต่อยอดให้กับกลุ่มทอผ้าส่งผลิตภัณฑ์ผ้ายกเดนิมนครเข้าสู่ระบบโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอได้เช่นกัน เพื่อสนับสนุนผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ให้แก่ผู้บริโภคสู่แนวความคิดการพัฒนาเป็นผ้า เดนิมที่มีความร่วมสมัย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design (CRD)) โดยมีปัจจัยในการทดลอง คือ ชนิดของเส้นด้ายประกอบด้วย เส้นด้าย 3 ชนิด คือ ฟ้าย พอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมเรยอน เพื่อใช้เป็นเส้นด้ายพุ่งในการทอผ้า และมี Control คือ ผ้าเดนิมและเส้นด้ายที่ใช้ในการทอผ้าเดนิม และผ้ายกนครดั้งเดิมและเส้นด้ายที่ใช้ในการทอผ้ายกนครดั้งเดิม

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 วัตถุดิบ คือ เส้นด้ายยีนใช้เส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 1042.60 ดีเนียร์ และเส้นด้ายพุ่งจำนวน 3 ชนิด คือ ฝ้ายเบอร์ 1042.60 ดีเนียร์ พอลิเอสเตอร์เบอร์ 1104.70 ดีเนียร์ และฝ้ายผสมเรยอนเบอร์ 1069.30 ดีเนียร์ ทั้งเส้นด้ายยีนและเส้นด้ายพุ่งที่ย้อมให้มีเจดสีอินดิโก จากบริษัท ก้องเกียรติ เท็กซ์ไทล์ จำกัด ซึ่งเส้นด้ายยีนที่ใช้ทอผ้าทุกชนิดเป็นเส้นด้ายชนิดเดียวกัน ส่วนเส้นด้ายพุ่งในผ้าเดนิมแบบดั้งเดิม ใช้เส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 536.40 ดีเนียร์ และเส้นด้ายพุ่งในผ้ายกนครแบบดั้งเดิมใช้เส้นด้ายเรยอนเบอร์ 271.90 ดีเนียร์

1.2 อุปกรณ์ทอผ้า คือ โน ระวึง หลักคั่น ฟืม ตีนฟืม เขายกดอก เขายีเย็บ ลูกพัน ลูกกะหยก ลูกตุ้ง ผึง นัต ทรนกระสวย และดานเก การทอผ้ายกเดนิมนคร ใช้เครื่องทอผ้าแบบกึ่งกระตุก 4 ตะกอ หน้าผ้ากว้าง 42 นิ้ว โดยกลุ่มทอผ้าบ้านท่าเนียน ตำบลควนพั่ง อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

2. การเตรียมเส้นด้าย

2.1 การเตรียมเส้นด้ายยีน

- 2.1.1 เส้นด้ายยีนใช้เส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 1042.60 ดีเนียร์ เส้นด้ายที่ย้อมให้มีเจดสีอินดิโก จากบริษัท ก้องเกียรติ เท็กซ์ไทล์ จำกัด
- 2.1.2 กรอเส้นด้ายยีนให้อยู่ในหลอดด้ายพร้อมใช้งาน จำนวน 76 หลอด
- 2.1.3 เดินเส้นด้าย เพื่อให้เส้นด้ายจากหลอดมาเรียงต่อกัน และพร้อมสำหรับนำเส้นด้ายไปทอ
- 2.1.4 สอด핀ทิว นำเส้นด้ายยีนแต่ละเส้นสอดเข้าไปในช่องระหว่างฟันทิวหรือฟืม เพื่อใช้ในการทอ โดยบังคับให้เส้นด้ายยีนอยู่ห่างกันตามระยะที่ต้องการ
- 2.1.5 ทิวเส้นด้าย เพื่อให้ได้เส้นด้ายยีนจากหลอดมาเรียงต่อกัน

2.2.6 คัดลายเส้นด้ายยืน และเก็บตะกอล สำหรับการแยกเส้นด้ายยืนให้ขึ้นลงชิดกับเส้นด้ายพุ่ง เพื่อให้เห็นถึงลวดลายที่ชัดเจนขึ้น

2.2.7 ขึ้นเส้นด้ายยืน จำนวน 55 หลา

2.3 การเตรียมเส้นด้ายพุ่ง

2.3.1 เส้นด้ายพุ่งใช้เส้นด้ายจำนวน 3 ชนิด คือ ฝ้ายเบอร์ 1042.60 ดีเนียร์ พอลิเอสเทอร์เบอร์ 1104.70 ดีเนียร์ และฝ้ายผสมเรยอนเบอร์ 1069.30 ดีเนียร์ เส้นด้ายที่ย้อมให้มึนเจดสีอินดิโก จากบริษัท ก้องเกียรติ เท็กซ์ไทล์ จำกัด

2.3.2 กรอเส้นด้ายพุ่ง 3 ชนิด ให้อยู่ในหลอดด้ายพร้อมใช้งาน จำนวน 60 หลอด

3. การทอฝ้ายกเคนิมนคร

3.1 ทอลวดลายดอกพิกลุ โดยกดเครื่องแยกหมู่ตะกอล เส้นด้ายยืนชุดที่ 1 จะถูกแยกออก และเกิดช่องว่างสอดกระสวยด้วยเส้นด้ายพุ่งผ่าน สลับตะกอลชุดที่ 1 ยกตะกอลชุดที่ 2 สอดกระสวยเส้นด้ายพุ่ง กลับทำสลับกันไปเรื่อย ๆ

3.2 กระทบพันทวี (พิมพ์) เมื่อสอดกระสวยเส้นด้ายพุ่งกลับก็จะกระทบพันทวี เพื่อให้เส้นด้ายพุ่งแนบติดจะกันได้นื้อผ้าที่แน่นหนา

3.3 เก็บหรือม้วนผ้า เมื่อทอผ้าได้พอประมาณแล้วจะทำการม้วนผ้าเก็บในแกนม้วนผ้า โดยพ่อนแกนเส้นด้ายยืนให้คลายออกและปรับความตึงหย่อนใหม่ให้พอเหมาะก่อน

3.4 ทอฝ้ายกเคนิมนคร จำนวน 3 ผืน คือ ฝ้ายกเคนิมนครฝ้าย ฝ้ายกเคนิมนครพอลิเอสเทอร์ และฝ้ายกเคนิมนครฝ้ายผสมเรยอน

4. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฝ้ายกเคนิมนคร

4.1 สมบัติทางกายภาพเส้นด้าย

4.1.1 การทดสอบขนาดเส้นด้าย ตามมาตรฐาน ASTM D 1907 : 2001 ด้วยเครื่องทดสอบขนาดเส้นด้าย (SDL Atlas Wrap Reel Electronic)

4.1.2 การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้าย ตามมาตรฐาน ASTM D 2256 : 2002 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้าย (Uster Tensorapid) รุ่น 3 V 6.1

4.1.3 การทดสอบความไม่สม่ำเสมอของเส้นด้าย ตามมาตรฐาน ASTM D 1425 : 1996 ด้วยเครื่องทดสอบความไม่สม่ำเสมอของเส้นด้าย (Uster Evenness Tester) รุ่น 3 V 2.50

4.2 สมบัติทางกายภาพผืนผ้า

4.2.1 การทดสอบความแข็งแรงของผ้าต่อแรงดึงขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 5034 : 2009 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของผ้าต่อแรงดึงขาด (Tensile Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น Model 5566

4.2.2 การทดสอบความแข็งแรงของผ้าต่อแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 1424 : 2009 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของผ้าต่อแรงฉีกขาด (Elmendorf Tester)

- 4.2.3 การทดสอบน้ำหนักพื้นผ้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3776 : 2009 OPTION C ด้วยเครื่องทดสอบน้ำหนักพื้นผ้า (Sample Cutter)
- 4.2.4 การทดสอบจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาว ตามมาตรฐาน ASTM D 3775 : 2008 ด้วยเครื่องทดสอบจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาว (Pick Counter)
- 4.2.5 การทดสอบความหนาของผ้า ตามมาตรฐาน BASED ON ASTM D 1777 : 1996 (2007) ด้วยเครื่องทดสอบความหนาของผ้า (Cloth Thickness Gauge) รุ่น Model TH-103

4.3 สมบัติความคงทนของสีต่อการซักล้าง

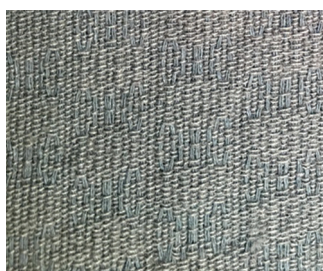
นำผ้ายกเดนิมนครที่ทอจากเส้นด้าย 3 ชนิด มาทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ตามมาตรฐานการทดสอบ AATCC TM 61 : 2010 Method 1A (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, 10 Stainless Steel Balls, เวลา 45 นาที) ด้วยเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Launder-Ometer Atlas)

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผ้ายกเดนิมนครที่ทอจากเส้นด้าย 3 ชนิด คือ ผ้ายกเดนิมนครฝ้าย ผ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์ ผ้ายกเดนิมนครฝ้ายผสมเรยอน มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM และ AATCC และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของผ้ายกเดนิมนครโดยวิธี Duncan, s New Multiple Range Test (Duncan)

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนารูปแบบการทอผ้ายกเดนิมนคร



(ก) ผ้ายกเดนิมนครฝ้าย

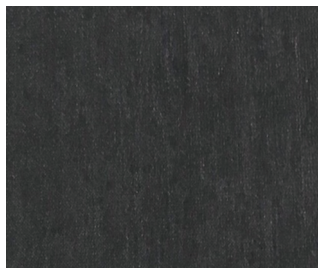


(ข) ผ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์

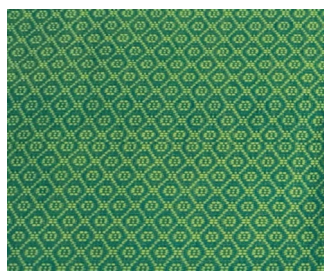
รูปที่ 1 ลักษณะลวดลายของผ้ายกเดนิมนคร



(ค) ผ้ายกเคนิมนครฝ้ายผสมเรยอน



(ง) ผ้าเคนิมแบบดั้งเดิม



(จ) ผ้ายกนครแบบดั้งเดิม

รูปที่ 1 ลักษณะลวดลายของผ้ายกเคนิมนคร (ต่อ)

จากรูปที่ 1 ผลการศึกษาผ้ายกเคนิมนครพบว่า ผ้ายกเคนิมนครพอลิเอสเตอร์ (ข) มีการพัฒนา รูปแบบการทอผ้ายกเคนิมนครมากที่สุด คือ มีลักษณะลวดลายดอกพิกลขนาดใหญ่และยกดอกสูงชัน เนื่องจากลวดลายผ้าทอยกดอกที่ใช้เส้นด้ายพุ่งที่มีขนาดใหญ่กว่าย้อมทำให้ลวดลายที่เกิดจากเส้นด้ายพุ่งที่ลอยบนพื้นผ้ามากกว่า เนื้อผ้ามีความหนา และมีความละเอียด ประณีตในการทอ รองลงมาคือ ผ้ายกเคนิมนครฝ้าย (ก) และฝ้ายผสมเรยอน (ค) มีลักษณะลวดลายดอกพิกลขนาดปานกลาง และเนื้อผ้ามีความหนา เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเคนิม (ง) และผ้ายกนครแบบดั้งเดิม (จ) พบว่าผ้ายกเคนิมนครพอลิเอสเตอร์ (ข) มีการพัฒนารูปแบบการทอผ้ายกเคนิมนครที่เด่นชัดมากกว่า มีการผสมผสานการพัฒนารูปแบบการทอด้วยลวดลายดอกพิกลที่เหมาะสมและชัดเจน

2. ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้ายกเคนิมนคร

2.1 เส้นด้ายของผ้ายกเคนิมนคร การทดสอบขนาดเส้นด้าย การทดสอบความแข็งแรง ต่อแรงดึงขาดของเส้นด้าย และการทดสอบความไม่สม่ำเสมอของเส้นด้าย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ขนาดเส้นด้ายพุ่งของผ้ายกเคนิมนครพบว่า เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 1104.70 ดีเนียร์ รองลงมาคือ เส้นด้ายฝ้ายผสมเรยอนมีขนาด 1069.30 ดีเนียร์ ซึ่งพบว่า เส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นด้ายที่มีขนาดที่ใหญ่ Teeraprasert, S. [7] กล่าวว่า เส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ 280 - 600 ดีเนียร์ เส้นด้ายที่มีขนาดกลางมีขนาดตั้งแต่ 100 - 180 ดีเนียร์ และเส้นด้ายที่มีขนาดเล็กมีขนาดตั้งแต่ 50 - 90 ดีเนียร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นด้ายผ้าเคนิมและเส้นด้ายผ้ายกนครพบว่า เส้นด้ายพุ่งทั้ง 3 ชนิด มีขนาดใหญ่กว่า 2 - 3 เท่า โดยขนาดเส้นด้ายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายฝ้ายกเดนิมนคร

ชนิดของเส้นด้ายพุ่ง	ขนาด (ดีเนียร์) *	ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด (กรัมต่อดีเนียร์) *	ความไม่สม่ำเสมอ (ร้อยละ) ^{ns}
ฝ้าย	1042.60 ^c	1.46 ^{ab}	9.14
พอลิเอสเตอร์	1104.70 ^a	1.87 ^a	11.20
ฝ้ายผสมเรยอน	1069.30 ^b	1.12 ^b	8.58
เส้นด้ายผ้าเดนิม (Control)	536.40	1.49	10.52
เส้นด้ายฝ้ายกนคร (Control)	271.90	4.35	8.02

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

ในด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายพบว่า เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์มีความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 1.87 กรัมต่อดีเนียร์ รองลงมาคือ เส้นด้ายฝ้ายมีความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด 1.46 กรัมต่อดีเนียร์ ซึ่งพบว่าเส้นด้ายพุ่งทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูง เมื่อเปรียบเทียบเส้นด้ายผ้าเดนิมพบว่า เส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงเหมือนกัน และเปรียบเทียบกับเส้นด้ายฝ้ายกนครพบว่า เส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงกว่า โดยความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเส้นด้ายพอลิเอสเตอร์กับเส้นด้ายฝ้ายผสมเรยอนแตกต่างกัน ในขณะที่เส้นด้ายฝ้าย เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์ และเส้นด้ายฝ้ายผสมเรยอนไม่แตกต่างกัน

ในด้านความไม่สม่ำเสมอของเส้นด้ายพบว่า เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์มีความไม่สม่ำเสมอมากที่สุด โดยมีร้อยละ 11.20 รองลงมาคือ เส้นด้ายฝ้ายร้อยละ 9.14 ซึ่งพบว่าเส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด มีปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดในเส้นด้ายจนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ Hattayanant, A. [8] กล่าวไว้ว่า ความไม่สม่ำเสมอและความไม่สมบูรณ์แบบของเส้นด้าย อาจกำหนดได้จากขนาดการเปลี่ยนแปลงในเส้นด้าย ซึ่งเกิดขึ้นได้จากกระบวนการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นด้ายผ้าเดนิมและฝ้ายกนครพบว่า เส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีความไม่สม่ำเสมอของเส้นด้ายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.2 พื้นผิวของฝ้ายกเดนิมนคร การทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาด และการทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 ความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดในแนวเส้นด้ายยืนพบว่า ฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายมีค่าเฉลี่ยมากที่สุด 597.80 นิวตัน รองลงมาคือ ฝ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์โดยมีค่าเฉลี่ย 581.63 นิวตัน และความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดในแนวเส้นด้ายพุ่งพบว่า ฝ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด 861.49 นิวตัน รองลงมาคือ ฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายโดยมีค่าเฉลี่ย 635.59 นิวตัน ซึ่งพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดในแนวยืนและแนวพุ่งสูง เมื่อเปรียบเทียบซึ่งจะเห็นได้ว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด ค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายแนวยืนและแนวพุ่งมีค่าน้อยกว่าผ้าเดนิม และผ้าทั้ง 3 ชนิด ค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายแนวยืนและแนวพุ่งมีค่าเท่ากับฝ้ายกนคร และผ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่า

ความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดทั้งเส้นด้ายแนวยืนและแนวนพุงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของผ้ายักเคนิมนคร

ชนิดของพื้นผ้า	ความแข็งแรงของผ้าทอ		ความแข็งแรงของผ้าทอ	
	ต่อแรงดึงขาด		ต่อแรงฉีกขาด	
	เส้นด้ายแนวยืน	เส้นด้ายแนวนพุง	เส้นด้ายแนวยืน	เส้นด้ายแนวนพุง
	(นิวตัน) *	(นิวตัน) *	(นิวตัน) ^{ns}	(นิวตัน) ^{ns}
ผ้ายักเคนิมนครฝ้าย	597.80 ^a	635.59 ^b	>125	>125
ผ้ายักเคนิมนครพอลิเอสเตอร์	581.63 ^b	861.49 ^a	>125	>125
ผ้ายักเคนิมนครฝ้ายผสมเรยอน	576.64 ^b	547.33 ^c	>125	>125
ผ้าเคนิม (Control)	760.35	792.42	45.31	60.80
ผ้ายักนคร (Control)	551.30	814.22	29.81	61.59

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

ในด้านความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาดพบว่า ผ้ายักเคนิมนครฝ้ายพอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมเรยอน มีค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาดในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุงมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 125 นิวตัน ซึ่งพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด มีความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาดในแนวด้ายยืน และแนวด้ายพุงสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผ้ากับเคนิมและผ้ายักนครพบว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงฉีกขาดต่อเส้นด้ายแนวยืนและแนวนพุงมากกว่า และมีค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

นอกจากนี้สมบัติในด้านน้ำหนักผ้าจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวและความหนาผ้าได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของผ้ายักเคนิมนคร

ชนิดของพื้นผ้า	น้ำหนัก (กรัมต่อตารางเมตร) *	ความหนา (มิลลิเมตร) ^{ns}	จำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาว	
			เส้นด้ายแนวยืน (เส้นต่อตารางนิ้ว) ^{ns}	เส้นด้ายแนวนพุง (เส้นต่อตารางนิ้ว) ^{ns}
ผ้ายักเคนิมนครฝ้าย	413.16 ^{ab}	1.55	41	44
ผ้ายักเคนิมนครพอลิเอสเตอร์	424.51 ^a	1.60	42	41
ผ้ายักเคนิมนครฝ้ายผสมเรยอน	412.39 ^b	1.46	41	39
ผ้าเคนิม (Control)	346.78	0.65	93	57
ผ้ายักนคร (Control)	206.35	0.76	63	95

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

จากตารางที่ 3 น้ำหนักผ้าพบว่า ฟ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์มีน้ำหนักมากที่สุด คือ มีค่าเฉลี่ย 424.51 กรัมต่อตารางเมตร รองลงมาคือ ฟ้ายกเดนิมนครฝ้ายมีค่าเฉลี่ย 413.16 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มของผ้าที่มีน้ำหนักมาก Teeraprasert, S. [7] กล่าวไว้ว่า ผ้าที่มีน้ำหนักมาก คือ ผ้าที่มีน้ำหนักมากกว่า 475 กรัมต่อตารางเมตร ผ้าที่มีน้ำหนัก คือ ผ้าที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 300 - 375 กรัมต่อตารางเมตร ผ้าที่มีน้ำหนักปานกลาง คือ ผ้าที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 170 - 240 กรัมต่อตารางเมตร ผ้าที่มีน้ำหนักเบา คือ ผ้าที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 70 - 100 กรัมต่อตารางเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเดนิม พบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด มีน้ำหนักมากกว่า ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับฝ้ายกนครพบว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีน้ำหนักมากกว่า 2 เท่า โดยน้ำหนักของฝ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์กับฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายผสมเรยอนแตกต่างกัน ในขณะที่น้ำหนักของฝ้ายกเดนิมนครฝ้าย ฝ้ายกเดนิมนคร พอลิเอสเตอร์ และฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายผสมเรยอนไม่แตกต่างกัน

ในด้านความหนาผ้าพบว่า ฟ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์มีความหนามากที่สุด คือ มีค่าเฉลี่ย 1.60 มิลลิเมตร รองลงมาคือ ฟ้ายกเดนิมนครฝ้ายมีความหนา 1.55 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มผ้ามีความหนา Teeraprasert, S. [7] กล่าวไว้ว่า ผ้าที่มีความหนา มีความหนาดังแต่ 0.47 มิลลิเมตร ผ้าที่มีความหนาน้อยกว่ามีความหนาดังแต่ 0.23 - 0.46 มิลลิเมตร ผ้าที่มีความหนาน้อย มีความหนาดังแต่ 0.20 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเดนิมและฝ้ายกนครพบว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีความหนามากกว่า 2 เท่า และมีความหนาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ในด้านจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในแนวเส้นด้ายยืนพบว่า ฟ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด 42 เส้นต่อตารางนิ้ว รองลงมาคือ ฟ้ายกเดนิมนครฝ้ายและฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายผสมเรยอน โดยมีค่าเฉลี่ย 41 เส้นต่อตารางนิ้ว และจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในแนวเส้นด้ายพุ่ง พบว่า ฟ้ายกเดนิมนครฝ้าย มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด 44 เส้นต่อตารางนิ้ว รองลงมาคือ ฟ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์ โดยมีค่าเฉลี่ย 41 เส้นต่อตารางนิ้ว ซึ่งพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด มีจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในเส้นด้ายทั้งแนวยืนและแนวพุ่งมีจำนวนเส้นด้ายต่อตารางนือน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเดนิมและฝ้ายกนครพบว่า ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในเส้นด้ายทั้งแนวยืนและแนวพุ่งมากกว่า และผ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในเส้นด้ายทั้งแนวยืนและแนวพุ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.3 ความคงทนของสีต่อการซักล้างของฝ้ายกเดนิมนคร การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยความคงทนของสีต่อการซักล้างของฝ้ายกเดนิมนคร

ชนิดของพื้นผ้า	สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ) ^{NS}	สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)					
		Acetate ^{NS}	Cotton ^{NS}	Nylon ^{NS}	Polyester ^{NS}	Acrylic ^{NS}	Wool ^{NS}
ฝ้ายกเดนิมนครฝ้าย	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
ฝ้ายกเดนิมนครพอลิเอสเตอร์	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
ฝ้ายกเดนิมนครฝ้ายผสมเรยอน	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

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

จากตารางที่ 4 ความคงทนของสีต่อการซักล้างพบว่า ผ้าใยเคนิมนครฝ้าย พอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมเรยอน มีการเปลี่ยนแปลงของสีอยู่ในระดับ 4.5 คือ มีสีซีดจางลงเล็กน้อย ซึ่ง Teeraprasert, S. [7] กล่าวว่าไว้ว่า ในการเปลี่ยนแปลงระดับของสี ระดับ 5 หมายถึง สีไม่เปลี่ยน ระดับ 4 หมายถึง สีเปลี่ยนเล็กน้อย ระดับ 3 หมายถึง สีเปลี่ยนปานกลาง ระดับ 2 หมายถึง สีเปลี่ยนมาก ระดับ 1 หมายถึง สีเปลี่ยนมากที่สุด

ในด้านการตกติดสีบนผ้าขาวพบว่า อะซิเตท (Acetate) ฝ้าย (Cotton) ไนลอน (NYLON) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) อะคริลิก (Acrylic) และขนสัตว์ (Wool) ในผ้าใยเคนิมนครฝ้าย พอลิเอสเตอร์ ฝ้ายผสมเรยอน มีสีตกติดของสีบนผ้าขาวอยู่ในระดับ 4.5 คือ มีสีตกติดน้อย Teeraprasert, S. [7] กล่าวว่าไว้ว่า การตกติดของสีบนผ้าขาว ระดับ 5 หมายถึง สีไม่ตก ระดับ 4 หมายถึง สีตกติดน้อย ระดับ 3 หมายถึง สีตกปานกลาง ระดับ 2 หมายถึง สีตกติดมาก ระดับ 1 หมายถึง สีตกติดมากที่สุด และพบว่าผ้าทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงของสีและสีตกติดบนผ้าขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

การอภิปรายผล

การพัฒนารูปแบบการทอผ้าใยเคนิมนคร

การพัฒนารูปแบบการทอผ้าใยเคนิมนครด้วยเส้นด้ายพุ่ง 3 ชนิด จะได้ผ้าใยเคนิมนครที่ทอจากเส้นด้าย 3 ชนิด คือ ผ้าใยเคนิมนครฝ้าย พอลิเอสเตอร์ และฝ้ายผสมเรยอน ทอด้วยลวดลายดอกพิกลุที่มีความประณีต เอกลักษณะเฉพาะของท้องถิ่น สืบทอดภูมิปัญญาตั้งแต่โบราณ ทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ที่มีลวดลายยกนูนสูงชันบนผ้า เนื่องจากเมื่อนำผ้าใยเคนิมนครมาพัฒนารูปแบบการทอด้วยเส้นด้ายที่ผลิตผ้าเคนิมซึ่งมีขนาดใหญ่ จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันนั้น ผ้าที่ทอด้วยเส้นด้ายพอลิเอสเตอร์ให้สมบัติด้านความแข็งแรงและกายภาพที่สูงกว่าผ้าจากเส้นด้ายฝ้ายและฝ้ายผสมเรยอน ซึ่งสอดคล้องกับ Jankelad, M. [9] เส้นใยพอลิเอสเตอร์มีความเหนียวเท่ากับ 4.5 - 5.0 กรัมต่อดีเนียร์ เส้นใยฝ้ายมีความเหนียวเท่ากับ 3.0 - 5.0 กรัมต่อดีเนียร์ และเส้นใยเรยอนมีความเหนียวเท่ากับ 2 กรัมต่อดีเนียร์ ส่งผลให้สมบัติของผ้าใยเคนิมพอลิเอสเตอร์มีค่าสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงกว่าผ้าชนิดอื่น แม้ว่าเส้นด้ายที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกัน จึงเกิดการผสมผสานผ้าทอรูปแบบใหม่เกิดขึ้น โดยทั่วไปผ้าเคนิมมีโครงสร้างที่แตกต่างกันแล้วแต่ลายผ้าและความหนาแน่นของเนื้อผ้าที่ต้องการ เช่น ลายสอง ลายคว้น ลายลูกฟูก และลายกางปลา [3] ลักษณะลวดลายของผ้าจะเรียบเหมือนกันทั้งผืน และผลการศึกษาผ้าใยเคนิม ผ้าใยเคนิมมีลักษณะเป็นผ้าที่มีลายนูนเด่นกว่าส่วนที่เป็นพื้นผ้า การทอยกดอกจะแทรกอยู่ในเนื้อผ้าลายชัดเกิดเป็นผ้ายกดอกที่มีลายชัดอยู่ในตัว [2] จึงส่งผลให้ผ้ามีน้ำหนักที่หนักมาก มีความหนาเป็น 2 เท่า กว่าผ้าเคนิมและผ้าใยเคนิมแบบดั้งเดิม เนื่องจากใช้เส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ในการทอ เพื่อให้เห็นลวดลายดอกพิกลุที่ชัดเจนขึ้น ดังนั้น เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนารูปแบบผ้าเคนิมที่มีความทันสมัยให้แก่ผู้บริโภค สามารถนำมาพัฒนาในรูปแบบการผลิตเป็นกางเกงยีนส์สูทระบบอุตสาหกรรมไทย และในด้านของกลุ่มทอผ้า สามารถนำมาพัฒนาในการสร้างอาชีพ เพื่อเพิ่มรายได้ ต่อยอดในส่วนของการพัฒนาลวดลายของผ้าได้เพื่อให้ผ้าใยเคนิมนครนั้นมีลวดลายที่หลากหลายและสามารถเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคต่อไป อนุรักษ์ภูมิปัญญาการทอผ้าพื้นเมือง และสืบทอดภูมิปัญญาท้องถิ่นให้คงอยู่สืบต่อไป

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้ายัคเดนิมนคร

เส้นด้ายของผ้ายัคเดนิมนคร เส้นด้ายทั้ง 3 ชนิด เป็นเส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ถึง 2 เท่า ของเส้นด้ายผ้าเดนิมและเส้นด้ายฝ้ายกนคร ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายสูง Vonkglam, S. [10] กล่าวว่า ความแข็งแรงของเส้นด้าย ความทนทานต่อแรงดึงของเส้นด้ายเดี่ยว (Single Yarn Strength) หรือความทนทานต่อแรงดึงของเส้นด้ายเป็นกลุ่ม (Lea Strength) การใช้งานเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงต่ำ จะถูกนำไปใช้งานที่ทนทานต่อแรงดึงน้อย การใช้งานเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงสูง จะถูกนำไปใช้งานที่ทนทานต่อแรงดึงสูง และการใช้งานเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงสูงมาก จะถูกนำไปใช้งานที่ทนทานต่อแรงดึงสูงมาก จึงเหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นผ้าเดนิม เพราะมีเนื้อหนาเกิดจากการทอด้วยเส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้ผ้ามีความแข็งแรง และทนทาน

ผ้าของผ้ายัคเดนิมนคร ผ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาด ความแข็งแรงของผ้าทอต่อฉีกขาดสูง จึงทำให้ผ้าทอมีความแข็งแรงสูง Sonthisombat, A. [11] กล่าวว่า การทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาด คือ ผ้าชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความคงทนต่อแรงดึงสูง จะมีความแข็งแรงมากกว่าผ้าชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความคงทนต่อแรงดึงต่ำ และการทดสอบความแข็งแรงของผ้าทอด้านแรงฉีกขาด คือ ผ้าชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความคงทนต่อการฉีกขาดสูง จะมีความแข็งแรงมากกว่าผ้าชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความคงทนต่อการฉีกขาดต่ำ ผ้ามีน้ำหนักที่น้ำหนักมาก มีความหนาเป็น 2 เท่า ของผ้าเดนิมและฝ้ายกนคร เกิดจากมีลวดลายที่ยกนูนสูงขึ้น ส่งผลมาจากเส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาวในเส้นด้ายทั้งแนวยืนและแนวพุ่งมีจำนวนเส้นด้ายต่อตารางนิ้วน้อย ส่งผลให้ผิวสัมผัสค่อนข้างหยาบ Chonsakorn, S. [12] กล่าวว่า จำนวนเส้นด้ายบนผืนผ้าส่วนใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเส้นด้ายยืนจะมีมากกว่าเส้นด้ายพุ่งอีกทั้งเส้นด้ายยืนมีขนาดเล็กกว่าเส้นด้ายพุ่ง ซึ่งทั้งจำนวนของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งต่อตารางนิ้วมีน้อย เส้นด้ายจึงมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งผลทำให้ผิวสัมผัสค่อนข้างหยาบ เนื่องจากเกิดการขัดกันของเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน

ความคงทนของสีต่อการซักล้างของผ้ายัคเดนิมนคร ผ้าทั้ง 3 ชนิด สีเปลี่ยนจากเดิมอยู่ที่ระดับ 4.5 คือ สีเปลี่ยนน้อย และสีตกติดผ้าขาว อะซิเตท (Acetate) ฝ้าย (Cotton) ไนลอน (Nylon) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) อะคริลิก (Acrylic) และขนสัตว์ (Wool) อยู่ในระดับ 4.5 คือ สีตกติดน้อย การซักล้างเป็นการเพิ่มเอกลักษณ์ของผ้าเดนิมอีกด้านหนึ่งด้วย เพื่อช่วยให้สีซีดจางลงและเห็นรอยตะเข็บได้ชัดเจนขึ้นหรือทำการตกแต่งให้ผ้านุ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าเดนิมพบว่า มีการเปลี่ยนของสีและสีตกติดบนผ้าขาวอยู่ในระดับที่ดีกว่า และผ้าที่พัฒนาขึ้นมีการซีดจางและสีตกน้อยกว่าผ้าเดนิม แสดงว่าเส้นด้ายผ่านการย้อมสีมีความคงทนต่อการซักดี แต่อย่างไรก็ตาม การซีดจางเนื่องจากการซักล้างเป็นการเพิ่มเอกลักษณ์ให้กับผ้าเดนิม ทำให้เห็นรอยตะเข็บได้ชัดเจน ผ้ามีความนุ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผ้าที่ทอจากเส้นด้ายย้อมสีทั้ง 3 ชนิดนี้ จึงอาจไม่ใช้ลักษณะการซีดจางแบบฝ้ายยีนส์ที่ชัดเจน แต่มีข้อดีคือได้ผ้าที่มีสมบัติความคงทนต่อการซักล้างดี ไม่เกิดปัญหาสีตกติดเปื้อนผ้าที่ซักร่วมกันได้ง่าย

ดังนั้น การพัฒนารูปแบบการทอฝ้ายกนคร จึงเหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนารูปแบบผ้าเดนิมที่มีความทันสมัยให้แก่ผู้บริโภค และการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้ายัคเดนิมนคร ทั้ง 3 ชนิด มีคุณสมบัติเด่น มีความแข็งแรงของผ้าทอต่อแรงดึงขาดและแรงฉีกขาดสูง มีน้ำหนักมาก มีความคงทนของสีต่อการซักล้าง การเปลี่ยนของสีเล็กน้อย และสีตกติดบนผ้าขาวน้อย แสดงว่าเส้นด้ายผ่านการย้อมสีมีความคงทนต่อการซักดี จึงมีคุณค่าทางด้าน การศึกษาอนุรักษ์ สืบทอดศิลปหัตถกรรมไทย สามารถ

เพิ่มโอกาสหรือต่อยอดให้กับกลุ่มทอผ้า เพื่อส่งเสริมผลิตภัณฑ์พื้นผ้ายกเคนิมนครเข้าสู่ระบบโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอได้ต่อไป

บทสรุป

จากการพัฒนารูปแบบการทอฝ้ายกเคนิมนครด้วยเส้นด้ายพุ่ง 3 ชนิด มาทอด้วยลวดลายฝ้ายกเคนิมนครจนกลายเป็นพื้นผ้าชนิดใหม่ที่มีเอกลักษณ์ของการทอฝ้ายกเคนิมนคร และมีความละเอียดประณีตในการทอ ส่งผลให้ผลิตได้รวดเร็วขึ้น และเป็นการสืบทอดศิลปะการทอฝ้ายกเคนิมนคร และอีกทั้งยังช่วยพัฒนารูปแบบผ้าเคนิมนครและลวดลายเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของฝ้ายกเคนิมนครทั้ง 3 ชนิด มีความแข็งแรงของผ้าทนต่อแรงดึงขาด และแรงฉีกขาดสูง มีน้ำหนักมาก มีความหนาเป็น 2 เท่า ของผ้าเคนิมนครและฝ้ายกเคนิมนครแบบดั้งเดิม ความคงทนของสีต่อการซักล้าง การเปลี่ยนของสีเล็กน้อยและสีตกติดบนผ้าขาวน้อย จึงเหมาะสมสำหรับตัดกระโปรง สูท เสื้อคลุม เสื้อแจ็คเก็ต กางเกงยีนส์ และผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฝ้ายกเคนิมนครพบว่า ฝ้ายกเคนิมนครสามารถนำไปพัฒนาเป็นกางเกงยีนส์ในรูปแบบที่ทันสมัยขึ้น ควรนำฝ้ายกเคนิมนครไปพัฒนาในการสร้างอาชีพ เพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่กลุ่มทอผ้า เพื่ออนุรักษ์ภูมิปัญญาการทอผ้าพื้นเมือง และสืบทอดภูมิปัญญาท้องถิ่นให้คงอยู่สืบต่อไป

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป การทอฝ้ายกเคนิมนคร ควรได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานราชการ หรือหน่วยงานท้องถิ่น ให้มีส่วนร่วมอนุรักษ์การพัฒนาเป็นพื้นผ้าที่มีความร่วมสมัย และควรมีการพัฒนากระบวนการการทอสู่ระบบอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เพื่อสนับสนุนให้ฝ้ายกเคนิมนครมีกำลังการผลิตที่สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก บริษัท ก้องเกียรติ เท็กซ์ไทล์ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์เส้นด้าย กลุ่มทอผ้าบ้านท่าเนียบ จังหวัดนครศรีธรรมราช ให้ความอนุเคราะห์ในการทอฝ้ายกเคนิมนคร และสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

References

- [1] Wongpatham, W. (2001). **Opinions of Lecturers in Rajabhat Institute Nakhon Si Thammarat Toward the Pha - Yok Muang Nakhon**. Master of Home Economics Major Field Home Economics Department of Home Economics Kasetsart University

- [2] The Faculty of Textile Industry. Rajamangala University of Technology Krungthep. (2012). **Textile of Thailand : An intellectual Heritage**. Bangkok: A.P. Graphic Design & Printing Co., Ltd.
- [3] Choopong, A. (2005). **Factors Affecting Jeans Buying Behavior of Consumers in Bangkok Metropolitan Area**. Master Degree in Marketing Faculty of Business Administration Srinakharinwirot University
- [4] Promjinda, V. (2001). **A Study of Consumer Behavior on Jeans in Bangkok Metropolis**. Master of Organizational Management and Administration Faculty of Business Administration Dhurakij Pundit University
- [5] Khongyai, T. (2011). **A Study on Properties of Plain Cotton Woven Fabric After Wash by Front load and Top Washing Machine**. Master of Engineering Textile Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- [6] Intertek. (2014). **Testing**. Access (18 December 2017). Available (<http://www.intertek.co.th/testing/>)
- [7] Teeraprasert, S. (2014). **Material Testing**. Access (5 December 2017). Available (http://www.textiles.rmutk.ac.th/images/textile_raw_material_control/textile_raw_material_control.pdf)
- [8] Hattayanant, A., Soyaya, B., and Theeramongkol, P. (2013). **Development of Textile in SLUB Yarn Fabric from Textile Material Waste**. Research from Faculty of Home Economics Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [9] Jankedlaed, M. (1998). **Basic Science of Textile**. Bangkok: The Thai Home Economics Association Under the Royal Patronage of Her Majesty the Queen.
- [10] Vonkglam, S. (2010). **A Study of Properties of Knitted Fabric Made from Silk and Polyester Twisted Yarn**. Master of Engineering Textile Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- [11] Sonthisombat, A. (2012). **Textile Chemical Processing**. Pathum Thani: Faculty of Engineering Rajamangala Institute of Technology.
- [12] Chonsakorn, S. (2012). **Textile Structure and Accessory Analysis**. Access (5 December 2017). Available (<https://www.het.rmutt.ac.th/?p=5909>)



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการพยากรณ์สำหรับตัวแบบของ
ตัวแปรเดียวกับข้อมูลที่มีฤดูกาล

Comparison of the Efficiency of Forecasting Techniques for Univariate Models with Seasonal Data

กฤตาพร พัชรสุภา^{1*}

Received: May, 2018; Accepted: June, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการพยากรณ์สำหรับตัวแบบของตัวแปรเดียว (Univariate Model) กับข้อมูลที่มีฤดูกาล (Seasonal Data) ซึ่งได้แก่ เทคนิคนาอิวสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (Seasonal Naïve Forecasting: SNF) เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average: WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (Winters' Exponential Smoothing: WES) มาสร้างเป็นตัวแบบในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตาก โดยใช้ข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2559 จากสำนักงานเกษตรจังหวัดตาก และวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ด้วยค่าน้อยที่สุดจากร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (Mean Absolute Deviation: MAD) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (Mean Squared Deviation: MSD) ผลการวิจัยพบว่าจากเทคนิคการพยากรณ์ทั้งหมดที่ได้ศึกษา เทคนิคนาอิวสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ให้ความถูกต้องของผลพยากรณ์สูงที่สุดลำดับถัดมา คือ เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) ให้ความถูกต้องของผลพยากรณ์น้อยที่สุด

คำสำคัญ : การพยากรณ์; ตัวแบบของตัวแปรเดียว; ข้อมูลที่มีฤดูกาล; ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโค

¹ Faculty of Business Administration and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak

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

Abstract

The objective of this research was to compare the efficiency of three forecasting techniques for univariate models with seasonal data. The three techniques: Seasonal Naïve Forecasting (SNF), Weighted Moving Average (WMA), and Winters' Exponential Smoothing (WES) were used to construct forecasting models for the price of field corn in Tak province. The data gathered from Tak Provincial Agricultural Extension Office during January 2011 to December 2016. The forecast accuracies were compared by minimizing the Mean Absolute Percentage Error (MAPE), the Mean Absolute Deviation (MAD), and the Mean Squared Deviation (MSD). Research finding indicated that among forecasting techniques had been studied, the most efficient technique was the Seasonal Naïve Forecasting (SNF), the Weighted Moving Average (WMA), and Winters' Exponential Smoothing (WES), respectively.

Keywords: Forecasting; Univariate Model; Seasonal Data; Autocorrelation Function

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยอยู่ในยุคเศรษฐกิจดิจิทัล (Digital Economy) ที่มีเป้าหมายที่สำคัญ คือ เปลี่ยนรูปภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และบริการดั้งเดิมของไทย โดยใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ และเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคม มาช่วยพัฒนาธุรกิจหรืออุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในระดับสากล [1] แต่ภาคเกษตรกรรมซึ่งเป็นรากฐานของประเทศไทยและเป็นอาชีพหลักของคนไทยตั้งแต่ดั้งเดิมมาจนถึงปัจจุบัน มักประสบปัญหาราคาขายของผลผลิตตกต่ำอยู่เสมอ ดังนั้นการนำวิธีการพยากรณ์ซึ่งเป็นวิธีการทำนายหรือการประมาณค่าในช่วงเวลาหนึ่งล่วงหน้า จากข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่มีอยู่หรือข้อมูลในอดีต [2] จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนและตัดสินใจในการดำเนินงานทางด้านเกษตรกรรม โดยเฉพาะในเรื่องการวางแผนการเพาะปลูกของเกษตรกร

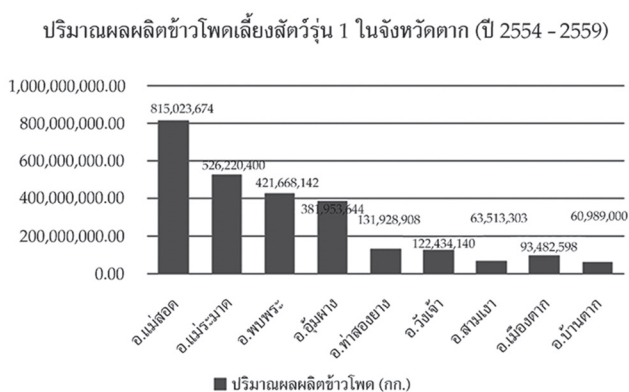
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของประเทศไทย และมีส่วนช่วยส่งเสริมการผลิตปศุสัตว์ในประเทศเป็นอย่างมาก ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตได้ 4,058,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2559 ทำให้ติดหนึ่งในสิบของประเทศที่มีการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากที่สุดในโลก จากผลผลิตทั้งหมด 1,039,064,000 ตัน [3] และจังหวัดตากก็เป็นแหล่งผลิตที่ใหญ่ติดลำดับหนึ่งในห้าของประเทศไทย ที่สามารถผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้ถึง 349,920 ตัน ในปี พ.ศ. 2559 [3] ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจอันดับต้น ๆ ที่สร้างรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกพืชไร่ในจังหวัดตาก จึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากตัวหนึ่งของจังหวัดตาก [4] ด้วยเช่นกัน และจังหวัดตากก็ประสบปัญหาราคาขายต่อกิโลกรัมของเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตกต่ำจนเกิดวิกฤตการณ์ร้องเรียนจากเกษตรกรผู้ปลูกอยู่หลายครั้ง [5] - [7] หากมีตัวแบบการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากที่ดี จะสามารถทำนายหรือประมาณการราคาขายต่อกิโลกรัมของเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้แม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นสารสนเทศที่มีประโยชน์ต่อการวางแผนและตัดสินใจในการดำเนินการเพาะปลูกและการวางแผนการขาย เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและได้ราคาขาย

ที่ตื้นเขินเป็นที่น่าสนใจ แก่เกษตรกรผู้ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตาก และยังเป็นสารสนเทศให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งในระดับองค์กร จังหวัด และประเทศ ซึ่งสามารถนำไปบริหารจัดการพื้นที่เพาะปลูกในระดับจังหวัดและภูมิภาค เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างกำลังการผลิตและตลาดที่รองรับ รวมทั้งยังสามารถเป็นต้นแบบให้การพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่อื่น ๆ ได้อีกด้วย

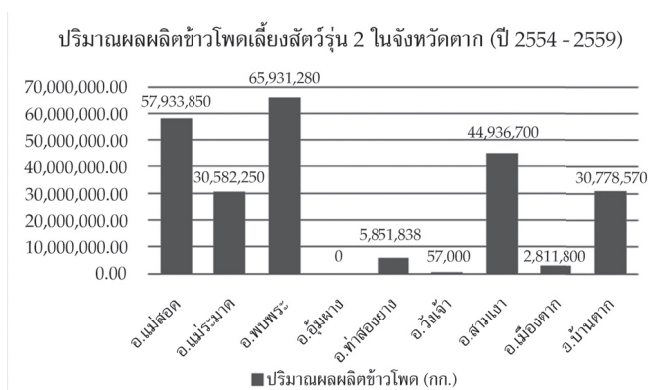
ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการพยากรณ์ ทางด้านการพยากรณ์เชิงปริมาณ (Quantitative Forecasting) ประเภทตัวแบบของตัวแปรเดียว (Univariate Model) โดยการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) ที่มีฤดูกาล (Seasonal Variation) เนื่องจากเทคนิคเหล่านี้สามารถประมวลผลได้รวดเร็ว มีการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก และใช้สถิติของข้อมูลย้อนหลังอย่างน้อย 1 - 3 ปี จึงสามารถให้ผลการพยากรณ์ได้ทันเหตุการณ์มี 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) [2] ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) [8] และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) [2], [9] มาสร้างเป็นตัวแบบในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตาก ด้วยข้อมูลราคาขายเมล็ดของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ที่มีความชื้นไม่เกิน 14.5 % ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2559 ซึ่งได้มาจากสำนักงานเกษตรจังหวัดตาก และวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ โดยวิธีร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) [2], [10] วิธีค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) [9], [11] และวิธีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) [11] เพื่อหาเทคนิคการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

วิธีการทดลอง

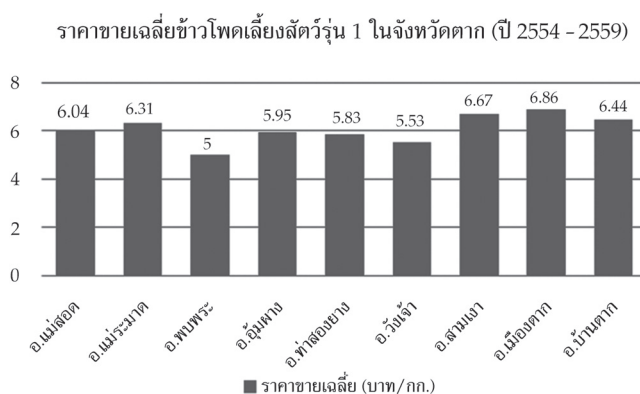
ประเทศไทยสามารถปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้ 2 รุ่น คือ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 จะเริ่มทำการเพาะปลูกตั้งแต่ 1 มีนาคม - 31 ตุลาคม และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 จะเริ่มเพาะปลูกตั้งแต่ 1 พฤศจิกายน - 28 กุมภาพันธ์ ของปีถัดไป ส่วนใหญ่นิยมปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์ลูกผสม ซึ่งมีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 100 - 120 วัน สำหรับฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 จะเริ่มตั้งแต่ 1 กรกฎาคม - 28 กุมภาพันธ์ ของปีถัดไป และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 จะเริ่มตั้งแต่ 1 มีนาคม - 30 มิถุนายน จังหวัดตากมีการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งสองรุ่นและมีปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 มีปริมาณมากกว่ารุ่น 2 สังเกตได้จากปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ที่น้อยที่สุดอยู่ที่อำเภอบ้านตาก ผลิตได้ 60,989,000 กิโลกรัม และปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ที่มากที่สุดอยู่ที่อำเภอพบพระ ผลิตได้ 65,931,280 กิโลกรัม ซึ่งอำเภอพบพระมีปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 อยู่ที่ 421,668,142 กิโลกรัม และราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 โดยส่วนใหญ่จะสูงกว่ารุ่น 1 เล็กน้อย ตามรูปที่ 3 และ 4 สังเกตได้จากราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ในอำเภอพบพระ อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า อำเภอสามเงา อำเภอเมืองตาก และอำเภอบ้านตาก มีราคาขายต่อกิโลกรัมที่สูงกว่า ดังนี้ 5.46 5.86 6.25 7.06 7.17 และ 6.85 บาท ตามลำดับ ซึ่งราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ใน 6 อำเภอดังกล่าวมีราคาขายต่อกิโลกรัมที่ต่ำกว่า ดังนี้ 5.00 5.83 5.53 6.67 6.86 และ 6.44 บาท ตามลำดับ เนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 มีช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิตอยู่ในฤดูแล้งทำให้ข้าวโพดมีความชื้นน้อยจึงขายได้ราคาดีกว่า



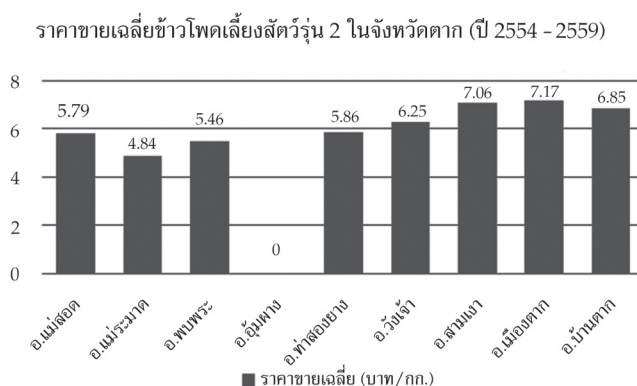
รูปที่ 1 กราฟแสดงปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ในจังหวัดตาก (พ.ศ. 2554 - 2559)



รูปที่ 2 กราฟแสดงปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ในจังหวัดตาก (พ.ศ. 2554 - 2559)

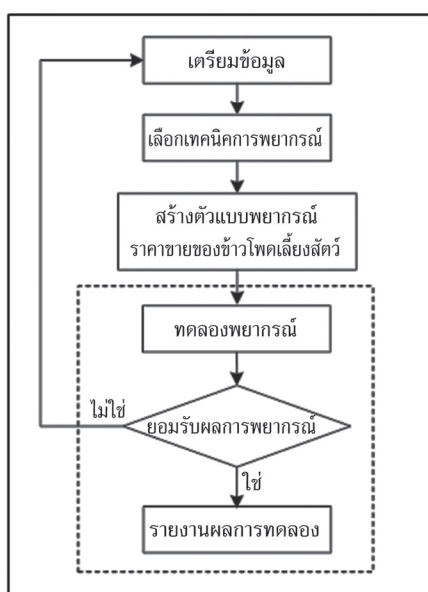


รูปที่ 3 กราฟแสดงราคาขายเฉลี่ยของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ในจังหวัดตาก (พ.ศ. 2554 - 2559)



รูปที่ 4 กราฟแสดงราคาขายเฉลี่ยของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ในจังหวัดตาก (พ.ศ. 2554 - 2559)

จากการสังเกตข้อมูล ผู้วิจัยพบว่าราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ในแต่ละอำเภอของจังหวัดตากไม่เท่ากัน และปริมาณผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีมากขึ้นหรือน้อยลงก็ไม่ได้เป็นปัจจัยส่งผลให้ราคาขายลดลงหรือสูงขึ้น เช่น กรณีอำเภอแม่สอดมีปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 มากที่สุดคือ 815,023,674 กิโลกรัม แต่มีราคาขาย คือ 6.04 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่ได้เป็นราคาขายที่ต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1 และ 3 และเมื่อปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ใน อำเภอแม่สอดน้อยลง คือ 57,933,850 กิโลกรัม แต่ราคาขายก็ไม่ได้สูงขึ้น กลับลดลงคือ 5.79 บาทต่อกิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 4 เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้การประมาณราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ล่วงหน้ามีประสิทธิภาพ จึงนำเทคนิคการพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบของตัวแปรเดียวเข้ามาช่วยในการทำนายราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยมีขั้นตอนดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงานในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ขั้นตอนดำเนินงานในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่แสดงในรูปที่ 5 มีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการพยากรณ์ โดยใช้ตัวแบบของตัวแปรเดียวสำหรับข้อมูลที่มีฤดูกาล เป็นข้อมูลราคาขายเมล็ดของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ที่มีความชื้นไม่เกิน 14.5 % ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากสำนักงานเกษตรจังหวัดตาก ย้อนหลังจำนวน 6 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - 2559 เป็นข้อมูลอนุกรมรายเดือนจำนวน 72 เดือน จากพื้นที่ 9 อำเภอ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกตรวจสอบความถูกต้อง (Accuracy) และความสมบูรณ์ครบถ้วน (Completeness) จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - 2558 ของแต่ละอำเภอเป็นข้อมูลฝึกสอน (Training Data) และข้อมูลในปี พ.ศ. 2559 ของแต่ละอำเภอเป็นข้อมูลทดสอบ (Test Data) เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์

2. การเลือกเทคนิคการพยากรณ์ (Model Selection)

การเลือกเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลจะช่วยลดความผิดพลาดในการพยากรณ์ลงได้ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูลด้วยค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต (Autocorrelation Function: ACF or Correlogram) [2] ของราคาขายข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นของแต่ละอำเภอในจังหวัดตาก ราคาขายข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นได้มาจากราคาขายข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 หรือรุ่น 2 ที่มีขายอยู่ในเดือนนั้นของปีที่พิจารณา และสำหรับบางเดือนที่มีผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งรุ่น 1 และรุ่น 2 ออกมาขายพร้อมกัน จะใช้ค่าเฉลี่ยของราคาขายข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 เป็นตัวแทนของราคาขายข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในเดือนนั้นของปีที่พิจารณา โดยใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรในช่วงเวลาปัจจุบันกับช่วงเวลาก่อนหน้า (Lag Time) ตั้งแต่หนึ่งช่วงเวลาขึ้นไปดังสมการที่ (1)

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (A_t - \bar{A})(A_{t-k} - \bar{A})}{\sum_{t=1}^n (A_t - \bar{A})^2} \quad (1)$$

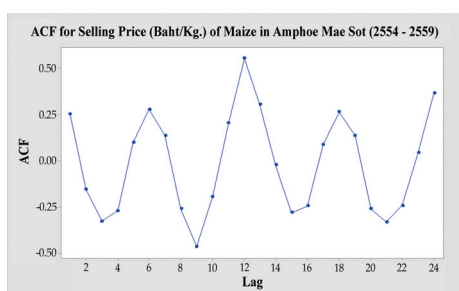
โดยที่

$$\begin{aligned} r_k &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตลำดับที่ } k \\ \bar{A} &= \text{ค่าเฉลี่ยของค่า } A \\ A_t &= \text{ค่า } A \text{ ณ เวลาที่ } t \\ A_{t-k} &= \text{ค่า } A \text{ ณ เวลาก่อนหน้าช่วง } k \text{ หรือช่วงที่ } t-k \\ A &= \text{ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่น} \end{aligned}$$

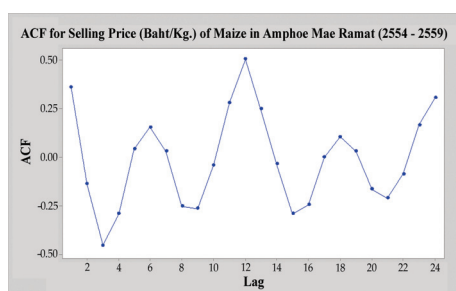
จากนั้นแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตในรูปแบบกราฟด้วยโปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) รุ่น 18 ได้ดังรูปที่ 6 โดยแกน y (แกนตั้ง) แสดงขนาดความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ตั้งแต่ -1 ถึง +1 ส่วนแกน x (แกนนอน) แสดงช่วงเวลา (Lag Time) การตรวจสอบอนุกรมเวลาว่ามีการลุ่ม มีแนวโน้มเป็นข้อมูลคงที่ หรือมีฤดูกาลหรือไม่ จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตที่แสดงในกราฟตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 1 - 24 (ลำดับสุดท้าย) ได้ดังนี้ 1) ข้อมูลมีการลุ่ม สังเกตจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต

ทุกค่าจะมีค่าใกล้เคียง 2) ข้อมูลมีแนวโน้ม สังเกตจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโดในลำดับต้นจะมีค่าสูงหรือใกล้ 1 หรือแตกต่างจากศูนย์มาก และจะค่อย ๆ ลดลงเข้าหาศูนย์เมื่อลำดับเพิ่มขึ้น 3) เป็นข้อมูลคงที่ สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบบอโดในลำดับต้น (r_1, r_2) จะมีค่าสูง และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโดในลำดับต่อมา ($r_3, r_4, \dots$) จะลดลงเท่ากับศูนย์อย่างรวดเร็ว และ 4) ข้อมูลมีฤดูกาล สังเกตจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโด (r) จะมีค่ามากในลำดับที่มีการเคลื่อนไหวของฤดูกาล เช่น ถ้าเป็นอนุกรมรายเดือนค่า r จะมากในลำดับที่หารด้วย 12 ลงตัว ถ้าเป็นอนุกรมรายไตรมาสค่า r จะมากในลำดับที่หารด้วย 4 ลงตัว [2]

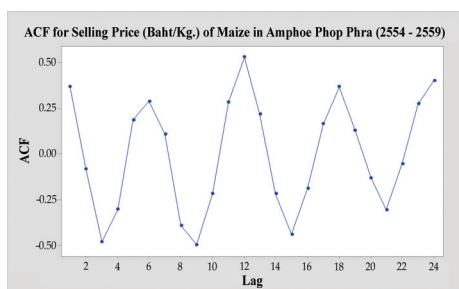
เมื่อพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโดสำหรับราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก กับช่วงเวลา (Lag Time) ในรูปที่ 6 พบว่าข้อมูลอนุกรมเวลาชุดนี้มีฤดูกาลแบบรายเดือน เนื่องจากค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโดจะมีค่ามากในลำดับที่เป็นฤดูกาลและในลำดับที่หารด้วย 12 ลงตัว แต่ไม่มีการลุ่ม ไม่มีแนวโน้ม และไม่เป็นข้อมูลคงที่



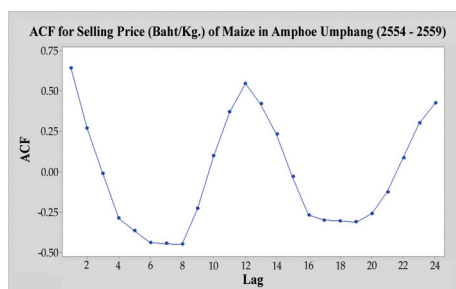
(ก) อำเภอแม่สอด



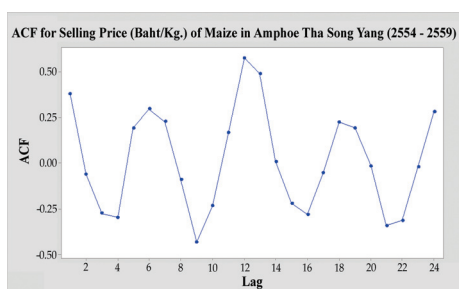
(ข) อำเภอแม่ระมาด



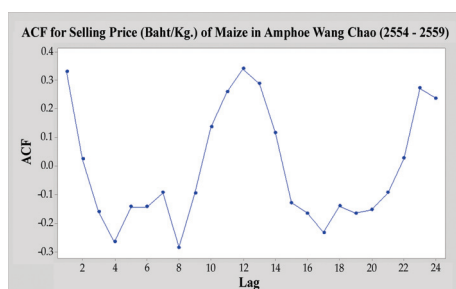
(ค) อำเภอพบพระ



(ง) อำเภออุ้มผาง

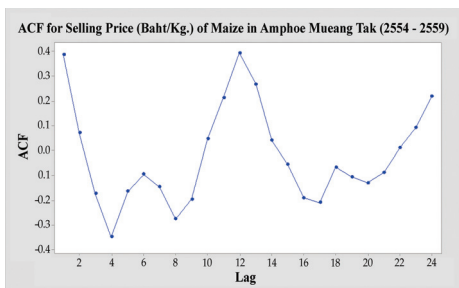


(จ) อำเภอท่าสองยาง

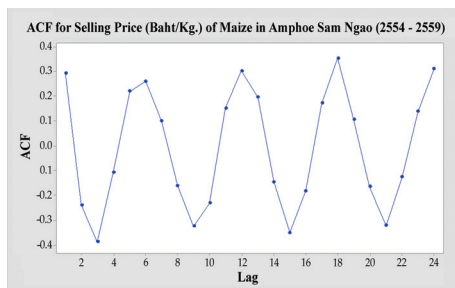


(ฉ) อำเภอวังเจ้า

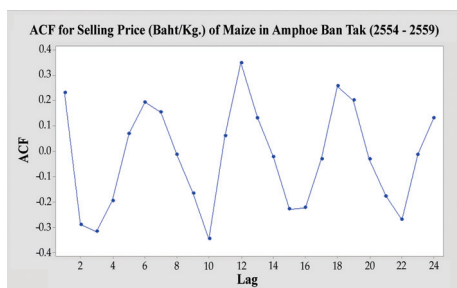
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโดสำหรับราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก กับช่วงเวลา (Lag Time)



(ช) อำเภอเมืองตาก



(ซ) อำเภอสามเงา



(ฅ) อำเภอบ้านตาก

รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตสำหรับราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก กับช่วงเวลา (Lag Time) (ต่อ)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลอนุกรมเวลาชุดนี้มีฤดูกาลแบบรายเดือน จึงทดสอบค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตในลำดับที่ 12 ทารลงตัว คือ ลำดับที่ 12 และ 24 โดยใช้กฎหัวแม่มือ ณ ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถทดสอบค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต [2] ได้ดังนี้

กำหนด $H_0 : \rho_k = 0$ (ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตลำดับที่ k ไม่แตกต่างจาก 0)

$H_1 : \rho_k \neq 0$ (ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตลำดับที่ k แตกต่างจาก 0)

โดยที่ $k = 12$ และ 24

ขอบเขตการตัดสินใจจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต (r) ในลำดับ 12 และ 24 อยู่นอกช่วงของ $0 \pm 2/\sqrt{72} = 0 \pm 0.235702$ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 โดยที่ $\rho_k \neq 0$ ถ้า $r_k < -0.235702$ หรือ $r_k > 0.235702$ ซึ่งหมายความว่าข้อมูลราคาขายเมล็ดของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีลักษณะฤดูกาลแบบรายเดือนนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบค่าขอบเขตการตัดสินใจกับค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต r_{12} และ r_{24} ของอำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า และอำเภอสามเงา รวมถึงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต r_{12} ของอำเภอเมืองตาก และอำเภอบ้านตาก ในตารางที่ 1 พบว่าที่ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตเหล่านี้ตกอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ H_0

จึงสามารถปฏิเสธ H_0 ได้ มีเพียงแต่อำเภอเมืองตาก และอำเภอบ้านตาก ที่มีค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโต r_{24} อยู่ในขอบเขตของการยอมรับ H_0 ดังนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งรุ่น 1 และรุ่น 2 ในอำเภอเมืองตาก และอำเภอบ้านตาก อยู่ในขอบเขตของการยอมรับ H_0 ทั้งคู่ จึงแยกพิจารณาค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโตของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ออกจากกัน พบว่าค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโตของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ในอำเภอเมืองตาก และอำเภอบ้านตาก อยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ H_0 จึงสามารถปฏิเสธ H_0 ได้ มีเพียงแต่ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโตของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ในอำเภอเมืองตากและอำเภอบ้านตากเท่านั้น ที่อยู่ในขอบเขตของการยอมรับ H_0 เนื่องจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 ในเขตพื้นที่ทั้งสองไม่ปกติ เช่น อำเภอเมืองตาก มีการงดเว้นการปลูกในบางปี และอำเภอบ้านตาก มีช่วงเวลาของการเพาะปลูกไม่สม่ำเสมอ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นทั้ง 7 อำเภอในจังหวัดตาก ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า และอำเภอสามเงา เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน เว้นแต่อำเภอมืองตากและอำเภอบ้านตากเท่านั้นที่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือนเฉพาะข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากโดยส่วนใหญ่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน และไม่มีแนวโน้ม

ตารางที่ 1 ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบบอโตของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก

Lag Time	Autocorrelation ณ Lag Time ต่าง ๆ								
	อำเภอแม่สอด	อำเภอแม่ระมาด	อำเภอพบพระ	อำเภออุ้มผาง	อำเภอท่าสองยาง	อำเภอวังเจ้า	อำเภอเมืองตาก	อำเภอสามเงา	อำเภอบ้านตาก
1	0.249856	0.360441	0.366517	0.637893	0.378169	0.329111	0.385916	0.292527	0.22991
2	-0.158802	-0.13727	-0.084019	0.267575	-0.062863	0.022636	0.069027	-0.23932	-0.289433
3	-0.331059	-0.45327	-0.481328	-0.013333	-0.276876	-0.160746	-0.174676	-0.388427	-0.318071
4	-0.274902	-0.29042	-0.304925	-0.288788	-0.298097	-0.266434	-0.349292	-0.109177	-0.195717
5	0.095105	0.041531	0.186691	-0.365725	0.190557	-0.144619	-0.166381	0.219131	0.068137
6	0.27611	0.154523	0.288683	-0.438669	0.294199	-0.143516	-0.096063	0.259413	0.191418
7	0.135117	0.030165	0.108716	-0.444641	0.225673	-0.094136	-0.147318	0.098346	0.151321
8	-0.264617	-0.25263	-0.392054	-0.450613	-0.091791	-0.286039	-0.277317	-0.162212	-0.015522
9	-0.468843	-0.2642	-0.497755	-0.228008	-0.432762	-0.095493	-0.196671	-0.326117	-0.166606
10	-0.197456	-0.0403	-0.216052	0.096408	-0.234296	0.134922	0.044622	-0.232254	-0.34775
11	0.200917	0.28042	0.283853	0.366332	0.165457	0.257502	0.211565	0.150809	0.05765
12	0.553527	0.504529	0.530409	0.544408	0.574299	0.338132	0.392743	0.301465	0.346881
13	0.30534	0.247484	0.218583	0.417113	0.488684	0.286868	0.266647	0.194639	0.1296

ตารางที่ 1 ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของ จังหวัดตาก (ต่อ)

Lag Time	Autocorrelation ณ Lag Time ต่าง ๆ								
	อำเภอแม่สอด	อำเภอแม่ระมาด	อำเภอบพพระ	อำเภออุ้มผาง	อำเภอท่าสองยาง	อำเภอวังเจ้า	อำเภอเมืองตาก	อำเภอสามเภา	อำเภอบ้านตาก
14	-0.024706	-0.03507	-0.218219	0.229966	0.00726	0.113828	0.038938	-0.146309	-0.024711
15	-0.283532	-0.29153	-0.44103	-0.031091	-0.221988	-0.12948	-0.057699	-0.351069	-0.230407
16	-0.247891	-0.2445	-0.190533	-0.267478	-0.282012	-0.16591	-0.190711	-0.182045	-0.224544
17	0.085464	-0.00027	0.164086	-0.299637	-0.053671	-0.234231	-0.210103	0.170305	-0.031073
18	0.262632	0.104258	0.367011	-0.305609	0.222897	-0.141468	-0.067236	0.352164	0.255014
19	0.13357	0.029925	0.129128	-0.311581	0.191596	-0.165669	-0.106226	0.105742	0.199249
20	-0.264113	-0.16508	-0.131455	-0.259178	-0.016931	-0.155058	-0.131622	-0.166131	-0.032838
21	-0.334415	-0.2109	-0.306194	-0.126805	-0.343052	-0.093977	-0.089097	-0.322846	-0.178211
22	-0.246133	-0.0873	-0.054171	0.085249	-0.315288	0.025253	0.01078	-0.127726	-0.270841
23	0.039647	0.165073	0.27472	0.298944	-0.021018	0.270565	0.091613	0.137583	-0.014369
24	0.365787	0.304143	0.400949	0.421634	0.280563	0.236212	0.217914	0.308654	0.129335

จากการวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูลด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติ พบว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากโดยส่วนใหญ่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือนที่ไม่มีแนวโน้ม และมีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (Training Data) ทั้งหมด 60 เดือน เริ่มตั้งแต่ มกราคม พ.ศ. 2554 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2558 เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ล่วงหน้า 12 เดือน ของอำเภอต่าง ๆ ในจังหวัดตาก ซึ่งเป็นการพยากรณ์ระยะกลาง (Medium-Term Forecasting) ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิควิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) มาสร้างตัวแบบในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีฤดูกาลได้ ซึ่งทั้ง 3 เทคนิคนี้มีลักษณะที่คล้ายกัน คือ ให้ความสำคัญหรือให้น้ำหนักกับข้อมูลปัจจุบันหรือข้อมูลล่าสุดมากที่สุดในการพยากรณ์ จึงสามารถให้ผลการพยากรณ์ที่สอดคล้องกับเหตุการณ์จริงในปัจจุบันได้

3. การสร้างตัวแบบพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Model Construction)

การพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นการพยากรณ์เชิงปริมาณ (Quantitative Forecasting) โดยการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) ที่มีฤดูกาล (Seasonal Variation) และงานวิจัยนี้สนใจศึกษากลุ่มเทคนิคการพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบของตัวแปรเดียว (Univariate Model) ซึ่งมีอยู่ 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) มาสร้างเป็นตัวแบบในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากด้วยข้อมูลฝึกสอน ดังนี้

3.1 การสร้างตัวแบบด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (Seasonal Naïve Forecasting: SNF) เทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลสามารถแบ่งได้เป็นเทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบไม่มีแนวโน้ม (Non-Trend Seasonal) และเทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบมีแนวโน้ม (Trend Seasonal) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบไม่มีแนวโน้ม (Non-Trend Seasonal) เท่านั้น

สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายไตรมาส และเทคนิคนาอ็อฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน งานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคนาอ็อฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน เนื่องจากผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ฯ ในหัวข้อที่ (2) การเลือกเทคนิคการพยากรณ์ (Model Selection) ของวิธีการทดลอง แสดงให้เห็นว่าราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากโดยส่วนใหญ่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน ดังนั้น เทคนิคนี้ จะเริ่มพยากรณ์ได้ในช่วงเวลาที่ 13 (หรือ $t = 13$) และสามารถพยากรณ์ล่วงหน้าได้ 12 เดือนจากข้อมูลจริงค่าล่าสุด [2] ดังสมการที่ (2)

$$F_{t+1} = A_{t-11} \quad (2)$$

โดยที่

F_{t+1} = ค่าพยากรณ์ราคาขายข้าวโพดในเดือนใด ๆ เมื่อ t คือ ช่วงเวลาตั้งแต่ 12 เป็นต้นไป

A_{t-11} = ค่าราคาขายข้าวโพดจริงในเดือนเดียวกันของปีที่แล้ว

3.2 การสร้างตัวแบบด้วยเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average: WMA) เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนักเป็นวิธีการพยากรณ์ที่ให้น้ำหนัก (Weight) กับข้อมูลปัจจุบันมากกว่าข้อมูลในอดีตที่ไกลออกไปตามลำดับ ทำให้ได้ค่าพยากรณ์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกับค่าข้อมูลจริงในปัจจุบันมากขึ้น [8] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$F_{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^n i A_{t-n+i}}{\sum_{i=1}^n i} \quad (3)$$

โดยที่

F_{t+1} = ค่าพยากรณ์ราคาขายข้าวโพดในเดือนใด ๆ เมื่อ t คือ ช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ตามเดือน

A_t = ค่าจริงในช่วงเวลา t

n = ขนาดของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่

i = ช่วงเวลาในการเคลื่อนที่

เพื่อให้ได้จำนวนช่วงเวลา (หรือ n) ในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุด จึงทดลองสร้างตัวแบบของเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนักจากสมการที่ (3) โดยกำหนดขนาดของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ดังนี้ $n = 2, n = 4, n = 6, n = 8, n = 10$ และ $n = 12$ ด้วยข้อมูลฝึกสอนตั้งแต่มกราคม พ.ศ. 2554 - ธันวาคม พ.ศ. 2558 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนักเมื่อกำหนดขนาดของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่เป็น n ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

อำเภอ	มกราคม พ.ศ. 2554 ถึงธันวาคม พ.ศ. 2558																	
	$n = 2$			$n = 4$			$n = 6$			$n = 8$			$n = 10$			$n = 12$		
	MAPE	MAD	MSD	MAPE	MAD	MSD	MAPE	MAD	MSD	MAPE	MAD	MSD	MAPE	MAD	MSD	MAPE	MAD	MSD
แม่สอด	11.36	0.69	1.28	10.20	0.62	0.92	10.16	0.62	0.88	8.76	0.56	0.76	7.65	0.50	0.68	<u>7.35</u>	0.48	0.68
แม่ระมาด	9.87	0.57	0.88	10.65	0.62	0.82	10.96	0.64	0.80	10.17	0.62	0.73	9.14	0.57	0.63	<u>8.91</u>	0.55	0.63
พบพระ	14.49	0.73	0.95	14.25	0.72	0.84	14.31	0.72	0.78	13.86	0.70	0.74	13.12	0.68	0.70	<u>12.80</u>	0.66	0.68
อุ้มผาง	<u>2.54</u>	0.15	0.09	3.20	0.20	0.10	3.84	0.24	0.11	4.37	0.27	0.12	4.54	0.28	0.13	4.51	0.27	0.13
ท่าสองยาง	<u>6.51</u>	0.37	0.38	7.62	0.44	0.38	7.98	0.46	0.38	8.16	0.47	0.40	7.71	0.45	0.37	7.63	0.45	0.38
วังเจ้า	5.30	0.31	0.53	4.96	0.28	0.37	4.77	0.26	0.35	4.73	0.26	0.34	3.41	0.20	0.23	<u>2.89</u>	0.16	0.10
เมืองตาก	<u>6.62</u>	0.42	0.49	7.57	0.48	0.53	8.00	0.51	0.55	8.43	0.53	0.58	8.01	0.51	0.52	7.82	0.49	0.50
สามเงา	8.69	0.62	0.89	8.79	0.64	0.79	8.50	0.62	0.73	8.51	0.62	0.74	8.49	0.62	0.75	<u>8.28</u>	0.61	0.72
บ้านตาก	9.19	0.60	0.67	9.04	0.58	0.58	9.00	0.57	0.57	9.03	0.57	0.57	8.96	0.56	0.57	<u>8.51</u>	0.52	0.52

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ในช่วง n มีขนาดต่าง ๆ ของเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนักด้วยข้อมูลฝึกสอน พบว่าขนาดของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างตัวแบบ คือ $n = 2$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง และอำเภอเมืองตาก และ $n = 12$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภอวังเจ้า อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก

3.3 การสร้างตัวแบบด้วยเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (Winters' Exponential Smoothing: WES) เทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์เป็นวิธีการพยากรณ์สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลและมีแนวโน้มประกอบอยู่ วิธีนี้เหมาะกับการพยากรณ์ระยะสั้นไม่เกิน 1 ปี จนถึงระยะกลาง 1-3 ปี ข้อมูลที่จะนำมาคำนวณควรเป็นข้อมูลรายเดือนหรือรายไตรมาส และควรมีข้อมูลอย่างน้อย 36 ข้อมูลสำหรับรายเดือน และ 12 ข้อมูลสำหรับรายไตรมาส เทคนิคนี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเรียบ 3 ค่า ได้แก่ สัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) สัมประสิทธิ์ในการปรับแนวโน้ม (β) และสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) สัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ค่านี้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 สำหรับเทคนิคของวินเทอร์มี 2 ตัวแบบ ดังสมการที่ (4) และ (5) [2], [9] ได้แก่

- 1) ตัวแบบฤดูกาลเชิงคูณ (Multiplicative Seasonal Model) สมการที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

$$F_{t+p} = (S_t + T_t p) I_{t-L+p} \quad (4)$$

- 2) ตัวแบบฤดูกาลเชิงบวก (Additive Seasonal Method) สมการที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

$$F_{t+p} = S_t + T_t + I_{t-L+p} \quad (5)$$

โดยที่

 F_{t+p} = ค่าพยากรณ์สำหรับ p งวดล่วงหน้า p = จำนวนงวดที่ต้องการพยากรณ์ล่วงหน้า L = ช่วงของฤดูกาลใน 1 ปี เช่น $L = 12$ S_t = ค่าปรับเรียบ = $\alpha \frac{A_t}{I_{t-L}} - [(1-\alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})]$ T_t = ตัวประมาณค่าแนวโน้ม = $\beta(S_t - S_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1}$ I_t = ตัวประมาณค่าฤดูกาล = $\gamma \frac{A_t}{S_t} + (1-\gamma)I_{t-L}$ A_t = ข้อมูลจริงในช่วงเวลา t

ตัวแบบฤดูกาลเชิงคูณ (Multiplicative Seasonal Model) เหมาะสมกับการพยากรณ์อนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลที่อาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ตัวแบบฤดูกาลเชิงบวก (Additive Seasonal Method) เหมาะสมกับการพยากรณ์อนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลคงที่ [12] สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวแบบฤดูกาลเชิงบวกของวินเทอร์ เนื่องจากข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตากที่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน เป็นฤดูกาลคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป และไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติของราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในหัวข้อที่ (2) การเลือกเทคนิคการพยากรณ์ (Model Selection) ของวิธีการทดลอง ดังนั้น จึงได้ตัวแบบที่ใช้ในการพยากรณ์ดังสมการที่ (6) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) และค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) ที่แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งให้ผลการพยากรณ์ที่ดีที่สุดจากทดลองพยากรณ์ด้วยข้อมูลฝึกสอนตั้งแต่ มกราคม พ.ศ. 2554 - ธันวาคม พ.ศ. 2558 โดยโปรแกรมมินิตับ (Minitab) รุ่น 18

$$F_{t+1} = S_t + I_{t-11} \quad (6)$$

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) และค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) ที่เหมาะสมต่อการพยากรณ์

อำเภอ		แม่สอด	แม่ระมาด	พบพระ	อุ้มผาง	ท่าสองยาง	วังเจ้า	เมืองตาก	สามเงา	บ้านตาก
สัมประสิทธิ์	การปรับเรียบ (α)	0.3	0.1	0.6	0.9	0.9	0.6	0.8	0.6	0.4
	การปรับฤดูกาล (γ)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
เครื่องมือ	MAPE	9.06	9.52	9.84	2.81	6.41	8.21	6.71	8.87	7.87
วัดค่าคลาด	MAD	0.57	0.54	0.51	0.17	0.37	0.49	0.44	0.61	0.50
เคลื่อน	MSD	0.77	0.50	0.53	0.07	0.34	0.50	0.38	0.66	0.41

ดังนั้น ในขั้นตอนการสร้างตัวแบบพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นี้ จะได้ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ 3 สมการ ได้แก่ สมการที่ (2) จากเทคนิคอนุพันธ์สำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) สมการที่ (3) จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) โดยมี $n = 2$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง และอำเภอเมืองตาก และ $n = 12$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภอวังเจ้า อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก และสมการที่ (6) จากเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) และค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) ตามตารางที่ 3

4. การทดลองพยากรณ์ (Model Extrapolation)

สำหรับขั้นตอนการทดลองพยากรณ์นี้ จะนำตัวแบบทั้ง 3 สมการ จากหัวข้อที่ (3) การสร้างตัวแบบพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Model Construction) ของวิธีการทดลอง มาพยากรณ์ด้วยข้อมูลทดสอบ (Test Data) ซึ่งเป็นข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2559 ของทั้ง 9 อำเภอในจังหวัดตาก และประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ด้วยค่าคลาดเคลื่อน (Error) ถ้าผลการพยากรณ์ไม่ถูกยอมรับในขั้นตอนนี้ ก็จะต้องย้อนกระบวนการกลับไปตรวจสอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล แต่ถ้ายอมรับผลการพยากรณ์ก็จะเข้าสู่กระบวนการรายงานผลการทดลองต่อไป

การประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ จะพิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ โดยการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ที่คำนวณได้กับข้อมูลจริงที่ช่วงเวลา t หากค่าพยากรณ์จากตัวแบบของเทคนิคใดให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แสดงว่าตัวแบบและเทคนิคนั้นมีความเหมาะสมต่อการพยากรณ์ หรือการพยากรณ์มีความแม่นยำสูงสุคนั่นเอง งานวิจัยนี้ใช้วิธีวัดค่าคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ 3 วิธี ดังสมการที่ (7) - (9) ได้แก่

วิธีร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) [2], [10]

$$MAPE(\%) = 100 / n \sum_{t=1}^n |(A_t - F_t) / A_t| \quad (7)$$

วิธีค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) [9], [11]

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - F_t| \quad (8)$$

วิธีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) [11]

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2 \quad (9)$$

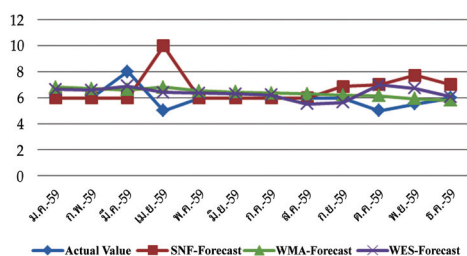
โดยที่

F_t = ค่าพยากรณ์ในเดือน t เมื่อ t คือ ช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ตามเดือน

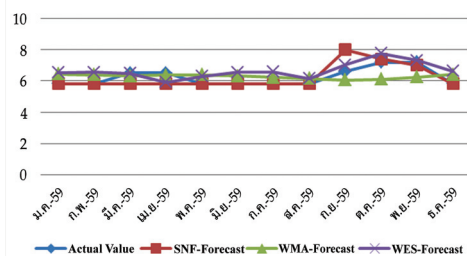
A_t = ค่าจริงในเดือน t

n = จำนวนช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

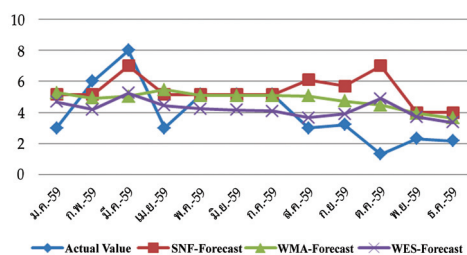
ผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่น ปี พ.ศ. 2559 ของทั้ง 9 อำเภอ ในจังหวัดตาก ด้วยเทคนิคนาอ็ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) แสดงในรูปแบบกราฟ ในรูปที่ 7 และผลการวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของการพยากรณ์จากทั้ง 3 เทคนิค ด้วยร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) แสดงในตารางที่ 4



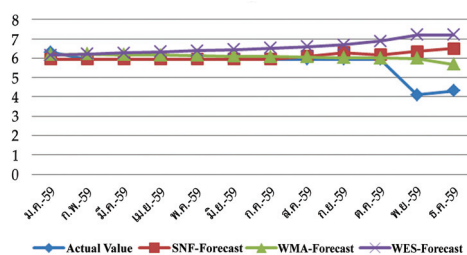
(ก) อำเภอแม่สอด



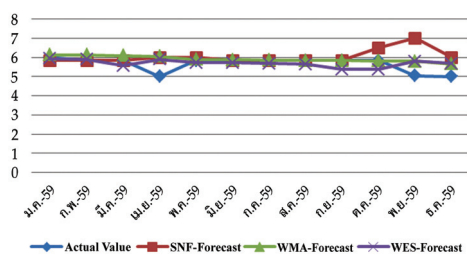
(ข) อำเภอแม่ระมาด



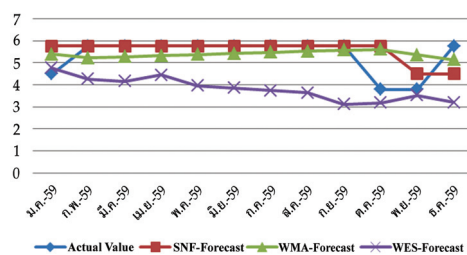
(ค) อำเภอพบพระ



(ง) อำเภออุ้มผาง

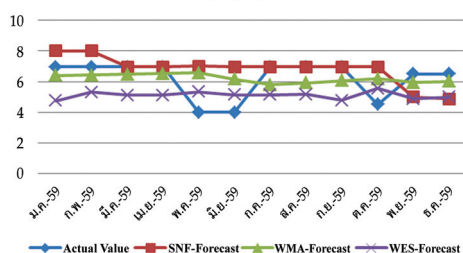


(จ) อำเภอท่าสองยาง

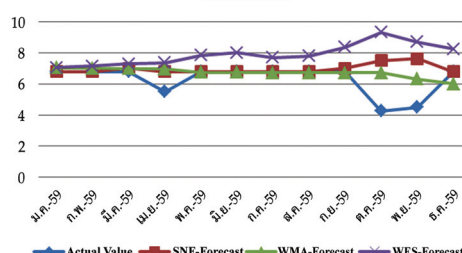


(ฉ) อำเภอวังเจ้า

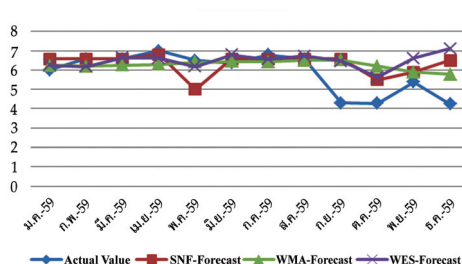
รูปที่ 7 กราฟพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2559 ด้วยเทคนิคนาอ็ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์



(ข) อำเภอมืองตาก



(ช) อำเภอสามเงา



(ฅ) อำเภอบ้านตาก

รูปที่ 7 กราฟพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2559 ด้วยเทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (ต่อ)

กราฟในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นของอำเภอส่วนใหญ่ในจังหวัดตาก จากทั้ง 3 เทคนิคให้ค่าใกล้เคียงข้อมูลจริง แต่มีบางพื้นที่ที่บางเทคนิคให้ผลการพยากรณ์ที่แตกต่างจากข้อมูลจริงมาก ได้แก่ เทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) ที่ให้ผลพยากรณ์ในอำเภอพบพระ อำเภอสามเงา อำเภอวังเจ้า และอำเภอเมืองตาก เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ที่ให้ผลพยากรณ์ในอำเภอพบพระและอำเภอเมืองตาก และเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) ที่ให้ผลพยากรณ์ในอำเภอพบพระและอำเภอเมืองตาก สังเกตต่อไปได้ว่า ในอำเภอสามเงาและอำเภอวังเจ้ายังมีเทคนิคการพยากรณ์อื่นที่ให้ผลการพยากรณ์ที่ดี แต่ในอำเภอพบพระและอำเภอเมืองตากมีผลพยากรณ์จากทั้ง 3 เทคนิค ที่ค่อนข้างแตกต่างจากข้อมูลจริงมาก สำหรับกรณีของอำเภอพบพระ เนื่องจากในปี พ.ศ. 2559 อำเภอพบพระประสบปัญหาาราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตกต่ำมาก [5] และกรณีของอำเภอเมืองตาก เนื่องจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 2 มีการงดเว้นการเพาะปลูกในบางปี และพบว่าเทคนิคที่ให้ผลการพยากรณ์โดยส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด คือ เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA)

ข้อมูลประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2559 ในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของเทคนิคการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในแต่ละอำเภอของจังหวัดตากที่แตกต่างกัน ดังนี้ ในอำเภอแม่ระมาดและอำเภอวังเจ้า ควรใช้เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ในอำเภอแม่สอด อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก ควรใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และในอำเภอพบพระควรใช้เทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES)

โดยสังเกตจากค่าร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) ที่มีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2559

เทคนิคการพยากรณ์	เครื่องมือวัดค่าคลาดเคลื่อน	อำเภอแม่สอด	อำเภอแม่ระมาด	อำเภอบพพระ	อำเภออุ้มผาง	อำเภอท่าสองยาง	อำเภอวังเจ้า	อำเภอเมืองตาก	อำเภอสามเภา	อำเภอบ้านตาก
นาอียสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF)	MAPE	19.87	3.97	79.09	10.25	7.94	10.04	23.46	14.61	15.51
	MAD	1.1	0.26	1.75	0.46	0.41	0.43	1.24	0.67	0.75
	MSD	3.32	0.25	5.47	0.84	0.52	0.63	2.67	1.84	1.23
ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA)	MAPE	12.16	8.55	59.79	5.47	5.19	14.24	23.14	12.60	14.72
	MAD	0.70	0.54	1.57	0.24	0.28	0.65	1.14	0.63	0.71
	MSD	0.73	0.36	3.56	0.32	0.16	0.68	2.57	1.03	1.02
ปรับเรียบเอกซโพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES)	MAPE	12.97	8.60	55.11	18.78	6.60	27.80	27.06	30.59	17.21
	MAD	0.73	0.52	1.51	0.91	0.35	1.56	1.61	1.66	0.82
	MSD	0.84	0.33	2.99	1.74	0.20	3.03	2.89	4.67	1.42

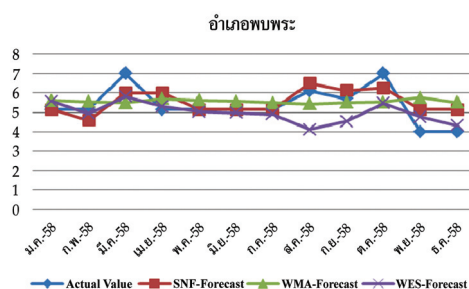
สำหรับเทคนิคที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์มากที่สุดและน้อยที่สุด ก็คือ เทคนิคนาอียสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) โดยอำเภอแม่ระมาดมีผลการพยากรณ์ดีที่สุด สังเกตจากค่าร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ที่ได้ 3.97 % ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) ที่ได้ 0.26 และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) ที่ได้ 0.25 ซึ่งมีความสอดคล้องไปในทำนองเดียวกัน คือ มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่ระมาดในปี พ.ศ. 2558 กับ พ.ศ. 2559 มีการเคลื่อนไหวของราคาใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับอำเภอบพพระ มีผลการพยากรณ์แย่มากที่สุด สังเกตจากค่าร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ที่ได้ 79.09 % ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) ที่ได้ 1.75 และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) ที่ได้ 5.47 ซึ่งมีความสอดคล้องไปในทำนองเดียวกัน คือ มีค่ามากที่สุด เนื่องจากในปี พ.ศ. 2559 อำเภอบพพระประสบปัญหาราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตกต่ำมาก [5] ทำให้มีราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ค่อนข้างแตกต่างจากปีที่ผ่านมา

จากกราฟพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2559 ในรูปที่ 7 และประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ในตารางที่ 4 ของอำเภอบพพระ แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติของการพยากรณ์ที่คลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริงมาก เนื่องจากข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอบพพระ ในปี พ.ศ. 2559 ไม่ปกติจากการที่ราคาขายตกต่ำมาก ดังนั้น จึงต้องย้อนกระบวนการกลับไปปรับกลุ่มข้อมูลสำหรับทดลองพยากรณ์ใหม่ในอำเภอบพพระ ดังนี้ ให้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - 2557 เป็นข้อมูลฝึกสอน (Training Data) และให้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2558 เป็นข้อมูลทดสอบ (Test Data) ความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์ ซึ่งค่าขนาดของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ (n) ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) และค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) ยังคงสามารถใช้ค่าเดิมได้ คือ 12 0.6 และ

0.1 ตามลำดับ ได้ผลการพยากรณ์สำหรับราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2558 ของอำเภอพบพระ แสดงในรูปที่ 8 และประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2558 ของอำเภอพบพระ แสดงในตารางที่ 5 จากผลการทดลองพยากรณ์ใหม่พบว่าทั้ง 3 เทคนิคให้ผลการพยากรณ์ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากขึ้น โดยมีเทคนิคนาอ์ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ให้ผลการพยากรณ์แม่นยำที่สุด

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในปี พ.ศ. 2558 ของอำเภอพบพระ

เทคนิคการพยากรณ์	เครื่องมือวัดค่าคลาดเคลื่อน		
	MAPE	MAD	MSD
นาอ์ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF)	10.29	0.52	0.46
ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA)	15.83	0.81	0.96
ปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES)	12.04	0.69	0.84



รูปที่ 8 กราฟพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นในอำเภอพบพระปี พ.ศ. 2558

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองพยากรณ์ในหัวข้อที่ (4) การทดลองพยากรณ์ (Model Extrapolation) ของวิธีการทดลอง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการพยากรณ์ของเทคนิคนาอ์ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) ซึ่งสามารถสรุปเทคนิคการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดหรือที่เหมาะสมต่อการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เทคนิคการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมต่อการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอต่าง ๆ ของจังหวัดตากที่พบมากที่สุด คือ เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) พบถึง 6 อำเภอ ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก เทคนิคการพยากรณ์ที่พบรองลงมา คือ เทคนิคนาอ์ฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) พบใน 3 อำเภอ ได้แก่ อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ และอำเภอวังเจ้า แต่สำหรับเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียล

ของวินเทอร์ (WES) ถึงแม้ในบางอำเภอจะมีผลการวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของการพยากรณ์ที่ดี เช่น อำเภอแม่ระมาดและอำเภอท่าสองยาง แต่ในอำเภอทั้งสองนี้ก็ยังมีเทคนิคการพยากรณ์อื่นที่ให้ผลประสิทธิภาพความถูกต้องของการพยากรณ์ที่ดีกว่าเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES)

ตารางที่ 6 เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก

เทคนิคการพยากรณ์	อำเภอแม่สอด	อำเภอแม่ระมาด	อำเภอพบพระ	อำเภออุ้มผาง	อำเภอท่าสองยาง	อำเภอวังเจ้า	อำเภอเมืองตาก	อำเภอสามเงา	อำเภอบ้านตาก
นาอึฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF)		✓	✓			✓			
ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA)	✓			✓	✓		✓	✓	✓
ปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES)									

หมายเหตุ สัญลักษณ์ ✓ แสดงเทคนิคการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับอำเภอนั้น

ถึงแม้ทั้ง 3 เทคนิคการพยากรณ์จะอยู่ในกลุ่มการพยากรณ์ประเภทเดียวกันและทดลองพยากรณ์กับข้อมูลชุดเดียวกัน แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในแต่ละอำเภอมีความเหมาะสมกับเทคนิคการพยากรณ์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ และอำเภอวังเจ้าของปีล่าสุดกับปีที่ต้องการพยากรณ์มีลักษณะการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่คล้ายกันและในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น เทคนิคนาอึฟสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) จึงให้ผลการพยากรณ์ที่ดีที่สุดกับกลุ่มข้อมูลนี้
- ข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่สอด อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก ของปีที่ต้องการพยากรณ์มีลักษณะการเคลื่อนไหวใกล้เคียงกับข้อมูลในปีล่าสุดมากกว่าข้อมูลในอดีตที่ไกลออกไปตามลำดับ ดังนั้น เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) จึงให้ผลการพยากรณ์ที่ดีที่สุดกับกลุ่มข้อมูลนี้
- สำหรับเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) แม้ในอำเภอแม่ระมาดและอำเภอท่าสองยาง จะได้ผลการวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของการพยากรณ์ที่ดี แต่ก็ยังมีเทคนิคการพยากรณ์อื่นที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า และในกรณีของอำเภอสามเงา ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากค่าร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ที่ได้ 30.59 % ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) ที่ได้ 1.66 และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD) ที่ได้ 4.67 ซึ่งมีความสอดคล้องไปในทำนองเดียวกัน คือ มีค่ามากที่สุด ดังนั้น เทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ เนื่องจากลักษณะข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอสามเงามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงราคาอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุด

สรุปการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการพยากรณ์สำหรับตัวแบบของตัวแปรเดียวกับข้อมูลที่มีฤดูกาล 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) และเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) มาสร้างเป็นตัวแบบในการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก โดยใช้ข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ได้จากสำนักงานเกษตรจังหวัดตาก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - 2558 เพื่อพยากรณ์ปี พ.ศ. 2559 ยกเว้นในกรณีของอำเภอพบพระที่ใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - 2557 เพื่อพยากรณ์ปี พ.ศ. 2558 จากการวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลด้วยค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต พบว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมรุ่นทั้ง 7 อำเภอในจังหวัดตาก ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอวังเจ้า และอำเภอสามเงา เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือน เว้นแต่อำเภอเมืองตากและอำเภอบ้านตากเท่านั้น ที่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือนเฉพาะข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดตาก โดยส่วนใหญ่เป็นอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาลแบบรายเดือนที่ไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น และวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของผลการพยากรณ์ด้วยร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAPE) ค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย (MAD) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย (MSD)

ผลการวิจัยพบว่า เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) และเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ข้อมูลที่มีฤดูกาลดีกว่าเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) โดยที่เทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF) ให้ผลการพยากรณ์แม่นยำที่สุด เนื่องจากให้ผลการพยากรณ์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคทุกตัวในทุกอำเภอแล้ว และเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) เป็นเทคนิคที่ให้ผลการพยากรณ์โดยส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด เนื่องจากมีหลายอำเภอที่เทคนิคนี้สามารถให้ผลการพยากรณ์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ได้แก่ อำเภอแม่สอด อำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง อำเภอเมืองตาก อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก

และในงานวิจัยนี้ ยังได้ตัวแบบที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 9 อำเภอของจังหวัดตาก จากเทคนิคการพยากรณ์ทั้ง 3 ได้แก่ สมการที่ (2) จากเทคนิคนาอ็พสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีฤดูกาล (SNF), สมการที่ (3) จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (WMA) โดยให้ $n = 2$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภออุ้มผาง อำเภอท่าสองยาง และอำเภอเมืองตาก และให้ $n = 12$ เมื่อต้องการพยากรณ์ราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภอวังเจ้า อำเภอสามเงา และอำเภอบ้านตาก และ สมการที่ (6) จากเทคนิคปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลของวินเทอร์ (WES) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับเรียบ (α) และค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับฤดูกาล (γ) ตามตารางที่ 3

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานเกษตรจังหวัดตาก ที่อนุเคราะห์ข้อมูลราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รุ่น 1 และรุ่น 2 ในเขตพื้นที่จังหวัดตาก และขอขอบพระคุณนางสาวกรรณิศา เครือทุน หัวหน้าศูนย์ภาษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไข บทความนี้
ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

References

- [1] The Secretariat of The House of Representatives. (2015). **Digital Economy**. Access (4 April 2018). Available (http://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2558/mar2558-2.pdf) (in Thai)
- [2] Niruttikul, N. (2016). **Sales Forecasting**. 8th ed. Bangkok : Kasetsart University Press (in Thai)
- [3] Office of Agricultural Economics. (2017). **Agricultural Statistics of Thailand 2016**. Access (4 April 2018). Available (http://www.oae.go.th/public_stat.html) (in Thai)
- [4] Tak Provincial Agriculture and Cooperatives Office. (2017). **Development plan of Agriculture and Cooperatives in Tak province (2017-2021)**. Access (4 April 2018). Available (<http://www.tak.doe.go.th/index.html>) (in Thai)
- [5] Thairath Online. (2016). **The dramatically lower field corn price in Tak province**. Access (4 April 2018). Available (<https://www.thairath.co.th/content/712893>) (in Thai)
- [6] National Farmers Council. (2016). **Annual Report 2016**. Access (4 April 2018). Available (http://www.nfctak.com/images/file_document/F00027.pdf) (in Thai)
- [7] National Farmers Council. (2013). **Annual Report 2013**. Access (4 April 2018). Available (http://www.nfctak.com/images/file_document/F00026.pdf) (in Thai)
- [8] Thongkhajorn, S. (2013). **Appropriate Forecasting Technique, A Case Study of Steel Pipe Factory for Automobile Industry**. M. Eng. Thesis, Industrial Management Engineer King Mongkut's University of Technology North Bangkok (in Thai)
- [9] Theeraviriya, C. (2017). A Comparison of the Forecasting Method for Electric Energy Demand in Nakhonphanom Province. **Naresuan University Journal: Science and Technology**. Vol. 25, No. 4, pp. 124-137 (in Thai)
- [10] Chuentawat, R. Ruangudomsakul, C. Kerdprasop, N. and Kerdprasop, K. (2016). Time Series Analysis of Electrical Distribution Units to Find a Suitable Forecasting Model with R Language. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 9, No. 3, pp. 25-41 (in Thai)
- [11] Schunn, C. D., & Wallach, D. (2005). **Evaluating Goodness-of-Fit in Comparison of Models to Data**. In W. Tack (Ed.), *Psychologie der Kognition: Reden and Vorträge anlässlich der Emeritierung von Werner Tack* (pp. 115-135). Saarbrücken, Germany : University of Saarland Press.
- [12] Keerativibool, W. (2015). Forecasting Model for the Export Values of Canned Food through Customs Department in Southern Thailand. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 3, pp. 72-89 (in Thai)



การพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพ: การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของข้าว อ้อย และ
ปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

Development of the Bio-Based Economy: Conversion of Rice, Sugar Cane and Oil Palm Residues to Value-Added Products

อาทิตย์ อัสวสุชี^{1*} นิภาวรรณ เป้งกลาง¹ พัสตราภรณ์ กิจศิริ¹ รัชดาวรรณ ตามกลาง¹ และฐิติพร วัฒนกุล²

Received: January, 2018; Accepted: February, 2018

บทคัดย่อ

ประเทศไทย 4.0 เป็นโมเดลทางเศรษฐกิจที่มุ่งเน้นแนวคิดเรื่องการขับเคลื่อนที่คนส่วนใหญ่มีส่วนร่วมอย่างเท่าเทียมและทั่วถึง การขับเคลื่อนผ่านการสร้างและยกระดับผลิตภาพ และการขับเคลื่อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ภายใต้โมเดลนี้เศรษฐกิจฐานชีวภาพสามารถสร้างตลาดใหม่สำหรับผู้ผลิตทางการเกษตร เพิ่มนวัตกรรมในการผลิตในประเทศ และกระตุ้นการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ยั่งยืน บทความนี้จะเน้นถึงการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ได้แก่ ข้าว อ้อย ปาล์มน้ำมัน) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม (เช่น สารเติมแต่งในอาหาร เครื่องสำอาง พลังงาน สารเคมี วัสดุ และยา) การเปลี่ยนแปลงหลักเกี่ยวกับการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยกระบวนการทางความร้อน ชีวเคมี และเคมี บทความนี้ไม่เพียงแต่แสดงศักยภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางในการทำให้สามารถดึงประเทศไทยออกจากกับดักรายได้ปานกลาง และพัฒนาเป็นประเทศที่มีรายได้สูง

คำสำคัญ : เศรษฐกิจฐานชีวภาพ; วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร; ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม; ประเทศไทย 4.0

¹ Innovative Materials for Energy and Environment Research Group, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² Department of Science Service, Ministry of Science and Technology, 75/7 Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400

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

Abstract

Thailand 4.0 is an economic model that focuses on the concept of inclusive, productive and green growth engine to enhance the country's competitiveness and economic development. Under the model, the bio-based economy can generate new markets for agricultural producers, boost innovation in domestic manufacturing, and stimulate sustainable economic growth. This article focuses on the conversion of agricultural residues (i.e., rice, sugar cane and oil palm residues) into value-added products (e.g., food additive, cosmetic, energy, chemicals, materials and pharmaceutical products). The key conversion involved in the processing of agricultural residues are thermochemical, biochemical and chemical process. This paper would provide not only a potential to develop a technology for agricultural residues conversion, but also a guide for pulling Thailand out of the middle-income trap and developing it as a high-income country.

Keywords: Bio-Based Economy; Agricultural Residues; Value Added Products; Thailand 4.0

บทนำ

การพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทยนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในยุคแรกเน้นการพัฒนาประเทศด้วยการส่งเสริมการพัฒนาทางด้านการเกษตร เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความอุดมสมบูรณ์ทางด้านทรัพยากรธรรมชาติ และความหลากหลายทางชีวภาพ การพัฒนาในลำดับต่อมาได้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเบา และอุตสาหกรรมหนัก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิต และเป็นอุตสาหกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ ซึ่งถ้าหากไม่มีการพัฒนาต่อยอดด้วยเทคโนโลยี และนวัตกรรมใหม่ อุตสาหกรรมกลุ่มนี้จะถึงจุดอิ่มตัว และมีความสามารถในการเติบโตที่ต่ำ (First S-Curve) แม้ว่าประเทศไทยจะมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการพัฒนาดังกล่าวยังไม่สามารถทำให้ประเทศไทยก้าวข้ามผ่านกับดักประเทศรายได้ปานกลาง (Middle Income Trap) กับดักความไม่เท่าเทียม (Inequality Trap) และกับดักความไม่สมดุลของการพัฒนา (Imbalance Trap) ปัจจุบันรัฐบาลจึงได้มีนโยบายประเทศไทย 4.0 (Thailand 4.0) [1] ซึ่งเป็นเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี ความคิดสร้างสรรค์ และนวัตกรรม แนวทางหนึ่งของการพัฒนาดังกล่าวทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมอนาคต (New S-Curve) ได้แก่ อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ (Robotics) อุตสาหกรรมการบิน และโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) อุตสาหกรรมดิจิทัล (Digital) อุตสาหกรรมการแพทย์ครบวงจร (Medical Hub) และอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีชีวภาพ (Biofuels and Biochemical) [2] ซึ่งในบทความนี้จะเน้นการพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพ (Bio-Based Economy) เพื่อเป็นเครื่องมือขับเคลื่อนในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยใช้การพัฒนาที่เป็นฐานเดิมจากการพัฒนาทางด้านการเกษตร ทั้งนี้การพัฒนา

เศรษฐกิจฐานชีวภาพจะมุ่งเน้นการส่งเสริมการใช้ผลผลิตทางการเกษตรในด้านใหม่ ๆ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เน้นการเสริมสร้างประสิทธิภาพทางการผลิตและศักยภาพของภาคเกษตรกรรม และการก่อตั้ง อุตสาหกรรมใหม่ ๆ ดังนั้นในบทความนี้จะเน้นการนำเสนองานวิจัยที่สนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจ ฐานชีวภาพ โดยนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ประเทศไทยมี ศักยภาพในการผลิต ได้แก่ ข้าว อ้อย และปาล์มน้ำมันให้เป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูงมากขึ้น (Value-Added Products) โดยมุ่งหวังว่าบทความนี้จะ เป็นแนวทางให้เกิดการสร้างองค์ความรู้ทางด้าน วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทย เพื่อให้เกิด การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจเพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านความเหลื่อมล้ำในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การยกระดับคุณภาพชีวิตของเกษตรกรไทยผ่านการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจฐานชีวภาพ

ศักยภาพของข้าว อ้อย และปาล์มน้ำมันในการพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพ

เกษตรกรรมยังคงมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมของประเทศ เนื่องจากเป็น พื้นฐานทางเศรษฐกิจที่สำคัญในการสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรซึ่งเป็นคนส่วนใหญ่ของประเทศ โดยจาก ข้อมูลสถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559 [3] พบว่าพืชเศรษฐกิจที่ประเทศไทยมีศักยภาพ ในการผลิตได้แก่ อ้อย ข้าว และปาล์มน้ำมัน โดยมีผลผลิตต่อปีดังแสดงในตารางที่ 1

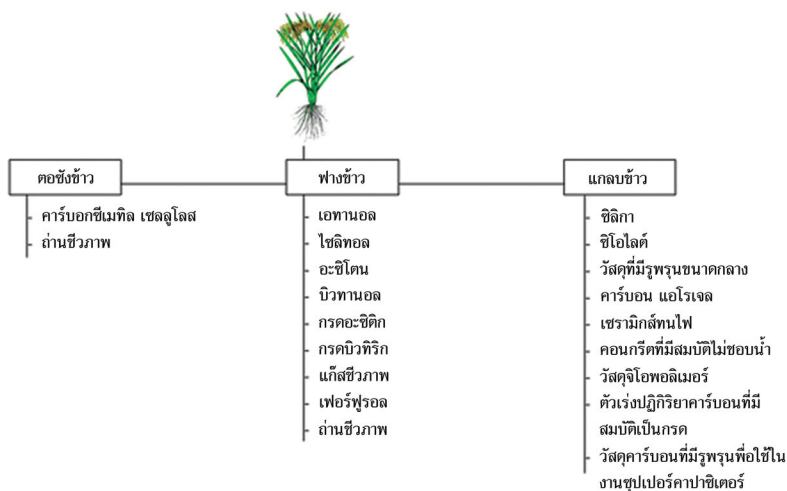
ตารางที่ 1 ผลผลิตของข้าว อ้อย และปาล์มน้ำมัน [3]

ปี	ผลผลิต (1,000 ตัน)		
	ข้าว	อ้อย	ปาล์มน้ำมัน
2555	38,102	98,400	11,312
2556	36,762	100,096	12,435
2557	31,617	103,697	12,473
2558	27,421	106,333	12,047
2559	31,944	94,064	10,997
เฉลี่ย	33,169	100,518	11,853

ผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าวส่วนหนึ่งส่งออกไปยังต่างประเทศสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับ ประเทศไทยปีละหลายพันล้านบาท อย่างไรก็ตามในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรจะมีวัสดุเหลือใช้ เกิดขึ้นจำนวนหนึ่งด้วย กระบวนการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น สามารถทำได้หลายหลากวิธี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางความร้อน ชีวเคมี และเคมี เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) การหมัก การสกัด การสังเคราะห์ และการคัดแปรสมบัติของวัสดุของสารตั้งต้น เพื่อผลิตเป็นพลังงานทางเลือก สารเคมี สารเคมีแต่ง ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดูดซับ

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

กระบวนการแปรรูปข้าวเพื่อการค่านั้น จะได้ส่วนเหลือใช้ ได้แก่ คอซังข้าว ฟางข้าว และแกลบข้าวออกมา (รูปที่ 1) จากรายงานการสำรวจของกรมพัฒนาที่ดิน [4] พบว่า ในแต่ละปีมีปริมาณคอซังข้าว และฟางข้าวที่ได้หลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวปีละ 50 - 60 ล้านตัน คอซังข้าวและฟางข้าวนี้ถือเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าต่ำและไม่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ต่อมากนัก คอซังข้าวมักถูกกำจัดโดยการเผา ซึ่งการเผาทิ้งนั้นจะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมถึงมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการ เผาไหม้ นอกจากนี้ยังอาจกำจัดคอซังข้าวโดยการไถกลบลงไปนดินเพื่อให้เกิดการย่อยสลายแล้วกลายเป็น แหล่งของอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารพืช หรือนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนฟางข้าวนิยมนำมาแปรรูป โดยการอัดเป็นก้อน เพื่อทำเป็นอาหารสัตว์ หรือหมักเป็นปุ๋ย การแปรรูปโดยวิธีนี้ ไม่ได้เป็นการเพิ่มมูลค่า แก่ของเหลือใช้ดังกล่าวมากนัก จากการวิจัยองค์ประกอบของคอซังข้าว และฟางข้าวพบว่า มีส่วนประกอบ ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นส่วนประกอบ [5] หากนำมาปรับสภาพด้วยสารเคมีและ/หรือ วิธีทางชีวภาพจะสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นสารเคมีและพลังงานทดแทน



รูปที่ 1 การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้คอซังข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

จากการศึกษางานวิจัยพบว่ามีการนำคอซังข้าว (Rice Stubble) มาเปลี่ยนเป็นคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose) [6] โดยนำตัวอย่างคอซังที่ผ่านการล้าง และปรับสภาพด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) มาทำให้บวม ด้วยการแช่ในสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับไอโซโพรพานอล (Isopropanol) แล้วนำมาทำปฏิกิริยา กับกรดคลอโรอะซิติก (Chloroacetic Acid) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นให้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที และผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะถูกนำมาใช้สำหรับการผลิตฟิล์ม ไบโอฟอลิเมอร์ (Biopolymer Film) โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม จากการทดลองพบว่าสามารถใช้คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสที่ผลิตจากคอซังข้าวทดแทนคาร์บอกซีเมทิล

เซลลูโลสเกรดการค้าได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล มากไปกว่านั้นยังสามารถนำต่อซึ่งข้าวมาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ (Biochar) [7] โดยการเผาในถังขนาด 200 ลิตร ที่ถูกออกแบบให้ต่อซึ่งข้าวเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมากที่เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส และสามารถนำถ่านชีวภาพที่เตรียมได้นี้มาใช้เป็นวัสดุในการอุ้มน้ำ

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ฟางข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ส่วนฟางข้าว (Rice Straw) นิยมนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าโดยผ่านกระบวนการหมักให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอทานอล และโซลิตอล [8] โดยจะนำฟางข้าวมาหั่น ล้างทำความสะอาด และทำให้แห้ง จากนั้นจะนำมาปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลส และกำจัดลิกนิน หลังจากปรับสภาพด้วยกรดจะนำมามันเหวี่ยง กากที่ได้จะถูกนำไปล้าง อบ และบด ส่วนของเหลวจะถูกนำไประเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้น และนำมาผ่านกระบวนการดีทอกซิฟิเคชัน (Detoxification) ไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) และกระบวนการหมักอย่างต่อเนื่อง (Continuous Co-Fermentation) โดยในขั้นตอนการหมักนั้น *S. cerevisiae* NCIM 3090 จะให้เอทานอลความเข้มข้นสูงที่สุดที่ 66.4 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ *C. tropicalis* NCIM 3119 จะให้โซลิตอลความเข้มข้นสูงที่สุดที่ 9.9 กรัมต่อลิตร สำหรับในกรณีของการผลิตอะซิโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก [9] จะนำฟางข้าวมาปรับสภาพด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (Organosolv Pretreatment) ก่อนที่จะนำมาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ และหมักโดยใช้ *Clostridium acetobutylicum* ซึ่งการนำฟางข้าวที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ใช้สารป้อนของแข็งจำนวน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลูโคสจำนวน 46.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อผ่านการหมักจะให้บิวทานอล 80.3 อะซิโตน 21.1 เอทานอล 22.5 กรดอะซิติก 18.6 และกรดบิวทิริก 19.3 กรัมต่อกิโลกรัมของฟางข้าว มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเปลี่ยนฟางข้าวเป็นแก๊สชีวภาพ [10] โดยใช้ถังหมักชีวภาพ (Bioreactor) ขนาด 300 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งพบว่าสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 323 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของฟางข้าวแห้ง มากไปกว่านั้นยังสามารถนำฟางข้าวมาเปลี่ยนเป็นเพนโตส (Pentose) และนำมาทำปฏิกิริยาไซโคลเดไฮเดรชัน (Cyclodehydration) เป็นเฟอร์ฟูรอล (Furfural) [11] โดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้ปริมาณเฟอร์ฟูรอล 71 กรัมต่อกิโลกรัมของฟางข้าวแห้ง นอกจากนี้ยังมีการศึกษานำฟางข้าวไปใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ (Biochar) [7] โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเช่นเดียวกับในกรณีของการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้ต่อซึ่งข้าว

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้แกลบข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

แกลบข้าว (Rice Husk) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้อีกประเภทหนึ่งซึ่งได้จากกระบวนการสีข้าว มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกามากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ และมีคาร์บอนในช่วง 10 - 40 เปอร์เซ็นต์ และมีแร่ธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อย [12] โดยปกติแกลบข้าวจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ นอกจากนี้แกลบข้าวยังถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงาน [13] การพัฒนาแกลบข้าวให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสามารถทำได้โดยการศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูง [14] โดยใช้กระบวนการปรับสภาพทางเคมี เช่น การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก และของเหลวไอออนิก (Ionic Liquid) ซึ่งจะทำได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.6 และ 99.5 เปอร์เซ็นต์ มากไปกว่านั้นในกรณีที่มีการปรับสภาพด้วยของเหลวไอออนิกสามารถเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเป็น 1.9 และ 2.4 เท่า ตามลำดับ รวมถึงยังสามารถนำแกลบข้าวมาสกัดให้เป็นซิลิกาเพื่อใช้เตรียมซีโอไลต์ [15] - [16] และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous Material) [17] - [19] และสามารถนำแกลบข้าวไปเตรียมเป็นคาร์บอน

แอโรเจลที่มีรูพรุนสูง (Highly Porous Carbon Aerogel) [20] โดยนำแกลบข้าวไปทำการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำแกลบข้าวที่ได้ไปสกัดด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์แอโรเจลโดยใช้วิธีการพอลิเมอร์เซชันแบบโซล-เจล (Sol-Gel Polymerization) ในไอของตัวทำละลายที่อิ่มตัว จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตแอโรเจลจะถูกเปลี่ยน เป็นคาร์บอน/ซิลิกา และคาร์บอน/ซิลิกา/ซิลิกอนคาร์ไบด์โดยการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และคาร์บอเทอร์มัลรีดักชัน (Carbothermal Reduction) ที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ รวมถึงสามารถนำแกลบข้าวมาใช้อุตสาหกรรมเซรามิกส์ทนไฟ (Refractory Ceramic) [21] โดยนำ แกลบข้าวมาเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 องศาเซลเซียส จนได้ซิลิกา และนำซิลิกาที่เตรียมได้นี้มาใช้ทดแทน แร่กาอลิน (Kaolin) รวมถึงการใช้แกลบข้าวมาเคลือบบนผิวของคอนกรีตเพื่อเพิ่มสมบัติไม่ชอบน้ำ (Superhydrophobic) [22] โดยนำแกลบมาทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮเลน (1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl triethoxy silane) และนำมาฉีดเคลือบที่ผิวคอนกรีต คอนกรีตที่เตรียมได้จะมีมุมสัมผัส (Contact Angle) 152.3 องศา ทำให้สามารถป้องกันผิวของคอนกรีตไม่ให้ถูกกัดกร่อนโดยน้ำ ทำให้สามารถ ยืดอายุคอนกรีตได้ นอกจากนี้ยังอาจใช้แกลบร่วมกับกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย (Water Treatment Sludge) สำหรับใช้เตรียมวัสดุซีโอพอลิเมอร์ [23] โดยแกลบจะมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา 89.51 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา และอลูมินาในปริมาณ 34.92 และ 34.11 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารทั้งสองนี้จะช่วยปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาให้เหมาะสมเพื่อใช้ทดแทน เมตาเกอลิน (Metakaolin) ในการเตรียมวัสดุซีโอพอลิเมอร์ สำหรับกรณีของการเตรียมเป็นวัสดุคาร์บอน สามารถทำได้โดยนำแกลบข้าวมาผสมกับฟีนอลและผสมกับกรดซัลฟิวริก จากนั้นนำมาให้ความร้อน และ ทำคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนที่มีสมบัติเป็นกรดสำหรับการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล [24] หรือนำแกลบข้าวมาไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และนำมาสกัดซิลิกาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเตรียมเป็นวัสดุคาร์บอน ที่มีรูพรุนเพื่อใช้ในการงานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor) [25]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของข้าว ได้แก่ ตอซังข้าว พบว่า สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม คือ คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส และถ่านชีวภาพ ในขณะที่ การเปลี่ยนฟางข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม สามารถทำได้โดยการผลิตเป็นเอทานอล ไชลิทอล อะซิโตน บิวทานอล กรดอะซิติก กรดบิวทิริก แก๊สชีวภาพ เพอร์ฟอรอล และถ่านชีวภาพ มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษา การเปลี่ยนแกลบข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มโดยการนำมาผลิตเป็นซิลิกา ซีโอไลต์ วัสดุที่มีรูพรุน ขนาดกลาง คาร์บอน แอโรเจล เซรามิกส์ทนไฟ คอนกรีตที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ วัสดุซีโอพอลิเมอร์ ตัวเร่ง ปฏิกิริยาคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นกรด และวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเพื่อใช้ในการงานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (รูปที่ 1)

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจหลักสำคัญของประเทศไทย ซึ่งรัฐบาลปัจจุบันให้การสนับสนุนเพื่อพัฒนา อุตสาหกรรม 4.0 จากการศึกษาพบว่าในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลได้วัสดุเหลือใช้ เป็น ใบอ้อย ยอดอ้อย ชานอ้อย และโมลาส (Molasses) หรือกากน้ำตาล (รูปที่ 2) จึงมีความพยายามที่จะนำวัสดุเหลือใช้มาสร้าง มูลค่าเพิ่มให้แก่อุตสาหกรรม

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ยอดอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ในกรณีของการศึกษาการนำยอดอ้อย (Sugarcane Top) มาสร้างมูลค่าเพิ่มทำได้โดยการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สมีเทนโดยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มกระบวนการไบโอไฮเทน (Biohythane) [31] ในกระบวนการผลิต โดยจะออกแบบให้เป็นถังปฏิกรณ์คู่ ถังที่ 1 จะทำการเปลี่ยนยอดอ้อยที่ผ่านการย่อยสลายทางชีวภาพให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นกรด (Acidogenesis) โดยจะให้แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ กากที่เหลือจะถูกล้างผ่านมายังถังที่ 2 เพื่อผลิตเป็นมีเทน (Methanogenesis) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งการทำงานร่วมกันของกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ถึง 37.7 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการผลิตน้ำตาลเพื่อใช้สำหรับการเตรียมเอทานอล [32] โดยการผลิตน้ำตาลทำได้โดยการปรับสภาพยอดอ้อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายใต้การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ และเมื่อนำมาย่อยสลายด้วยเอนไซม์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ 0.376 กรัมต่อกรัม

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ปัจจุบันขานอ้อย (Sugarcane Bagasse) ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า และการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในโรงงานน้ำตาล การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ขานอ้อยวิธีการนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขานอ้อยไม่มากนัก มีงานวิจัยที่น่าสนใจมากมายศึกษาการเปลี่ยนขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น การผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) [33] จากการนำขานอ้อยมาปรับสภาพด้วยกรด หรือเบส หรือทั้งกรดและเบส ก่อนที่จะนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350 - 450 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียม หรือออกซิเจนผสมฮีเลียม โดยการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 122 องศาเซลเซียส และนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียม ให้น้ำมันชีวภาพความเข้มข้น 31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้ขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมาให้ความร้อนเพียงขั้นตอนเดียวซึ่งให้น้ำมันชีวภาพความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก อีกวิธีการหนึ่งสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพคือการนำขานอ้อยมาทำการไพโรไลซิส และกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ [34] โดยให้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่าน (Char) น้ำมันชีวภาพ และแก๊สในปริมาณ 25.90 41.11 และ 32.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่า 900 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำขานอ้อยมาใช้ในการผลิตคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส [35] โดยนำขานอ้อยมาผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion Process) ที่อุณหภูมิ 187.15 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อขานอ้อยเท่ากับ 39 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก เซลลูโลสที่เตรียมได้จะถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์ และนำมาทำปฏิกิริยากับกรดโมโนคลอโรอะซิติกที่อุณหภูมิ 57.85 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 4.01 ชั่วโมง ได้ออสการแทนที่ 1.085 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำขานอ้อยมาใช้เตรียมเซลลูโลส อะซิเตด (Cellulose Acetate; CA) [36] โดยการปรับสภาพขานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำมาผ่านขั้นตอนการทำคีเลตติง (Chelating) ด้วยอีดีทีเอ (Ethylenediaminetetraacetic Acid; EDTA) และฟอก (Bleaching) ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อให้ได้เซลลูโลส จากนั้นทำปฏิกิริยาอะเซทิเลชัน (Acetylation) ด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic Anhydride) โดยมีออสการแทนที่เท่ากับ 2.52 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเป็นอีกหนึ่งความพยายามที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับขานอ้อย [37] โดยนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยมาผ่านกระบวนการหมักโดยใช้ยีสต์ *Trichosporon* sp., (RW) ซึ่งสามารถ

ผลิตได้ โดยมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดโอเลอิก รวมถึงกรดปาล์มมิก ลิโนเลอิก และกรดสเตียริก ซึ่งน้ำมันที่ผลิตได้มีค่าซีเทนในช่วง 52.39 - 59.57 ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ อีกความพยายามหนึ่งของการเปลี่ยนขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การเปลี่ยนขานอ้อยเป็นกรดซัคซินิก (Succinic Acid) ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี [38] โดยนำขานอ้อยมาปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และนำมาผ่านการไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์หลายชนิด จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งประกอบด้วย กลูโคส ไสโลส โดยใช้กลุ่มเอนไซม์ที่มีอัตราส่วนเหมาะสม ได้แก่ เซลลูเลส (Cellulase) ไกลาเนส (Xylanase) เบต้า-กลูคาเนส (β -Glucanase) และเพกทิเนส (Pectinase) ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การไฮโดรไลซิสของขานอ้อยที่ได้รับการปรับสภาพแล้วสูงถึง 88.5 เปอร์เซ็นต์ และใช้แบคทีเรียชนิด *Succinogenes* CCTCC M2012036 สำหรับการเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์เป็นกรดซัคซินิกซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเท่ากับ 80.5 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาการเตรียมบิวทานอลจากการหมักขานอ้อยเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างที่น่าสนใจ [39] โดยนอกจากจะได้บิวทานอลเป็นผลิตภัณฑ์หลักแล้วยังได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอะซิติก กรดบิวทิริก เอทานอล และอะซิโตนด้วย อีกรงานวิจัยหนึ่งที่มีการศึกษาการเตรียม 2,3-บิวเทนไดออล (2,3-Butanediol) [40] จากขานอ้อยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายซึ่งประกอบด้วย โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลไฟด์ และนำมาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิต 2,3-บิวเทนไดออลโดยใช้แบคทีเรียชนิด *Enterobacter aerogenes* มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษากระบวนการหมักเพื่อเปลี่ยนขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม โดยการนำขานอ้อยมาผ่านกระบวนการโอโซนชัน (Ozonation) [41] เพื่อผลิตส่วนของเหลว (Liquid Fraction) ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตแก๊สมีเทน และไฮโดรเจน ด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และส่วนของแข็ง (Solid Fraction) จะนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์สำหรับการผลิตเอทานอล มากไปกว่านั้นยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำขานอ้อยมาใช้เป็นตัวดูดซับแมงกานีส(II) ไอออน [42] โดยสามารถเตรียมขานอ้อยเพื่อเป็นตัวดูดซับจากการนำขานอ้อยมาต้มในน้ำเดือด และล้างหลาย ๆ ครั้งเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน และสารที่สามารถละลายออกมาได้เช่นสารให้สี จากนั้นนำมาอบ และปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก นำมาล้าง และอบจะได้ตัวดูดซับที่มีสมบัติเหมาะสม นอกจากนี้ยังอาจเตรียมตัวดูดซับโดยการนำขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ และเตรียมตัวดูดซับได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [43] ตัวดูดซับที่เตรียมได้ถูกนำไปใช้ในการดูดซับกลีเซอรอลเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังมีการใช้ซิลิกาที่เป็นส่วนประกอบในขานอ้อยสำหรับสังเคราะห์ซีโอไลต์ [44] - [45] และวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง [46] ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตอ้อยมาใช้อีกรูปแบบหนึ่งคือการนำขานอ้อยไปใช้เป็นสารช่วยสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโน (Silver Nanoparticles) [47] โดยขานอ้อยจะถูกสกัดด้วยน้ำร้อน และสารผสมระหว่างไทลูน/เอทานอล จากนั้นนำมาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารสกัดที่ได้จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing Agents) และสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing Agents) เมื่อได้สารสกัดแล้ว จะนำสารละลายไดแอมมินซิลเวอร์(I) ($[Ag(NH_3)_2]^+$) มาเติมลงในสารสกัดจากขานอ้อย และนำมากระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยอนุภาคของซิลเวอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 18 - 28 นาโนเมตรมีลักษณะค่อนข้างกลม และถูกห่อหุ้มด้วยสารสกัดจากขานอ้อย (Bagasse Extract) และอนุภาคซิลเวอร์นี้จะถูกนำมาใช้วิเคราะห์ซิสเทอีน (Cystein) ในตัวอย่างซีรัม (Serum)

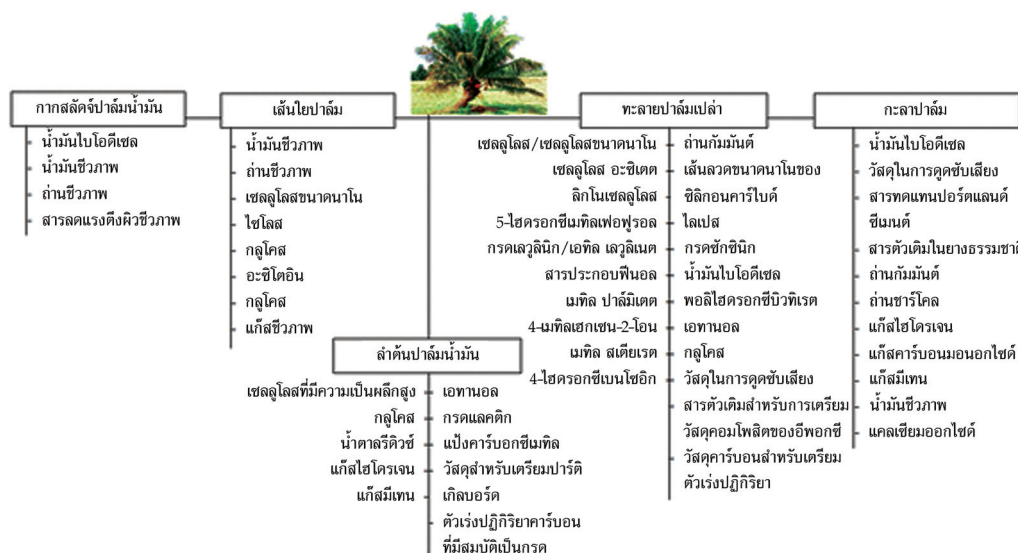
การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้โมลาสเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนโมลาส (Molasses) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การนำโมลาสมาผ่านกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอล [48] - [49] เช่นเดียวกับในกรณีของกระบวนการเปลี่ยนสารชีวภาพที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ รวมถึงสามารถนำโมลาสมาผ่านกระบวนการหมักโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอน (Two-Stage Fixed-Bed Anaerobic Reactor) ในการผลิตแก๊สมีเทน [50] หรือสามารถนำโมลาส และ/หรือน้ำหมักข้าวโพด (Corn Steep Liquor) มาผ่านกระบวนการหมักโดยใช้ *Streptococcus zooepidemicus* ในการผลิตกรดไฮยาลูโรนิก (Hyaluronic acid) [51] ซึ่งเป็นสารที่เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง น้ำตาเทียม และยารักษาอาการข้อเข่าเสื่อม หรือนำโมลาสมาผ่านกระบวนการหมักโดยใช้ *Leuconostoc mesenteroides* MTCC 10508 ในการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharides) [52] นอกจากนี้ยังสามารถนำโมลาส และกากน้ำตาลจากหัวบีท (Sugar Beet Molasses) มาหมักโดยใช้ *Kluyveromyces marxianus* เพื่อใช้สำหรับการผลิตสารที่มีกลิ่นหอม (Aroma Compounds) [53] การนำโมลาสมาหมักโดยใช้ *Clostridium beijerinckii* TISTR 1461 เพื่อใช้สำหรับการผลิตบิวทานอล [54] รวมถึงการนำโมลาสมาหมักโดยใช้ *Bacillus coagulans* เพื่อใช้สำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน [55] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยตรงของชีวมวลแห้งของ *Cunninghamella echinulate* โดยใช้โมลาสเป็นสารตั้งต้นของการหมักในขั้นตอนแรก ส่วนในขั้นตอนที่สองกากของ *Cunninghamella echinulate* จะถูกใช้ในการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนโดย *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 และในขั้นตอนที่สามกากของ *Clostridium* ซึ่งมีกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจะถูกใช้ในการผลิตมีเทน [56] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำโมลาสมาสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด ร่วมกับกระบวนการกลั่นเพื่อเตรียมสารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) ในกลุ่มอนุพันธ์ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid Derivatives) [57] มากไปกว่านั้นโมลาสยังถูกนำมาผ่านการเร่งปฏิกิริยาดัวยระบบการเร่งแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยการใช้กรดลิวอิส (Lewis Acid) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และอลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และการใช้กรดเบรินสเต็ด (Bronsted Acid) ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สำหรับการผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (5-Hydroxymethylfurfural; HMF) [58] ในกรณีของการนำโมลาสมาใช้เตรียมวัสดุคาร์บอน มีงานวิจัยที่ศึกษาการนำโมลาสมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์โดยการนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันและกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมีพื้นที่ผิว 2,202 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการดูดซับแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 100 องศาเซลเซียส [59] นอกจากนี้ยังมีความพยายามเตรียมวัสดุเสมือนคอมโพสิตขนาดนาโนของพาลีโกลไคต์-กราฟีน (Palygorskite-Graphene Like Nanocomposite) ซึ่งเตรียมจากโมลาส และใช้เคลย์พาลีโกลไคต์ (Palygorskite Clay) เป็นแม่แบบ (Template) [60] วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้นี้จะถูกนำมาปรับสภาพด้วยกรดเพื่อกำจัดคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ (Disorder Carbon) ที่เกิดขึ้นภายในเคลย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า กราฟีนออกไซด์เสมือนคาร์บอน (Graphene Oxide-Like Carbon) ซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นซัพพอร์ตสำหรับการผลิตลิเทียมแบตเตอรี่ มากไปกว่านั้นโมลาสยังถูกนำไปใช้เป็นสารช่วยบด (Grinding Aid) สำหรับผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ [61] รวมถึงการนำโมลาสไปใช้ในการผลิตผงคาร์บอน [62] โดยการนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ได้มาบดเพื่อนำไปใช้เป็นสารเสริมแรง (Reinforcing Filler) ในยาง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของอ้อย ได้แก่ ใบอ้อย พบว่าสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม คือ เชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ไฮโดรเจน อะราบีโนส น้ำตาลรีดิวิซ์ ไตรเทอร์พีนอยด์ และวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง ในขณะที่การศึกษางานวิจัยสำหรับการเปลี่ยนยอดอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม คือ การศึกษาการเปลี่ยนเป็นมีเทน และน้ำตาลรีดิวิซ์ ส่วนในกรณีของการศึกษางานวิจัยสำหรับการเปลี่ยนชานอ้อย ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนเป็นน้ำมันชีวภาพ ถ่านกัมมันต์ คาร์บอนซีเมตล เซลลูโลส เซลลูโลส อะซิเตด น้ำมันไบโอดีเซล กรดซัคซินิก บิวทานอล กรดอะซิติก กรดบิวทริก เอทานอล อะซิโตน 2,3-บิวเทนไดออล แก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน ตัวดูดซับ ซีโอไลต์ วัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง และตัวรีดิวิซ์สำหรับการเตรียมอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโน มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเปลี่ยนโมลาสเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล สารแอนติออกซิแดนท์ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล ถ่านกัมมันต์ กราฟีนออกไซด์เสมือนคาร์บอน สารช่วยบด ผงคาร์บอน เอทานอล แก๊สมีเทน กรดไฮยาลูโรนิก โอลิโกแซคคาไรด์ สารที่มีกลิ่นหอม บิวทานอล และแก๊สไฮโดรเจน

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตน้ำมันคอปั่นที่สูงเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น [3] ดังนั้นทำให้มีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันของไทยในปัจจุบันมีภาวะที่ค่อนข้างผันผวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาส่วนเหลือใช้ของปาล์มน้ำมันเพื่อการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหล่านี้ จากการศึกษาพบว่าวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน คือ กะลาปาล์มส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มเปล่า นำไปใช้ทำปุ๋ย ชีวสัจฉิใช้สำหรับผสมอาหารสัตว์ และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ และเส้นใยปาล์ม ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นการลดการซื้อพลังงานจากภายนอกได้



รูปที่ 3 การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

สำหรับในกรณีที่มีการศึกษาการเปลี่ยนทะลายปาล์มเปล่า (Oil Palm Empty Fruit Bunch) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นทำได้โดยการนำทะลายปาล์มเปล่ามาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส และกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ [63] รวมถึงศึกษาการเตรียมเส้นลวดขนาดนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC Nanowires) จากการไพโรไลซิสทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า และแทรกซึม (Infiltration) ด้วยเตตระเอทิล ออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate) [64] สำหรับการใช้กระบวนการหมักเพื่อการเปลี่ยนทะลายปาล์มเปล่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การผลิตไลเปส (Lipase) โดยใช้การหมักด้วย *Trichoderma* strains [65] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษากระบวนการหมักโดยใช้ *A. succinogenes* ATCC 55618 ร่วมกับการทำให้เกิดแซ็กคาไรด์ (Saccharification) เพื่อใช้ในการเตรียมกรดซักซินิก [66] การหมักโดยใช้ *Mucor plumbeus* เพื่อใช้สำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Microbial Oil) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารป้อนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ [67] การหมักโดยใช้ *Bacillus megaterium* R11 เพื่อใช้ในการเปลี่ยนเป็นพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Polyhydroxybutyrate) [68] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำทะลายปาล์มเปล่ามาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส และกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอล [69] รวมถึงมีงานวิจัยที่นำทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เตรียมน้ำตาลกลูโคสโดยผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดเปอร์อะซิติก (Peracetic Acid) และอัลคาไลน์ เปอร์ออกไซด์ (Alkaline Peroxide) เพื่อกำจัดลิกนิน และส่วนที่เหลือจะนำมาผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ โดยสามารถให้ปริมาณกลูโคสถึง 629.8 กรัมต่อกิโลกรัมของทะลายปาล์มเปล่า [70] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำเส้นใยที่ได้จากทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับเสียง [71] รวมถึงมีการศึกษาการนำทะลายปาล์มเปล่ามาเตรียมเป็นสารตัวเติมขนาดนาโนสำหรับการใช้เตรียมวัสดุคอมโพสิตของอีพอกซี (Epoxy Nanocomposites) โดยวัสดุที่เตรียมได้จะมีสมบัติทางความร้อนที่ดีเมื่อมีการเติมสารตัวเติมจากทะลายปาล์มเปล่าจำนวน 3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดี [72] นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่จะนำทะลายปาล์มเปล่ามาเตรียมเป็นเซลล์ูโลสโดยการไอโซเลต (Isolate) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เซลล์ูโลสที่เตรียมได้จะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเตรียมฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานเพื่อใช้สำหรับการกำจัดแคดเมียมในสารละลาย [73] มากไปกว่านั้นยังมียงานวิจัยที่ศึกษาการเตรียมเซลล์ูโลสจากทะลายปาล์มเปล่าโดยเตรียมผ่านภาชนะสังเคราะห์ความดันสูง (Autoclave) และอัลตราโซนิก (Ultrasonication) จากนั้นนำเซลล์ูโลสที่เตรียมได้มาใช้เตรียมวัสดุคอมโพสิตกับพอลิพรอพิลีน [74] รวมถึงมีการศึกษาการนำทะลายปาล์มเปล่ามาผ่านกระบวนการทำเยื่อ (Pulping Process) และนำมาเตรียมเป็นผลึกเซลล์ูโลสขนาดนาโน (Nanocrystalline Cellulose) โดยใช้อัลตราโซนิกช่วยในการไฮโดรไลซิสด้วยกรด โดยวัสดุที่เตรียมได้จะมีความเป็นผลึกสูง มีเสถียรภาพทางความร้อน [75] ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในยา และการขนส่งยา วัสดุทดแทนกระดูก และการซ่อมฟัน ปรับปรุงสมบัติของกระดาษ สารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ สารตัวเติมในอาหารและยา และแอสโรเจล รวมถึงมีการเตรียมเซลล์ูโลส อะซิเตต (Cellulose Acetate) โดยใช้ปฏิกิริยาอะเซทิเลชันแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Acetylation) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส ขั้นตอนประกอบด้วย การกระตุ้นด้วยกรดอะซิติก และตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดกลacial อะซิติก (Glacial Acetic) โดยเซลล์ูโลส อะซิเตตที่เตรียมได้มีองศาการแทนที่เท่ากับ 2.52 [76] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเพิ่มมูลค่าเพิ่มของทะลายปาล์มโดยใช้กระบวนการของเหลวไอออนิก เช่น การผลิตสารประกอบลิกโนเซลล์ูโลส (Lignocellulosic Compounds) โดยการปรับสภาพด้วยของเหลวไอออนิก

(Ionic Liquid) ซึ่งประกอบด้วย 1-บิวทิล-3-เมทิล-อิมิดาโซเลียม คลอไรด์ (1-Butyl-3-methyl-imidazolium chloride) และการปรับสภาพด้วยเบส สารที่เตรียมได้จะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,869 1,736 และ 2,695 กรัมต่อโมล ตามลำดับ [77] การเปลี่ยนทะเลาะปาล์มเปล่า เป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล กรดเลวูลินิก (Levulinic Acid) และเอทิล เลวูลิเนต (Ethyl Levulinate) โดยในสภาวะของเหลวไอออนิกที่มีสมบัติเป็นกรด (Acidic Ionic Liquid) ซึ่งประกอบไปด้วย อินเดียม ไตรคลอไรด์ (Indium Trichloride) และของเหลวไอออนิก 1-เมทิลอิมิดาโซเลียม ไฮโดรเจน ซัลเฟต (1-Methylimidazolium hydrogen sulfate) [78] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเปลี่ยนทะเลาะปาล์มเปล่า ให้เป็นสารประกอบฟีนอล เช่น ฟีนอล กัวอิคอล (Guaiacol) คาทีซอล (Catechol) ซิงกรอล (Syringol) ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และโซลโวเทอร์มัล [79] รวมถึงมีการศึกษาการเปลี่ยนทะเลาะปาล์มเปล่า ด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อนเพื่อเปลี่ยนเป็นของเหลวโดยตรง (Direct Thermochemical Liquefaction) [80] โดยดำเนินการภายใต้สภาวะวิกฤตยิ่งยวด และสภาวะวิกฤตรอง (Sub-Critical) ของตัวทำละลายนอร์มัล-โดเดเคน (*n*-Dodecane) หรือเตตระลิน (Tetralin) หรือของผสมดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส โดยมีการเติมสารไอรอนออกไซด์ (Fe_3O_4) และไฮโดรเจน ในระบบ พบว่าให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นเมทิล ปาล์มิเตต (Methyl Palmitate) 4-เมทิลเฮกเซน-2-โอน (4-Methylhexan-2-one) เมทิล สเตียเรต (Methyl Stearate) และอื่น ๆ นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์ เป็นของแข็งซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเปลี่ยนทะเลาะปาล์มเปล่าด้วย กระบวนการทางความร้อน ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ และไฮโดรเลตเพื่อเตรียมเป็นกรด 4-ไฮดรอกซีเบนโซอิก (4-Hydroxybenzoic acid) [81] รวมถึงมีการศึกษานำทะเลาะปาล์มเปล่ามาปรับสภาพด้วยความร้อน และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเพื่อเตรียมเป็นวัสดุคาร์บอน และวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้นั้นจะนำมาใช้เป็น วัสดุรองรับในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์(II) ออกไซด์ (CuO) เพื่อใช้สำหรับการกำจัดกรดไนตริก ออกไซด์ (Nitric Oxide; NO) [82] และยังมีกรณำทะเลาะปาล์มเปล่ามาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ภายใต้ออกซิเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ในฮีเลียมให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน โดยการใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [83]

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้จากสลัดจ์ปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

สำหรับในกรณีที่มีการศึกษาการเปลี่ยนกากสลัดจ์ปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Sludge) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่มีมูลค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยศึกษาการเปลี่ยนกากสลัดจ์ปาล์มน้ำมันเป็นน้ำมันไบโอดีเซล โดยการนำ ส่วนที่สกัดได้ของกากสลัดจ์ด้วยเฮกเซนมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้อะลูมิเนียม (Alum) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ [84] รวมถึงมีการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [85] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเปลี่ยนกากสลัดจ์ปาล์มน้ำมันที่ถูกปรับสภาพเป็นน้ำมันชีวภาพ และถ่านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส [86] รวมถึงมีการทำไพโรไลซิสแบบช้าเพื่อใช้เตรียมถ่านชีวภาพสำหรับ นำมาใช้ในการดูดซับตะกั่ว โดยภายหลังจากการไพโรไลซิสถ่านชีวภาพจะถูกนำมาโซนิเคต (Sonicate) ในน้ำร้อนเพื่อกำจัดแร่ธาตุตกค้าง และน้ำมัน [87] นอกจากนี้ยังมีการศึกษานำกากสลัดจ์ปาล์มน้ำมัน มาใช้เตรียมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (Biosurfactant) โดยใช้กระบวนการหมัก [88]

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้กะลาปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

ปัจจุบันกะลาปาล์ม (Palm Kernel Shell) ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า อีกแนวทางหนึ่งของการศึกษางานวิจัยและพัฒนาเพื่อเปลี่ยนกะลาปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การศึกษาการนำกะลาปาล์มมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อเตรียมคอนกรีตที่ช่วยในการดูดซับเสียง [89] รวมถึงการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาใช้ในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา [90] และการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาผสมกับเคลย์และนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และนำสารที่เกิดขึ้นมาใช้ทดแทนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) [91] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltrimethoxysilane) เป็นสารคัปปลิง (Coupling Agent) [92] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [93] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาใช้เตรียมถ่านชาร์โคล (Charcoal) โดยการใช้ไมโครเวฟในการกระตุ้นในการทำคาร์บอนในเซชัน [94] รวมถึงมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาใช้เป็นตัวดูดซับซิงค์ไอออน [95] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน [96] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) [97] รวมถึงมีการศึกษาการนำกะลาปาล์มมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำแก๊สซิฟิเคชันจะถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีแคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก และสามารถนำผลิตภัณฑ์นี้มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันกับเมทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [98]

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้เส้นใยปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

เส้นใยปาล์ม (Oil Palm Mesocarp Fibre) เป็นวัสดุเหลือใช้อีกส่วนหนึ่งที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไอน้ำ แนวทางหนึ่งของการนำเทคโนโลยีมาใช้เพื่อเปลี่ยนเส้นใยปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การไพโรไลซิสเส้นใยปาล์มเป็นน้ำมันชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite) ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Ash) ผสมกับเกาหลิน และเบสภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal) [99] รวมถึงศึกษาการนำเส้นใยปาล์มมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ และถ่านชีวภาพ โดยดำเนินการในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-Bed Reactor) [100] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการนำเส้นใยปาล์มมาใช้เตรียมเซลลูโลสขนาดนาโน (Cellulose Nanowhiskers) โดยใช้การไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก ตามด้วยไมโครฟลูอิดิเซชัน (Microfluidization) และนำไปผสมในฟิล์มแบง์เพื่อใช้เตรียมวัสดุคอมโพสิต โดยเซลลูโลสขนาดนาโนที่เตรียมได้จากเส้นใยปาล์มจะช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของวัสดุคอมโพสิต [101] รวมถึงการศึกษาการเตรียมไซโลสและกลูโคสจากเส้นใยปาล์ม โดยการนำเส้นใยปาล์มมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพื่อปรับสภาพ รวมถึงการปรับสภาพเชิงกลโดยใช้บอลมิลลิง (Ball Milling) การปรับสภาพด้วยเบส และไฮโดรไลซิส

ด้วยเอนไซม์ [102] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการนำเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จากนั้นนำมาหมักโดยใช้ *Escherichia Coli* เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็น อะซิโตอิน (Acetoin) [103] รวมถึงการนำเส้นใยปาล์มมาใช้ในการเตรียมกลูโคสผ่านกระบวนการอัดด้วยน้ำร้อน (Hot Compressed Water) และเวท ดิสก์ มิลลิง (Wet Disk Milling) จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์ [104] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยใช้เห็ดนางรม (Oyster Mushroom) และนำมาย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจนร่วมกับมูลสัตว์ (Cattle Manure) ร่วมกับน้ำทิ้งจากการผลิตปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Mill Effluent) เพื่อใช้สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ [105]

การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ลำต้นปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเปลี่ยนลำต้นปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Trunk) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นโดยการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพด้วยตัวทำละลายยูเทคติกเชิงลึก (Deep Eutectic Solvents) ซึ่งประกอบด้วยเอทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ (Ethylammonium Chloride) และเอทิลีน ไกลคอล (Ethylene Glycol) เพื่อกำจัดลิกนิน และเซลลูโลสเพื่อเตรียมเป็นเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง จากนั้นจะนำมาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เพื่อผลิตกลูโคส [106] รวมถึงมีการศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพในระบบซัลไฟต์ (Sulfite Pretreatment to Overcome Recalcitrance of Lignocellulose; SPORL) ก่อนที่จะนำมาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เพื่อผลิตกลูโคส [107] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และนำมาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิซ และนำมาใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดย *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* KKU19 และน้ำทิ้งที่มีสมบัติเป็นกรด (Acidic Effluent) ที่ได้หลังจากการหมักให้เกิดไฮโดรเจนจะถูกนำมาใช้เป็นสารป้อนเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน [108] รวมถึงมีการศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง (Dilute Acid Pretreatment) ก่อนขั้นตอนการทำให้เกิดแซคคาไรด์ด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Saccharification) เพื่อใช้สำหรับการผลิตเอทานอล [109] และการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาผ่านกระบวนการปรับสภาพทางความร้อน การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และการหมักเพื่อเตรียมเป็นกรดแลคติก (Lactic Acid) [110] มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเปลี่ยนลำต้นปาล์มน้ำมันเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการสตีมน้ำแก๊สซิฟิเคชัน (Steam Gasification) [111] และศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาเตรียมเป็นเซลลูโลสที่เป็นผลึกขนาดนาโน (Cellulose Nanocrystal) โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลด้วยกรด (Acid Hydrothermal) [112] รวมถึงการศึกษาการเตรียมเซลลูโลสที่เป็นผลึกขนาดนาโนจากลำต้นปาล์มน้ำมันโดยวิธีที่ปราศจากคลอรีน (Total Chlorine Free Method) โดยนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาไฮโดรไลซิสด้วยน้ำ (Water Pre-Hydrolysis) จากนั้นนำมาผ่านขั้นตอนการทำเยื่อด้วยโซดา (Soda Pulping) แขนในกรดซัลฟิวริก และฟอกขาวด้วยโอโซน (Ozone Bleaching) [113] ในกรณีของการศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาใช้เตรียมวัสดุมีการศึกษาการนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพด้วยน้ำร้อน (Hot Water) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาใช้เป็นปาร์ติเกิลบอร์ด (Particleboard) โดยใช้ยูเรีย ฟอรัลดีไฮด์ [114] นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมปาร์ติเกิลบอร์ดโดยใช้แป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl starch) ที่เตรียมได้จากการปรับสภาพทางเคมีของลำต้นปาล์มน้ำมัน [115] รวมถึงการเตรียมแป้งจากลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยการสกัดด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium Metabisulphite; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ร่วมกับการเติมกรดแลคติก [116] มากไปกว่านั้น

ยังมีการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นกรดจากลำต้นปาล์มน้ำมันโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และนำมาเติมแต่งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดโดยการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ยังมีการเติมแต่งตำแหน่งกรดโดยการฝังตัวด้วยกรดฟอสฟอรัส (Phosphotungstic Acid) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะถูกนำมาศึกษาปฏิกิริยาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล [117]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ของปาล์มน้ำมัน ได้แก่ กากสลัดจ์ ปาล์มน้ำมันพบว่าสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม คือ น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ ส่วนในกรณีของการเปลี่ยนเส้นใยปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม สามารถทำได้โดยการผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ เซลลูโลสขนาดนาโน ไซโลส กลูโคส อะซิโตน กลูโคส และแก๊สชีวภาพ ในขณะที่การศึกษางานวิจัยสำหรับการเปลี่ยนลำต้นปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม คือ การศึกษาการเปลี่ยนเป็นเอทานอล กรดแลคติก แป้งคาร์บอกซีเมทิล วัสดุสำหรับเตรียมปาร์ติเกิลบอร์ด ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นกรด เซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง กลูโคส น้ำตาลรีเวิร์ซ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน ส่วนในกรณีของการศึกษางานวิจัยสำหรับการเปลี่ยนทะลายปาล์มเปล่า ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ เส้นลวดขนาดนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ โลเปส กรดซัลฟิวริก น้ำมันไบโอดีเซล พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต เอทานอล กลูโคส วัสดุในการดูดซับเสียง สารตัวเติมสำหรับการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของอีพอกซี วัสดุคาร์บอนสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เซลลูโลส/เซลลูโลสขนาดนาโน เซลลูโลส อะซิเตต ลิกโนเซลลูโลส 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล กรดเลวูลินิก/เอทิล เลวูลิเนต สารประกอบฟีนอล เมทิล ปาล์มเตต 4-เมทิลเฮกเซน-2-โอน เมทิล สเตียเรต และ 4-ไฮดรอกซีเบนโซอิก มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการเปลี่ยนกะลาปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล วัสดุในการดูดซับเสียง สารทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สารตัวเติมในยางธรรมชาติ ถ่านกัมมันต์ ถ่านชาร์โคล แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำมันชีวภาพ และแคลเซียมออกไซด์ (รูปที่ 3)

สรุป

ในบทความวิชาการนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ได้แก่ ข้าว อ้อย และปาล์มน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมือขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยผ่านการพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพ กระบวนการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้ใช้กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมี โดยการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มจำเป็นที่จะต้องได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาล รวมถึงเป็นโจทย์ที่ท้าทายความรู้ความสามารถของนักวิจัย เพื่อให้สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เป็นทรัพยากรของประเทศมาใช้เพื่อการพึ่งพาตนเองได้ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทย ทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจเพื่อแก้ไขปัญหาความเหลื่อมล้ำในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการยกระดับคุณภาพชีวิตของเกษตรกรไทยผ่านการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจฐานชีวภาพ

References

- [1] Division of Research Administration and Educational Quality Assurance, University of Phayao. (2016). **Blueprint Thailand 4.0 Model Drive of Thailand Towards Wealth, Stability and Sustainable**. Access (10 February 2018). Available (<http://www.libarts.up.ac.th/v2/img/Thailand-4.0.pdf>) (in Thai)
- [2] Ministry of Industry. (2016). **20-Year Development Strategy for Thailand Industry 4.0 (2017-2036)**. Access (10 February 2018). Available (http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_plan/thailandindustrialdevelopmentstrategy4.0.pdf) (in Thai)
- [3] Office of Agricultural Economics. (2017). **Agricultural Statistics of Thailand 2016**. Access (10 February 2018). Available (<http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/ebook/yearbook59.pdf>)
- [4] Kulruengsup, N. (2013). Study on Influence of Burning-No Burning of Rice Stubble Before Harvesting on Yield Per Rai, Outgoing and Income of Farmers. **Journal of Agricultural Economics**. Vol. 59, pp. 2-4 (in Thai)
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2012). **Feasibility Study for the Commercial Production of Cellulosic Ethanol**. Access (10 February 2018). Available (<http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/Final%20Report.pdf>)
- [6] Rodsamran, P. and Sothornvit, R. (2017). Rice Stubble as a New Biopolymer Source to Produce Carboxymethyl Cellulose-Blended Films. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 171, pp. 94-101. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.05.003
- [7] Tansatit, T., Rotchanamekha, S., and Thepwoong, R. (2016). Biochar Production from Stubble and Rice Straw for Water Holding in Soil. In **The 1st National RMUTR Conference**. RMUTR: Nakhonpathom. (in Thai)
- [8] Zahed, O., Jouzani, G. S., Abbasalizadeh, S., Khodaiyan, F., and Tabatabaei, M. (2016). Continuous Co-Production of Ethanol and Xylitol from Rice Straw Hydrolysate in a Membrane Bioreactor. **Folia Microbiologica**. Vol. 61, Issue 3, pp. 179-189. DOI: 10.1007/s12223-015-0420-0
- [9] Amiri, H., Karimi, K., and Zilouei, H. (2014). Organosolv Pretreatment of Rice Straw for Efficient Acetone, Butanol, and Ethanol Production. **Bioresource Technology**. Vol. 152, pp. 450-456. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.038
- [10] Zhou, J., Yang, J., Yu, Q., Yong, X., Xie, X., Zhang, L., Wei, P., and Jia, H. (2017). Different Organic Loading Rates on the Biogas Production During the Anaerobic Digestion of Rice Straw: A pilot study. **Bioresource Technology**. Vol. 244, Part 1, pp. 865-871. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.146
- [11] Sashikala, M. and Ong, H. K. (2007). Synthesis and Identification of Furfural from Rice Straw. **Journal of Tropical Agriculture and Food Science**. Vol. 35, Issue 1, pp. 165-172

- [12] Shen, Y., Zhao, P., and Shao, Q. (2014). Porous Silica and Carbon Derived Materials from Rice Husk Pyrolysis Char. **Microporous and Mesoporous Materials**. Vol. 188, pp. 46-76. DOI: 10.1016/j.micromeso.2014.01.005
- [13] Yoomun, P. (2013). Analysis the Potential of Bio-Energy from Residual Biomasses in Lampang Province. Case study: Mae-Tha District. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. Vol. 6, No. 2, pp. 35-45 (in Thai)
- [14] Lee, J. H., Kwon, J. H., Lee, J. -W., Lee, H. -S., Chang, J. H., and Sang, B. -I. (2017). Preparation of High Purity Silica Originated from Rice Husks by Chemically Removing Metallic Impurities. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. Vol. 50, pp. 79-85. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.01.033
- [15] Khoshbin, R. and Karimzadeh, R. (2017). The Beneficial use of Ultrasound in Free Template Synthesis of Nanostructured ZSM-5 Zeolite from Rice Husk ash used in Catalytic Cracking of Light Naphtha: Effect of Irradiation Power. **Advanced Powder Technology**. Vol. 28, Issue3, pp. 973-982. DOI: 10.1016/j.appt.2017.01.001
- [16] Khoshbin, R. and Karimzadeh, R. (2017). Synthesis of Mesoporous ZSM-5 from Rice Husk ash with Ultrasound Assisted Alkali-Treatment Method used in Catalytic Cracking of Light Naphtha. **Advanced Powder Technology**. Vol. 28, Issue 8, pp. 1888-1897. DOI: 10.1016/j.appt.2017.04.024
- [17] Suyanta and Kuncaka, A. (2011). Utilization of Rice Husk as Raw Material in Synthesis of Mesoporous Silicates MCM-41. **Indonesian Journal of chemistry**. Vol. 11, Issue 3, pp. 279-284
- [18] Srivastava, V. C., Mall, I. D., and Mishra, I. M. (2006). Characterization of Mesoporous Rice Husk Ash (RHA) and Adsorption Kinetics of Metal Ions from Aqueous Solution onto RHA. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. B134, Issue 1-3, pp. 257-267. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.052
- [19] Boonpoke, A., Chiarakorn, S., Laosiripojana, N., and Chidthaisong A. (2016). Enhancement of Carbon Dioxide Capture by Amine-Modified Rice Husk Mesoporous Material. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. Vol. 35, Issue 6, pp. 1716-1723. DOI: 10.1002/ep.12423
- [20] Ghafoorian, N. S., Bahramian, A. R., and Seraji, M. M. (2015). Investigation of the Effect of Rice Husk Derived Si/SiC on the Morphology and Thermal Stability of Carbon Composite Aerogels. **Materials and Design**. Vol. 86, pp. 279-288. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.093
- [21] Sobrosa, F. Z., Stochero, N. P., Marangon, E., and Tier, M. D. (2017). Development of Refractory Ceramics from Residual Silica Derived from Rice Husk Ash. **Ceramics International**. Vol. 43, Issue 9, pp. 7142-7146. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.02.147
- [22] Husni, H., Nazari, M. R., Yee, H. M., Rohim, R., Yusuff, A., Ariff, M. A. M., Ahmad, N. N. R., Leo, C. P., and Junaidi, M. U. M. (2017). Superhydrophobic Rice Husk ash Coating on Concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 144, pp. 385-391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.078

- [23] Geraldo, R. H., Fernandes, L. F. R., and Camarini, G. (2017). Water Treatment Sludge and Rice Husk Ash to Sustainable Geopolymer Production. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 149, pp. 146-155. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.076
- [24] Guo, M. -L., Yin, X. -Y. and Huang, J. (2017). Preparation of Novel Carbonaceous Solid Acids from Rice Husk and Phenol. **Materials Letters**. Vol. 196, pp. 23-25. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.025
- [25] Zhang, W., Lin, N., Liu, D., Xu, J., Sha, J., Yin, J., Tan, X., Yang, H., Lu, H., and Lin, H. (2017). Direct Carbonization of Rice Husk to Prepare Porous Carbon for Supercapacitor Applications. **Energy**. Vol. 128, pp. 618-625. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.065
- [26] Jorapur, R. and Rajvanshi, A. K. (1997). Sugarcane Leaf-Bagasse Gasifiers for Industrial Heating Applications. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 13, Issue 3, pp. 141-146. DOI: 10.1016/S0961-9534(97)00014-7
- [27] Boochapun, S., Lamamorphanth, W., and Kamwilaisak, K. (2014). The Acid Hydrolysis of Sugarcane Leaves as a Biofeedstock for Bioethanol Production. **Advanced Materials Research**. Vols. 931-932, pp. 194-199
- [28] Moodley, P. and Gueguim Kana, E. B. (2017). Microwave-Assisted Inorganic Salt Pretreatment of Sugarcane Leaf Waste: Effect on Physiochemical Structure and Enzymatic Saccharification. **Bioresource Technology**. Vol. 235, pp. 35-42. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.031
- [29] Attard, T. M., McElroy, C. Rob, Rezende, C. A., Polikarpov, I., Clark, J. H., and Hunt, A. J. (2015). Sugarcane Waste as a Valuable Source of Lipophilic Molecules. **Industrial Crops and Products**. Vol. 76, pp. 95-103. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.077
- [30] Arumugam, A. and Ponnusami, V. (2013). Modified SBA-15 Synthesized Using Sugarcane Leaf Ash for Nickel Adsorption. **Indian Journal of Chemical Technology**. Vol. 20, pp. 101-105
- [31] Kumari, S. and Das, D. (2016). Biologically Pretreated Sugarcane Top as a Potential Raw Material for the Enhancement of Gaseous Energy Recovery by Two Stage Biohythane Process. **Bioresource Technology**. Vol. 218, pp. 1090-1097. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.070
- [32] Maurya, D. P., Vats, S., Rai, S., and Negi, S. (2013). Optimization of Enzymatic Saccharification of Microwave Pretreated Sugarcane Tops Through Response Surface Methodology for Biofuel. **Indian Journal of Experimental Biology**. Vol. 51, pp. 992-996
- [33] Cunha, J. A., Pereira, M. M., Valente, L. M. M., de la Piscina, P. R., Homs, N., and Santos, M. R. L. (2011). Waste Biomass to Liquids: Low Temperature Conversion of Sugarcane Bagasse to Bio-Oil. The Effect of Combined Hydrolysis Treatments. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 35, Issue 5, pp. 2106-2116. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.02.019
- [34] Goncalves, G. C., Pereira, N. C., and Veit, M. T. (2016). Production of Bio-Oil and Activated Carbon from Sugarcane Bagasse and Molasses. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 85, pp. 178-186. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.12.013

- [35] Golbaghi, L., Khamforoush, M., and Hatami, T. (2017). Carboxymethyl Cellulose Production from Sugarcane Bagasse with Steam Explosion Pulping: Experimental, Modeling, and Optimization. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 174, pp. 780-788. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.06.123
- [36] Candido, R. G., Godoy, G. G., and Goncalves, A. R. (2017). Characterization and Application of Cellulose Acetate Synthesized from Sugarcane Bagasse. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 167, pp. 280-289. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.03.057
- [37] Brar, K. K., Sarma, A. K., Aslam, M. Polikarpov, I., and Chadha, B. S. (2017). Potential of Oleaginous Yeast *Trichosporon* sp., for Conversion of Sugarcane Bagasse Hydrolysate Into Biodiesel. **Bioresource Technology**. Vol. 242, pp. 161-168. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.155
- [38] Chen, P., Tao, S., and Zheng, P. (2016). Efficient and Repeated Production of Succinic Acid by Turning Sugarcane Bagasse Into Sugar and Support. **Bioresource Technology**. Vol. 211, pp. 406-413. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.108
- [39] Phachan, N., Fiala, K., and Apirakakorn, J. (2017). Isolation of Cellulolytic Clostridia and Their Performance for One-Step Butanol Production from Sugarcane Bagasse. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 163-168. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.144
- [40] Um, J., Kim, D. G., Jung, M. -Y., Saratale, G. D., and Oh, M. -K. (2017). Metabolic Engineering of *Enterobacter aerogenes* for 2,3-butanediol Production from Sugarcane Bagasse Hydrolysate. **Bioresource Technology**. Vol. 245, Part B, pp. 1567-1574. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.166
- [41] Adarme, O. F. H., Baeta, B. E. L., Lima, D. R. S., Gurgel, L. V. A., and de Aquino, F. (2017). Methane and Hydrogen Production from Anaerobic Digestion of Soluble Fraction Obtained by Sugarcane Bagasse Ozonation. **Industrial Crops and Products**. Vol. 109, pp. 288-299. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.040
- [42] Esfandiar, N., Naserneja, B., and Ebadi, T. (2014). Removal of Mn(II) from Groundwater by Sugarcane Bagasse and Activated Carbon (A Comparative Study): Application of Response Surface Methodology (RSM). **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. Vol. 20, Issue 5, pp. 3726-3736. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.12.072
- [43] Alves, M. J., Cavalcanti, I. V., de Resende, M. M., Cardoso, V. L., and Reis, M. H. (2016). Biodiesel Dry Purification with Sugarcane Bagasse. **Industrial Crops and Products**. Vol. 89, pp. 119-127. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.05.005
- [44] Moises, M. P., da Silva, C. T. P., Meneguim, J. G., Girotto, E. M., and Radovanovic, E. (2013). Synthesis of Zeolite NaA from Sugarcane Bagasse Ash. **Materials Letters**. Vol. 108, pp. 243-246. DOI: 10.1016/j.matlet.2013.06.086
- [45] Thuadaij, P. and Mukda, P. (2016). Synthesis and Characterization of Zeolite Derived from Buriram Sugarcane Bagasse Ash and Narathiwat Kaolinite. **SNRU Journal of Science and Technology**. Vol. 8, No. 3, pp. 320-326

- [46] Norsuraya, S., Fazlena, H., and Norhasyimi, R. (2016). Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). **Procedia Engineering**. Vol. 148, pp. 839-846. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.627
- [47] Shen, Z., Han, G., Liu, C. Wang, X., and Sun, R. (2016). Green Synthesis of Silver Nanoparticles with Bagasse for Colorimetric Detection of Cysteine in Serum Samples. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 686, pp. 82-89. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.348
- [48] Silalertruksa, T., Gheewala, S. H., and Pongpat, P. (2015). Sustainability Assessment of Sugarcane Biorefinery and Molasses Ethanol Production in Thailand Using Eco-Efficiency Indicator. **Applied Energy**. Vol. 160, pp. 603-609. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.087
- [49] Khatiwada, D., Venkata, B. K., Silveira, S., and Johnson, F. X. (2016). Energy and GHG Balances of Ethanol Production from Cane Molasses in Indonesia. **Applied Energy**. Vol. 164, pp. 756-768. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.032
- [50] Meng, X., Yuan, X., Ren, J., Wang, X., Zhu, W., and Cui, Z. (2017). Methane Production and Characteristics of the Microbial Community in a Two-Stage Fixed-Bed Anaerobic Reactor Using Molasses. **Bioresource Technology**. Vol. 241, pp. 1050-1059. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.181
- [51] Amado, I. R., Vazquez, J. A., Pastrana, L., and Teixeira, J. A. (2017). Microbial Production of Hyaluronic Acid from Agro-industrial by-products: Molasses and Corn Steep Liquor. **Biochemical Engineering Journal**. Vol. 117, Part A, pp. 181-187. DOI: 10.1016/j.bej.2016.09.017
- [52] Sharma, M., Patel, S. N., Lata, K., Singh, U., Krishania, M., Sangwan, R. S., and Singh, S. P. (2016). A Novel Approach of Integrated Bioprocessing of Cane Molasses for Production of Prebiotic and Functional Bioproducts. **Bioresource Technology**. Vol. 219, pp. 311-318. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.131
- [53] Martinez, O., Sanchez, A., Font, X., and Barrena, R. (2017). Valorization of Sugarcane Bagasse and Sugar Beet Molasses Using *Kluyveromyces marxianus* for Producing Value-Added Aroma Compounds Via Solid-State Fermentation. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 158, pp. 8-17. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.155
- [54] Wechgama, K., Laopaiboon, L., and Laopaiboon, P. (2017). Enhancement of Batch Butanol Production from Sugarcane Molasses Using Nitrogen Supplementation Integrated with Gas Stripping for Product Recovery. **Industrial Crops and Products**. Vol. 95, pp. 216-226. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.10.012
- [55] Glinwong, C., Lertsriwong, S., and Chulalaksananukul, W. (2017). Hydrogen Producer Isolated from Agricultural Wastewater and Molasses. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 140-144. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.081

- [56] Abd-Alla, M. H., Bagy, M. M. K., Morsy, F. M., and Hassan, E. A. (2017). Enhancement of Biodiesel, Hydrogen and Methane Generation from Molasses by *Cunninghamella echinulata* and Anaerobic Bacteria Through Sequential Three-Stage Fermentation. **Energy**. Vol. 78, pp. 543-554. DOI: 10.1016/j.energy.2014.10.041
- [57] Guan, Y., Tang, Q., Fu, X., Yu, S., Wu, S., and Chen, M. (2014). Preparation of Antioxidants from Sugarcane Molasses. **Food Chemistry**. Vol. 152, pp. 552-557. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.12.016
- [58] Gomes, G. R., Rampon, D. S., and Ramos, L. P. (2017). Production of 5-(hydroxymethyl)-furfural from Water-Soluble Carbohydrates and Sugarcane Molasses. **Applied Catalysis A: General**. Vol. 545, pp. 127-133. DOI: 10.1016/j.apcata.2017.07.049
- [59] Srenseck-Nazzal, J., Kaminska, W., Michalkiewicz, B., and Koren Z. C. (2013). Production, Characterization and Methane Storage Potential of KOH-Activated Carbon from Sugarcane Molasses. **Industrial Crops and Products**. Vol. 47, pp. 153-159. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.03.004
- [60] Alvarez, E. D., Laffita, Y. M., Montoro, L. A., Mohallem, N. D. S., Cabrera, H., Pérez, G. M., Frutis, M. A., and Cappe, E. P. (2015). Electrical, Thermal and Electrochemical Properties of Disordered Carbon Prepared from Palygorskite and Cane Molasses. **Journal of Solid State Chemistry**. Vol. 246, pp. 404-411. DOI: 10.1016/j.jssc.2016.09.024
- [61] Li, H., Jiang, Z., Yang, X., Yu, L., Zhang, G., and Wu, J. (2015). Sustainable Resource Opportunity for Cane Molasses: use of Cane Molasses as a Grinding Aid in the Production of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 93, pp. 56-64. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.027
- [62] Saowapark, T., Plao-le, S., Chaichana, E., and Jaturapiree, A. (2017). Role of Eco-Friendly Molasses Carbon Powder as a Filler in Natural Rubber Vulcanizates. **Materials Today: Proceedings**. Vol. 4, Issue 5, pp. 6450-6457. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.152
- [63] Osman, N. B., Shamsuddin, N., and Uemura, Y. (2016). Activated Carbon of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB): Core and shaggy. **Procedia Engineering**. Vol. 148, pp. 758-764. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.610
- [64] Chiew, Y. L. and Cheong, K. Y. (2012). Growth of SiC Nanowires Using Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibres Infiltrated with Tetraethyl Orthosilicate. **Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures**. Vol. 44, Issue 10, pp. 2041-2049. DOI: 10.1016/j.physe.2012.06.008
- [65] Musa, H., Han, P. C., Kasim, F. H. and Gopinath, S. C. B. (2017). Turning Oil Palm Empty Fruit Bunch Waste Into Substrate for Optimal Lipase Secretion on Solid State Fermentation by *Trichoderma* Strains. **Process Biochemistry**. Vol. 63, pp. 35-41. DOI: 10.1016/j.procbio.2017.09.002

- [66] Akhtar, J. and Idris, A. (2017). Oil Palm Empty Fruit Bunches a Promising Substrate for Succinic Acid Production Via Simultaneous Saccharification and Fermentation. **Renewable Energy**. Vol. 114, Part B, pp. 917-923. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.113
- [67] Ahmad, F. B., Zhang, Z., Doherty, W. O. S., Te'o, V. S. J., and O'Hara, I. M. (2017). Improved Microbial Oil Production from Oil Palm Empty Fruit Bunch by *Mucor plumbeus*. **Fuel**. Vol. 194, pp. 180-187. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.01.013
- [68] Zhang, Y., Sun, W., Wang, H., and Geng, A. (2013). Polyhydroxybutyrate Production from Oil Palm Empty Fruit Bunch Using *Bacillus megaterium* R11. **Bioresource Technology**. Vol. 147, pp. 307-314. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.08.029
- [69] Duangwang, S. and Sangwichien, C. (2015). Utilization of Oil Palm Empty Fruit Bunch Hydrolysate for Ethanol Production by Baker's Yeast and Loog-Pang. **Energy Procedia**. Vol. 79, pp. 157-162. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.455
- [70] Palamae, S., Dechatiwongse, P., Choorit, W., Chisti, Y., and Prasertsan, P. (2017). Cellulose and Hemicellulose Recovery from Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Fibers and Production of Sugars from the Fibers. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 155, pp. 491-497. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.09.004
- [71] Or, K. H., Putra, A., and Selamat, M. Z. (2017). Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibres as Sustainable Acoustic Absorber. **Applied Acoustics**. Vol. 119, pp. 9-16. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.12.002
- [72] Saba, N., Jawaid, M., Paridah, M. T., and Alothman, O. (2017). Physical, Structural and Thermomechanical Properties of Nano Oil Palm Empty Fruit Bunch Filler Based Epoxy Nanocomposites. **Industrial Crops & Products**. Vol. 108, pp. 840-843. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.07.048
- [73] Rahmi, Lelifajri, Julinawati, and Shabrina. (2017). Preparation of Chitosan Composite Film Reinforced with Cellulose Isolated from Oil Palm Empty Fruit Bunch and Application in Cadmium Ions Removal from Aqueous Solutions. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 170, pp. 226-233. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.04.084
- [74] Abdullah, M. A., Nazir, M. S., Raza, M. R., Wahjoedi, B. A., and Yussof, A. W. (2016). Autoclave and Ultra-Sonation Treatments of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibers for Cellulose Extraction and Its Polypropylene Composite Properties. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 126, pp. 686-697. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.107
- [75] Azrina, Z. A. Z., Beg, M. D. H., Rosli, M. Y., Ramli, R., Junadi, N., and Alam, A. K. M. M. (2017). Spherical Nanocrystalline Cellulose (NCC) from Oil Palm Empty Fruitbunch Pulp Via Ultrasound Assisted Hydrolysis. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 162, pp. 115-120. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.01.035

- [76] Daud, W. R. W. and Djuned, F. M. (2015). Cellulose Acetate from Oil Palm Empty Fruit Bunch Via a One Step Heterogeneous Acetylation. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 132, pp. 252-260. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.06.011
- [77] Mohtar, S. S., Busu, T. N. Z. T. M., Noor, A. M. M. N., Shaari, N., and Mat, H. (2017). An Ionic Liquid Treatment and Fractionation of Cellulose, Hemicellulose and Lignin from Oil Palm Empty Fruit Bunch. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 166, pp. 291-299. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.02.102
- [78] Tiong, Y. W., Yap, C. L., Gan, S., and Yap, W. S. P. (2017). One-Pot Conversion of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Mesocarp Fiber Biomass to Levulinic Acid and Upgrading to Ethyl Levulinate Via Indium Trichloride-Ionic Liquids. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 168, pp. 1251-1261. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.050
- [79] Lee, H. -S., Lee, H., Ha, J. -M., Kim, J., and Suh, D. J. (2015). Production of Aromatic Compounds from Oil Palm Empty Fruit Bunches by Hydro- and Solvothermolysis. **Industrial Crops and Products**. Vol. 76, pp. 104-111. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.083
- [80] Koriakin, A., Moon, S., Kim, D. -W., and Lee, C. -H. (2017). Liquefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch Using Sub- and Supercritical Tetralin, *n*-dodecane, and Their Mixture. **Fuel**. Vol. 208, pp. 184-192. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.010
- [81] Rasmussen, H., Mogensen, K. H., Jeppesen, M. D., Sorensen, H. R., and Meyer, A. S. (2016). 4-Hydroxybenzoic acid from hydrothermal pretreatment of oil palm empty fruit bunches - Its origin and influence on biomass conversion. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 93, pp. 209-216
- [82] Ahmad, N., Ibrahim, N., Ali, U. F. M., Yusuf, S. Y., and Ridwan, F. M. (2016). Carbon-Supported CuO Catalyst Prepared from Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) for Low-Temperature NO removal. **Procedia Engineering**. Vol. 148, pp. 823-829. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.623
- [83] Ismail, K., Yarmo, M. A. Taufiq-Yap, Y. H., and Ahmad, A. (2012). The Effect of Particle Size of CaO and MgO as Catalysts for Gasification of Oil Palm Empty Fruit Bunch to Produce Hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 37, pp. 3639-3644. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.100
- [84] Abdullah, Sianipar, R. N. R., Ariyani, D., and Nata, I. F. (2017). Conversion of Palm Oil Sludge to Biodiesel Using Alum and KOH as Catalysts. **Sustainable Environment Research**. Vol. 27, Issue 6, pp. 291-295. DOI: 10.1016/j.serj.2017.07.002
- [85] Nasaruddin, R. R., Alam, M. Z., and Jami, M. S. (2014). Evaluation of Solvent System for the Enzymatic Synthesis of Ethanol-Based Biodiesel from Sludge Palm Oil (SPO). **Bioresource Technology**. Vol. 154, pp. 155-161. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.095

- [86] Thangalazhy-Gopakumar, S., Al-Nadheri, W. M. A., Jegarajan, D., Sahu, J. N., Mubarak, N. M., and Nizamuddin, S. (2015). Utilization of Palm Oil Sludge Through Pyrolysis for Bio-Oil and Bio-Char Production. **Bioresource Technology**. Vol. 178, pp. 65-69. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.068
- [87] Lee, X. J., Lee, L. Y., Hiew, B. Y. Z., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., and Ng, H. K. (2017). Multistage Optimizations of Slow Pyrolysis Synthesis of Biochar from Palm Oil Sludge for Adsorption of Lead. **Bioresource Technology**. Vol. 245, Part A, pp. 944-953. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.175
- [88] Nawawi, W. M. F. W., Jamal, P., and Alam, M. Z. (2010). Utilization of Sludge Palm Oil as a Novel Substrate for Biosurfactant Production. **Bioresource Technology**. Vol. 101, Issue 23, pp. 9241-9247. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.07.024
- [89] Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, Hussin, M. W., Khan, R., and Rafieizonooz, M. (2017). Properties of Quiet Pervious Concrete Containing Oil Palm Kernel Shell and Cockleshell. **Applied Acoustics**. Vol. 122, pp. 113-120. DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.02.014
- [90] Gibigaye, M., Godonou, G. F., Katte, R., and Degan, G. (2017). Structured Mixture Proportioning for Oil Palm Kernel Shell Concrete. **Case Studies in Construction Materials**. Vol. 6, pp. 219-224. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.04.004
- [91] Bediako, M., Gawu, S. K., Adjaottor, A. A., Ankrah, J. S., and Atiemo, E. (2016). Analysis of Co-Fired Clay and Palm Kernel Shells as a Cementitious Material in Ghana. **Case Studies in Construction Materials**. Vol. 5, pp. 46-52. DOI: 10.1016/j.cscm.2016.06.001
- [92] Daud, S. Ismail, H. and Bakar, A. A. (2016). The Effect of 3-aminopropyltrimethoxysilane (AMEO) as a Coupling Agent on Curing and Mechanical Properties of Natural Rubber/ Palm Kernel Shell Powder Composites. **Procedia Chemistry**. Vol. 19, pp. 327-334. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.019
- [93] Rashidi, N. A. and Yusap, S. (2017). Potential of Palm Kernel Shell as Activated Carbon Precursors Through Single Stage Activation Technique for Carbon Dioxide Adsorption. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 168, pp. 474-486. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.045
- [94] Zainal, N. H., Aziz, A. A., Idris, J., Mamat, R., Hassan, M. A., Bahrin, E. K. and Abd-Aziz, S. (2017). Microwave-Assisted Pre-Carbonisation of Palm Kernel Shell Produced Charcoal with High Heating Value and Low Gaseous Emission. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 142, pp. 2945-2949. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.176
- [95] Karri, R. R. and Sahu, J. N. (2018). Modeling and Optimization by Particle Swarm Embedded Neural Network for Adsorption of Zinc(II) by Palm Kernel Shell Based Activated Carbon from Aqueous Environment. **Journal of Environmental Management**. Vol. 206, pp. 178-191. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.10.026

- [96] Hussain, M., Tufa, L. D., Azlan, R. N. A. R., Yusup, S. and Zabiri, H. (2016). Steady State Simulation Studies of Gasification System Using Palm Kernel Shell. **Procedia Engineering**. Vol. 148, pp. 1015-1021. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.523
- [97] Asadullah, M., Rasid, N. S. A., Kadir, S. A. S. A. and Azdarpour, A. (2013). Production and Detailed Characterization of Bio-Oil from Fast Pyrolysis of Palm Kernel Shell. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 59, pp. 316-324. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.08.037
- [98] Bazargan, A., Kostic, M. D., Stamenkovic, O. S., Veljkovic, V. B., and McKay, G. (2015). A Calcium Oxide-Based Catalyst Derived from Palm Kernel Shell Gasification Residues for Biodiesel Production. **Fuel**. Vol. 150, pp. 519-525. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.02.046
- [99] Khanday, W. A., Kabir, G. and Hameed, B. H. (2016). Catalytic Pyrolysis of Oil Palm Mesocarp Fibre on a Zeolite Derived from Low-Cost Oil Palm Ash. **Energy Conversion and Management**. Vol. 127, pp. 265-272. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.093
- [100] Kabir, G., Din, A. T. M. and Hameed, B. H. (2017). Pyrolysis of Oil Palm Mesocarp Fiber and Palm Frond in a Slow-Heating Fixed-Bed Reactor: A Comparative Study. **Bioresource Technology**. Vol. 241, pp. 563-572. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.180
- [101] de Campos, A., de Sena Neto, A. R., Rodrigues, V. B., Luchesi, B. R., Moreira, F. K. V., Correa, A. C., Mattoso, L. H. C., and Marconcini, J. M. (2017). Bionanocomposites Produced from Cassava Starch and Oil Palm Mesocarp Cellulose Nanowhiskers. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 175, pp. 330-336. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.07.080
- [102] Zakaria, M. R., Hirata, S., and Hassan, M. A. (2014). Combined Pretreatment Using Alkaline Hydrothermal and Ball Milling to Enhance Enzymatic Hydrolysis of Oil Palm Mesocarp Fiber. **Bioresource Technology**. Vol. 169, pp. 236-243. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.06.095
- [103] YuSoff, M. Z. M., Akita, H., Hassan, M. A., Fujimoto, S., Yoshida, M., Nakashima, N., and Hoshino, T. (2017). Production of Acetoin from Hydrothermally Pretreated Oil Mesocarp Fiber Using Metabolically Engineered *Escherichia coli* in a Bioreactor System. **Bioresource Technology**. Vol. 245, Part A, pp. 1040-1048. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.131
- [104] Zakaria, M. R., Norrrahim, M. N. F., Hirata, S., and Hassan, M. A. (2015). Hydrothermal and Wet Disk Milling Pretreatment for High Conversion of Biosugars from Oil Palm Mesocarp Fiber. **Bioresource Technology**. Vol. 181, pp. 263-269. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.072
- [105] Saidu, M., Yuzir, A., Salim, M. R., Salmiati, Azman, S., and Abdullah, N. (2014). Biological Pre-Treated Oil Palm Mesocarp Fibre with Cattle Manure for Biogas Production by Anaerobic Digestion During Acclimatization Phase. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Vol. 95, Part A, pp. 189-194. DOI: 10.1016/j.ibiod.2014.06.014
- [106] Zulkefli, S., Abdulmalek, E., and Rahman, M. B. A. (2017). Pretreatment of Oil Palm Trunk in Deep Eutectic Solvent and Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Oil Palm Trunk. **Renewable Energy**. Vol. 107, pp. 36-41. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.037

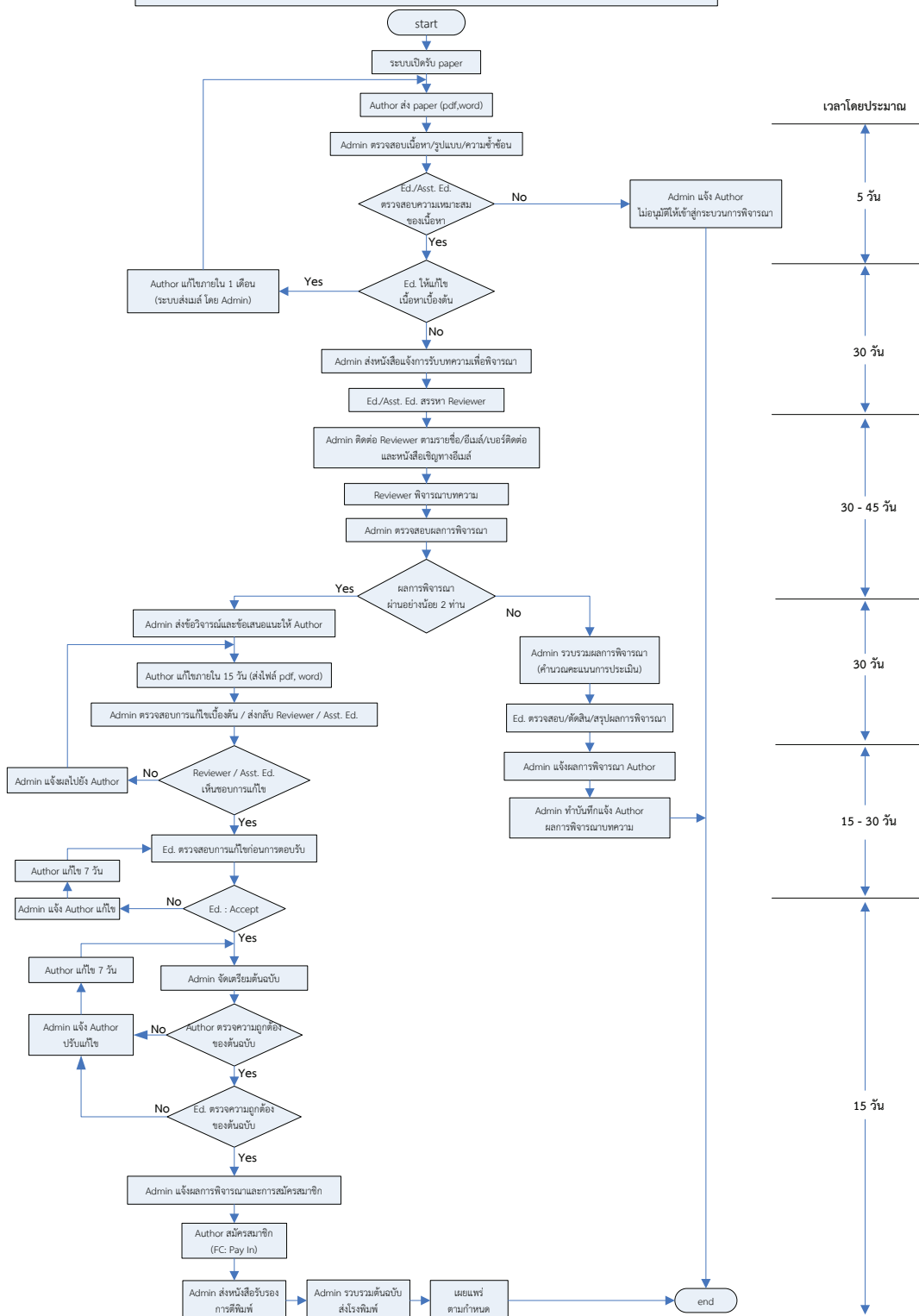
- [107] Noparat, P., Prasertsan, P., O-Thong, S., and Pan, X. (2017). Sulfite Pretreatment to Overcome Recalcitrance of Lignocellulose for Enzymatic Hydrolysis of Oil Palm Trunk. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 1122-1127. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.209
- [108] Sitthikitpanya, S., Reungsang, A., Prasertsan, P., and Khanal, S. K. (2017). Two-Stage Thermophilic Bio-Hydrogen and Methane Production from Oil Palm Trunk Hydrolysate Using *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* KCU19. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 42, Issue 47, pp. 28222-28232. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.136
- [109] Noparat, P., Prasertsan, P., O-Thong, S., and Pan, X. (2015). Dilute Acid Pretreatment of Oil Palm Trunk Biomass at High Temperature for Enzymatic Hydrolysis. **Energy Procedia**. Vol. 79, pp. 924-929. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.588
- [110] Eom, I. -Y., Oh, Y. -H., Park, S. J., Lee, S. -H., and Yu, J. -H. (2015). Fermentative L-Lactic Acid Production from Pretreated whole Slurry of Oil Palm Trunk Treated by Hydrothermolysis and Subsequent Enzymatic Hydrolysis. **Bioresource Technology**. Vol. 185, pp. 143-149. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.02.060
- [111] Nipattummakul, N., Ahmed, I. I., Kerdsuwan, S., and Gupta, A. K. (2012). Steam Gasification of Oil Palm trunk Waste for Clean Syngas Production. **Applied Energy**. Vol. 92, pp. 778-782. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.026
- [112] Lamaming, J., Hashim, R., Sulaiman, O., Leh, C. P., Sugimoto, T., and Nordin, N. A. (2015). Cellulose Nanocrystals Isolated from Oil Palm Trunk. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 127, pp. 202-208. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.03.043
- [113] Lamaming, J., Hashim, R., Leh, C. P., and Sulaiman, O. (2017). Properties of Cellulose Nanocrystals from Oil Palm Trunk Isolated by Total Chlorine Free Method. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 156, pp. 409-416. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.09.053
- [114] Jumhuri, N., Hashim, R., Sulaiman, O., Nadhari, W. N. A. W., Salleh, K. M., Khalid, I., Saharudin, N. Z., and Razali, M. Z. (2014). Effect of Treated Particles on the Properties of Particleboard Made from Oil Palm Trunk. **Materials and Design**. Vol. 64, pp. 769-774. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.053
- [115] Selamat, M. E., Sulaiman, O., Hashim, R., Hiziroglu, S., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, N. S. and Razali, M. Z. (2014). Measurement of Some Particleboard Properties Bonded with Modified Carboxymethyl Starch of Oil Palm Trunk. **Measurement**. Vol. 53, pp. 251-259
- [116] Tay, P. W., H'ng, P. S., Chin, K. L., Wong, L. J., and Luqman, A. C. (2013). Effects of Steeping Variables and Substrate Mesh Size on Starch Yield Extracted from Oil Palm Trunk. **Industrial Crops and Products**. Vol. 44, pp. 240-245. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.001
- [117] Ezebor, F., Khairuddean, M. Abdullah, A. Z., and Boey, P. L. (2014). Oil Palm Trunk and Sugarcane Bagasse Derived Heterogeneous Acid Catalysts for Production of Fatty Acid Methyl Esters. **Energy**. Vol. 70, pp. 493-503. DOI: 10.1016/j.energy.2014.04.024



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research Article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic Article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใหม่ 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 8 - 12 หน้า หากเกินจำนวนคิดค่าใช้จ่ายหน้าละ 400 บาท (แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า)

- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย
กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย

- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14

- ที่อยู่ บทความภาษาไทยหรือบทความภาษาอังกฤษ เขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น
ขนาดตัวอักษร 10

- 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 10 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 10

- ชื่อตาราง

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

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 10 ตัวหนา
วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 10 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

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

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป
ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียด
ต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding
Author) ด้วยการระบุ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ด้วย
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) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน เป็นการ
กำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้สืบค้นในระบบฐานข้อมูล กำหนดให้มีความสำคัญได้อย่างน้อย 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 ควรมีรูปภาพ และ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

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

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

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

7. เอกสารอ้างอิง (**References**) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหา โดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร 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)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้ ระบบตัวเลข (Numerical System) เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายวงเล็บ กรอบสี่เหลี่ยม 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] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2552). รายงานประจำปี 2551. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

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

ตัวอย่างเช่น

[11] เรืองวิทย์ ลิ้มปนาท. (2543). ท้องถิ่น - อินเดียน. ชลบุรี: ภาควิชาประวัติศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์
และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียด
ไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ
ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปถ่ายย่อ ควรจัดให้รูปถ่ายย่อทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความ
ภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อที่ 1



(ข) รูปย่อที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภาพย่อ

7) หลีกเลี่ยงการใช้รูปภาพสีหากไม่จำเป็น ทางวารสารอนุญาตให้มีการใช้รูปที่เป็นภาพสี
ในแต่ละบทความได้ไม่เกิน 2 รูปต่อบทความ หากเกินทางวารสารขอคิดค่าใช้จ่าย รูปละ 50 บาท
กรณีที่เป็นกราฟ ควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์
แบบขาว - ดำ

8) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของ
หน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Time New Roman ขนาด 10
- 3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

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

- 4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข
- 2) เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการ และจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสาร จะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด 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)

☐ ไฟฟ้า

☐ อิเล็กทรอนิกส์

☐ คอมพิวเตอร์

☐ สื่อสาร-โทรคมนาคม

☐ ลัทธิศาสตร์

☐ ศิลปะและการออกแบบ

☐ วัสดุและโลหะ

☐ โยธา-สำรวจ

☐ สิ่งแวดล้อม

☐ พลังงาน

☐ สถาปัตยกรรม

☐ พืชไร่

☐ พืชสวน

☐ วิทยาศาสตร์การอาหาร

☐ ICT

☐ อุตสาหการ

☐ เคมี

☐ คณิตศาสตร์

☐ สถิติประยุกต์

☐ เครื่องกล

☐ โภชนศาสตร์

☐ ฟิสิกส์

☐ 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 ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

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

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่ (สำหรับส่งวารสาร).....

รหัสไปรษณีย์..... โทรศัพท์.....

โทรสาร.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี 3 ฉบับ 1000 บาท/ปี)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้โอนเงินผ่านทางบัญชี ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร มทร.อีสาน”

บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 986-4-38484-8

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

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร
(.....)



หนังสือยืนยันการชำระค่าตีพิมพ์
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขอชำระค่าตีพิมพ์วารสาร มทร.อีสาน เรื่อง
.....
.....

เป็นค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์ที่เกินจากข้อกำหนดของวารสาร มทร.อีสาน

- ☐ จำนวนหน้า หน้า หน้าละ 400 บาท คิดเป็นเงิน บาท
☐ จำนวนรูปสี รูป รูปละ 50 บาท คิดเป็นเงิน บาท

รวมเป็นเงินทั้งสิ้น บาท (.....) โดยชำระเงิน
ผ่านทางบัญชีวารสาร มทร.อีสาน ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร
มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 986-4-38484-8

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

ลงชื่อ.....ผู้เขียนบทความ
(.....)

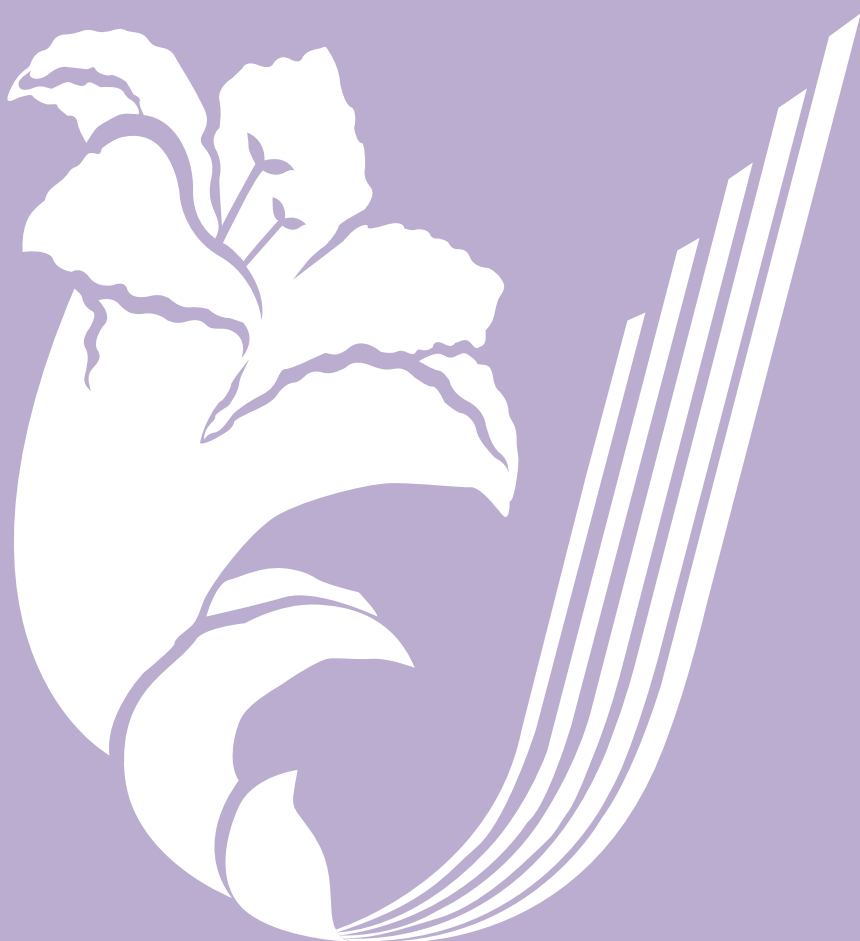


**หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน**

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขออนการพิจารณาบทความเรื่อง
.....
.....
ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่..... และยินยอม
รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน บาท
(.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีวารสาร มทร.อีสาน
ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์
เลขที่ 986-4-38484-8

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

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชมงคลอีสาน



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 11 No. 3 September - December 2018



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

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