



วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2562



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. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุนทรารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป

ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป

เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวความคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวัตร ตาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ อ่าง	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	เมนะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมนิรัญ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประสมพิกุล	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมมากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทนต์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนก	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธาริบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดลิ่ง	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤดาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	คุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	94/7 หมู่บ้านนาแลนด์ ซอย 5 ถนนสุวินทวงศ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัสวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ตันสุวรรณรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สารบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรลธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชนิดา	เยรัมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เดือนเพ็ญ	วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไทรรัตน์

รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหารงานทั่วไป

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวอรุณรักษ์ ตีราชมัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดหมูฟอยตันแบบสำหรับ OTOP กลุ่มสตรีอาสาพัฒนาบ้านหนองหลวง เพื่อการส่งออกสู่ประชาคมอาเซียน	1
ศิริชัย ต่อสกุล, จงกล สุภารัตน์ และกมล ทองศรี	
การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบ หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้	12
ศุภชัย ชุมนุวัฒน์, นิติกร หลีชัย และธงชัย เครือผือ	
การยับยั้งแบคทีเรียและการต้านรังสียูวีจากแสงอาทิตย์ของผ้าฝ้ายย้อมด้วยสีธรรมชาติเปรียบเทียบกับผ้าจิวร วรวิทย์ ศรีวิทยากุล, ธฤติ รุ่งโรจน์ารักษ์, ทวีป ศรีภูมิ, มาหามะสุไรมี มะแซ และภาณุมาศ ชูพล	27
ผลของซิลิคอนต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	42
พิสิฐชัย โคสะสุ และสุดสาคร อินธิเดช	
การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิตเพื่อเพิ่มอรรถประโยชน์ของโลหิต	57
วิจัย บุญญานุสิทธิ์ และพงษ์ชัย จิตตะมัย	
การศึกษาอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนในการกัดวัสดุสแตนเลสแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น	74
ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ และชาญณรงค์ สายแก้ว	
การศึกษาการเจริญ การสะสมและการปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดงที่เลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร	86
ศิราภรณ์ ชื่นบาล และฐปน ชื่นบาล	
ผลของการหมักฟางข้าวด้วยยูเรียร่วมกับผักจามจุรีบดหมักต่อการเพิ่มคุณภาพฟางข้าว และลดระดับของอะฟลาทอกซิน B1 (AFB1) โดยวิธี <i>In vitro</i> Gas Production Technique	97
อรอนงค์ พวงชมพู, จุฬาสินี แมนสถิต, มิ่งขวัญ อุณสำโรง, สุรรัตน์ ศรีรัมย์, ชัยณรงค์ ขาวทอง, และพิลาสลักษณ์ ปานประเสริฐ	
อัตลักษณ์เรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม	111
สุธน คงศักดิ์ตระกูล	
ผลของกระบวนการออสโมซิสของน้ำตาลดอกมะพร้าวและโพลิโพรพิลีนต่อการแลกเปลี่ยนมวลสาร และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขึ้นสับประเดแวน	128
วิชมนิ ยืนยงพุทธกาล, อีรารัตน์ อิทธิโสภณกุล, ศุภิสรา แสนกล้า และสุทธิดา คุ่มทรัพย์	
การพัฒนาระบบพานิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่าย	142
ผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมา	
รณชัย ชื่นวัช, เจษฎา รัตนสุพร และศรายุทธ เนียนกระโทก	
การเตรียมนาโนคอมพอสิตของแป้งเคทไอออนิกและมอนตมอริลโลไนต์สำหรับการดูดซับสีเมทิลีนบลู	158
ลิรินันท์ วิริยะสุนทร	

Table of Contents

Research Articles

Design and Development of the Crispy Flossy Pork Fryer Prototype Machine of Ban Nong Luang Volunteer for Rural Development Women Group's OTOP for Exporting to AEC	1
Sirichai Torsakul, Chongkol Suparat and Kulthon Thungsri	
A Feasibility Study of Solar Collector for Preheating Feed Water of Wood-Fired Boiler System	12
Suppachai Chumnumwat, Nitikorn Leechai and Thongchai Khruaphue	
Antibacterial Activity and Solar UV-Protective Properties of Cotton Dyed with Natural Dye Compared with Commercial Yellow Robe	27
Worawit Sriwittayakul, Tharueti Rungrodejnanarueti, Taweeep Srimuni, Mahamasuhaimi Masae and Parnumart Choopool	
Effect of Silicon on Abrasive Wear Behavior of Heat-Treated 16% Cr - 2% Mo Cast Iron	42
Pisizchai Kosasu and Sudsakorn Inthidech	
The Development of Rule-based Decision Making Models for Blood Allocation to Enhance Utilization	57
Wijai Boonyanusith and Phongchai Jittamai	
The Study of Workpiece Temperature During Machining in Dry Milling Stainless Steel	74
Paramet Baowan and Charnnarong Saikaew	
Study on Growth, Nutrients Accumulation and Release from <i>Azolla</i> Cultured in Swine Farm Effluent	86
Siraporn Cheunbarn and Tapan Cheunbarn	
Effect of Urea Treated Rice Straw in Combination with Fermented Ground <i>Samanea Saman</i> Pods on Quality of Rice Straw and a Reduction of Aflatoxin B1 (AFB1) Level Using <i>In vitro</i> Gas Production Technique	97
Onanong Pongchompu, Julasinee Mansatith, Mingquan Unsumrong, Sureerat Sririmoh, Chainarong Kaowthong and Pilasrak Panprasert	
The Identity of Community Traditional Shophouse Along the Makong River, Nakhon Phanom Province	111
Suthon Kongsaktrakul	
Effects of Coconut Flower Sugar and Oligofructose Osmotic Process on Mass Exchange and Sensory of Pineapple Rings	128
Wichamanee Yuenyongputtakal, Teerarat Itthisoponkul, Suphisara Sankla and Sutthida Khumsub	
Development of an E-Commerce System from a Requirement of the OTOP Entrepreneurs in Nakhon Ratchasima	142
Ronnachai Chuentawat, Jessada Rattanasuporn and Sarayut Neankratok	
Preparation of Cationic Starch-Montmorillonite Nanocomposites for Methylene Blue Adsorption	158
Sirinun Wiriyasontorn	

ส่วนแก้ไข

บทความเรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเทคนิคการพยากรณ์สำหรับตัวแบบของตัวแปรเดียวกับข้อมูลที่มีฤดูกาล (Comparison of the Efficiency of Forecasting Techniques for Univariate Models with Seasonal Data) โดย กฤตาพร พืชระสุภา มีแก้ไขเนื้อหาในบทความดังรายการต่อไปนี้

เนื้อหาเดิม

1. เนื้อหาในบทความระบุเป็น “ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโต”
2. $S_t = \text{ค่าปรับเรียบ} = \alpha \frac{A_t}{I_{t-L}} - [(1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})]$
3. หมายเหตุ สัญลักษณ์ แสดงเทคนิคการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับอำเภอนั้น

เนื้อหาใหม่

1. ขอแก้ไขเป็น “ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต” ทั้งหมดที่พบในบทความ
2. $S_t = \text{ค่าปรับเรียบ} = \alpha \frac{A_t}{I_{t-L}} + [(1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})]$
3. หมายเหตุ สัญลักษณ์ แสดงเทคนิคการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับอำเภอนั้น

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดหมูฟลอยด์ต้นแบบสำหรับ OTOP กลุ่มสตรี
อาสาพัฒนาบ้านหนองหลวงเพื่อการส่งออกสู่ประชาคมอาเซียน

Design and Development of the Crispy Flossy Pork Fryer Prototype Machine of Ban Nong Luang Valunteer for Rural Development Women Group's OTOP for Exporting to AEC

ศิริชัย ต่อสกุล^{1*} จงกล สุภารัตน์¹ และกมล ทองศรี¹

Sirichai Torsakul^{1*} Chongkol Suparat¹ and Kulthon Thungsri¹

Received: July 5, 2018; Revised: October 18, 2018; Accepted: October 18, 2018

บทคัดย่อ

เครื่องทอดหมูฟลอยด์ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตหมูฟลอยด์ให้มีคุณภาพ
อำนวยความสะดวก ลดการใช้งาน และลดต้นทุนในการทอดหมูฟลอยด์ สำหรับใช้ในวิสาหกิจขนาดกลาง
และขนาดย่อมที่แปรรูปหมูฟลอยด์จำหน่าย เครื่องต้นแบบประกอบไปด้วย โครงสร้างเครื่อง หม้อน้ำมัน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตร หม้อตะแกรงทอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
240 มิลลิเมตร ลึก 170 มิลลิเมตร ชุดใบกวนมีรัศมี 220 มิลลิเมตร ใช้น้ำมัน 25 วัตต์
เป็นต้นกำลังใช้ความร้อนจากเตาแก๊สโดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง การทำงานของเครื่องโดยเริ่มจากการ
เทน้ำมันลงไปบนหม้อน้ำมัน เปิดแก๊สแล้วจุดไฟหลังจากนั้นรอให้น้ำมันร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด
จากนั้นใส่หมูฟลอยด์ลงในน้ำมัน และทำการเปิดมอเตอร์ใบกวน เมื่อหมูฟลอยด์ได้ที่ก็จะยกตะแกรงทอดออก
จากผลการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส โดยการทอด
แบบน้ำมันผ่านการกรอง มีความสามารถในการทอดหมูฟลอยด์ 3 กิโลกรัม ด้วยเวลา 16 นาที สามารถใช้
น้ำมันทอดซ้ำได้ถึง 13 ครั้ง โดยที่ปริมาณสารโพลาร์ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้หมูฟลอยด์ที่มีคุณภาพ
และปลอดภัยต่อผู้บริโภค และยังสามารถลดความเสียหายจากการทอดด้วยวิธีเดิม

คำสำคัญ : หมูฟลอยด์; วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม; สารโพลาร์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani

* Corresponding Author E - mail Address: Sirichai.to@en.rmutt.ac.th

Abstract

Crispy Flossy Pork frying machine is designed and built for the purpose of developing and studying process in frying Crispy Flossy Pork in order to ensure a good quality, convenience, and reduce workforce and cost in producing fried Crispy Flossy Pork. The machine will be used in small to medium enterprise and transform Crispy Flossy Pork in order to sell them. Prototype of the machine comprises a machine frame, an oil pot with 300 mm in diameter and 200 mm in depth, a deep fly sieve with 240 mm in diameter and 170 mm in depth. The stirring blade has 220 mm radius. It used 25 W motor as a driving force and heater from the gas LPG. The machine works by pouring oil into the pot and open the fire. When the oil is hot at the setting temperature the Crispy Flossy Pork are poured into the oil. The experiment shows that the prototype machine can work best when temperature of the oil is at 121 - 130 °C with frying oil filtration. The machine can fry up to 3 kg of Crispy Flossy Pork within 16 minute the reused oil could be done up to 13 times while maintaining polar substances at 25 % or less Therefore yielding fried shallots with good quality and safe to consumers is obtained. And reduce fatigue from old frying.

Keywords: Crispy Flossy Pork; Small to Medium Enterprise; Polar Substances

บทนำ

หมูฟอยเป็นอาหารชนิดหนึ่งของคนไทยที่นิยมทานกันแพร่หลาย “หมูฟอย” ผลิตจากเนื้อหมูส่วนสะโพกหลังหรือสันใน ตัดแต่งแยกมันออกจนได้เนื้อหมูล้วน ๆ มองให้เห็นเส้นใยเป็นริ้ว ๆ นำมาต้มให้สุก (หากเป็นเนื้อส่วนสะโพกใช้เวลาในการต้มนานกว่าสันในจนเนื้อหมูเริ่มเปื่อย) แล้วจึงนำมาฉีกเป็นเส้น ๆ ฟอย ๆ หลังจากนั้นจึงนำไปหมักกับเครื่องปรุงรส เช่น น้ำตาล ซีอิ๊วขาว เกลือ หมักไว้ให้ซึมเข้าเนื้อดีก่อนจะนำไปทอดในน้ำมันร้อน ๆ ซึ่งใส่ใบเตยลงไปด้วยเพื่อเพิ่มกลิ่นหอมจากใบเตย ช่วยดูดซับกลิ่นหืน และช่วยให้น้ำมันไม่ขึ้นเหนียว ความพิเศษอีกประการหนึ่งของหมูฟอยคือ ใส่หอมแดงซอยลงไปทอดพร้อมเนื้อหมูด้วย [1]

การแปรรูปหมูฟอยในปัจจุบันส่วนใหญ่มักเกิดปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ในการทอด เช่น ความร้อนในการทอดไม่คงที่มีผลต่อความสุกของหมู ซึ่งส่งผลถึงเวลาที่ใช้ในการทอด ปัญหาด้านคุณภาพของน้ำมัน การใช้ไขมันทอดซ้ำจากการทอดหมูฟอยที่มีส่วนผสมของเครื่องปรุงต่าง ๆ ส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันที่ไหลลงอย่างรวดเร็ว [2] - [3] และการใช้ตะหลิวกวนหมูตลอดเวลาเพื่อไม่ให้เนื้อหมูติดกันทำให้เกิดความเมื่อยล้าแก่ผู้ทอด ในการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าการออกแบบใบกวนหมูฟอยในลักษณะการใช้กระทะและเตาทอดแบบทั่วไปและไม่มีอุปกรณ์กรองน้ำมัน ดังเช่นงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดหอมเจียว ซึ่งสามารถช่วยลดความเมื่อยล้าจากการทอด และสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการทอดหอมเจียวนั้นดีขึ้นโดยหอมเจียวที่ทอดได้นั้นสุกทั่วกันทั้งหมดและใบกวนยังส่งผลให้เวลาในการทอดลดลง [4]

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องทอดหมูฝอยต้นแบบและทดลองเพื่อหาอายุการใช้งานของน้ำมันที่เหมาะสมที่ใช้ในการทอดหมูฝอยกับเครื่องทอดหมูฝอยต้นแบบอำนวยความสะดวก และลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยออกแบบให้มีหม้อทอดและใบพัดในการทอดหมูฝอยซึ่งจะทำให้หมูนั้นสุกเท่า ๆ กัน และเพื่อลดความเมื่อยล้าของผู้ผลิตนอกจากนี้ได้มีการออกแบบอุปกรณ์กรองน้ำมันเพื่อกรองเศษหมูฝอยทำให้ยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน และเพื่อต้องการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้สู่กลุ่มสตรีอาสาพัฒนาบ้านหนองหลวง หรือวิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีเกษตรบ้านหนองหลวง อำเภอเมืองกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร ซึ่งต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์โอท็อป (OTOP) ดังรูปที่ 1 ของจังหวัดกำแพงเพชร เพื่อแข่งขันในตลาดและส่งออกสู่ประเทศอาเซียนต้อนรับเศรษฐกิจอาเซียน AEC ต่อไป



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์หมูฝอยแม่ลำควน

วิธีการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลสำหรับออกแบบ

จากการศึกษาของงานของกลุ่มแม่บ้านแม่ลำควนพบว่ากรรมวิธีการผลิตหมูฝอยเริ่มจากการเลือกสันสะโพกหมูเพื่อนำไปต้ม เพราะสันสะโพกหมูมีความเหนียวและเป็นเส้นง่ายต่อการฉีกโดยใช้เวลาต้ม 40 นาที เมื่อต้มเสร็จนำมาทุบและฉีกเป็นเส้นลักษณะดังรูปที่ 2 จากนั้นหมักด้วยเครื่องปรุงรสคลุกเคล้าให้เข้ากันจนน้ำตาลละลายเมื่อเสร็จขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นก็สามารถนำไปทอดได้โดยใช้เวลาทอดประมาณ 10 นาทีต่อเนื้อหมู 0.5 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3 และอุณหภูมิของน้ำมันในการทอดควรอยู่ระหว่าง 110 - 140 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นหมูฝอยก่อนทอด



รูปที่ 3 การทอดหมูฝอยแบบวิธีเดิม

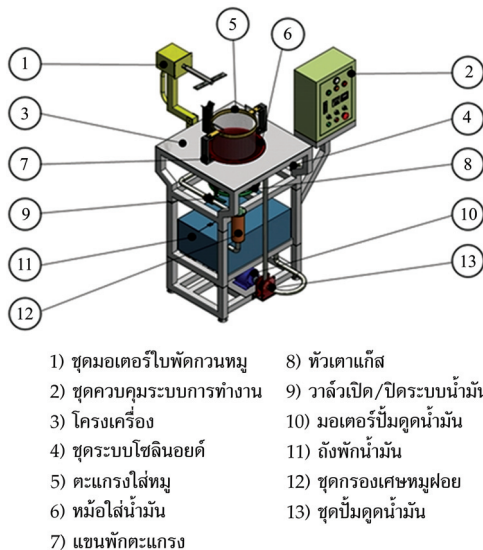
2. การออกแบบเครื่องต้นแบบ

สำหรับการออกแบบเครื่องทอดหมูฝอยต้นแบบเพื่อใช้ในธุรกิจขนาดเล็กนั้น สามารถออกแบบส่วนประกอบหลักของเครื่องโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) [5] - [6] การออกแบบการทำงานของเครื่องทอดหมูฝอยได้แบ่งออกเป็น 4 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบหมูนวนน้ำมัน ระบบใบพัด ระบบให้ความร้อนด้วยแก๊ส และระบบควบคุมการทำงานของเครื่องทอดใช้แก๊ส (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนไปยังหม้อทอดโดยสามารถปรับอุณหภูมิได้จากชุดควบคุมและมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในแต่ละระบบ โดยมอเตอร์ที่ใช้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 เป็นมอเตอร์หมุนใบพัดขนาด 25 W เนื่องจากแรงบิดที่คำนวณมาได้ นั่นคือ 3.55 N.m. ซึ่งเป็นแรงบิดจากใบพัด ในการกวนหมูฝอยโดยความเร็วรอบที่ต้องการในการกวนหมูฝอย คือ 40 rpm จึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 25 W ตามขนาดมาตรฐาน จำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่กวนหมูทำให้หมูไม่ติดกัน และส่วนที่ 2 เป็นมอเตอร์ปั๊มคูดน้ำมันขนาด 0.25 แรงม้า จำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่คูดน้ำมันจากถังพักไปยังหม้อทอดทำให้เกิดการหมุนวนของน้ำมัน เครื่องต้นแบบประกอบไปด้วย โครงสร้างเครื่อง หม้อน้ำมันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตร หม้อตะแกรงทอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร ลึก 170 มิลลิเมตร ชุดใบกวนมีรัศมี 220 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในการสร้างขึ้นส่วนคือ สแตนเลส เกรด 304 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร [7]

3. วิธีการทดลอง

แบ่งกรรมวิธีการทอดเป็น 2 แบบ คือ การทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรอง คือการใช้ไขมันเดิมทอดซ้ำไปเรื่อย ๆ การทำงานของเครื่องเริ่มจากเทน้ำมันลงไปในหม้อน้ำมัน เปิดเตาแก๊สแล้วตั้งอุณหภูมิ น้ำมันตามที่กำหนด เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันร้อนตามที่กำหนดแล้วหลังจากนั้นใส่หมูฝอยที่จี่แล้วลงในหม้อทอด โดยการทอดในแต่ละครั้งจะใช้หมูฝอยครั้งละ 3 กิโลกรัม โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง ทำการเปิดมอเตอร์ใบกวน ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้เวลาความเร็วรอบของใบกวนที่ 40 รอบต่อนาที และการทอดโดยน้ำมันผ่านการกรอง คือการใช้ไขมันเดิมแต่น้ำมันจะหมุนเวียนผ่านระบบกรองในการทอดโดยน้ำมันผ่านการกรองนั้นจะมีวิธีการทอดเหมือนกับการทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรอง แต่จะแตกต่างกันตรงที่น้ำมันในหม้อทอดจะถูกปล่อยออกมาที่ท่อด้านนอกและผ่านชุดกรองน้ำมัน โดยชุดกรองจะทำหน้าที่กรองเศษหมูฝอยขนาดเล็ก ๆ ที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นของหม้อทอด น้ำมันจะกรองมายังถังพักน้ำมันข้างล่างหลังจากนั้นน้ำมันในถังพักข้างล่างที่ผ่านการกรองจะถูกดูดขึ้นไปยังหม้อทอดข้างบนด้วยชุดปั๊มคูดน้ำมัน ลักษณะการทอดดังรูปที่ 5 เมื่อหมูฝอย

สุกได้ที่แล้วก็จะยกตะแกรงทอดออกเพื่อเทหมูฝอยลงในตะแกรงสะเด็ดน้ำมัน ซึ่งหมูฝอยที่ได้หลังจากทอดเสร็จแล้วจะมีลักษณะสีเหลืองอมน้ำตาล ดังรูปที่ 6 ในการทดสอบจะทอดหมูฝอยโดยใช้น้ำมันปาล์ม และทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข อุณหภูมิ และกรรมวิธีการทอด เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทอดหมูฝอยที่ดีที่สุด โดยกำหนดอุณหภูมิในการทอดหมูฝอย 3 ระดับ คือ 111 - 120, 121 - 130 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับทอดอาหารไม่ควรเกิน 180 องศาเซลเซียส [8] ทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่ทำให้เกิดสารโพลาร์ในน้ำมันน้อยที่สุด



(ก) แบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรม CAD
รูปที่ 4 เครื่องทอดหมูฝอย

(ข) เครื่องทอดหมูฝอยต้นแบบ



รูปที่ 5 การทอดหมูฝอยด้วยเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 6 สีของหมูฝอยหลังการทอด

ในการทดสอบน้ำมันที่ใช้ในการทอดในแต่ละครั้งน้ำมันจะถูกเก็บตัวอย่างหลังการทอดทุกครั้ง เพื่อนำตัวอย่างน้ำมันที่ได้ไปทดสอบคุณภาพของน้ำมันที่นำมาทอดซ้ำ ซึ่งตัวอย่างน้ำมันที่เก็บจะถูกนำมาทดสอบหาปริมาณสารโพลาร์ (Polar Metabolites Test) โดยใช้ชุดทดสอบสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขเพื่อตรวจสอบหาค่าปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ [9] โดยค่าการทดสอบสามารถเทียบกับแถบสีอ่านค่าได้ดังรูปที่ 7



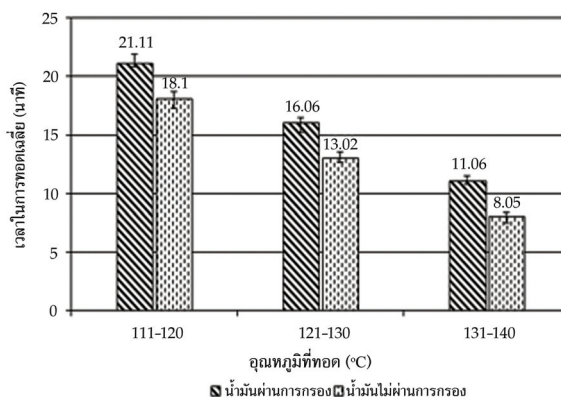
รูปที่ 7 วิธีการอ่านผลทดสอบสารโพลาร์ในน้ำมัน [10]

ผลการทดลอง

1. การทดลองหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอดหมูฝอย

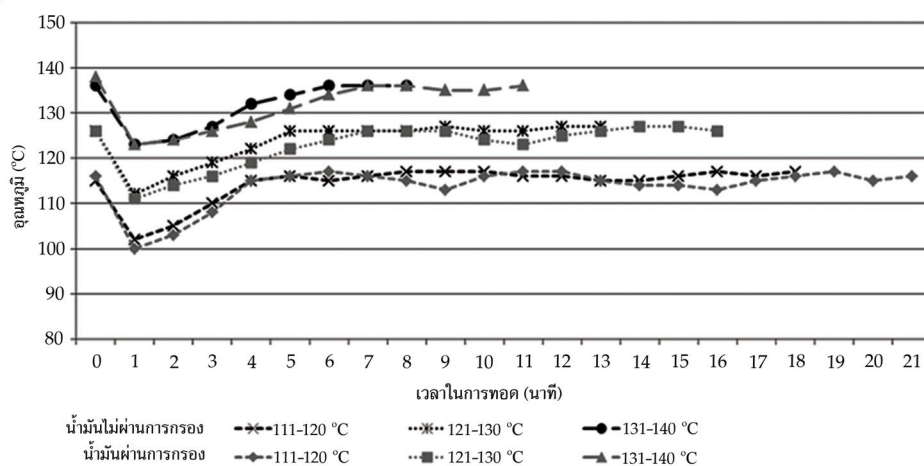
ผลการทดลองทอดหมูฝอยจากตัวแปรดังกล่าว พบว่าการทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรองที่อุณหภูมิ

111 - 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 18.10 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 121 - 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 13.02 นาที และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 131 - 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 8.05 นาที ในขณะที่การทอดโดยน้ำมันผ่านการกรองที่อุณหภูมิ 111 - 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 21.11 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 121 - 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 16.06 นาที และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 131 - 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทอดเฉลี่ย 11.06 นาที ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ระยะเวลาในการทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิและวิธีการทอดที่แตกต่างกัน

จากการทดลองจะสังเกตได้ว่าการทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรองใช้เวลาในการทอดเฉลี่ยน้อยกว่าการทอดโดยน้ำมันผ่านการกรองดังรูปที่ 9 เนื่องจากอุณหภูมิในหม้อทอดแบบน้ำมันไม่ผ่านการกรองคงที่มากกว่าแบบน้ำมันผ่านการกรอง เมื่อทำการใส่หมูฝอยลงไป ในหม้อทอดอุณหภูมิน้ำมันจะลดลงไปประมาณ 15 องศาเซลเซียส และจะใช้เวลาประมาณ 3 - 4 นาที อุณหภูมิน้ำมันจะเพิ่มขึ้นถึงจุดที่ตั้งกำหนดไว้ หลังจากนั้นโซลินอยด์จะทำการตัดระบบเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่กำหนดโซลินอยด์ก็จะทำการเปิดระบบเชื้อเพลิงแก๊สอัตโนมัติ

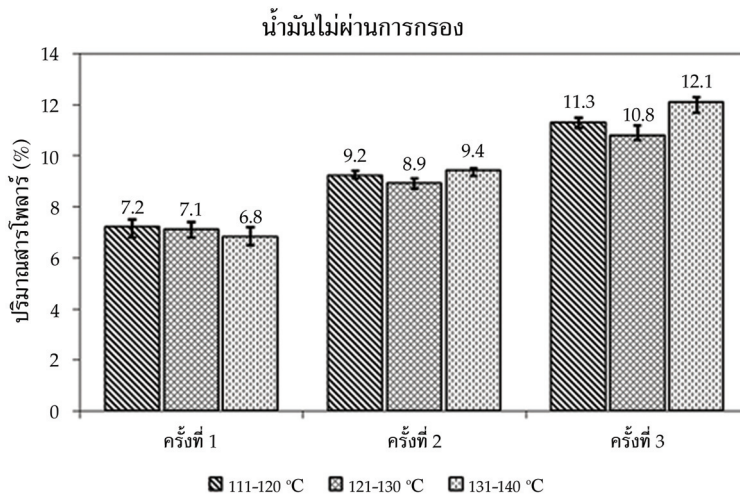


รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำมันระหว่างการทอดน้ำมันไม่ผ่านการกรองและน้ำมันผ่านการกรอง

ผลการทดลองทอดหมูฝอยดันตัวแปรที่กำหนดพบว่า อุณหภูมิและวิธีการทอดมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทอดหมูฝอยซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เวลาในการทอดที่ลดลงและการใช้วิธีการทอดแบบน้ำมันไม่ผ่านการกรองทำให้เวลาในการทอดต่ำกว่าวิธีการทอดแบบน้ำมันผ่านการกรอง

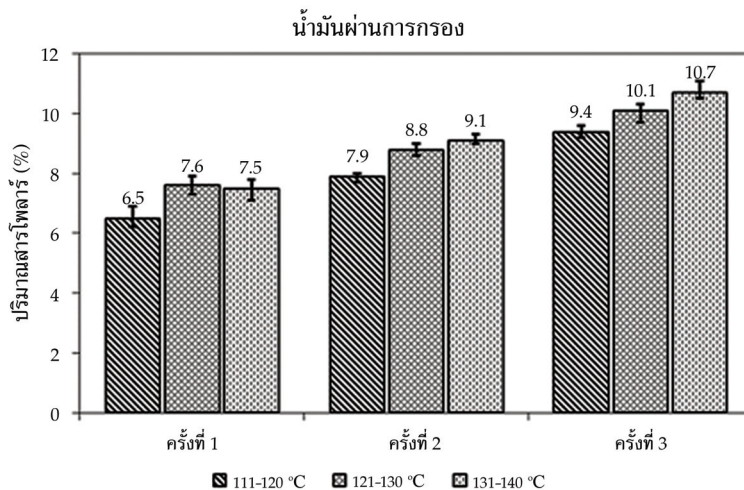
2. ผลการทดสอบคุณภาพน้ำมัน

จากผลการทดลองทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิ 111 - 120, 121 - 130 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส และวิธีการทอดแบบน้ำมันไม่ผ่านการกรอง และแบบน้ำมันผ่านการกรอง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทอดหมูฝอยเบื้องต้นก่อน 3 ครั้ง เพื่อหาอุณหภูมิและกรรมวิธีการทอดที่มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันน้อยที่สุด เพื่อนำอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมไปวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของน้ำมันทอดซ้ำ



รูปที่ 10 ผลเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันแบบน้ำมันไม่ผ่านการกรอง

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าการทดลองทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิ 111 - 120, 121 - 130 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส ทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรอง เมื่อนำตัวอย่างน้ำมันมาทดสอบการเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ พบว่าการทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสารโพลาร์ที่อุณหภูมิ 111 - 120 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 7.2 เป็น 11.3 คิดเป็น 28.47 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 7.1 เป็น 10.8 คิดเป็น 26.06 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 131 - 140 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 6.8 เป็น 12.1 คิดเป็น 38.97 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองทั้ง 3 อุณหภูมิ พบว่าการทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์น้อยกว่าอุณหภูมิ 111 - 120 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส



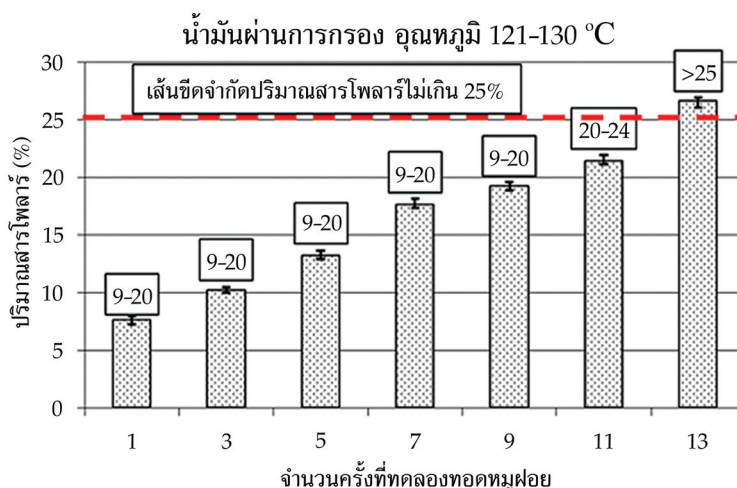
รูปที่ 11 ผลเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันแบบน้ำมันผ่านการกรอง

จากรูปที่ 11 จะเห็นว่าการทดลองทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิ 111 - 120, 121 - 130 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส ทอดโดยน้ำมันผ่านการกรอง เมื่อนำตัวอย่างน้ำมันมาทดสอบการเกิดสารโพลาร์ ในน้ำมันทอดซ้ำ พบว่าการทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสารโพลาร์ที่อุณหภูมิ 111 - 120 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 6.5 เป็น 9.4 คิดเป็น 22.30 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 10.1 คิดเป็น 16.44 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 131 - 140 องศาเซลเซียส ปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นจาก 7.5 เป็น 10.7 คิดเป็น 21.30 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองทั้ง 3 อุณหภูมิ พบว่าการทอดหมูฝอยที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์น้อยกว่าอุณหภูมิ 111 - 120 และ 131 - 140 องศาเซลเซียส

จากการทอดหมูฝอยทั้งแบบน้ำมันไม่ผ่านการกรองและแบบน้ำมันผ่านการกรองพบว่า การทอดแบบน้ำมันผ่านการกรองมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์น้อยกว่าการทอดแบบ น้ำมันไม่ผ่านการกรอง และอุณหภูมิที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์น้อยที่สุดคือ อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส

3. การวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของน้ำมัน

หลังจากวิเคราะห์หาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์พบว่า การทอดแบบน้ำมัน ผ่านการกรองที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์น้อยที่สุด จึงทำการนำตัวแปรดังกล่าวมาทำการทอดซ้ำเพื่อหาอายุการใช้งานของน้ำมันที่มีปริมาณสารโพลาร์ ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การวิเคราะห์อายุการใช้งานของน้ำมันทอดซ้ำ

จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส ทอดโดยวิธีน้ำมันผ่านการกรอง ครั้งที่ 1 - 9 ปริมาณสารโพลาร์อยู่ในช่วง 9 - 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 11 - 12 ปริมาณสารโพลาร์อยู่ในช่วง 20 - 24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทอด 13 ครั้งขึ้นไป พบว่าปริมาณสารโพลาร์มีค่าสูงกว่า 25 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิที่ 131 - 140 องศาเซลเซียส ทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรองใช้เวลาในการทอดเฉลี่ยน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำพบว่าที่อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส ทอดโดยน้ำมันผ่านการกรองมีแนวโน้มการเพิ่มของปริมาณสารโพลาร์น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 131 - 140 องศาเซลเซียส ทอดโดยน้ำมันไม่ผ่านการกรอง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องทอดหมูฝอยโดยใช้ตัวชี้วัดผลการศึกษา คือ ความสามารถในการทำงาน และอายุการใช้งานของน้ำมัน พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุดด้วยการทอดแบบน้ำมันผ่านการกรองที่อุณหภูมิน้ำมัน 121 - 130 องศาเซลเซียส มีความสามารถทอดหมูฝอย 3 กิโลกรัม โดยใช้เวลาในการทอด 16 นาที และสามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ถึง 13 ครั้ง โดยที่มีปริมาณสารโพลาร์ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบปริมาณสารโพลาร์สามารถนำไปใช้เพื่อขอเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดอายุการใช้งานของน้ำมันทอดซ้ำในกระบวนการทอดหมูฝอยจากเครื่องต้นแบบได้ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานการใช้น้ำมันทอดซ้ำที่กระทรวงสาธารณสุขกำหนด

ดังนั้นสรุปผลการศึกษพบว่า อุณหภูมิน้ำมันที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทอดหมูฝอยคือ อุณหภูมิ 121 - 130 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีแนวโน้มของการเกิดสารโพลาร์น้อยที่สุด จึงส่งผลทำให้สามารถลดปริมาณการใช้น้ำมันในการทอดหมูฝอยลงได้และทำให้ลดการเมื่อยล้าจากการทอดแบบวิธีเดิมโดยใช้คนทอด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก RMUTT financial budget in fiscal in 2017 ที่ได้ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนโครงการงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

References

- [1] Thongsong, P., Kamcharlearn, S., and Torsakul, S., (2018) Design and Development of the Oil Shake Off Shredded Pork Prototype Machine of Ban Nong Luang Volunteer for Rural Development Women Group's OTOP for Exporting to AEC. **Kasem Bundit Engineering Journal**. Vol. 8, No. 3, pp. 89-100
- [2] Fennema, O. R. (1985). **Food Chemistry**. 2nd ed., New York, U.S.A.: Marcel Dekker Inc.,
- [3] Fircotone, D., Stier, R. F., and Blurnenthal, M. M. (1991). Regulation of Frying Fats and Oil. **Food Technology**. Vol. 45, No. 2, pp. 90-94
- [4] Suparat, C., Inpunyo, C., and Torsakul, S. (2017). Design and Development of Shallot Frying Machine. **Journal of Engineering, RMUTT**. Vol. 15, No. 2, pp. 51-57 (in Thai)
- [5] Krutz, G., Thomson, L., and Claar, P. (1994). **Design of Agricultural Machinery**. John Wiley and Sons. New York Chichester Brisbane, Toronto, Singapore. p. 472
- [6] Shigley, J. E. and Mischke, C. R. (1989). **Mechanical Engineering Design**. Edition, McGraw-Hill Book Company, USA. p. 779
- [7] Ruecha, A. and Srila, M. (2015). Banana Slider Machine. **Prawarun Agricultural Journal**. Vol. 12, No. 2, pp. 136-143 (in Thai)
- [8] Research Projects Reassurance of Refined Oil Quality Several Times to Reduce the Risk of Consumers' Health. (2002). **Lipid and Fat Center Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University**. Access (30 February 2016). Available (<http://food.fda.moph.go.th/data/document/2554/CS04.pdf>)
- [9] Department of Medical Sciences Ministry of Public Health. (n.d.). **Guide to Food Test Kit**. Access (24 February 2016). Available (http://dmsc2.dmhc.moph.go.th/webroot/BQSF/File/food_safety/document/foodsafety%20manual_fulltext.pdf)
- [10] SANSABAY SHOP. (2012). **Polar Tester in Frying Oil**. Access (24 February 2016). Available (<http://www.sansabaytwelve.com/f015.php>)

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้

A Feasibility Study of Solar Collector for Preheating Feed Water of Wood-Fired Boiler System

ศุภชัย ชุมณุมวัฒน์^{1*} นิตกร ทลีชัย¹ และธงชัย เครือผือ²

Suppachai Chumnumwat^{1*} Nitikorn Leechai¹ and Thongchai Khrueaphue²

Received: April 24, 2018; Revised: July 5, 2018; Accepted: July 10, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้เพื่อช่วยลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงของโรงงานผลไม้มะปราง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดชัยภูมิ ซึ่งรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ศึกษามีสองรูปแบบ ประกอบด้วย รูปแบบแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากประสิทธิภาพเชิงความร้อน ต้นทุนแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการพิจารณาความเป็นไปได้ในการลงทุน จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 60.6 % และ 58.1 % โดยผลต่างของอุณหภูมิน้ำป้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ระหว่างสองรูปแบบเท่ากับ 1.8 °C เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการลงทุนทั้งประสิทธิภาพเชิงความร้อนและต้นทุนของแผงรับความร้อนพบว่า ต้นทุนแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีต้นทุนสูงกว่าแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร แต่ทั้งสองรูปแบบสามารถผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตลาดกระบัง

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

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

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

ดังนั้นรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาจึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงไม้เท่ากับ 45,639.70 บาทต่อปี เมื่อพื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 10,887.80 บาท ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 0.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี

คำสำคัญ : ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์; หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้; การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ

Abstract

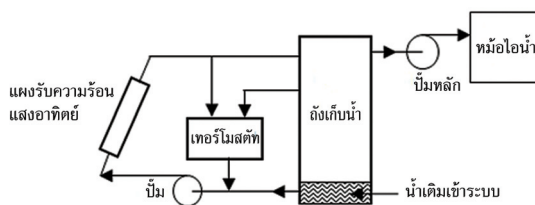
The purpose of this research was to determine feasibility of investing in the use of solar collectors to preheat feed water of a wood-fired boiler, in order to reduce fuel cost for the canned fruit factory at Phanatnikhom district, Chonburi province. Two types of solar collectors studied were evacuated tube and flat plate solar collector, both with compound parabolic concentrator. The feasibility of investment was determined by analysis of thermal efficiency, as well as cost and economic value of solar collector. Results of this research revealed that an average thermal efficiency of the evacuated tube and the flat plate solar collectors with compound parabolic concentrator were 60.6 % and 58.1 %, with a difference of 1.8 °C in feed water temperature between the two types of solar collector. Considering the feasibility of investment from both thermal efficiency and cost of solar collector, it was found that the cost of evacuated tube solar collector with compound parabolic concentrator was higher than that of flat plate solar collector at 4,365 baht per square meter. However, both types could produce feed water at the similar temperature level. Consequently, the flat plate solar collector with compound parabolic concentrator seemed to be a promising alternative to invest for preheating feed water of wood-fired boiler system. It could reduce the boiler's fuel cost by 45,639.70 baht per year with solar collection area of 119.07 m². The NPV of this project was 10,887.80 baht, with the IRR of 0.32 % and the payback period of 14.83 years.

Keywords: Solar Collector; Wood-Fired Boiler; Preheating Feed Water

บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ซึ่งจะเห็นได้จากรายงานกระทรวงพลังงาน เรื่องการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2559 สาขาอุตสาหกรรม ซึ่งมีการใช้พลังงานถึง 29,206 พันตัน

เทียบเท่าน้ำมันดิบ รวมถึงกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้รายงานว่าโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากได้มีการนำหม้อไอน้ำมาใช้เป็นต้นกำลังหลักในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังมีจำนวนหม้อไอน้ำที่ใช้งานอยู่กว่า 15,000 เครื่อง จากจำนวนหม้อไอน้ำนี้ก็จะส่งผลทำให้มีการใช้พลังงาน และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงด้วย โดยพลังงานที่ใช้สำหรับหม้อไอน้ำคิดเป็น 29.1 % ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมีกระบวนการที่สามารถลดการใช้พลังงานลง โดยทั่วไปจะมีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่หรือการใช้พลังงานทดแทนมาใช้เพื่อลดการใช้พลังงานหลักของหม้อไอน้ำ ซึ่งในการอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำเป็นลักษณะการให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำก่อนที่จะถูกนำเข้าไปในระบบหม้อไอน้ำ เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงหลักในหม้อไอน้ำ โดยการใช้แหล่งความร้อนในการอุ่นน้ำนั้นนิยมใช้กันมานานและมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องในอัตราการใช้งานที่เพิ่มขึ้น โดยวิธีการอุ่นน้ำป้อนโดยใช้ก๊าซไอเสียที่กำลังจะปล่อยทิ้งออกจากปล่องวนกลับมาให้ความร้อนแก่น้ำป้อนก่อนปล่อยทิ้งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งข้อดีคือประหยัดต้นทุนในการสร้างความร้อนและเป็นแหล่งความร้อนที่ใช้ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ข้อเสียคือต้นทุนในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เชื่อมต่อกับเส้นทางการไหลของทางเดินก๊าซไอเสีย และต้องทำชุดท่อน้ำที่เข้ามารับความร้อน ซึ่งต้องมีการดูแลรักษาอย่างต่อเนื่องทั้งการจัดการเขม่าจากก๊าซไอเสียที่มาเกาะท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งก่อให้เกิดการอุดตันและกีดขวางการไหล จึงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียกับน้ำป้อนน้อยลงเนื่องจากชั้นเขม่าและกรดซัลฟิวริกที่อยู่บนท่อ เมื่อใช้เป็นเวลานานก็อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน [1] จำเป็นต้องเปลี่ยนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้เกิดเป็นต้นทุนในการบำรุงรักษาเพื่อลดปัญหาดังกล่าวก็มีอีกวิธีการโดยการอุ่นน้ำป้อนจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งการอุ่นน้ำป้อนมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 1 โดยน้ำอุณหภูมิต่ำที่เดิมเข้าระบบจะถูกป้อนเข้ามาในถังเก็บ จากนั้นจะถูกปั๊มเข้ามารับความร้อนที่แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแล้วกลับเข้ามาในถังเก็บน้ำแล้วจะถูกปั๊มไหลเข้าไปใช้ให้ความร้อนในระบบหม้อไอน้ำ ทำให้ลดการใช้พลังงานหลักส่งผลให้การใช้เชื้อเพลิงน้อยลงไปด้วย โดยทั่วไปจะนำแผงรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมาใช้ ซึ่งในแต่ละรูปแบบสามารถผลิตความร้อนได้ต่างกันไปตามตารางที่ 1 โดยขึ้นอยู่กับความต้องการของอุณหภูมิน้ำที่จะนำไปใช้



รูปที่ 1 หลักการของระบบการอุ่นน้ำป้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากการรายงานของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมกรณีศึกษาด้านความร้อนของ บริษัท ซีพีเอฟ ผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ได้มีการนำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการบวนการต้มแฮม โดยรูปแบบของแผงรับแสงเป็นแบบแผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิด ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 65 °C พบว่า บริษัทสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 63,072 บาทต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของน้ำมันเตา โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.67 ปี

ตารางที่ 1 อุณหภูมิที่ทำได้ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

แบบแผ่นรับแสง	ระดับอุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (°C)
1. แผ่นเรียบชนิดแผ่นปิดใส	40 – 90
2. แผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด	< 40
3. ท่อแก้วสุญญากาศ	100 – 200

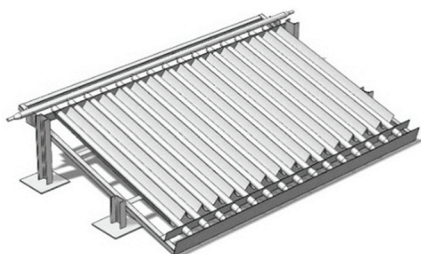
และจากงานวิจัยของ Celuppi, R., et al. [2] ได้ศึกษาการใช้แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศเพื่ออุ่นน้ำหม้อไอน้ำสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร พบว่าสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 97.9 °C โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 65 % ซึ่งให้ระยะเวลาคืนทุน 4.7 และ 5 ปี เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ ก๊าซธรรมชาติ (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ และสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบจึงจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบ โดยจากงานวิจัยการศึกษาแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ผ่านมา Rabl, A. et al. [3] ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบแผงรับความร้อนแบบรูปประกอบพาราโบลาแบบใช้ท่อไม่สุญญากาศกับแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบ พบว่าชุดรับรังสีแบบรูปประกอบพาราโบลาแบบท่อไม่สุญญากาศมีผลการทำงานที่ดีกว่าชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนของผิวที่เป็นกระจก จึงได้พัฒนาการใช้ชั้นผิวที่เป็นกระจก 2 ชั้น เพื่อลดความร้อนสูญเสียตรงส่วนนี้ลง ต่อมาได้มีการพัฒนาท่อแก้วแบบสุญญากาศขึ้นเพื่อลดปัญหาของการสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อน ซึ่งมีประสิทธิภาพการรับความร้อนที่สูงขึ้น สามารถทำอุณหภูมิได้สูงและปัจจุบันก็มีราคาที่ถูกกลง โดย Chamsa-ard, W. et al. [4] ได้ทำการพัฒนาชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาโดยใช้ท่อแก้วสุญญากาศและหาประสิทธิภาพการผลิตความร้อน พบว่าชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ใช้ท่อแก้วสุญญากาศ สามารถผลิตความร้อนได้ดีกว่าแบบท่อแก้วสุญญากาศที่ไม่มีชุดรูปประกอบพาราโบลาสะท้อนแสง 73.38 % โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 45.6 % และ 26.3 % ตามลำดับ จากนั้น Sonsaree, S. et al. [5] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพแผงรับความร้อนของแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศแบบรูปประกอบ โดยเป็นสมการประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิขาเข้า อุณหภูมิแวดล้อม และค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 78 % สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 3.55 และ $0.0600 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแผ่นสะท้อนแสงกับชุดรับรังสีความร้อนแบบท่อทั้งกรณีท่อแบบสุญญากาศ และท่อไม่สุญญากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับความร้อนให้สูงขึ้นได้ รวมถึงการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมที่มีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน จึงทำให้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา และแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา เป็นชุดทดสอบในการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการลดการใช้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

ดังนั้นจากข้อมูลเบื้องต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ โดยมี บริษัท พี.วี.ที.ฟู้ดส์ อินดัสตรีส์ จำกัด โรงงานผลไม้กระป๋อง อำเภอพนสนิมคม จังหวัดชลบุรี เป็นพื้นที่การศึกษา เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสร้างและทดสอบชุดทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

ในขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มจากการทำการสร้างชุดทดสอบเพื่อใช้ในการเก็บผลการทดสอบ โดยรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาแสดงดังรูปที่ 2 และมีส่วนประกอบดังตารางที่ 2

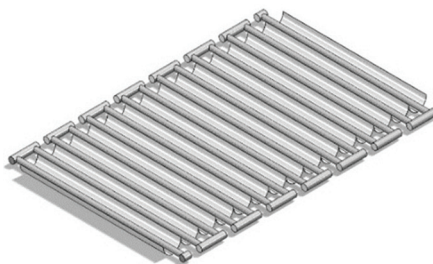


รูปที่ 2 ลักษณะแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วยพื้นที่
1. ท่อสุญญากาศแบบฮีตไปป์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm ยาว 1.5 m	15 ท่อ	8,125.5 บาทต่อตารางเมตร (พื้นที่ที่ใช้ 2.646 ตารางเมตร)
2. โครงสร้างแผง	1 ชุด	
3. แผ่นสะท้อนแสง	15 แผ่น	

และในการสร้างชุดทดสอบแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา จะมีลักษณะดังรูปที่ 3 และมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วยพื้นที่
1. ท่อสแตนเลสบาง หนา 1 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 6 m	4 เส้น	3,760.5 บาทต่อตารางเมตร (พื้นที่ที่ใช้ 2.646 ตารางเมตร)
2. ท่อสแตนเลสบาง หนา 1 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว ยาว 6 m	1 เส้น	
3. โครงสร้างแผง	1 ชุด	
4. แผ่นสะท้อนแสง	15 แผ่น	

จากนั้นทำการหาประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เพื่อประเมินความสามารถในการรับความร้อน โดยการวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม อุณหภูมิน้ำป้อนขาเข้า และออกของแต่ละรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่รับความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานรวมต่อปีต่ำที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังรูปที่ 4 ซึ่งทำการเก็บผลการทดสอบตั้งแต่ 08.00 - 16.00 น. ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 เฉพาะวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง โดยใช้ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

รายการ	จำนวน
- อายุการทำงานของแผงรับความร้อน	15 ปี
- ขนาดการทำงานของหม้อไอน้ำ	2 ตันต่อชั่วโมง
- ราคาเชื้อเพลิงไม้ผืน	1 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหม้อไอน้ำที่ได้รับผลจากปริมาณเชื้อเพลิง*	0.2 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายแรงงานในการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ*	0.15 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงไม้ [6]	8,400 kJ/kg
- ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องหม้อไอน้ำก่อนปรับปรุง*	2,000,000 บาทต่อปี
- อุณหภูมิน้ำป้อนก่อนทำการอุ่น	28 °C
- ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	80 %
- สัดส่วนการใช้งานแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ในสภาพอากาศที่เหมาะสม	60 %

* การประเมินของภาคอุตสาหกรรม สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ของแต่ละรูปแบบ สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (1)

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_i} \quad (1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \eta_c &= \text{ประสิทธิภาพแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์} \\ Q_u &= \text{ความร้อนที่ของไหลได้รับ (W)} \\ Q_i &= \text{ความร้อนที่แผงได้รับจากแสงอาทิตย์ (W)} \end{aligned}$$

และสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ในรูปแบบของการส่งผ่านความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูญเสียรวม ได้ดังสมการที่ (2) [7]

$$\eta_c = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I} \quad (2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F_R &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การดึงความร้อนไปใช้ของของไหล} \\ \tau &= \text{ค่าการส่งผ่านรังสี} \\ \alpha &= \text{ค่าการดูดกลืนรังสี} \\ U_L &= \text{สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C)} \\ T_i &= \text{อุณหภูมิที่เข้ามาแผงรับความร้อน (}^{\circ}\text{C)} \\ T_a &= \text{อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (}^{\circ}\text{C)} \\ I &= \text{ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาความร้อนที่ของไหลได้รับ เมื่อทราบค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ค่าอัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่ไหลเข้าและออก ดังสมการที่ (3)

$$Q_u = c_p \dot{m} (T_o - T_i) \quad (3)$$

โดยที่

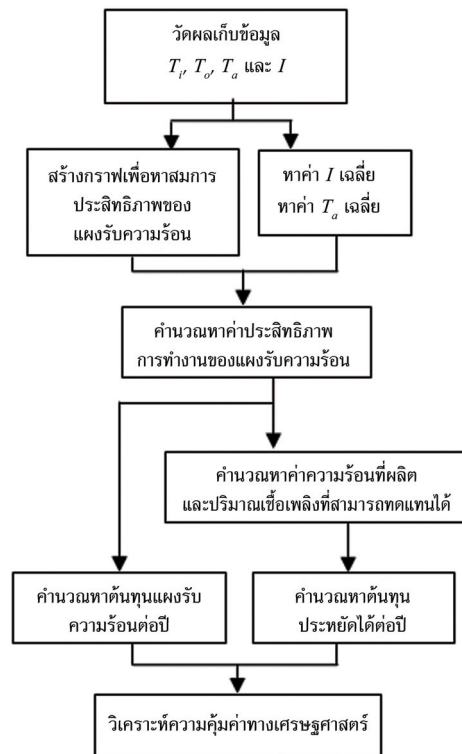
$$\begin{aligned} c_p &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kg }^{\circ}\text{C)} \\ \dot{m} &= \text{อัตราการไหลของของไหลที่ได้รับความร้อน (kg/s)} \\ T_o &= \text{อุณหภูมิที่ออกจากแผงรับความร้อน (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

และความร้อนที่แผงได้จากแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Q_i = IA \quad (4)$$

โดยที่

$$A = \text{พื้นที่รับแสงอาทิตย์ (m}^2\text{)}$$



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการจะต้องวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลต้นทุนและผลประโยชน์ทางการเงินมาทำการวิเคราะห์ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนต่อทุน (Benefit Cost Ratio: BCR) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เพื่อประกอบการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโครงการ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา Kongcharoen, K. and Jitsanguan, T. [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ : กรณีศึกษา โรงพยาบาลแก่ง จังหวัดระยอง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดการทำงานจริงของระบบในช่วงระยะเวลา 6 เดือน นับตั้งแต่ติดตั้งระบบอายุโครงการเท่ากับ 16 ปี อัตราคิดลด

ร้อยละ 8 พบว่า โครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 1,071,359.57 บาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 2.34 และอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 31.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ พบว่าโครงการยังคงมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการพิจารณาการลงทุนโครงการ สิ่งที่จะนำมาวิเคราะห์คือ มูลค่าปัจจุบัน อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน โดยสามารถทำได้ดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

โดยที่

- i = อัตราคิดลด (Discount Rate) หรืออัตราดอกเบี้ย
- t = ระยะเวลาของโครงการ คือ ปีที่ 0, 1, 2, ... n
- B_t = รายได้ที่คาดว่าจะได้ และ ณ ปีที่ t
- C_t = รายจ่ายที่คาดว่าจะได้ และ ณ ปีที่ t

อัตราผลตอบแทนต่อทุน (Benefit Cost Ratio: BCR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (6)$$

โดยเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาในการลงทุน เมื่อ $BCR > 1$ จะยอมรับการลงทุนเพราะผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการจะมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไป แต่ถ้า $BCR < 1$ แสดงว่าผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการจะมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไป จึงไม่เหมาะสมที่จะลงทุน [9]

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราดอกเบี้ยในการคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (7)

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

เกณฑ์การพิจารณา ถ้า IRR สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมของโครงการที่กำหนดไว้แสดงว่าโครงการคุ้มค่าแก่การลงทุน แต่ถ้า IRR ต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมของโครงการที่กำหนดไว้แสดงว่าโครงการไม่คุ้มค่า

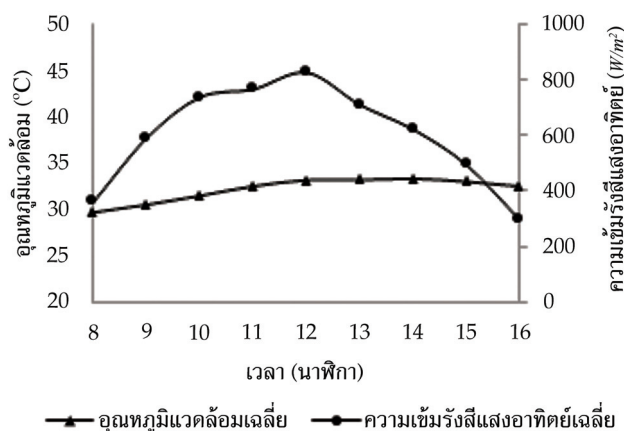
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่สามารถคืนทุนได้เมื่อเปรียบเทียบกับมูลค่าต้นทุนที่จ่ายออกไป โดยคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนสำหรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์รายปี}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปี}} \quad (8)$$

ผลและวิจารณ์ผล

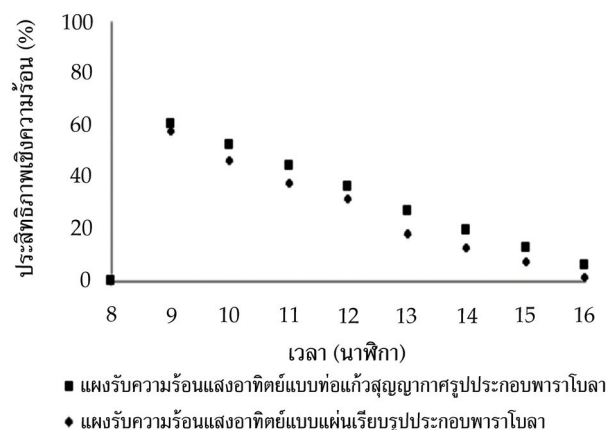
1. ผลการทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

จากการดำเนินการเก็บผลการทดลองสภาพแวดล้อม พบว่าในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 32.1°C และค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 825.3 W/m^2 แสดงดังรูปที่ 5

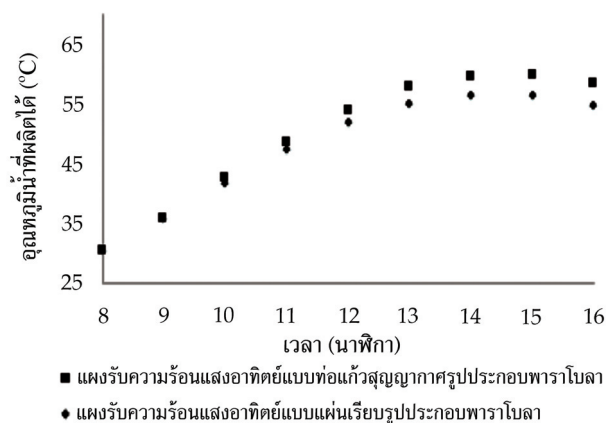


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย ณ อำเภอพนสนิม จังหวัดชลบุรี

และเมื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของแผงรับความร้อนในแต่ละรูปแบบ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ รูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 60.6 % และ 58.1 % แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแต่ละรูปแบบมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำป้อนภายในถังเก็บน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำป้อนที่นำกลับมาเข้าแผงรับความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจากการที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำป้อนภายในถังเก็บน้ำว่าจะลดลงตามไปด้วย แต่เกิดจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำป้อนเข้าและขาออกที่น้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละรูปแบบลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moakhar, R. S. et al. [1] ได้รายงานว่าประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเข้า ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิน้ำเข้ายิ่งสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยในแต่ละรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์



รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยที่ผลิตได้ในแต่ละรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

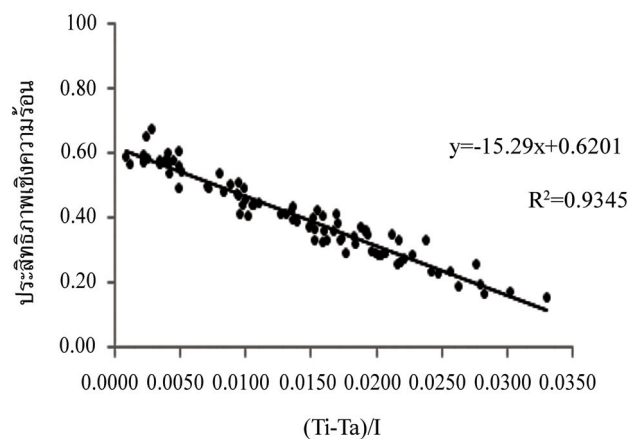
จากรูปที่ 7 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำป้อนที่สามารถผลิตได้สูงสุดของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลามีค่าเท่ากับ 59.8 °C และ 56.5 °C โดยผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำป้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ทั้งสองรูปแบบเท่ากับ 1.8 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์สามารถผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน และผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malahom, T. [10] ที่ได้ศึกษาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบฮีตปั๊ม กล่าวว่า แผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบและแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศสามารถผลิตน้ำร้อนได้ใกล้เคียงกัน

ซึ่งจากผลการทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิน้ำป้อนที่ผลิตได้พบว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนและผลิตน้ำร้อนได้ดีกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา แต่หากคำนึงถึงต้นทุนในการสร้างแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์พบว่าแผงรับความร้อน

แสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาที่มีต้นทุนที่สูงกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 53.7 % โดยจะเห็นได้ว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาที่มีต้นทุนสูง แต่ผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิแตกต่างกับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเพียง 1.8 °C และเมื่อพิจารณาประกอบกับตารางที่ 1 จะเห็นว่าท่อแก้วสุญญากาศนั้นมีความสามารถในการผลิตความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 - 200 °C แต่กลับพบว่าอุณหภูมิของน้ำป้อนที่สามารถผลิตได้ของท่อแก้วสุญญากาศอยู่ในช่วงของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดแผ่นปิคลิโซแทนนั้น จึงทำให้รูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาที่มีความเป็นไปได้ที่ดีกว่าในการลงทุนในการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ผลการตอบแทนและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการเลือกรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาจะใช้ผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามสมการที่ (2) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อนำมาใช้ในการทำนายค่าความร้อนที่สามารถผลิตได้สำหรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา จากผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนจะได้สมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา ดังสมการที่ (9) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.9345$

$$\eta_c = 0.6201 - 15.29 \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad (9)$$

3. ผลตอบแทนและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลในตารางที่ 4 และสมการที่ (9) เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนในการทำงานของหม้อไอน้ำและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา พบว่าต้นทุนในการทำงานของหม้อไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 1,984,343.63 บาท เมื่อใช้พื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 50.4 % ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 227,184.29 kJ/ปี โดยคิดเป็นต้นทุนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 449,750 บาท และสามารถประหยัดต้นทุนทางด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงของไม้เท่ากับ 45,639.7 บาทต่อปี

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ประเภทเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน ของเชื้อเพลิง (kJ/kg)	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	NPV	BCR	IRR	ระยะเวลา คืนทุน (ปี)
ไม้	8,400	1.00 ^{*1}	10,887.80	-0.22	0.32 %	14.83
ก๊าซธรรมชาติ (LPG)	46,100	18.07 ^{*2}	624,015.40	1.16	16.29 %	4.83

หมายเหตุ ^{*1} ^{*2} ราคาเชื้อเพลิง ณ วันที่ 26 มกราคม 2560

จากตารางที่ 5 เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์โดยพิจารณาที่อัตราดอกเบี้ยลูกค้ารายย่อยชั้นดี (MRR) จากธนาคารกรุงไทย (2560) ณ วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2560 เท่ากับ 7.12 % พบว่ารูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 10,887.80 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับ 0.32 % ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราผลตอบแทนต่ำและมีระยะเวลาคืนทุนที่นาน เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้มีราคาถูก ซึ่งในอนาคตแนวโน้มต้นทุนของไม้ฟืนมีราคาที่สูงขึ้น ก็จะทำให้อัตราผลตอบแทนและระยะเวลาคืนทุนดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากหากเปรียบเทียบกับระบบที่มีการนำก๊าซธรรมชาติ (LPG) มาใช้ซึ่งมีต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงที่สูง พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 624,015.40 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับ 16.29 % ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 4.83 ปี โดยจะเห็นได้ว่าสามารถลดระยะเวลาคืนทุนได้อย่างมากและมีผลตอบแทนที่ดี ดังนั้นการนำแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลามาใช้ในการอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำจึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุน อย่างไรก็ตาม ในอนาคตอาจจะต้องมีการนำข้อมูลทางด้านต้นทุนและผลกระทบในส่วนอื่น ๆ เช่น การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไม้ฟืน ซึ่งเป็นก๊าซหลักที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก มาพิจารณาร่วมด้วยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็จะทำให้มีความเป็นไปได้ในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนและต้นทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ ซึ่งทำการศึกษาสองรูปแบบ ได้แก่ แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้ว สุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา สามารถสรุปผลการวิจัยด้านประสิทธิภาพและต้นทุนได้ดังนี้

1. เปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาพบว่า มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 60.6 และ 58.1 % ซึ่งรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าคิดเป็น 2.5 % เป็นผลมาจากอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ยสูงสุดของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีค่าสูงกว่ารูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

2. เมื่อเปรียบเทียบด้านต้นทุนระหว่างแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีมูลค่าสูงกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 53.7 % จากผลการวิเคราะห์ที่ต้นทุนดังกล่าวพบว่า แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ โดยมีมูลค่าเท่ากับ 449,750 บาท สามารถประหยัดต้นทุนทางด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงของไม้เท่ากับ 45,639.7 บาทต่อปี เมื่อพื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 10,887.80 บาท ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 0.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ โดยได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ร่วมกับเครือข่ายการวิจัยภาคเหนือตอนล่าง มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 บริษัท พี.วี.ที.ฟู้ดส์ อินดัสตรีส์ จำกัด ที่เอื้อเฟื่องบประมาณและสถานที่ในการทำวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

References

- [1] Moakhar, R. S., Mehdipour, M., Ghorbani, M., Mohebbali, M., and Koohbor, B. (2013). Investigations of the Failure in Boilers Economizer Tubes Used in Power Plants. **Journal of Materials Engineering and Performance**. Vol. 22, Issue 9, pp. 2691-2697. DOI: 10.1007/s11665-013-0567-2

- [2] Celuppi, R., Scapinello, J., Andrade, F. G. D., Revello, J. H. P., and Magro, J. D. (2014). Solar Energy Use for Water Pre-Heating in Boilers of Agro-Industries. **Journal of Engenharia Agricola**. Vol. 34, No. 3, pp. 451-460. DOI: 10.1590/S0100-69162014000300009
- [3] Rabl, A., O’Gallagher, J., and Winston, R. (1980). Design and Test of Non-Evacuated Solar Collectors with Compound Parabolic Concentrators. **Solar Energy**. Vol. 25, Issue 4, pp. 335-351. DOI: 10.1016/0038-092X(80)90346-1
- [4] Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Pongtornkulpanich, A., Sonsaree, S., and Laodee, P. (2012). **Development of Compound Parabolic Concentrating Collector (CPC)**. Bangkok: Naresuan University
- [5] Sonsaree, S., Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Laodee, P., and Sirisamphanwong, C. (2014). Development of a Compound Parabolic Concentrating Solar Collector. **Burapha Science Journal**. Vol. 19, No. 2, pp. 105-121
- [6] Quaak, P., Knoef, H., Stassen, H., Quaak, P., Knoef, H., and Stassen, H. (1999). **Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies (English)**. World Bank technical paper; no. WTP 422. Energy series. Washington, D.C.: The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/936651468740985551/Energy-from-biomass-a-review-of-combustion-and-gasification-technologies>.
- [7] John A. Duffie and William A. Beckman. (1974). **Solar Energy Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Kongcharoen, K. and Jitsanguan, T. (2006). Economic Analysis of Project Investment on Hot Water Production from Integrated Solar Energy System: Case Study of Klang Hospital, Rayong Province. **Applied Economics Journal**. Vol. 11, No. 1-2, pp. 33-48
- [9] Awirothannaon, A. (2016). Financial Feasibility of the use of Mixing Valve Solar Hot Water by Industrial Enterprises in the Northern Region. In **12th Naresuan Research Conference**. 21-22 July 2016. Phitsanulok, Thailand. pp. 1170-1179
- [10] Malahom, T. (2007). **A Study of the Performance of Heat Pipe Solar Collector for Hot Water System**. Chulalongkorn University

การยับยั้งแบคทีเรียและการต้านรังสียูวีจากแสงอาทิตย์ของผ้าฝ้ายย้อมด้วยสีธรรมชาติเปรียบเทียบกับผ้าจิวร

Antibacterial Activity and Solar UV-Protective Properties of Cotton Dyed with Natural Dye Compared with Commercial Yellow Robe

วรวิทย์ ศรีวิทยากุล^{1*} ธฤติ รุ่งโรจน์ารักษ์¹ ทวีป ศรีมูนิ¹ มาหามะสุไฮมี มะแซ¹ และภาณุมาศ ชูพูล²
Worawit Sriwittayakul, Tharueti Rungrodejarnarueti, Taweeep Srimuni, Mahamasuhaimi Masae and Parnumart Choopool

Received: June 14, 2018; Revised: October 22, 2018; Accepted: October 22, 2018

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้เพื่อย้อมผ้าฝ้ายด้วยขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง ซึ่งเป็นสีย้อมตามธรรมชาติ โดยใช้สารช่วยติดสี คือ สารส้ม ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) ทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก เท้งื่อและน้ำ ตามมาตรฐานการทดสอบสิ่งทอ (AATCC) และศึกษาการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายด้วยการคำนวณค่าการต้านรังสียูวี (Ultraviolet Protection Factor) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในสีย้อมธรรมชาติได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรด (FT-IR Spectroscopy) การยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ย้อมทดสอบด้วยเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ซึ่งผลการทดลองผ้าย้อมสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ร้อยละ 94 และ 97 โดยสีผ้าของที่ย้อมด้วยขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝางให้สีผ้าย้อมเป็นสีเหลืองคล้ายจิวร ผลการทดลองความคงทนของสีย้อมผ้าฝ้ายพบว่ามีความคงทนของสีต่อการซัก เท้งื่อและน้ำในระดับปานกลางถึงดี การต้านรังสียูวีอยู่ในระดับค่าการต้านรังสียูวีในระดับดีมาก เป็นผลจากสารกลุ่มพอลิฟีนอลิก (Polyphenolic) และแทนนิน (Tannin) ที่มีอยู่ในขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง ซึ่งพืชธรรมชาติดังกล่าวก็เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการย้อมผ้าจิวรและในการผลิตสีย้อมผ้าอีกด้วย

คำสำคัญ : ผ้าฝ้าย; การยับยั้งแบคทีเรีย; การต้านรังสียูวี

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

² Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkla

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

Abstract

The objective of this research was dyeing of cotton fabrics using Turmeric, Jackfruit wood and Sappan wood as a natural dye with Potassium aluminium sulfate ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) as mordant. The color fastness to washing, perspiration and water of the dyed samples was determined according to AATCC test methods. In this study the UV-protection properties were investigated on cotton fabrics. Transmittance measurements were used to calculate the ultraviolet protection factor. The chemical functional groups of the dyes were characterized by using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Antibacterial activity of this dyed cotton was confirmed by exposing the fabric to *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* reduced the number of viable organisms by 94 and 97 %. Cotton fabric dyed with turmeric, jackfruit wood and sappan wood had a yellow color look, like a yellow robe. Our results revealed that color fastness to washing, perspiration and water was fair to good level. The UV protection characteristics were also very good protection due to these extract composition of polyphenolic and tannin found in turmeric, Jack fruit wood and sappan wood. These extracts contained polyphenolic and tannin. Therefore, it was suggested that these extracts have potential in producing functional dyes that could be imparted into the yellow robe dyeing natural colourant system.

Keywords: Cotton Fabrics; Antibacterial Activity; UV Protective Properties

บทนำ

การใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สืบทอดตามบรรพบุรุษในการย้อมผ้าที่เกี่ยวข้องกับพระพุทธศาสนา คือ การใช้สีจากแก่นขนุน ขมิ้น และไม้ฝาง มาย้อมผ้าจิวรานั้นยังมิให้เห็นในทุกภาคของประเทศไทย ซึ่งในภาคใต้นั้นนิยมใช้ไม้จากแก่นขนุน เพราะขนุนเป็นพืชที่พบได้ง่ายในพื้นที่ โดยปัจจุบันวัดเขาล้อม (ควนจง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ยังอนุรักษ์ให้มีการย้อมผ้าจิวรด้วยแก่นขนุน และการย้อมผ้าจิวด้วยไม้ฝางและแก่นขนุนยังคงสืบทอดให้เห็นจนถึงปัจจุบันอีกหลายพื้นที่ ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวถึงการย้อมผ้าด้วยสีที่ได้จากพืชนั้นมีมากมาย ซึ่งมีการศึกษาการย้อมผ้าไหมด้วยสีย้อมจากไม้โกงกางย้อม [1] การใช้ดอกไม้บานาชนิดของประเทศอิตาลีในการย้อมผ้าฝ้ายและผ้าลินิน [2] การย้อมสีผ้าขนสัตว์ด้วยชาดำและเติมสารช่วยติดหรือสารกระตุ้นต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความคงทนของสี ได้แก่ คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นต้น ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเหล่านี้ต่อค่าความคงทนของสี พบว่าผ้าย้อมที่ใช้สารช่วยติดเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ทำให้ผ้าขนสัตว์มีสีติดคงทนได้ดีกว่าสารช่วยติดอื่น ๆ [3] และสารช่วยติดในกลุ่มเหล็ก (Fe) ยังมีผลต่อการดำรงชีวิตได้ดีอีกด้วย [4] อีกทั้งการวิจัยสกัดสีด้วยใบพืช

จำพวกผักชีล้อมผสมกับสารช่วยติดสี คือ สารส้ม ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) และสแตนนัสคลอไรด์ ($SnCl_2$) แล้วย้อมผ้าฝ้ายและทดสอบความคงทนของสี ซึ่งทำให้ผ้าย้อมสีดังกล่าวมีค่าความคงทนของสีได้ดี [5] การศึกษาการใช้สารสกัดสีย้อมจากพืชของจีน ชื่อว่า ไชนีสกอล (Chinese Gall) หรือส้มผสมสารส้ม ย้อมสีผ้าขนสัตว์และทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) ได้ถึงร้อยละ 96.55 เนื่องจากพืชดังกล่าวมีกรดแกลลิก (*Gallic Acid*) เป็นส่วนประกอบทางเคมี [6] การย้อมผ้าขนสัตว์โดยใช้สีจากธรรมชาติ ได้แก่ กุหลาบแดง ชาเขียว ขมิ้นชัน ใบเทียนกิ่ง (*Henna*) และสารส้ม มาทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก คือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และแกรมลบ คือ *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) ผลทดสอบสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ถึง 80 - 99.8 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังมีความคงทนของสีด้วย [7] นอกจากนี้ได้มีการใช้สีธรรมชาติมาผสมเพื่อผลิตภาชนะบรรจุภัณฑ์สำหรับถนอมอาหารป้องกันเชื้อราได้ คือ ขมิ้นชัน ฟรัง และเทียนกิ่ง (*Henna*) พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อราได้ เนื่องจากในพืชดังกล่าวมีโครงสร้างทางเคมี คือ เคอร์คิวมิน (*Curcumin*) และเทอฟลาวินบี (*Terflavin B*) ที่พบในขมิ้นชัน สำหรับกรดเชบูลินิก (*Chebulinic Acid*) พบในต้นสมอ (*Terminallia*) ส่วนลอสัน (*Lawson*) พบในใบเทียนกิ่ง อีกทั้งเบต้าแคโรทีน ดี-อะราบีโนส (*D-Arabinose*) และแอลอะราบีโนส (*L-Arabinose*) พบในฝรั่ง [8] การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพืชในธรรมชาติที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrometer) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของโครงสร้างที่เป็นกรดแกลลิก ซึ่งมีโครงสร้างของแกลโลแทนนิน (*Gallotannin*) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากพอลิฟีนอลมอนอเมอร์ (*Polyphenol Monomer*) และกลุ่มไฮดรอกซิล (*Hydroxyl Group*) อีกทั้งยังมีองค์ประกอบของพอลิแอล คาร์โบไฮเดรต (*Polyol Carbohydrate*) เป็นโครงสร้างของกลูโคส (*Glucose*) จากข้อมูลที่ได้กล่าวมา กรดแกลลิกจะมีองค์ประกอบทางเคมีของเดฟไซด์ โมอีตี (*Depside Moiety*) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากสีย้อมจากพืชในธรรมชาติ [9] - [10] นอกจากนี้แล้วการใช้ส่วนต่าง ๆ ของขนุนกับการรักษาโรคตามภูมิปัญญาท้องถิ่น เช่น เนื้อและรากขนุนสามารถรักษาอาการไข้และท้องเสียได้ (*Diarrhea and Fever*) ไม้ขนุนรักษาลมชัก (*Convulsions*) ใบช่วยให้น้ำนมของแม่ไหลได้ดีและรักษาแผลได้อีกด้วย เป็นต้น แก่นไม้ขนุนมีองค์ประกอบทางเคมี คือ สารฟลาโวนอยด์ (*Flavonoids*) แทนนิน (*Tannins*) อัลคาลอยด์ (*Alkaloids*) ซัฟโฟนิน (*Saponins*) สเตอรอล (*Sterols*) และไตรเทอพินอยด์ (*Triterpenoids*) เป็นต้น ซึ่งใบ เมล็ด แก่นไม้ และรากสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมลบและแกรมบวก [11] - [12] สารฟลาโวนอยด์ยังช่วยสร้างเกล็ดเลือด และมีสารช่วยลดน้ำตาลในเลือดด้วย แก่นไม้ฝางใช้อย่างแพร่หลายในตำรายาท้องถิ่น ในทางการแพทย์แผนจีนได้ใช้ไม้ฝางเป็นยา เช่น บำรุงระบบหมุนเวียนเลือด (*Blood Circulation*) ยาระงับการปวดและการอักเสบ ยาแก้แพ้ (*Anti-Inflammatory*) รักษาผิว สารต้านอนุมูลอิสระ (*Antioxidant*) รวมทั้งสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น ภูมิปัญญาท้องถิ่นในประเทศไทยใช้แก่นฝางในการรักษาวัณโรค (*Tuberculosis*) ท้องเสีย และผิวหนังที่เกิดจากแบคทีเรีย เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีในไม้ฝางประกอบไปด้วย กลุ่มฟีนอลิก (*Phenolic Components*) เช่น แซนโทน (*Xanthone*) เคมาริน (*Coumarin*) ฟลาโวน (*Flavones*) โฮโมไอโซฟลาโวนอยด์ (*Homoisoflavonoids*) และบราซิลิน (*Brazilin*) เป็นต้น [13] - [15] บราซิลินเป็นสารย้อมสีแดงตามภูมิปัญญาท้องถิ่น อีกทั้งยังมีการศึกษาการนำไม้ฝางมาสกัดสารบราซิลินโดยต้มกับน้ำแล้วเก็บสารละลายผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทำเป็นสีย้อมเซลล์อาทิตย์ซึ่งสามารถให้ค่าการนำไฟฟ้า

ได้ดีอีกด้วย [16] ในปัจจุบันปัญหาโลกร้อนเป็นสิ่งที่ทุกคนตระหนัก การดำรงชีวิตของมนุษย์และการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการทำลายสิ่งแวดล้อมและชั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศโลก โดยที่โอโซนมีหน้าที่ป้องกันรังสียูวีโดยจะดูดกลืนและป้องกันไม่ให้ทะลุผ่านลงมาสู่ผิวโลก ทำให้รังสียูวีลงมาถึงผิวโลกมากขึ้น อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้เกิดโรคผิวหนังที่เกิดจากแสง เช่น ผิวคล้ำแดด เทียวย่น เกิดฝ้าและมะเร็งผิวหนัง เป็นต้น เนื่องจากภูมิคุ้มกันถูกแสงยูวีทำลาย นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการต้านรังสียูวีในผ้า ซึ่งนอกจากองค์ประกอบของผ้า โครงสร้างของผ้า สีของผ้า สารเคมี และสารเติมแต่งยังสามารถป้องกันรังสียูวีได้ด้วย [17] ซึ่งจะส่งผลต่อสุขภาพร่างกายของผู้สวมใส่ได้ อีกทั้งยังมีการศึกษาสมบัติการป้องกันรังสียูวีของผ้าย้อมสีที่ได้จากพืชต่าง ๆ ซึ่งผลการทดสอบสามารถป้องกันรังสียูวีได้ถึงร้อยละ 20 - 35 เนื่องจากในพืชเหล่านั้นประกอบด้วยสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกที่มีสมบัติป้องกันรังสียูวีได้ [2]

ในการวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการย้อมผ้าฝ้ายด้วยพืชธรรมชาติให้มีสมบัติในการมีความคงทนของสี การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และการต้านรังสียูวี โดยใช้พืชธรรมชาติ คือ ขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีอันตรายที่ทำลายสิ่งแวดล้อม และทำการทดสอบด้วยการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสมบัติป้องกันรังสียูวี โดยเปรียบเทียบกับผ้าจิวที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

วิธีดำเนินการวิจัย

ผ้าฝ้าย (Cotton Fabric: CF) จากร้านเล็กสโตร์ จังหวัดสงขลา แฉ่งซีกฟอก 30 นาที ล้างน้ำสะอาดแล้วตากให้แห้ง ขั้นตอนการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีธรรมชาติมีดังนี้ คือ นำผ้าที่ซีกและตากให้แห้งแล้วใส่ลงในน้ำสกัดสีจากธรรมชาติผสมกับสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยอัตราส่วนผ้าฝ้าย : สีย้อมธรรมชาติ : สารช่วยติดสี : น้ำเท่ากับ 0.5 : 1.0 : 0.04 : 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้สารช่วยติดสี คือ สารส้ม ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) และสีย้อมธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ คือ ขมิ้น (Turmeric: T) ไม้ขนุน (Jack Fruit Wood: J) และไม้ฝาง (Sappan Wood: S) จากร้านไทรบุรีโอสถ จังหวัดสงขลา หลังจากนั้นตากผ้าที่ย้อมเรียบร้อยแล้วให้แห้ง แล้วทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของผ้าย้อมสีธรรมชาติเปรียบเทียบกับผ้าจิว (Yellow Robe: Y) ยี่ห้อหนึ่งที่วางขายในท้องตลาดต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

น้ำสีย้อมผ้าจากพืชและสีย้อมผ้าจิวสังเคราะห์วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma (ICP) รุ่น AVIO 500 บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผ้าย้อมสีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) รุ่น VERTEX 70 บริษัท Bruker ประเทศสหรัฐอเมริกา ศึกษาภาพถ่ายเชื้อแบคทีเรียที่ถูกทำลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น Quanta 400 บริษัท FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา ทดสอบสมบัติความแตกต่างสี (The Color Difference: ΔE) ระหว่างผ้าตัวอย่างเปรียบเทียบกับจิวยี่ห้อหนึ่งที่วางขายในท้องตลาดด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น SC80B บริษัท SADT ประเทศจีน เป็นแหล่งกำเนิดแสงและตรวจจับสี บันทึกค่า L^* , a^* และ b^* และคำนวณค่าความแตกต่างสีของตัวอย่างจากสมการที่ (1) [18]

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ

ΔE	คือ	ค่าความแตกต่างสี
ΔL^*	คือ	ค่าความแตกต่างของความสว่าง (Lightness)
Δa^*	คือ	ค่าความแตกต่างของสีระหว่างสีแดงและสีเขียว
Δb^*	คือ	ค่าความแตกต่างของสีระหว่างสีเหลืองและสีฟ้า

ตัวอย่างฝ้ายอมทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก เท็งอ และน้ำ ตามมาตรฐานทดสอบสิ่งทอ AATCC Test Method 61-2010, AATCC TM 15: 2009 และ AATCC Test Method 107-2009 ตามลำดับ ซึ่งระดับความคงทนสีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับค่าความคงทนของสี [2]

สีเปลี่ยนจากเดิม (Color Change)		สีตกติด (Color Strain)	
ระดับ	หมายถึง	ระดับ	หมายถึง
5	ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี	5	ไม่มีการตกติดของสี
4	สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	4	สีตกติดเล็กน้อย
3	สีเปลี่ยนแปลงพอสังเกตเห็นได้	3	สีตกติดพอสังเกตเห็นได้
2	สีเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก	2	สีตกติดค่อนข้างมาก
1	สีเปลี่ยนแปลงมาก	1	สีตกติดมาก

น้ำสีและฝ้ายอมสปีวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนของแสงที่สีย้อมดูดซับไว้ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrometer) รุ่น GENESYS™ 10S บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา และทดสอบการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายด้วยมาตรฐาน (AATCC Test Method 183-2004) [2] ค่าความต้านทานรังสียูวีคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$UPF = \frac{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta_{\lambda}}{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} S_{\lambda} T_{\lambda} \Delta_{\lambda}} \quad (2)$$

เมื่อ

E_{λ}	คือ	ค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนังมนุษย์
S_{λ}	คือ	ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์
T_{λ}	คือ	ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้
Δ_{λ}	คือ	ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ (นาโนเมตร)

ค่า UPF จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการป้องกันแสงแดดของวัสดุสิ่งทอ โดยบอกเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสียูวีที่สัมผัสผิวเมื่อมีผ้าทดสอบป้องกันอยู่ต่อปริมาณรังสีที่สัมผัสผิวเมื่อไม่มีผ้าทดสอบ (ปริมาณรังสีได้จากการคำนวณ) ซึ่งการกำหนดค่าความสามารถในการป้องกันรังสีเป็น UPF ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับค่า UPF ในการป้องกันรังสียูวี [2]

ช่วงค่า UPF	ระดับการป้องกันรังสียูวี	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของรังสียูวี
< 15	มีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้น้อย (ปริมาณรังสีที่ป้องกันได้อยู่ต่ำกว่า 93.3 เปอร์เซ็นต์)	> 6.7
15 - 24	มีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดี (ปริมาณรังสีที่ป้องกันได้อยู่ในช่วง 93.3 - 95.9 เปอร์เซ็นต์)	6.7 - 4.2
25 - 39	มีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดีมาก (ปริมาณรังสีที่ป้องกันได้อยู่ในช่วง 96.0 - 97.4 เปอร์เซ็นต์)	4.1 - 2.6
40 - 50, 50+	มีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้สูงสุด	≤ 2.5

ตัวอย่างผ้าทดสอบการยับยั้งแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *S. aureus* และ *E. coli* โดยเริ่มต้นจากการนำเชื้อแบคทีเรีย (ได้การอนุเคราะห์จากภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) ใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว (Tryptic Soy Broth) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน 0.85 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaCl) ในน้ำกลั่นปริมาตร 9 มิลลิลิตร โดยใช้วิธี Serial Dilution Method แล้วนำเชื้อมาเจือจาง 0.1 มิลลิลิตร หยดบนอาหารแข็ง สำหรับเชื้อ *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบจะใช้อาหาร MacConkey Agar ส่วนเชื้อ *S. aureus* ที่เป็นแบคทีเรียแกรมบวกใช้อาหาร Nutrient Agar โดยใช้เทคนิค Spread Plate แล้วเจือจางจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30 - 300 โคโลนี หลังจากรู้ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้นแล้วนำเชื้อที่ได้เตรียมความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียของสิ่งทอตามมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004 และคำนวณอัตราการลดลงของแบคทีเรีย (R) ได้โดยสมการที่ (3)

$$R = 100(A - B) / A \quad (3)$$

เมื่อ

R คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย
 A คือ เชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นทั้งหมด
 B คือ เชื้อแบคทีเรียที่เหลือ

ผลการวิจัย

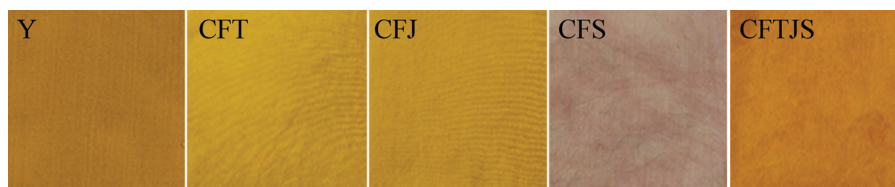
1. ลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสี

จุดมุ่งหมายของผู้วิจัยในการย้อมผ้าที่ใช้ขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง เพื่อเปรียบเทียบกับผ้าจิวร ให้มีสีที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งลักษณะสีผ้าย้อมจากการมองด้วยตาเปล่าดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติทั้งสามชนิด คือ ขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง (CFTJS) จะมีสีคล้ายสีผ้าจิวร ส่วนผ้าย้อม CFT และ CFJ จะมีสีเหลืองสว่างกว่าสีจิวร ในขณะที่ผ้า CFS จะมีสีชมพูอมม่วงแตกต่างจากสีจิวรอย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของสีผ้าย้อมสีเปรียบเทียบกับสีจิวรด้วยเครื่องวัดสีและคำนวณค่าความแตกต่างสี (ΔE) (ตารางที่ 3) จะพบว่าตัวอย่างผ้า CFTJS จะมีค่าความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับสีผ้าจิวรน้อยที่สุด คือ 16.3 แสดงให้เห็นว่าสีย้อมธรรมชาติที่ได้จากสีย้อมผ้าผสมด้วยขมิ้น ขนุน และไม้ฝางจะมีสีใกล้เคียงกับสีจิวรมาก เนื่องจากสีย้อมผ้าที่ได้จากขมิ้นผสมกับไม้ขนุน เมื่อผสมกับน้ำสีจากไม้ฝางจะให้สีผ้าย้อมสีเหลืองหรือสีเหลืองเข้มใกล้เคียงกับสีของจิวรทั่วไป ดังรูปที่ 1 ส่วนค่าความแตกต่างสีรองลงมา คือ ผ้าย้อม CFT และ CFJ ในขณะที่ผ้าย้อม CFS ซึ่งย้อมด้วยแก่นฝางเพียงอย่างเดียวจะมีค่าความแตกต่างสีมากที่สุดถึง 43.7 นั่นคือ ผ้าย้อมสีจากไม้ฝางมีสีแตกต่างจากสีจิวรมากที่สุด เพราะผ้าย้อมฝางมีสีชมพูอมม่วง ซึ่งแตกต่างจากสีของจิวรทั่วไปมากที่สุด

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักตกค้างในสีย้อมเปรียบเทียบกับน้ำสีธรรมชาติทุกสูตรและน้ำสีสังเคราะห์ย้อมผ้าจิวรยี่ห้อหนึ่งที่วางขายตามท้องตลาดด้วยเทคนิค ICP พบว่าน้ำสีธรรมชาติทุกสูตรไม่พบปริมาณโลหะหนักใด ๆ ในขณะที่ตัวอย่างน้ำสีสังเคราะห์พบปริมาณโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) ปริมาณ 0.041 และ 0.014 mg/L ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสีย้อมผ้าของ Ecological and Toxicological Association of Dyes and Organic Pigments Manufacturers (ETAD) ที่ยอมรับ คือ ปริมาณทองแดงและโครเมียมไม่เกิน 250 และ 100 mg/L

ตารางที่ 3 การทดสอบสมบัติความแตกต่างสีของผ้าย้อมสีธรรมชาติเปรียบเทียบกับผ้าจิวร

ตัวอย่าง	ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*	ΔE
ผ้าฝ้าย	CF	-	-	-	-
ผ้าจิวร	Y	50.39	26.26	40.88	0.0
ผ้าฝ้ายย้อมด้วยขมิ้น	CFT	67.5	8.88	49.95	26.0
ผ้าฝ้ายย้อมด้วยไม้ขนุน	CFJ	72.71	8.94	22.62	33.6
ผ้าฝ้ายย้อมด้วยไม้ฝาง	CFS	67.06	18.54	1.28	43.7
ผ้าฝ้ายย้อมด้วยขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝาง	CFTJS	59.75	20.17	52.74	16.3



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบสีด้วยสายตาของลักษณะสีผ้าฝ้ายย้อมสีธรรมชาติเทียบกับผ้าจิวร

ตารางที่ 4 ความคงทนของสีต่อการซัก ต่อเหงื่อและต่อน้ำ

ผลการทดลอง	ความคงทนของสี					
	ต่อการซัก		ต่อเหงื่อ		ต่อน้ำ	
	Y	CFTJS	Y	CFTJS	Y	CFTJS
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4.0	3.5	4.0	4.0	4.5	4.0
สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)						
ผ้าอะซีเตต (Acetate)	4.5	4.0	4.5	4.0	4.5	4.0
ผ้าฝ้าย (Cotton)	3.5	3.5	4.5	4.0	4.0	3.5
ผ้าไนลอน (Nylon)	4.5	4.0	4.5	4.0	4.0	4.0
ผ้าไหม (Silk)	4.5	4.0	4.5	4.0	4.0	3.5
ผ้าสังเคราะห์ (Viscose Rayon)	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5	4.0
ผ้าขนสัตว์ (Wool)	4.5	4.0	4.5	4.0	4.5	4.0

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ตารางที่ 4 พบว่าสีผ้าย้อมจากธรรมชาติทุกสูตร มีการเปลี่ยนสีหลังจากผ่านการซัก เหงื่อ และต่อน้ำในระดับ 3.5 - 4.0 คือ สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนเกือบเปลี่ยนแปลงพอสังเกตเห็นได้ สำหรับความคงทนของสีโดยวิเคราะห์จากสีที่ตกติดกับผ้าขาวชนิดต่าง ๆ อยู่ในช่วง 3.5 - 4.5 คือ สีตกติดผ้าขาวเล็กน้อยจนเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเปรียบเทียบความคงทนสีกับผ้าจิวร ย้อมด้วยสีสังเคราะห์ตามท้องตลาด พบว่าผ้าย้อมธรรมชาติมีค่าความคงทนสีต่อการซักและการตกติดบน ผ้าขาวต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเกิดขึ้นจาก 1) การแตกตัวของโมเลกุลกลุ่มไฮดรอกซิลในสีย้อมธรรมชาติภายใต้สภาวะการทดสอบในสารละลายที่เป็นค่าที่ใช้ผงซักฟอกในการทดสอบ [19] 2) การสลายตัวของสารประกอบในสีย้อม เพราะอิทธิพลจากสารส้อมที่ใช้เป็นสารช่วยติดสีในครั้งนี้ จะเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันกับน้ำ สีย้อมธรรมชาติ ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นจะเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง แต่ในขณะเดียวกันสารชนิดนี้จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใย ซึ่งพันธะชนิดนี้เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง หรือป้องกันไม่ให้น้ำสีย้อมเกิดพันธะกับเส้นใย ทำให้ความคงทนสีต่อการซักล้างของผ้าย้อมสีธรรมชาติที่กระตุ้นด้วยสารส้อมมีค่าลดลง และมีค่าต่ำกว่าผ้าจิวร เนื่องจากสีติดไม่คงทน [20] - [21]

2. ผลการยับยั้งแบคทีเรีย

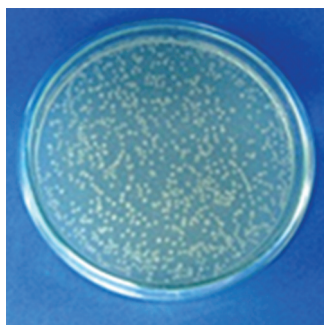
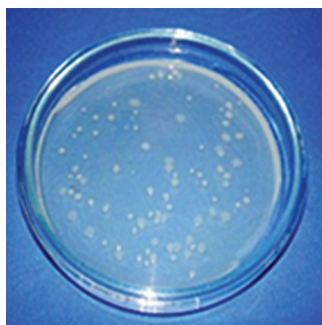
ผลการทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียผ้าย้อมตามมาตรฐานทดสอบสิ่งทอ AATCC Test Method 100-2004 ซึ่งใช้เวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่าง CFTJS ซึ่งมีสีใกล้เคียงกับตัวอย่างจิวรมี

ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียสูงและผลการกระจายตัวของแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 (ก) - (จ) พบว่าการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* บนอาหารเลี้ยงเชื้อลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับเชื้อแบคทีเรียที่ไม่มีฝ้าย้อม ค่าความอัตราการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (*R*) พบว่าผ้า CFTJS มีอัตราการลดลงของเชื้อแบคทีเรียมากกว่าผ้าจิวรที่ขายตามท้องตลาด โดยมีอัตราการลดลงของเชื้อแบคทีเรียทั้งเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* สูงสุดถึง 97 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผ้าจิวรมีอัตราการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* เพียง 52 และ 49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์รูปร่างและโครงสร้างเซลล์แบคทีเรียหลังจากผ่านการทดสอบที่ 12 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค SEM ทำให้เห็นรูปร่างและผนังเซลล์แบคทีเรียถูกทำลายได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 2 (ข) - (ญ) พบว่าผนังเซลล์ของเชื้อ *E. coli* บนตัวอย่าง CFTJS ถูกทำลายอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่แบคทีเรีย *E. coli* บนตัวอย่าง Y ลักษณะเซลล์จะยุบ ดังรูปที่ 2 (ข) - (ช) การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยเชื้อ *S. aureus* บนผ้า Y และ CFTJS พบเพียงผนังเซลล์มีลักษณะบวมและยุบ ดังรูปที่ 2 (ฉ) - (ญ) จากผลการทดลองดังกล่าว การที่ผนังเซลล์แบคทีเรียถูกทำลาย เนื่องจากอิทธิพลของสารแทนนินและกรดแกแลคติกที่มีอยู่ในขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฟาง รวมทั้งสารประกอบของสารส้มที่ใช้เป็นสารช่วยติดสีที่ติดในเส้นใยฝ้าย ทำให้มีประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ โดยทั่วไปในสีย้อมจากธรรมชาติจะมีปริมาณอนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species: ROS) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์ และซูเปอร์ออกไซด์ สารเหล่านี้จะยับยั้งการเจริญเติบโตและทำลายแบคทีเรียได้ นอกจากอนุมูลอิสระแล้ว ในสีย้อมยังมีกลุ่มไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical: OH) จึงมีฤทธิ์รุนแรงต่อเซลล์ของแบคทีเรียโดยจะออกซิไดซ์เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนในเซลล์และมีผลต่อไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ โดยทำให้เกิดภาวะลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (Lipid Peroxidation) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวในผนังเซลล์ เกิดขึ้นในผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดภาวะที่ยอมให้สารซึมผ่านได้สูงขึ้น (Permeability) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบการยอมให้สารซึมผ่านเข้าออกจากเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติ จึงเกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ โครงสร้างโมเลกุล และโปรตีนภายในเซลล์ กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของสารช่วยติดสีที่เติมลงไปสีย้อม เนื่องจากเมื่อไอออนของโลหะจะสัมผัสกับผนังเซลล์ ซึ่งสามารถแพร่กระจายประจุไปเกาะตามผนังและแทรกเข้าไปภายในเซลล์ ทำให้เกิดภาวะการรวมตัวของ DNA (DNA Condensation) ภายในเซลล์ ประจุของโลหะเข้าไปจับกับเอนไซม์โปรตีนเนส (Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึมของเซลล์ ซึ่งจะจับกับหมู่ซัลไฟดริล (-SH) ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีประจุเป็นลบ (S^{2-}) และทำให้เกิดกระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานเซลล์แบคทีเรียจึงหยุดการเจริญเติบโตเสื่อมสภาพ และตายในที่สุด และการที่แบคทีเรีย *E. coli* สามารถยับยั้งได้สูงกว่า *S. aureus* นั้นเนื่องจาก *S. aureus* มีผนังเซลล์ที่หนากว่า *E. coli* จึงถูกทำลายได้ยากกว่า [22] - [23]

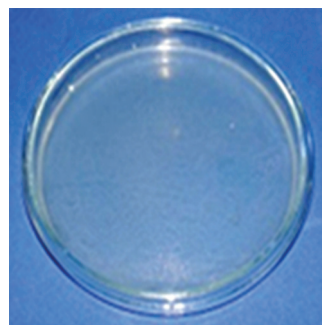
3. การต้านรังสียูวี

การทดลองวัดค่าการต้านรังสียูวี (UPF) ดังรูปที่ 3 พบว่าผ้าฝ้าย้อมขมิ้น ไม้ขนุน ไม้ฟาง และฝ้าย้อมผสมสาร 3 ชนิด มีประสิทธิภาพป้องกันรังสียูวีได้ดีมาก และสูงกว่าผ้าจิวรตามท้องตลาด ตัวอย่างผ้า CFT, CFJ, CFS และ CFTJS มีค่าการต้านรังสียูวี คือ 32.5, 47.0, 40.4 และ 27.0 ส่วนผ้า CF และ Y มีค่าการต้านทานแสงยูวีเพียง 13.8 และ 10.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบยังพบอีกว่าค่าการส่องผ่านของรังสียูวีของแสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วย รังสียูวีบี (UVB) และรังสียูวีเอ (UVA) ของ

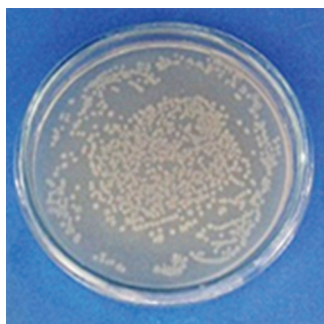
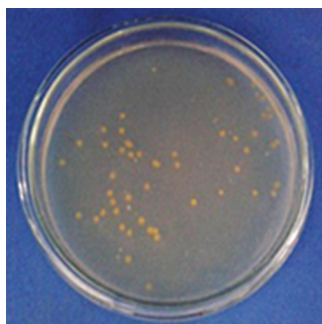
ผ้าย้อมทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานยุโรป (The European Standard for Sun Protective Clothing) คือ ถ้าหากผ้ามีค่าดังกล่าวต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือผ้าจะต้านรังสียูวีได้ดี และสอดคล้องกับมาตรฐานจีน (The Chinese National Standard GB/T18830-2002) อีกด้วย [2] สำหรับสีย้อมที่มีประสิทธิภาพต้านรังสียูวีได้นั้น เนื่องจากในสีย้อมขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฟางนั้นมีกรดแกลลิก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแทนนินที่เป็นองค์ประกอบหลักของกลุ่มฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบกลุ่มดังกล่าวจะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี ซึ่งมีคลื่นสั้นและพลังงานสูง กระตุ้นให้สารเหล่านี้ดูดกลืน และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยอาศัยหลักการทำงาน คือ จับกับเรดิเคิลหรือออกซิเจน และกระจายรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าออกมาแทน [2], [4]

(ก) เชื้อ *E. coli* เริ่มต้น

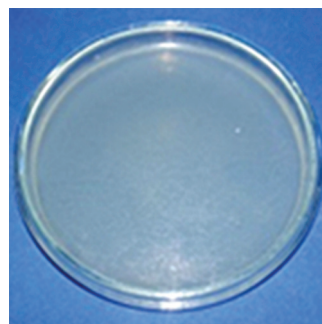
(ข) Y



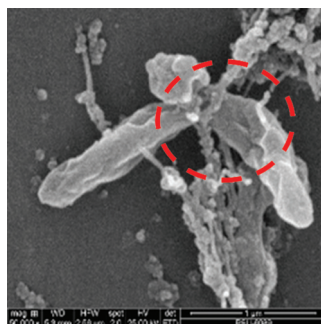
(ค) CFTJS

(ง) เชื้อ *S. aureus* เริ่มต้น

(จ) Y

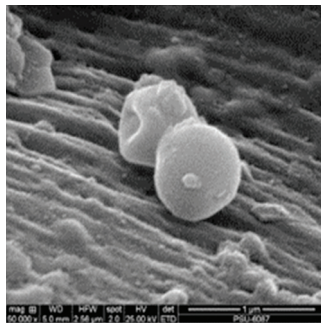
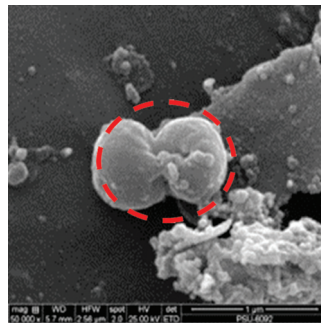


(ฉ) CFTJS

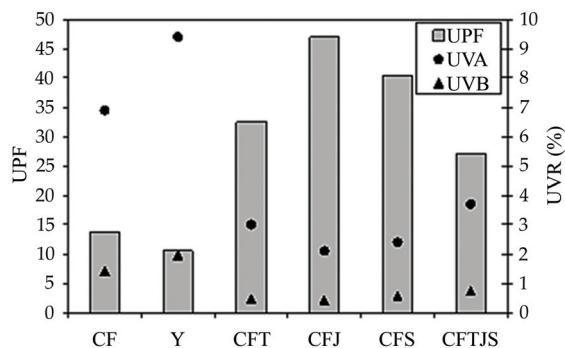
(ข) ภาพถ่าย SEM หลังทดสอบยับยั้งเชื้อ *E. coli* กับ Y

(ช) CFTJS

รูปที่ 2 ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และแบคทีเรีย *S. aureus* ของตัวอย่าง

(ฉ) เชื้อ *S. aureus* กับ Y

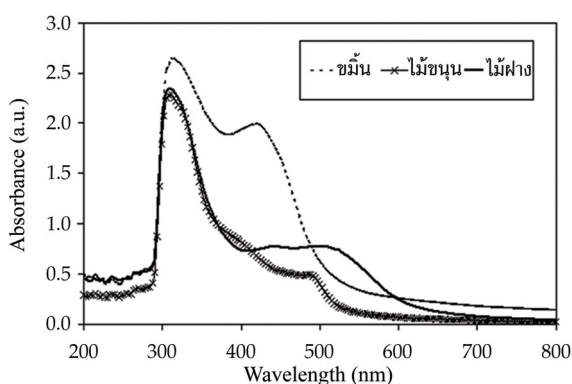
(ญ) CFTJS

รูปที่ 2 ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และแบคทีเรีย *S. aureus* ของตัวอย่าง (ต่อ)

รูปที่ 3 ผลการต้านรังสียูวีฟ้าย้อมสี

4. การวิเคราะห์สีด้วยเทคนิค UV-vis

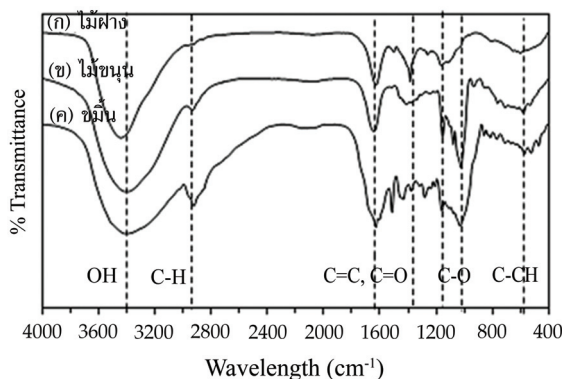
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และความยาวคลื่น (Wavelength) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมผ้าฝ้ายที่เป็นไขมัน ไม้ขนุน และไม้ฝางจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร (รูปที่ 4) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 250 - 350 นาโนเมตร จะแสดงถึงสารละลายในกลุ่มฟอลิฟินอล และกรดแกแลลิก ยังพบว่าในไขมันที่อุดมไปด้วยเคอร์คูมินและฟีนอล [24] - [25] ส่วนในไม้ขนุนจะประกอบด้วยสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ แทนนิน อัลคาลอยด์ และซัพฟอนิน เป็นต้น [12], [17] และไม้ฝางจะมีองค์ประกอบทางเคมี คือ ฟีนอลิก ซึ่งจะประกอบด้วย แซนโทน คูมาริน ซาโคเน ฟลาโวน ไฮโมไอโซฟลาโวนอยด์ และบราซิลิน อีกทั้งยังมีวิตามินที่สำคัญ คือ กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acids) ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) ไทอามิน (Thiamin) และไนอาซิน (Niacin) อีกด้วย [13] - [15] จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบที่มีอยู่ในไขมัน ไม้ขนุน และไม้ฝางสามารถป้องกันรังสียูวีได้ ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายย้อมผ้าฝ้ายและภาพแทรกเป็นสูตรโครงสร้างของกรดแกลลิก

5. การวิเคราะห์สีย้อมด้วยเทคนิค FTIR

จากผลการทดลองพบว่าสีย้อมผ้าฝ้ายด้วยน้ำสกัดจากไม้ฝาง ไม้ขนุนและขมิ้น มีตำแหน่งเลขคลื่นที่ปรากฏอย่างเด่นชัดดังรูปที่ 5 (ก) - (ค) ผลการทดลองพบว่าขมิ้นจะเกิดการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 571 cm^{-1} แสดงถึงองค์ประกอบของแอลเคน (C-H) เลขคลื่นที่ 571 cm^{-1} แสดงถึงองค์ประกอบของแอลเคน (C-H) (รูปที่ 6) สำหรับเลขคลื่นที่ $1,161$ และ $1,028\text{ cm}^{-1}$ (ขมิ้น) (รูปที่ 6 (ค)) เลขคลื่นที่ $1,153$ และ $1,024\text{ cm}^{-1}$ (ไม้ขนุน) (รูปที่ 6 (ข)) ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $1,160\text{ cm}^{-1}$ (ไม้ฝาง) แสดงถึงองค์ประกอบของอีเทอร์ (C-O) ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $1,514\text{ cm}^{-1}$ (ขมิ้น) $1,645\text{ cm}^{-1}$ (ไม้ขนุน) และ $1,627\text{ cm}^{-1}$ (ไม้ฝาง) แสดงถึงองค์ประกอบของเอสเทอร์และคาร์บอนิล (C=O) ที่ตำแหน่งคลื่นที่ $1,627\text{ cm}^{-1}$ (ขมิ้น) $1,410$ (ไม้ขนุน) และ $1,384\text{ cm}^{-1}$ (ไม้ฝาง) แสดงถึงองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนไซปิค (C=C) ในตำแหน่งเลขคลื่นที่ $3,200 - 3,600\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงองค์ประกอบของไฮดรอกซิล (O-H) ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ข้างต้นสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ในงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบองค์ประกอบหลักในขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฝางตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าว [11], [13], [24] - [26]



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR

สรุปผลการศึกษา

การนำสีพืชธรรมชาติ คือ ขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฟางย้อมผ้าฝ้าย สามารถผลิตสีย้อมจากธรรมชาติได้ ซึ่งผ้าฝ้ายย้อมด้วยสีย้อมจากขมิ้น ไม้ขนุนและไม้ฟางจะให้สีเหลืองที่มีค่าความแตกต่างของสีใกล้เคียงกับผ้าจีวรมากที่สุด ผ้าฝ้ายย้อมสีจากพืชดังกล่าวมีความคงทนของสีต่อการซัก เทื่อและน้ำอยู่ในระดับปานกลางถึงดี แต่ความคงทนของสีต่อการซักลดลงเมื่อเทียบกับผ้าจีวร อีกทั้งสีย้อมผ้าธรรมชาตินี้ไม่พบโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ในขณะที่สีย้อมผ้าสังเคราะห์ยังคงพบโลหะหนักแต่พบในปริมาณน้อย ผ้าย้อมสีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการป้องกันรังสียูวีได้อยู่ในระดับดี และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้สูงถึง 94 - 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบในสีย้อมผ้าจากธรรมชาตินี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

References

- [1] Punrattanasin, N., Nakpathom, M., Somboon, B., Narumol, N., Rungruangkitkrai, N., and Mongkholrattanasit, R. (2013). Silk Dyeing with Natural Dye from Mangrove Bark (*Rhizophora apiculata* Blume) Extract. **Industrial Crops and Products**. Vol. 49, pp. 122-129. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.04.041
- [2] Grifoni, D., Bacci, L., Lonardo, S. D., Pinelli, P., Scardigli, A., Camilli, F., Sabatini, F., Zipoli, G., and Romani, A. (2014). UV Protective Properties of Cotton and Flax Fabrics Dyed with Multifunctional Plant Extracts. **Dyes Pigments**. Vol. 105, pp. 89-96. DOI: 10.1016/j.dyepig.2014.01.027
- [3] Moiz, A., Ahmed, A., Kausar, N., Ahmed, K., and Sohail, M. (2010). Study the Effect of Metal Ion on Wool Fabric Dyeing with Tea as Natural Dye. **Journal of Saudi Chemical Society**. Vol. 14, Issue 1, pp. 69-76. DOI: 10.1016/j.jscs.2009.12.011
- [4] Feng, X. X., Zhang, L. L., Chen, J. Y., and Zhang, J. C. (2006). New Insights Into Solar UV-Protective Properties of Natural Dye. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 15, pp. 366-372. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.003
- [5] Wafa, H., Imen, E., Nizar, M., and Farouk, M. (2014). Valorization of the Leaves of Fennel (*Foeniculum vulgare*) as Natural Dyes Fixed on Modified Cotton: A Dyeing Process Optimization Based on a Response Surface Methodology. **Industrial Crops and Products**. Vol. 52, pp. 588-596. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.11.019

- [6] Bin, Z., Lu, W., Liangfei, L., and Martin, W. K. (2014). Natural Dye Extracted from Chinese Gall-the Application of Color and Antibacterial Activity to Wool Fabric. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 80, pp. 204-210. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.100
- [7] Fatemeh, S. G., Sayed, M. M., Farzaneh, A., Afshin, F., Ali, S. N., and Daryoush, A. (2014). Assessment of Antibacterial Activity of Wool Fabrics Dyed with Natural Dyes. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 72, pp. 139-145. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.050
- [8] Mari selvam, R., Ranjit Singh, A. J. A., and Kalirajan, K. (2012). Antifungal Activity of Different Natural Dyes Against Traditional Products Affected Fungal Pathogens. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**. Vol. 2, Issue 3, pp. S1461-S1465. DOI: 10.1016/S2221-1691(12)60438-9
- [9] Chee-Yuen, G. and Aishah, A. L. (2011). Antioxidant *Parkia speciosa* Pod Powder as Potential Functional Flour in Food Application. Physicochemical Properties' Characterization. **Food Hydrocolloids**. Vol. 25, No. 5, pp. 1174-1180. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2010.11.004
- [10] Tian, F., Li, B., Ji, B. P., Zhang, G. Z., and Luo, Y. C. (2009). Identification and Structure-Activity Relationship of Gallotannins Separated from Chinese Gall. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 42, Issue 7, pp. 1289-1295. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.03.004
- [11] Septama, A. W. and Panichayupakaranant, P. (2017). Antibacterial Activity of Artocarpanone Isolated from Artocarpus Heterophyllus Heartwoods Against Diarrheal Pathogens and its Mechanism of Action on Membrane Permeability. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**. Vol. 7, pp. 064-068. DOI: 10.7324/JAPS.2017.71109
- [12] Manjeshwar, S. B., Arnadi, R. S., Raghavendra, H., Jerome, D., and Harshith, P. B. (2011). Phytochemistry, Nutritional and Pharmacological Properties of *Artocarpus heterophyllus* Lam (jackfruit): A Review. **Food Research International**. Vol. 44, No. 7, pp. 1800-1811. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.02.035
- [13] Zhang, J. Y., Wu, F. H., Qu, W., and Liang, J. Y. (2012). Two New Cassane Diterpenoids from the Seeds of *Caesalpinia sappan* Linn. **Chinese Journal of Natural Medicines**. Vol. 10, pp. 0218-0221
- [14] Hai Xuan, N., Mai Thanh, T. N., Thy Anh, N., Nhi Thi, N., Dao Anh, T. P., Phuoc Ho, T., Trong Huu, P. N., Phu Hoang, D., Nhan Trung, N., Jun-ya, U., and Suresh, A. (2013). Cleistanthane Diterpenes from the Seed of *Caesalpinia sappan* and their Antiausterity Activity Against PANC-1 Human Pancreatic Cancer Cell Line. **Fitoterapia**. Vol. 91, pp. 148-153. DOI: 10.1016/j.fitote.2013.08.018
- [15] Li-yang, T., Jian-ying, L., and Jian-ye, Z. (2013). Brazilein, a Compound Isolated from *Caesalpinia sappan* Linn., Induced Growth Inhibition in Breast Cancer Cells Via Involvement of GSK-3b/b-Catenin/cyclin D1 pathway. **Chemico-Biological Interactions**. Vol. 206, pp. 1-5

- [16] Ananth, S., Vivek, P., Saravana Kumar, G., and Murugakoothan, P. (2015). Performance of *Caesalpinia sappan* Heartwood Extract as Photo Sensitizer for Dye Sensitized Solar Cells. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. Vol. 137, pp. 345-350. DOI: 10.1016/j.saa.2014.08.083
- [17] Kan, C. W. (2014). A Study on Ultraviolet Protection of 100% Cotton Knitted Fabric: Effect of Fabric Parameters. **The Scientific World Journal**. Vol. 2014, pp. 1-10. DOI: 10.1155/2014/506049
- [18] Bamfield, P. and Hutchings, M. G. (2010). **Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry**. Royal Society of Chemistry.
- [19] Räisänen, R., Nousiainen, P., and Hynninen, P. H. (2002). Dermorubin and 5-Chlorodermorubin Natural Anthraquinone Carboxylic Acids as Dyes for Wool. *Textile Research Journal*. Vol. 72, Issue 11, pp. 973-976. DOI: 10.1177/004051750207201107
- [20] Jothi, D. (2008). Extraction of Natural Dyes from African Marigold Flower (*Tagetes erecta* L.) for Textile Coloration. **Autex Research Journal**. Vol. 8, No. 2, pp. 49-53
- [21] Moiz, A., Ahmed, M. A., Kausar, N., Ahmed, K., and Sohail, M. (2010). Study the Effect of Metal Ion on Wool Fabric Dyeing with Tea as Natural Dye. **Journal of Saudi Chemical Society**. Vol. 14, Issue 1, pp. 69-76. DOI: 10.1016/j.jscs.2009.12.011
- [22] Ruipérez, F., Mujika, J. I., Ugalde, J. M., Exley, C., and Lopez, X. (2012). Pro-Oxidant Activity of Aluminum: Promoting the Fenton Reaction by Reducing Fe (III) to Fe (II). **Journal of Inorganic Biochemistry**. Vol. 117, pp. 118-123
- [23] Ghaheh, F. S., Mortazavi, S. M., Alihosseini, F., Fassihi, A., Nateri, A. S., and Abedi, D. (2014). Assessment of Antibacterial Activity of Wool Fabrics Dyed with Natural Dyes. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 72, pp. 139-145. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.050
- [24] Rohman, A., Sudjadi, D., Ramadhani, D., and Nugroho, A. (2015). Analysis of Curcumin in *Curcuma longa* and *Curcuma xanthorrhiza* using FTIR Spectroscopy and Chemometrics. **Research Journal of Medicinal Plant**. Vol. 9, pp. 179-186. DOI: 10.3923/rjmp.2015.179.186
- [25] Safie, N. E., Ludin, N. A., Su'ait, M. S., Hamid, N. H., Sepeai, S., Ibrahim, M. A., and Teridi, M. A. M. (2015). Preliminary Study of Natural Pigments Photochemical Properties of *Curcuma longa* L. and *Lawsonia inermis* L. as TiO₂ Photoelectrode Sensitizer. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**. Vol. 19, Issue 6, pp. 1243-1249
- [26] Khan, M. R., Omoloso, A. D., and Kihara, M. (2003). Antibacterial activity of *Artocarpus heterophyllus*. **Fitoterapia**. Vol. 74, Issue 5, pp. 501-505. DOI: 10.1016/S0367-326X(03)00120-5

ผลของซิลิคอนต่อพฤติกรรมการสึกกร่อนแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

Effect of Silicon on Abrasive Wear Behavior of Heat-Treated 16% Cr - 2% Mo Cast Iron

พิสิฐชัย โคสะสุ^{1*} และสุศศากร อินธิเดช²

Pisizchai Kosasu^{1*} and Sudsakorn Inthidech²

Received: July 12, 2018; Revised: September 10, 2018; Accepted: September 12, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของธาตุซิลิคอน (Si) ต่อพฤติกรรมการสึกกร่อนแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo โดยน้ำหนัก (แทนด้วย %) ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ได้เตรียมชิ้นงานที่เติม Si ในช่วง 0.5 - 2.0 % อบอ่อนชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 900 °C ชิ้นงานอบอ่อนถูกชุบแข็งจากอุณหภูมิ 1,050 °C ด้วยน้ำมันและอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 °C ตามลำดับ ชิ้นงานถูกทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีด้วยเครื่อง Suga Abrasion Test พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับระยะทางการสึกกร่อนเป็นแบบเส้นตรงในทุกชิ้นงาน อัตราการสึกกร่อน (Rw, mg/m) ลดลงเมื่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่า Rw ในสภาพชุบแข็งต่ำกว่าในสภาพอบคืนตัวในทุกส่วนผสม ค่า Rw ลดลงช้า ๆ เมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้นจนถึงจุดต่ำสุดที่ 1.5 % Si จากนั้นค่า Rw เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้น ค่า Rw ต่ำสุดในสภาพอบคืนตัวได้รับในชิ้นงานอบคืนตัวที่ 500 °C ส่วนค่า Rw สูงสุดได้รับในชิ้นงานอบคืนตัวที่ 550 °C ความต้านทานการสึกกร่อนดีที่สุดได้รับในชิ้นงาน 1.5 % Si

คำสำคัญ : เหล็กหล่อโครเมียมสูง; กรรมวิธีทางความร้อน; ความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสี; ผลของซิลิคอน

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม

² Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham

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

Abstract

In this research, the effect of silicon (Si) on abrasive wear behavior of heat-treated 16 wt% Cr - 2 wt% Mo (as shown by %) cast iron was investigated. The specimens with 0.5 - 2.0 % Si were prepared. The specimens were annealed at 900 °C and then, hardened from 1,050 °C by oil quenching. The hardened specimens were tempered at 450, 500 and 550 °C, respectively. The abrasive wear resistance of specimens was evaluated using Suga abrasion tester. It was found that the linear relation between wear loss and wear distance was obtained in all specimens. The wear rate (Rw, mg/m) of specimen lowered as the hardness rose. The as-hardened specimens showed lower Rw value than tempered specimen did. In each heat treatment condition, the Rw value decreased progressively in the 1.5 % Si specimen and then increased gradually as the Si content increased. In the tempered state, the lowest Rw was obtained in the specimen tempered at 500 °C and the highest value of Rw was obtained in the specimen tempered at 550 °C. The specimen with 1.5 % Si was found to provide the lowest Rw or largest wear resistance.

Keywords: High Chromium Cast Iron; Heat Treatment; Abrasive Wear Resistance; Si Effect

บทนำ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM A532 [1] ใช้ทำเป็นวัสดุทนการสึกหรอแบบขัดสีเนื่องจากมีความต้านทานการขัดสีสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อขาวทั่วไปและความแกร่งในระดับที่สามารถใช้งานได้ [1] - [3] โดยเฉพาะเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมโครเมียม (Cr) ในช่วง 15 - 17 % นิยมใช้ผลิตเป็นลูกรีดในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า อุปกรณ์การบดในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และปูนซีเมนต์ [1] เหล็กหล่อชนิดนี้นอกจากมีการเติมธาตุ Cr แล้วยังมีการเติมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) หรือทองแดง (Cu) ในปริมาณไม่เกิน 3 % เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งในขณะทำการกรรมวิธีทางความร้อน [1], [4] และเติมซิลิคอน (Si) ประมาณ 0.5 % เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลเข้าแบบของน้ำโลหะ [1] - [2], [5]

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อจะประกอบด้วย คาร์ไบด์ยูเทคติกประเภท M_7C_3 ที่มีความแข็งประมาณ 1,500 HV [1] เนื้อพื้นสามารถเป็นได้ทั้งเพอไลต์ ออสเทนไนต์ เบนไนต์ หรือมาร์เทนไซต์ ขึ้นกับปริมาณธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อ [1] - [6] เนื้อพื้นที่เป็นเพอไลต์จะมีความต้านทานการสึกหรอดำมาก [1] ส่วนเนื้อพื้นที่เป็นออสเทนไนต์จะมีความแข็งต่ำและส่งผลให้เหล็กหล่อมีความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีได้น้อย นอกจากนี้ออสเทนไนต์เหลืค้ำยังส่งเสริมการสึกหรอแบบหลุดล่อน (Spalling Wear) [1] เนื้อพื้นที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านการสึกหรอแบบขัดสีควรประกอบด้วย มาร์เทนไซต์เป็นส่วนใหญ่และมีออสเทนไนต์เล็กน้อย [1], [7] - [10] ดังนั้นการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจึงจำเป็นสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

กรรมวิธีทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงมีสองวิธีคือ กรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไป ได้แก่ การอบอ่อน การชุบแข็ง และอบคืนตัว ตามลำดับ [4], [8] - [9] ซึ่งเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อน และกรรมวิธีทางความร้อนแบบได้อุณหภูมิวิกฤติ (Sub-Critical Heat Treatment) [3], [7], [10] ซึ่งเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนและมีขนาดไม่ใหญ่มาก โดยวิธีแรกจะให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวิธีที่สอง ดังนั้นการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปจึงเป็นที่นิยม

กรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปของเหล็กหล่อโครเมียมสูงประกอบด้วยสามขั้นตอน ได้แก่ การอบอ่อน การชุบแข็งและอบคืนตัว การอบอ่อนมีจุดประสงค์เพื่อลดการเกิดปัญหา Micro-Segregation ของธาตุผสมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหล่อและในขณะเดียวกันมีความจำเป็นสำหรับทางอุตสาหกรรมสำหรับการกัดแต่งผิวชิ้นงานที่สำคัญคือ เป็นการปรับสภาพโครงสร้างเนื้อพื้นของเหล็กหล่อให้เป็นเฟอไลต์ทั้งหมดเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการชุบแข็งต่อไป ภายหลังการอบอ่อนจะต้องชุบแข็งชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอ โดยใช้อุณหภูมิในช่วง $1,000 - 1,050^{\circ}\text{C}$ [1], [4] ในระหว่างการอบที่อุณหภูมิชุบแข็งจะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในออสเทนไนต์ [1], [4], [6], [8] - [9] ทำให้ออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพและเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างการเย็นตัว ชิ้นงานในสภาพชุบแข็งจะมีความแข็งแรงสูงและเปราะมาก นอกจากนี้ยังมีความเค้นตกค้างสูงจากการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว และในขณะเดียวกันยังคงมีออสเทนไนต์เหลือค้างอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ออสเทนไนต์เหลือค้างจะส่งผลเสียต่อชิ้นงานในระหว่างการใช้งานดังระบุไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงต้องทำการอบคืนตัวชิ้นงานที่อุณหภูมิ $400 - 600^{\circ}\text{C}$ [1], [4], [6], [8] - [9] เพื่อลดปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างลง โดยความแข็งแรงไม่ลดลงจากสภาพชุบแข็งมากนัก นอกจากนี้ยังช่วยลดความเค้นจากการชุบแข็งอีกด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปสำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมธาตุผสมอื่นนอกเหนือจาก Cr จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ไม่เกิน 800 HV30 [1], [4] และส่วนการเติม 3% Mo หรือ 3% V จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไม่เกิน 850 HV30 โดยประมาณ [4] เนื่องจากยังคงมีออสเทนไนต์เหลือค้างเหลืออยู่แม้ว่าจะผ่านการอบคืนตัว ในการใช้งานอุปกรณ์การบิดในอุตสาหกรรมซีเมนต์ต้องการความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องจักรเกินกว่า 850 HV30 [1] ดังนั้นการหาแนวทางในการเพิ่มความแข็งแรงจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยไม่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตมากนัก การเติมธาตุ Si จึงน่าสนใจเนื่องจากส่งเสริมการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ [2] - [3], [5] - [7] และมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับธาตุ Mo หรือ V [1] จากงานวิจัยของ Laird, G., and Powell, G. L. [2] ได้รายงานไว้ว่า Si ลดการละลายของคาร์บอนในออสเทนไนต์และส่งเสริมการฟอร์มคาร์ไบด์ทั้งในขั้นตอนการแข็งตัวและในระหว่างการทำการกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองจะลดธาตุผสมในออสเทนไนต์ ทำให้ออสเทนไนต์ขาดเสถียรภาพและเปลี่ยนมาเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้น Pisizchai, K. et al. [7] ได้ศึกษาผลของ Si ต่อความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม 16% Cr - 2% Mo ด้วยการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบได้อุณหภูมิวิกฤติ พบว่าการเติม Si สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเมื่อเทียบกับในสภาพหล่อได้ แต่ความแข็งแรงสูงสุดที่ได้รับไม่เกิน 700 HV30 ดังนั้นการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปควบคู่กับการเติม Si จึงเป็นแนวทางที่อาจจะเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้ อย่างไรก็ตาม Pisizchai, K. et al. [7] ได้รายงานว่าการเติม Si มากกว่า 2 % จะทำให้เกิดเฟอไลต์ได้ง่ายซึ่งทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง

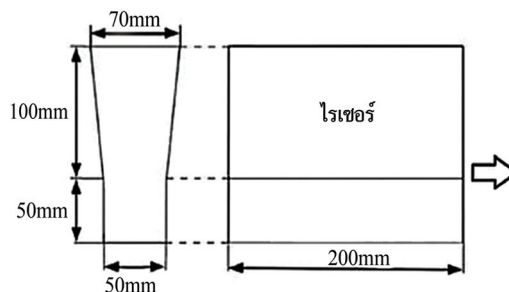
การสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท [1] คือการสึกหรอแบบสองวัตถุ (Two-Body Type) เช่น การสึกหรอของลูกรีดในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า และการสึกหรอแบบสามวัตถุ (Three-Body Type) ซึ่งพบในอุปกรณ์หม้อบดซีเมนต์หรือแร่ การสึกหรอที่เกิดขึ้นในทางอุตสาหกรรมมีกลไกซับซ้อน ซึ่งพฤติกรรมการสึกหรอไม่ได้ขึ้นกับความแข็งของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญด้วย เช่น ชนิดวัสดุขัดสี สิ่งแวดล้อม ความเค้นที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เป็นต้น [1], [7] - [10] ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการทำกรรมวิธีทางความร้อนและการเติมธาตุผสมจึงมีความจำเป็นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแข็งตัว [1] - [2], [5] ผลของธาตุผสมต่อกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไป [4], [8] - [9] และกรรมวิธีทางความร้อนแบบไดอะนอเทมิก [3], [7], [10] ในเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้ศึกษาไปแล้ว แต่การศึกษาผลของ Si ต่อความต้านทานการสึกหรอชนิดสองวัตถุของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปยังไม่มีรายงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของ Si ต่อความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อ 3% C - 16% Cr - 2% Mo ในสภาพที่ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไป เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่ใช้งานหลากหลายในภาคอุตสาหกรรม [1]

วิธีดำเนินการ

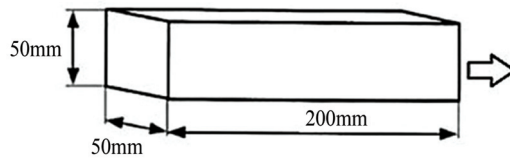
1. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมโดยการหลอมวัสดุดิบในเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,580 °C เหนือโลหะที่มีส่วนผสมตามที่กำหนดที่อุณหภูมิ 1,500 - 1,520 °C ลงในแบบหล่อทรายที่มีช่องว่างภายในแบบหล่อดังรูปที่ 1 (ก) คลุมผิวหน้าไรเซอร์ด้วยผงคายความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิไรเซอร์ไม่ให้เย็นตัวเร็ว ไรเซอร์ของชิ้นงานหล่อถูกตัดออกด้วยเครื่อง Wire-Cut EDM ให้เหลือเฉพาะส่วนที่ใช้ทำชิ้นงานขนาด 50 x 50 x 200 มม. ดังรูปที่ 1 (ข) ส่วนปลายของแท่งชิ้นงานถูกตัดออกด้านละ 10 มม. เนื่องจากบริเวณส่วนนี้มีการเย็นตัวเร็วและมีโครงสร้างเกรนละเอียดแตกต่างจากส่วนอื่นของชิ้นงานหล่อ ซึ่งส่งผลต่อการทดลองแท่งชิ้นงานถูกตัดให้มีความหนาขึ้นละ 7 มม. ตามรูปที่ 1 (ค) เพื่อใช้เป็นชิ้นงานสำหรับการทดลองโดยส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A532 [1], [11]

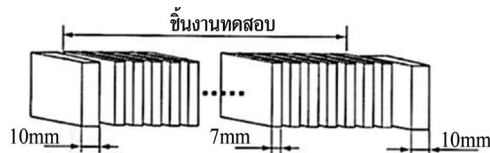


(ก) รูปร่างของชิ้นงานหล่อ

รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบในสภาพหล่อ



(ข) ส่วนที่ใช้ทำชิ้นงานทดสอบ



(ค) ชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบในสภาพหล่อ (ต่อ)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบ	ธาตุผสม (wt%)						
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
ชิ้นงานที่ 1	2.95	0.56	0.56	0.01	0.02	16.06	2.00
ชิ้นงานที่ 2	2.92	0.94	0.56	0.01	0.02	15.93	2.03
ชิ้นงานที่ 3	2.95	1.46	0.57	0.01	0.01	15.94	1.98
ชิ้นงานที่ 4	2.94	1.94	0.54	0.01	0.01	15.93	1.96

2. กรรมวิธีทางความร้อน

ขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อนจะอ้างอิงตามมาตรฐานการผลิตเหล็กหล่อกลุ่ม ASTM A532 [1], [11] โดยมีขั้นตอนคือ เริ่มต้นจากอบอ่อนชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเย็นตัวภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนจะถูกชุบแข็งโดยใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,050 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และเย็นตัวในน้ำมัน ชิ้นงานชุบแข็งถูกอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเย็นตัวในอากาศ

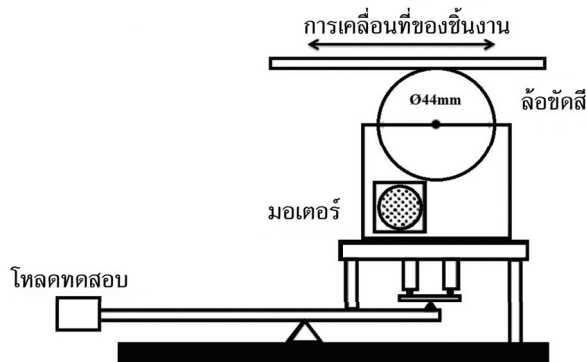
3. ความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

ผิวของชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E3 [11] โดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายขนาดเบอร์ 80 - 1,000 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E92 [11] ใช้น้ำหนักกดทดสอบ 30 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบความแข็งรวมของชิ้นงานหรือความแข็งแบบมาโคร และน้ำหนักกดทดสอบ 0.1 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบความแข็งของเนื้อพื้นหรือความแข็งแบบไมโคร ทดสอบอย่างละ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน และหาค่าเฉลี่ย ทดสอบโครงสร้างจุลภาคโดยกัดผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยน้ำยา Villella ที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรคลอริก 5 มิลลิลิตร กรดพิคริก 1 กรัม และแอลกอฮอล์ 95 มิลลิลิตร [1] ตรวจสอบโครงสร้าง

จุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อยืนยันผลการทดลอง

4. การสึกหรอแบบขัดสี

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดถูกทดสอบการสึกหรอชนิดสองวัตถุโดยใช้เครื่องทดสอบ Suga Abrasion Test ดังแสดงในภาพวาดรูปที่ 2 ตามมาตรฐาน ASTM D6037 [11] โดยใช้น้ำหนักทดสอบ 1 กิโลกรัม ล้อขัดสีมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร กว้าง 12 มิลลิเมตร ซึ่งถูกติดรอบด้วยแผ่นกระดาษทราย (SiC) ขนาดเม็ดผงขัดเบอร์ 180 ล้อขัดสีหมุนด้วยความเร็ว 0.345 มิลลิเมตร/วินาที เพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับผงขัดสีใหม่ตลอดการทดสอบ ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปและกลับในระยะ 30 มิลลิเมตร/สโตรก โดยมีขนาดพื้นที่ขัดสีเท่ากับ 12×30 ตารางมิลลิเมตร ทดสอบ 400 สโตรกต่อรอบการทดสอบและทดสอบซ้ำที่รอยขัดสีเดิมจำนวน 8 รอบต่อหนึ่งชิ้นงาน รวมเป็นระยะทางการขัดสีทั้งหมด 192 เมตร ในแต่ละรอบการทดสอบจะล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิก ชั่งน้ำหนักที่สูญเสียด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง (0.0001 กรัม)



รูปที่ 2 รูปวาดเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบสองวัตถุ (Suga Abrasion Test)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. โครงสร้างจุลภาคในสภาพที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

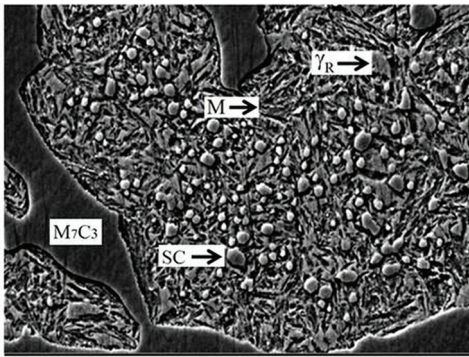
ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคในสภาพชุบแข็งและอบคืนตัวของชิ้นงาน 0.5 % Si แสดงดังรูปที่ 3 เนื้อพื้นของชิ้นงานชิ้นในสภาพชุบแข็งประกอบด้วย มาร์เทนไซต์ คาร์ไบด์ ลำดับที่สองและอสเทไนต์ เหลือค้างดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในระหว่างการอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้ออสเทไนต์ขาดเสถียรภาพและเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ในระหว่างเย็นตัว Laird, G. and Powell, G. L. [2] ได้รายงานไว้ว่า Si จะส่งเสริมการตกตะกอนของคาร์ไบด์ประเภทที่สองประเภท $M_{23}C_6$ ในระหว่างขั้นตอนการชุบแข็ง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเป็นไปได้ว่าการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในสภาพชุบแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Si สูงขึ้น การตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองนี้จะทำให้ออสเทไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้นในขณะเย็นตัว [1] - [4], [6], [8] - [9] เมื่อชิ้นงานชุบแข็งถูกอบคืนตัวที่ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างจากสภาพชุบแข็งมากนัก

ดังรูปที่ 3 (ข) เป็นไปได้ว่าอุณหภูมิในการอบคืนตัวต่ำเกินไป ซึ่งไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองในออสเทนไนต์เหล็กล้างในขณะอบคืนตัวได้ มาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการชุบแข็งจะถูกอบคืนตัวและมีความแข็งแรงลดลง [1] เมื่อทำการอบคืนตัวที่ 500 °C ดังแสดงในรูปที่ 3 (ค) พบว่าเนื้อพื้นมีออสเทนไนต์เหล็กล้างลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาพชุบแข็ง และในขณะเดียวกันจะพบคาร์ไบด์ลำดับที่สองและมาร์เทนไซต์มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าออสเทนไนต์เปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้ดีที่อุณหภูมิการอบคืนตัวนี้ เนื่องจากมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ลำดับที่สองมากขึ้นดังที่พบในงานวิจัยอ้างอิงอื่น ๆ [4], [8] - [9] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 550 °C พบว่าเนื้อพื้นส่วนใหญ่เป็นคาร์ไบด์ลำดับที่สองและมาร์เทนไซต์ดังรูปที่ 3 (ง) Sudsakorn, I. et al. [4] ได้รายงานว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 550 °C ขึ้นไป จะทำให้เนื้อพื้นบางส่วนกลายเป็นเพอไลต์และมาร์เทนไซต์ถูกอบคืนตัวเกิน (Over-Tempering) โดยออสเทนไนต์เหล็กล้างน้อยมากหรือไม่มีเลย ดังนั้นเป็นไปได้ว่าเนื้อพื้นในรูปที่ 3 (ง) จะมีเพอไลต์และมาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัวเกินด้วย

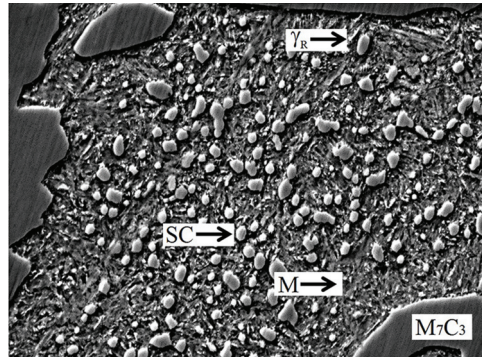
2. ความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ

ความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนขึ้นกับทั้งปริมาณของคาร์ไบด์ยูเทคติกและชนิดของเฟสเนื้อพื้น เนื่องจากคาร์ไบด์ยูเทคติกประเภท M_7C_3 มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงจึงเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระหว่างทำการกรรมวิธีทางความร้อน [1] ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงคือเฟสของเนื้อพื้นคือ คาร์ไบด์ลำดับที่สอง ออสเทนไนต์เหล็กล้าง มาร์เทนไซต์ หรือเพอไลต์

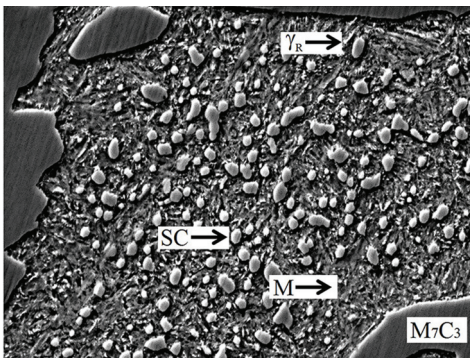
ผลของ Si ต่อความแข็งแรงของชิ้นงานในสภาพที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 4 ความแข็งแรงแบบมาโครและแบบไมโครของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ Si และสภาวะของกรรมวิธีทางความร้อน ความแข็งแรงแบบมาโครจะสูงกว่าความแข็งแรงแบบไมโครในทุกชิ้นงาน เนื่องจากความแข็งแรงแบบไมโครเป็นความแข็งแรงเฉพาะเนื้อพื้น ส่วนความแข็งแรงแบบมาโครเป็นความแข็งแรงรวมระหว่างเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ยูเทคติกซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อพื้น การเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงแบบมาโครและแบบไมโครมีแนวโน้มคล้ายกันในทุกชิ้นงาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงแบบมาโครขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของเนื้อพื้นหรือความแข็งแรงแบบไมโคร ทั้งนี้ความแข็งแรงแบบไมโครจะขึ้นกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ในขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อน ความแข็งแรงในสภาพชุบแข็งสูงกว่าในสภาพอบคืนตัวในทุกส่วนผสมของ Si ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยอ้างอิงที่เดิมธาตุผสมอื่น [4], [8] - [9] ในสภาพอบคืนตัวพบว่าความแข็งแรงทั้งแบบมาโครและแบบไมโครสูงสุดได้รับที่อุณหภูมิ 500 °C รองลงมาคือผ่านการอบคืนตัวที่ 550 °C และ 450 °C ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่แสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 3 โดยความแข็งแรงสูงที่สุดในการทดลองนี้ได้รับในชิ้นงานที่เติม 1.5% Si คือประมาณ 900 HV30



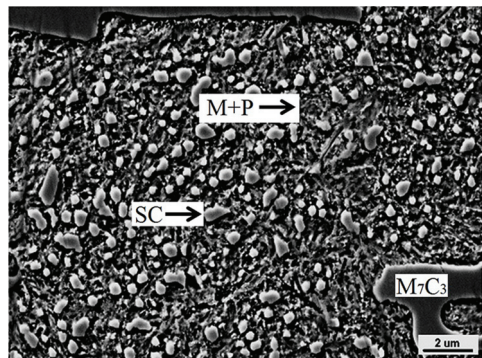
(ก) สภาพชุบแข็ง



(ข) อบคืนตัวที่ 450 °C

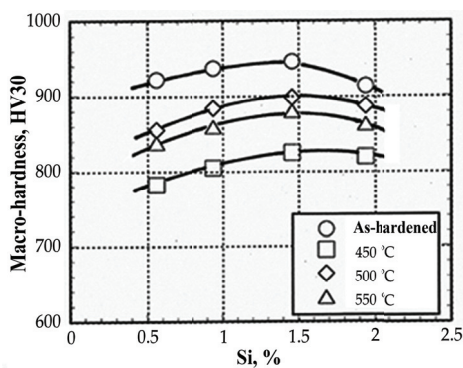


(ค) อบคืนตัวที่ 500 °C

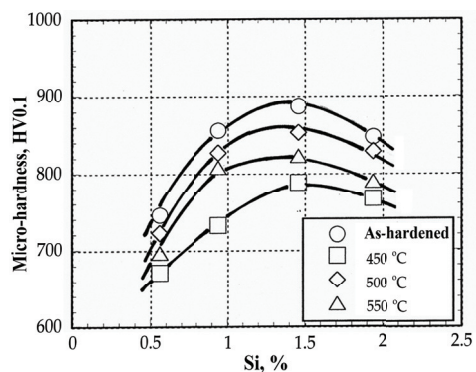


(ง) อบคืนตัวที่ 550 °C

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคในสภาพชุบแข็งและอบคืนตัวของชิ้นงานที่เติม 0.5% Si ด้วยกล้อง SEM (γR = ออสเทนไนต์เหลือค้าง M = มาร์เทนไซต์ P = เพอไลต์ SC = คาร์ไบด์ลำดับที่สอง)



(ก) ความแข็งแบบมาโคร



(ข) ความแข็งแบบไมโคร

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและปริมาณ Si ของชิ้นงานทดสอบ

จากผลการทดลองนี้สามารถกล่าวได้ว่าการเติม 1.5% Si สามารถเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านการอบคืนตัวได้ถึง 900 HV30 ซึ่งความแข็งนี้สูงกว่าการเติม

Mo หรือ V เพียงอย่างเดียวที่ศึกษาโดย Sudsakorn, I. et al. [4] ที่ได้รายงานว่าการเติม 3% Mo หรือ 3% V จะสามารถเพิ่มความแข็งให้เหล็กหล่อ 16% Cr สูงสุดได้ประมาณ 850 HV30 นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งที่ได้รับในงานวิจัยนี้สูงกว่าความแข็งที่ได้รับจากกรรมวิธีทางความร้อนแบบได้อุณหภูมิวิกฤติในเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมเดียวกัน [7] ประมาณ 200 HV30

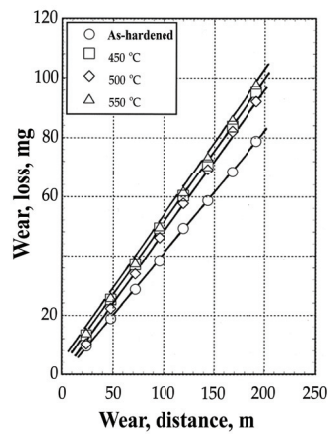
3. พฤติกรรมการสึกกร่อนแบบขัดสี

ผลการทดสอบการสึกกร่อนแบบขัดสีของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญเสียน้ำหนัก (Wear Loss) ในการทดสอบการสึกกร่อนแต่ละรอบและระยะทางในการขัดสี (Wear Distance) พบว่าน้ำหนักสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อระยะทางในการทดสอบเพิ่มขึ้นในทุกชิ้นงาน ซึ่งแนวโน้มของกราฟนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิง [7] - [10] ในแต่ละส่วนผสมของ Si พบว่าชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือชิ้นงานอบคืนตัวที่ 550 °C ส่วนชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือชิ้นงานในสภาพชุบแข็ง เมื่อเปรียบเทียบภายใต้สภาวะของกรรมวิธีทางความร้อนเดียวกันพบว่าน้ำหนักสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดเกิดขึ้นในชิ้นงานที่เติม 1.5% Si จากกราฟความสัมพันธ์พบว่า เป็นเส้นตรงในทุกชิ้นงาน ดังนั้นอัตราการสึกกร่อน ซึ่งหาได้จากความชันกราฟถูกใช้ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกกร่อน โดยค่า R_w ของทุกชิ้นงานได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่า R_w ในแต่ละชิ้นงานจะแตกต่างกันตามปริมาณ Si และสภาวะของกรรมวิธีทางความร้อน โดยมีค่าในช่วง 0.4130 - 0.5081 mg/m ในชิ้นงาน 0.5% Si, 0.4127 - 0.5058 mg/m ในชิ้นงาน 1.0% Si, 0.3979 - 0.4867 mg/m ในชิ้นงาน 1.5% Si และ 0.4122 - 0.4888 mg/m ในชิ้นงาน 2.0% Si ตามลำดับ

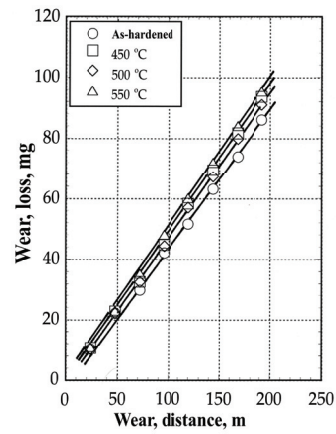
ตารางที่ 2 ค่า R_w ของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบ	R_w , mg/m			
	สภาพชุบแข็ง	อบคืนตัว 450 °C	อบคืนตัว 500 °C	อบคืนตัว 550 °C
0.5% Si	0.4130	0.4858	0.4753	0.5081
1.0% Si	0.4127	0.4801	0.4688	0.5058
1.5% Si	0.3979	0.4576	0.4522	0.4867
2.0% Si	0.4122	0.4820	0.4681	0.4888

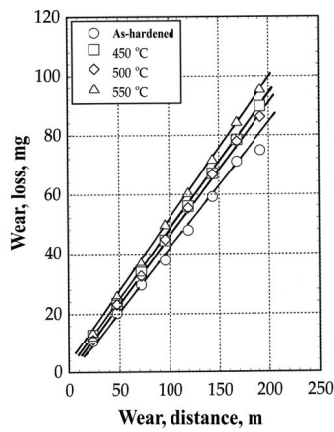
ผลของความแข็งแบบมาโครต่อค่า R_w ของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าค่า R_w มีแนวโน้มลดลงเมื่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่มีความแข็งที่สูงเกินกว่า 900 HV30 คือชิ้นงานในสภาพชุบแข็งซึ่งเนื้อพื้นมีความแข็งสูงสุด ส่วนชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำกว่า 900 HV30 คือชิ้นงานในสภาพอบคืนตัวซึ่งความแข็งของเนื้อพื้นเปลี่ยนแปลงตามสภาวะของการอบคืนตัวดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การที่เนื้อพื้นของเหล็กหล่อมีความแข็งสูงจะช่วยยึดคาร์ไบด์ยูเทคติกให้หลุดยากขึ้นเมื่อได้รับการขัดสี ดังนั้นจึงทำให้ค่า R_w ลดลง จากข้อมูลนี้สามารถกล่าวได้ว่าความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอ้างอิง [7] - [10]



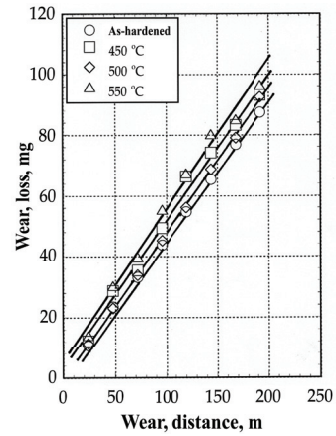
(ก) 0.5% Si



(ข) 1.0% Si

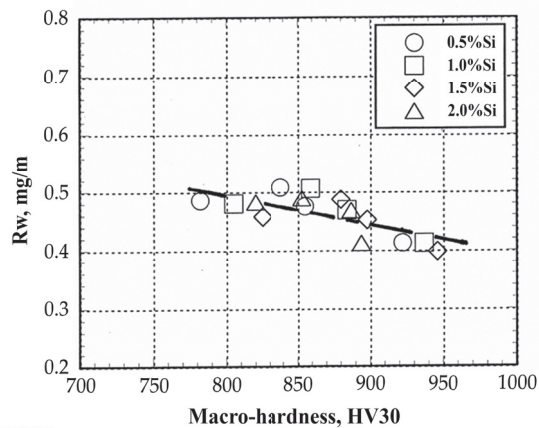


(ค) 1.5% Si

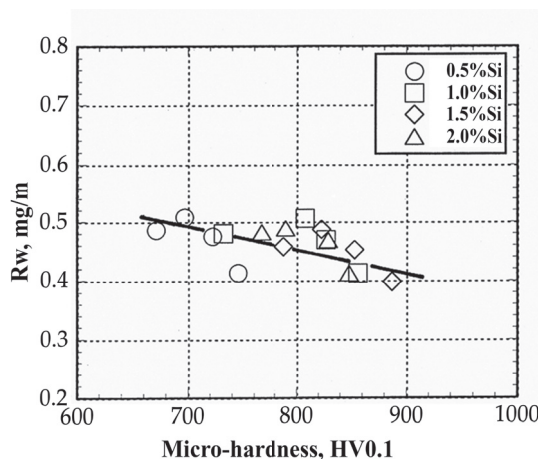


(ง) 2.0% Si

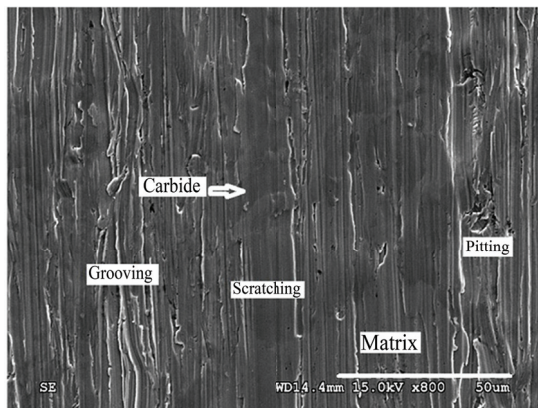
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญเสียน้ำหนักและระยะทางในการขัดสีของชิ้นงานทดสอบ


 รูปที่ 6 ผลของความแข็งแบบมาโครต่อค่า R_w ของชิ้นงานทดสอบ

เพื่อยืนยันว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีผลต่อพฤติกรรมการสึกกร่อนจึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง R_w และความแข็งแบบไมโครดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่า R_w ลดลงเมื่อความแข็งแบบไมโครเพิ่มขึ้น โดยอัตราการลดลงของ R_w ใกล้เคียงกับรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าความแข็งของเนื้อพื้นส่งผลต่อความต้านทานการสึกกร่อนเช่นเดียวกับความแข็งแบบมาโคร เมื่อพิจารณาโครงสร้างผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกกร่อนแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าพื้นผิวแสดงรอยกัดลึกเป็นแนวอย่างชัดเจน พงชดสี SiC มีความแข็งประมาณ 1,800 HV [1] ซึ่งสูงกว่าคาร์ไบด์ M_7C_3 ที่มีความแข็งประมาณ 1,500 HV [1] - [2] ทำให้พงชดสีสามารถตัดผ่านทั้งคาร์ไบด์ยูเทคติกและเนื้อพื้น โดยรอยกัดลึกจะหายาบและมีขนาดใหญ่ในบริเวณเนื้อพื้น แต่จะเรียบในบริเวณที่เป็นคาร์ไบด์ยูเทคติก หรืออีกความหมายหนึ่งคือ บริเวณเนื้อพื้นมีการสึกกร่อนมากกว่าบริเวณของคาร์ไบด์ยูเทคติกเนื่องจากคาร์ไบด์มีความแข็งสูงกว่าเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังพบการสึกกร่อนแบบหลุม (Pitting Wear) ในโครงสร้างยูเทคติกซึ่งเกิดจากการหลุดของคาร์ไบด์ที่แตกหักจากการที่เนื้อพื้นได้สึกกร่อนออกไปก่อน [8] - [9] ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ถ้าเหล็กหล่อมีเนื้อพื้นที่มีความแข็งสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสึกกร่อนน้อยลงจากการช่วยยึดคาร์ไบด์ยูเทคติกไม่ให้หลุด จึงทำให้ความต้านทานการสึกกร่อนโดยรวมดีขึ้น

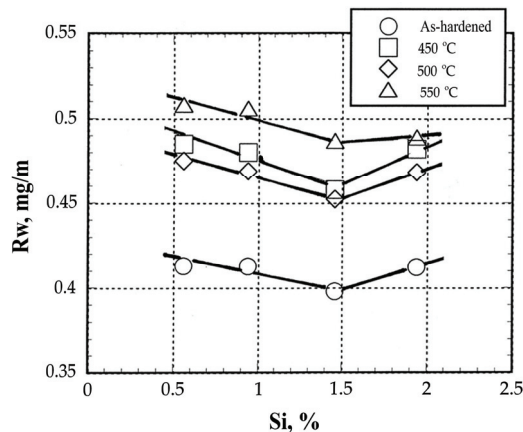


รูปที่ 7 ผลของความแข็งแบบไมโครต่อค่า R_w ของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 8 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกกร่อนแบบกัดลึกของชิ้นงานที่เติม 1.5% Si อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C

ผลของปริมาณ Si ต่อ R_w แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าค่า R_w ลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้นจนถึงจุดต่ำสุดที่ 1.5% Si จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งแนวโน้มนี้จะตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงความแข็งในรูปที่ 4 โดยพบว่าค่า R_w ในสภาพชุบแข็งจะต่ำกว่าในสภาพอบคืนตัวในทุกปริมาณ Si ในช่วงแรกพบว่าค่า R_w ลดลงหรือขึ้นงานมีความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ Si เกิดจากชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากผลของ Si ในการลดเสถียรภาพของออสเทนไนต์เหลือค้าง โดยการส่งเสริมการตกตะกอนคาร์ไบด์ลำดับที่สองในระหว่างการชุบแข็งและอบคืนตัวทำให้ออสเทนไนต์สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้นดังเหตุผลที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มปริมาณ Si จะเพิ่มปริมาณคาร์ไบด์ยูเทคติก [1] - [3], [5], [7] นอกจากนี้การเกิด Work-Hardening ของออสเทนไนต์เหลือค้างก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า R_w ลดลง [1], [7] - [10] อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้นเป็น 2% กลับพบว่าค่า R_w เพิ่มขึ้นหรือความต้านทานการสึกหรอลดลง โดยคาดว่าเกิดจากการที่เติม Si สูงจะทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง เนื่องจาก Si จะส่งเสริมให้เกิดเพอไลต์ในเนื้อพื้น [1], [7] ซึ่งเพอไลต์ทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อลดลงดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 9 ผลของปริมาณ Si ต่อ R_w ของชิ้นงานทดสอบ

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ชัดว่าค่า R_w ของชิ้นงานชุบแข็งสูงกว่าในสภาพอบคืนตัวในทุกส่วนผสมของ Si เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อพื้นมีความแตกต่างกัน โดยในสภาพชุบแข็งมีเนื้อพื้นที่ประกอบด้วย มาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูงจากการมีคาร์บอนสูง คาร์ไบด์ลำดับที่สอง และออสเทนไนต์เหลือค้างบางส่วน ดังรูปที่ 3 ทำให้มีความแข็งสูงดังผลการทดลองในรูปที่ 4 ส่วนในสภาพอบคืนตัวพบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นที่ประกอบด้วย มาร์เทนไซต์จากการชุบแข็งที่ถูกอบคืนตัว คาร์ไบด์ลำดับที่สอง มาร์เทนไซต์จากการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์เหลือค้างในระหว่างอบคืนตัว และอาจมีออสเทนไนต์เหลือค้างในบางชิ้นงาน ดังนั้นความแข็งของเนื้อพื้นในสภาพอบคืนตัวจึงต่ำกว่าสภาพชุบแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างเนื้อพื้นในสภาพอบคืนตัวดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3 พบว่าเนื้อพื้นของชิ้นงานอบคืนตัวที่ 450 °C จะประกอบด้วย มาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัว ออสเทนไนต์เหลือค้างในปริมาณใกล้เคียงกับสภาพชุบแข็งและคาร์ไบด์ลำดับที่สอง ส่วนชิ้นงานอบคืนตัวที่ 500 °C ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์ลำดับที่สองจำนวนมาก โดยมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างน้อยลงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงาน

อบคืนตัวที่ 450 °C ส่วนชิ้นงานอบคืนตัวที่ 550 °C พบว่าเนื้อพื้นประกอบด้วย คาร์ไบด์ลำดับที่สองขนาดใหญ่ มาร์เทนไซต์ที่ถูกอบคืนตัวเกิน และอาจมีเฟอไลต์ร่วมด้วย ดังนั้นความต้านทานการสึกกร่อนของชิ้นงานอบคืนตัวที่ 500 °C จึงดีที่สุด ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pisizchai, K. et al., Sudsakorn, I. et al. [7] - [8] ที่ได้รายงานว่าความต้านทานการสึกกร่อนดีที่สุดได้รับในชิ้นงานที่เนื้อพื้นที่มีปริมาณคาร์ไบด์ลำดับที่สองและมาร์เทนไซต์จำนวนมากโดยมีออสเทนไนต์เหลือค้างในปริมาณเล็กน้อย แม้ว่าชิ้นงานอบคืนตัวที่ 450 °C จะมีความแข็งน้อยกว่าชิ้นงานอบคืนตัวที่ 550 °C ดังแสดงในรูปที่ 4 แต่มีความต้านทานการสึกกร่อนดีกว่า ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่มีออสเทนไนต์เหลือค้างมากทำให้เกิด Work-Hardening ได้สูงในระหว่างการขัดสี ดังนั้นจากข้อมูลนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าความต้านทานการสึกกร่อนไม่ได้ขึ้นกับความแข็งเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับชนิดของเฟสในเนื้อพื้นด้วย

จากข้อมูลในรูปที่ 9 พบว่าชิ้นงานในสภาพชุบแข็งมีความต้านทานการสึกกร่อนดีที่สุด ซึ่งน่าจะสมารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงานเพื่อใช้งานจริงได้ แต่ปัญหาที่สำคัญคือแม้ว่าในสภาพชุบแข็งจะมีความต้านทานการสึกกร่อนดีที่สุด แต่เนื้อพื้นประกอบด้วยออสเทนไนต์เหลือค้างเป็นจำนวนมากจะส่งผลเสียในขณะใช้งาน เนื่องจากออสเทนไนต์เหลือค้างนี้จะส่งเสริมการสึกกร่อนแบบหลุดล่อน [1] ดังนั้นการใช้งานในสภาพอบคืนตัวจึงมีความเหมาะสมมากกว่าสภาพชุบแข็ง จากผลการทดลองทั้งหมดจึงสามารถสรุปได้ว่าการเติม Si สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนแบบขัดสีให้กับเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปได้ โดยความต้านทานต่อการสึกกร่อนดีที่สุดได้รับในชิ้นงานที่เติม 1.5% Si

สรุปผลการวิจัย

ได้ศึกษาผลของ Si ต่อพฤติกรรมการสึกกร่อนแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไป ได้เตรียมชิ้นงานทดสอบมีปริมาณ Si ในช่วง 0.5 - 2.0 % ชิ้นงานทดสอบได้ผ่านการทำการกรรมวิธีทางความร้อน ได้แก่ การอบอ่อนที่ 900 °C การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,050 °C ด้วยน้ำมัน และการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 °C ตามลำดับ ความต้านทานการสึกกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนถูกประเมินด้วยเครื่อง Suga Abrasion Test ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและระยะทางการขัดสีเป็นแบบเส้นตรง ชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสีย หลังการทดสอบการสึกกร่อนน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานในสภาพชุบแข็ง ส่วนชิ้นงานที่มีน้ำหนักสูญเสียมากที่สุดคือ ชิ้นงานอบคืนตัวที่ 550 °C โดยน้ำหนักสูญเสียที่น้อยที่สุดได้รับในชิ้นงานที่เติม 1.5% Si
2. อัตราการสึกกร่อน R_w , mg/m ทาได้จากความชันกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียและระยะทางการขัดสี โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความแข็งของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น
3. ค่า R_w ในแต่ละสภาวะของกรรมวิธีทางความร้อนลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าต่ำสุดที่ 1.5% Si จากนั้น R_w จะสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 %
4. ชิ้นงานในสภาพชุบแข็งมีค่า R_w ต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัว โดยค่า R_w ต่ำสุด (หรือมีความต้านทานการสึกกร่อนดีที่สุด) ในสภาพชุบแข็งได้รับในชิ้นงาน 1.5% Si ส่วนค่า R_w สูงสุด (หรือมีความต้านทานการสึกกร่อนต่ำที่สุด) ได้รับในชิ้นงาน 0.5% Si

5. ในสภาพอบคืนตัวพบว่าค่า R_w เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในการอบคืนตัวและปริมาณ Si โดยค่า R_w ต่ำสุดได้รับในชิ้นงาน 1.5% Si ผ่านการอบคืนตัวที่ 550 °C และค่า R_w สูงสุดได้รับในชิ้นงาน 0.5% Si ผ่านการอบคืนตัวที่ 550 °C

6. การเติม Si สามารถเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง 16% Cr - 2% Mo ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไปได้ โดยการเติม 1.5 % จะทำให้เหล็กหล่อมีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Prof. Dr.Yasuhiro Matsubara and Prof. Dr.Kaoru Yamamoto แห่ง National Institute of Technology-Kurume College ประเทศญี่ปุ่น และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับการสนับสนุนการทำวิจัย

References

- [1] Laird, G., Gunlach, R., and Rohring, K. (2000). **Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook**. AFS, Illinois.
- [2] Laird, G., and Powell, G. L. (1993). Solidification and Solid State Transformation Mechanisms in Si Alloyed High-Chromium White Cast irons. **Metallurgical Transactions A**. Vol. 24, Issue 4, pp. 981-988. DOI: 10.1007/BF02656520
- [3] Park, J. L. (1985). Characteristic of As-cast and Sub-critical Heat Treated High-Chromium-Molybdenum White Irons for Thick-Section Casting. **AFS Transactions**. Vol. 86, pp. 93-102
- [4] Sudsakorn, I., Prasonk, S., and Yasuhiro, M. (2006). Effect of Alloying Elements on Heat Treatment Behavior of Hypoeutectic High Chromium Cast Iron. **Materials Transactions**. Vol. 47, No. 1, pp. 72-81
- [5] Bedolla-Jacuinde, A., Rainforth, M. W., and Mejia, I. (2013). The Role of Silicon in the Solidification of High-Cr Cast Irons. **Metallurgical and Materials Transactions A**. Vol. 44, Issue 2, pp. 856-872. DOI: 10.1007/s11661-012-1434-8
- [6] Powell, G. L. F. (1996). Secondary Carbide Precipitation in an 18 wt% Cr - 1 wt% Mo White Iron. **Journal of Materials Science**. Vol. 31, Issue 3, pp. 707-711. DOI: 10.1007/BF00367889
- [7] Pisizchai, K., Sudsakorn, I., Prasonk, S., and Yasuhiro, M. (2012). Effect of Silicon on Subcritical Heat Treatment Behavior and Wear Resistance of 16 wt% Cr Cast Iron with 2wt% Mo. **Journal of Metals Materials and Minerals**. Vol. 22, No. 2, pp. 89-95

- [8] Sudsakorn, I., Attasit, C., Prasonk, S., and Yasuhiro, M. (2012). Two-Body and Three-body Types Abrasive Wear Behavior of Hypoeutectic 26 mass% Cr Cast Irons with Molybdenum. **Materials Transactions**. Vol. 53, No. 7, pp. 1258-1266
- [9] Sudsakorn, I., Pisizchai, K., Sumpao, Y., and Yasuhiro, M. (2013). Effect of Repeated Tempering on Abrasive Wear Behavior of Hypoeutectic 16 mass% Cr Cast Iron with Molybdenum. **Materials Transactions**. Vol. 54, Issue 1, pp. 28-35. DOI: 10.2320/matertrans.M2012185
- [10] Pisizchai, K., Sudsakorn, I., Keartisak, S., and Yasuhiro, M. (2016). The Effect of Sub-Critical Heat Treatment on Hardness, Retained Austenite and Abrasive Wear Resistance of Hypoeutectic 16 mass% Cr - 2 mass% Mo Cast Iron with Varying Vanadium Content. **Materials Transactions**. Vol. 57, No. 2, pp. 174-182
- [11] ASTM Standard. (2004). **ASTM International**. West Conshohocken PA. United states

การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิตเพื่อเพิ่ม
อรรถประโยชน์ของโลหิต

The Development of Rule-based Decision Making Models for Blood Allocation to Enhance Utilization

วิชัย บุญญานุสธิ^{1*} และพงษ์ชัย จิตตะมัย²

Wijai Boonyanusith^{1*} and Phongchai Jittamai²

Received: July 26, 2018; Revised: October 8, 2018; Accepted: October 10, 2018

บทคัดย่อ

การจัดสรรโลหิตมีความซับซ้อน เนื่องจากศูนย์บริการโลหิตต้องกระจายโลหิตให้กับโรงพยาบาลตามประเภทของโลหิต หมู่โลหิต และจำนวนที่ต้องการ โดยคำนึงถึงตัวชี้วัดด้านการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิต ดังนั้น การศึกษาถึงปัจจัยด้านการจัดการคลังโลหิตที่ส่งผลกระทบต่อตัวชี้วัดดังกล่าวจึงควรมานำวิเคราะห์ในการจัดสรรโลหิตด้านจำนวนและอายุที่เหมาะสมยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิธีการจัดสรรโลหิตโดยใช้วิธีการพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎซึ่งผนวกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการคลังโลหิตจำนวน 4 ตัวแบบ คือ (1) ความต้องการโลหิต (2) ระดับโลหิตคงคลัง (3) ระยะเวลาการจองโลหิต และ (4) ระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล ยิ่งไปกว่านั้น การทดสอบตัวแบบการจัดสรรโลหิตเพื่อประเมินการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับตัวแบบระบบจัดสรรโลหิตปัจจุบันในระยะเวลา 12 เดือนพบว่า ตัวแบบที่ (1) มีผลการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบสูงสุดเท่ากับร้อยละ 14.39 รองลงมาคือตัวแบบที่ (4) (2) และ (3) ด้วยค่าร้อยละ 9.41 8.76 และ 8.05 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแบบที่สามารถลดอัตราการหมดอายุของโลหิตเรียงลำดับจากสูงไปต่ำ

¹ สำนักวิชาเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

¹ Institute of Social Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

² Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author Email Address: boonyanusith@gmail.com

คือ ตัวแบบที่ (4) (3) (1) และ (2) ด้วยค่าร้อยละเท่ากับ 27.89 20.95 17.33 และ 13.26 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงปัจจัยในการจัดสรรโลหิตที่ส่งผลกระทบต่อ การขาดแคลนและการหมดอายุของโลหิต ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงวิธีการจัดสรรโลหิตในระบบงานในปัจจุบันให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นได้ในอนาคต

คำสำคัญ : การจัดสรรโลหิต; ตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎ; การจำลองสถานการณ์; การขาดแคลนโลหิต; การหมดอายุของโลหิต

Abstract

Blood allocation is a complex task. It has to deal with managing blood products, groups, units, and their shelf lives in order to allocate the requested units from Blood Center to hospitals in the network to reduce blood shortage and blood outdated levels. Hence, it is the aim of this study to explore blood allocation policy that helps reducing shortage and outdated rates, using Rule-based decision method. Four blood allocation models are proposed in this study, which are (1) Demand-based, (2) Stock level-based, (3) Crossmatched release period-based, and (4) Hospital performance level-based. Moreover, the evaluation of was done by using simulation method to measure the blood shortage and blood outdated rates in the system. The results of all models are compared based on 12-month data. The shortage rate results indicated that the Demand-based allocation model yielded the highest rate with 14.39 %, followed by model (4), (2), and (3), with 9.41 %, 8.76 %, and 8.05 %, respectively. The outdated rate results showed that Hospital performance level-based model was ranked in the highest rate with 27.89 %, followed by model (3), (1), and (2), with 20.95 %, 17.33 %, and 13.26 %, respectively. The contribution of this study is to illustrate the factors in managing the blood inventory which affect the occurrence of the blood shortage and blood outdated units. Blood service organizations can apply the blood allocation models in their work in order to enhance the allocation procedure more effectively.

Keywords: Blood Allocation; Rule-Based Decision Model; Simulation; Blood Shortage; Blood Outdated

บทนำ

การจัดสรรโลหิตเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากศูนย์บริการโลหิตต้องกระจายโลหิตให้กับโรงพยาบาลตามประเภทของโลหิต หมู่โลหิต และจำนวนที่ต้องการ บนพื้นฐานของการจัดการคลังโลหิต เพื่อให้แน่ใจว่ามีโลหิตที่เพียงพอต่อความต้องการในโรงพยาบาลและต้องป้องกันการหมดอายุของโลหิต

ที่อาจจะเกิดขึ้นได้พร้อมกัน [1] การที่โรงพยาบาลมีโรคติดต่อไม่เพียงพอดต่อการใช้ในการรักษาอาจจะนำไปสู่การเสียชีวิตของผู้ป่วย ในทางเดียวกัน การหมดอายุของโรคติดต่อไม่ควรเกิดขึ้นเพราะโรคติดต่อเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและเป็นต้นทุนทางสังคมประเภทหนึ่ง [2] ยิ่งไปกว่านั้น การจัดสรรโรคติดตียังต้องคำนึงถึงระดับการใช้โรคติดต่อในการรักษา ซึ่งต้องพิจารณาถึงจำนวนและอายุของโรคติดต่อที่เหมาะสมในการจัดสรรอีกด้วย ในขณะที่การจัดสรรโรคติดต่อส่วนใหญ่่มักจะใช้วิธีเข้าก่อนออกก่อน (First In First Out) เพื่อป้องกันการหมดอายุของโรคติดต่อที่มีโอกาสเกิดขึ้น [3] ซึ่งเป็นมุมมองจากด้านศูนย์บริการโรคติดต่อเพียงฝ่ายเดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การใช้โรคติดต่อในการรักษาผู้ป่วยในโรงพยาบาลนั้นมีความแตกต่างกันไปตามหมู่โรคติดต่อ จำนวน อายุ ตลอดจนรูปแบบในการใช้โรคติดต่อในการรักษาผู้ป่วยแต่ละประเภท อีกทั้งยังมีปัจจัยในธนาคารเลือดของโรงพยาบาลที่ส่งผลกระทบต่อการจัดสรรโรคติดต่อทางด้านจำนวนและอายุอีกด้วย เช่น ความต้องการโรคติดต่อ ระดับโรคติดตึงคลั่ง และระยะเวลาการจ้องโรคติดต่อ เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้โรคติดต่อและการหมดอายุของโรคติดต่อในระบบจึงควรได้รับการวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจร่วมกับประสบการณ์ของบุคลากรในการจัดสรรโรคติดต่อให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

การศึกษาในการจัดสรรโรคติดต่อทางด้านการวิจัยดำเนินงานโดยส่วนใหญ่เป็นการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์และตัวแบบทางการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างซับซ้อน เช่น การศึกษาของ Prastacos, G. P., and Brodheim, E. ที่สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่อศึกษานโยบายในการจัดสรรโรคติดต่อ โดยประเมินอัตราการขาดแคลนโรคติดต่อ และอัตราการหมดอายุของโรคติดต่อ [4] และการศึกษาโดย Sapountzis, C. ในการสร้างตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Model) สำหรับการจัดสรรทรัพยากรโรคติดต่อที่เหมาะสม โดยแสดงให้เห็นถึงการลดอัตราการหมดอายุของโรคติดต่อในระบบได้ [5] โดยได้ขยายงานวิจัยดังกล่าวต่อในการพัฒนาวิธีการจัดสรรโรคติดตื้อด้วยวิธีการกำหนดพลวัตเชิงสุ่ม (Stochastic Dynamic Programming) และลดรูปสู่โปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งได้ผนวกปัจจัยในการจัดการคลังโรคติดต่อเข้าไปในวิธีการจัดสรรด้วย [6] ตลอดจนการศึกษาของ Qin, Y. ในการพัฒนาตัวแบบการกระจายโรคติดต่อโดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบมาร์คอฟ (Markov Decision Model) โดยศึกษาถึงนโยบายการเรียกคืนโรคติดต่อที่ใกล้หมดอายุกลับคืนเพื่อจัดสรรให้กับโรงพยาบาลแห่งอื่น และประเมินจำนวนโรคติดต่อที่หมดอายุในระบบ [7] เป็นต้น

ตัวแบบการจัดสรรโรคติดต่อในงานวิจัยดังกล่าวมีความซับซ้อนในการนำไปประยุกต์ใช้กับบริบทจริง ซึ่งไม่ได้สะท้อนถึงการจัดสรรโรคติดต่อที่จำเป็นต้องใช้ความเชี่ยวชาญของบุคลากรในการตัดสินใจ ตลอดจนตัวแบบการจัดสรรโรคติดต่อในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Model) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในช่วงเวลาหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงแล้วสถานการณ์ของการจัดการโรคติดตื้อมีความแปรผันตามความต้องการโรคติดต่อที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้และการจัดหาโรคติดต่อที่ไม่แน่นอน [8] ยิ่งไปกว่านั้น ตัวแบบในงานวิจัยดังกล่าวมีขอบเขตการศึกษาเพียงแค่การจัดสรรโรคติดตื้อระหว่างการหยิบใช้โรคติดตื้อแบบ First In First Out และ Last In First Out ซึ่งโรงพยาบาลจะได้รับโรคติดต่อที่มีอายุเท่ากันทุกโรงพยาบาล โดยไม่ได้พิจารณาถึงช่วงอายุของโรคติดต่อที่เหมาะสมกับโรงพยาบาลแต่ละแห่ง อย่างไรก็ตาม การจัดสรรโรคติดตื้อยังจำเป็นต้องอาศัยความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในการตัดสินใจในการจัดสรรโรคติดตื้อให้เหมาะสมกับสถานการณ์ของอุปสงค์และอุปทานของโรคติดต่อในระบบ [9] ซึ่งการตัดสินใจในการจัดสรรโรคติดตื้อที่สามารถผนวกความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเข้ากับตัวแบบทางด้านคณิตศาสตร์ จะช่วยให้ตรรกะในการจัดสรรมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นและสามารถนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการจัดการโรคติดตื้อในสถานการณ์จริงได้ [10]

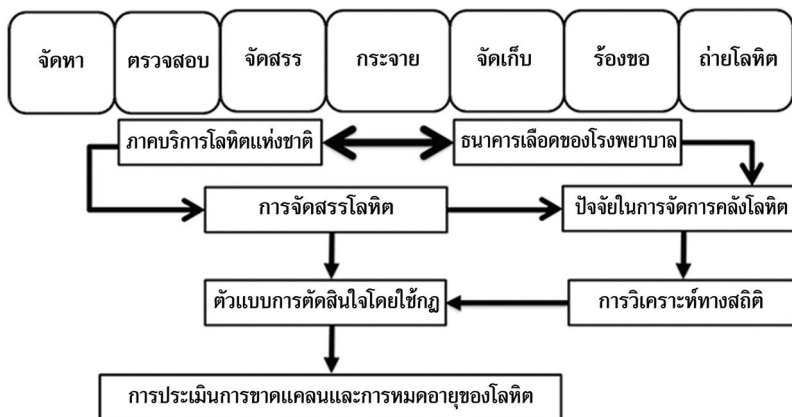
ยิ่งไปกว่านั้น ตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎ (Rule-based Decision Model) เป็นการนำความรู้เฉพาะด้านของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์และสร้างเป็นกฎเพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลสำหรับช่วยในการแก้ไขปัญหาโดยใช้กฎทำให้การตัดสินใจมีความแม่นยำมากขึ้น [11] โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองเงื่อนไขในการตัดสินใจด้วยปัจจัยด้านการจัดการคลังโลหิตที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรโลหิตตามจำนวนและช่วงอายุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการมีโลหิตขาดแคลนและการสูญเสียโลหิตโดยเปล่าประโยชน์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบ

ในประเทศไทย ภาควิชาโลหิตแห่งชาติ สังกัดศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย เป็นหน่วยงานสำคัญในการดำเนินกิจกรรมการบริการด้านโลหิต โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีภาควิชาโลหิตแห่งชาติกระจายอยู่ในแต่ละจังหวัดตามส่วนภูมิภาค ซึ่งดำเนินการด้านการจัดหา ตรวจสอบคัดกรอง ปั่นแยกส่วนประกอบ และจัดสรรโลหิต ให้กับโรงพยาบาลภายในเครือข่ายพื้นที่รับผิดชอบ อย่างไรก็ตาม การจัดสรรโลหิตในระบบงานปัจจุบันยังอาศัยการตัดสินใจจากประสบการณ์ของบุคลากรเท่านั้น ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตโดยสิ้นได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้น ตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิตโดยประยุกต์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรโลหิต ด้านความต้องการโลหิต ระดับโลหิตคงคลัง ระยะเวลาการจองโลหิต รวมไปถึงระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล ผนวกในการสร้างตัวแบบการตัดสินใจในการจัดสรรโลหิต จะสามารถใช้เป็นกลไกในการสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดสรรโลหิตได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้นโดยจะส่งผลให้การขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตลดลงได้ในระบบ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาการจัดสรรโลหิตของภาควิชาโลหิตแห่งชาติและโรงพยาบาล

การจัดสรรโลหิตจากภาควิชาโลหิตแห่งชาติไปยังโรงพยาบาลเครือข่ายอาศัยการตัดสินใจจากประสบการณ์ของบุคลากรและใช้ระบบเอกสารเป็นหลัก โดยจัดสรรโลหิตให้กับโรงพยาบาลที่ร้องขอแบบฉุกเฉินก่อนการร้องขอแบบทั่วไป ยิ่งไปกว่านั้น จำนวนของโลหิตซึ่งบุคลากรจัดสรรให้กับโรงพยาบาลนั้น ไม่สามารถเติมเต็มตามจำนวนความต้องการที่ร้องขอได้ ประกอบกับโลหิตที่จัดสรรนั้นมีอายุคงกันโดยไม่ได้นับถึงรูปแบบการใช้ในโรงพยาบาลส่งผลให้โลหิตมีโอกาสมอดอายุ ดังนั้น การประมวลองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญด้านธนาคารเลือดเพื่อสร้างตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎ สามารถถูกประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างเงื่อนไขการตัดสินใจจากการศึกษาสภาพการณ์จริงในการจัดการคลังโลหิต เช่น นโยบายการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาความต้องการโลหิตหรือพิจารณาระดับโลหิตคงคลัง เพื่อสร้างตัวแบบการตัดสินใจในการจัดสรรโลหิตได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายในการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระบบ โดยสามารถแสดงกรอบแนวคิดในการพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิตได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

2. การจำลองวิธีการจัดสรรโลหิตของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎ

แนวคิดในการพัฒนาตัวแบบการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธี Age-Differentiated [12] ของการจัดสรรสินค้าที่มีวันหมดอายุ ซึ่งตัวแบบจะสามารถจัดสรรโลหิตตามจำนวนและช่วงอายุที่เหมาะสมกับแต่ละโรงพยาบาลได้ โดยมีการผนวกปัจจัยในการจัดการสรรโลหิตเพื่อป้องกันการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระบบ ดังต่อไปนี้

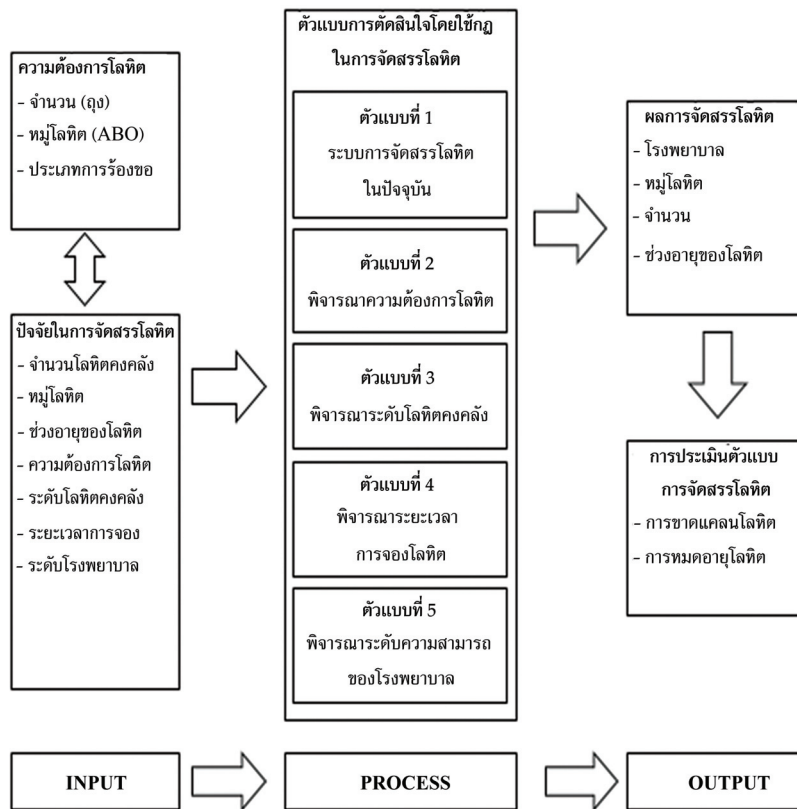
1) ความต้องการโลหิตภายในโรงพยาบาล โดยที่โรงพยาบาลที่มีแนวโน้มของอัตราการใช้โลหิตจำนวนมากควรพิจารณาจัดสรรโลหิตให้จำนวนมากกว่าเดิมและมีระยะเวลาการหมดอายุน้อยกว่า

2) ระดับโลหิตคงคลังในโรงพยาบาล โดยที่ไม่ควรจัดสรรโลหิตจำนวนมากให้กับโรงพยาบาลที่มีระดับโลหิตคงคลังสูงและควรจัดสรรโลหิตที่มีระยะเวลาการหมดอายุน้อยกว่าเพื่อป้องกันการหมดอายุ

3) ระยะเวลาการจองโลหิต คือ ระยะเวลาที่โลหิตสามารถถูกจองเพื่อใช้กับผู้ป่วย โดยที่โรงพยาบาลที่มีระยะเวลาในการจองโลหิต 3 - 7 วัน ควรกระจายโลหิตที่มีระยะเวลาหมดอายุมากกว่าให้กับโรงพยาบาลเหล่านี้ ในทางตรงกันข้าม ควรกระจายโลหิตที่มีระยะเวลาหมดอายุน้อยให้กับโรงพยาบาลที่มีระยะเวลาในการจองโลหิตน้อยกว่า 3 วัน เพื่อป้องกันการหมดอายุของโลหิต

4) ระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาลที่แตกต่างกัน โดยโรงพยาบาลขนาดใหญ่ที่รองรับการรักษาระดับสูงจำเป็นต้องใช้โลหิตที่สามารถเก็บไว้ได้นานเพื่อใช้ในการรักษา เช่น การผ่าตัดใหญ่ เป็นต้น ตลอดจนโรงพยาบาลขนาดใหญ่จะมีหน่วยงานธนาคารเลือดของตนเองที่มีความสามารถในการจัดเก็บโลหิตไว้ได้เพื่อสำรองใช้ภายในโรงพยาบาลจึงควรได้รับการจัดสรรโลหิตที่มีช่วงอายุใหม่เพื่อนำไปจัดเก็บไว้ในอนาคต ในทางตรงกันข้าม โรงพยาบาลขนาดเล็กนั้นมีการร้องขอโลหิตเพื่อนำไปใช้ในการรักษาฉุกเฉินโดยส่วนใหญ่ จึงสามารถจัดสรรโลหิตที่ใกล้หมดอายุได้เพื่อป้องกันการหมดอายุของโลหิตในระบบ

การจำลองวิธีการจัดสรรโลหิตของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสามารถแสดงกรอบแนวคิดเชิงระบบในการจัดสรรโลหิตได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดเชิงระบบของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิต

3. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากภาคบริการโลหิตแห่งชาติที่ 5 นครราชสีมา ซึ่งมีเครือข่ายบริการในจังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ บุรีรัมย์ และสุรินทร์ โดยเป็นหน่วยงานบริการโลหิตขนาดใหญ่แก่โรงพยาบาลในเครือข่ายมากกว่า 60 แห่ง และมีปริมาณการร้องขอและเบิกจ่ายโลหิตอยู่ในระดับสูงเป็นอันดับต้นของประเทศเนื่องจากมีโรงพยาบาลที่มีความสามารถในการรักษาระดับสูงอยู่จำนวนมากประกอบกับพื้นที่จังหวัดมีอัตราการใช้โลหิตค่อนข้างสูง โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง พ.ศ. 2557 - 2559 ประกอบไปด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

3.1 ข้อมูลเชิงปริมาณที่ใช้ในการพัฒนาตัวแบบการจัดสรรโลหิต

3.1.1 จำนวนการจัดหาโลหิตแต่ละประเภท ณ ภาคบริการโลหิต

(หมู่โลหิต (ABO) และจำนวน (ถุง))

3.1.2 จำนวนความต้องการโลหิตในแต่ละประเภท ณ โรงพยาบาล

(หมู่โลหิต (ABO) จำนวน (ถุง) และประเภท (ทั่วไปและฉุกเฉิน))

3.1.3 ระดับความต้องการโลหิตของโรงพยาบาล

วิเคราะห์ข้อมูลสถิติจำนวนการร้องขอโลหิตของโรงพยาบาลและเปรียบเทียบระดับสูง กลาง และต่ำ ในแต่ละโรงพยาบาลด้วยการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

3.1.4 ระดับโลหิตคงคลังของภาคบริการโลหิตและโรงพยาบาล

วิเคราะห์ข้อมูลสถิติจำนวนของระดับโลหิตคงคลังของโรงพยาบาลในการสำรองโลหิต และเปรียบเทียบระดับสูง กลาง และต่ำ ในแต่ละโรงพยาบาล ด้วยการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

3.1.5 ระยะเวลาการจองโลหิตของแต่ละโรงพยาบาล

(0 - 2 วัน / 3 - 5 วัน / 6 - 7 วัน)

3.1.6 ระดับขีดความสามารถของแต่ละโรงพยาบาล

A - S = โรงพยาบาลศูนย์และโรงพยาบาลทั่วไป

M1 - M2 = โรงพยาบาลทั่วไปขนาดเล็กและโรงพยาบาลแม่ข่าย

F1/F2/F3 = โรงพยาบาลชุมชนขนาดใหญ่ กลาง และเล็ก

3.2 ข้อมูลในการสร้างตัวแบบในการทดสอบการจัดสรรโลหิต

3.2.1 ข้อมูลความต้องการโลหิตของโรงพยาบาลเครือข่ายจำนวน 12 เดือน

3.2.2 ข้อมูลการได้มาซึ่งโลหิตของภาคบริการโลหิตแห่งชาติ จำนวน 12 เดือน

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านความต้องการโลหิตของโรงพยาบาลแต่ละแห่ง และข้อมูลการได้มาซึ่งโลหิตของภาคบริการโลหิตแห่งชาติ เพื่อทดสอบการกระจายตัวของความน่าจะเป็นของข้อมูลด้วยวิธีการ One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test พบว่า การกระจายของค่าของโอกาสของข้อมูลทั้ง 2 ชุด อยู่ในรูปแบบของ Poisson Distribution จากนั้นทำการสร้างชุดข้อมูลจำลองจากชุดค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวด้วยวิธีการ Random Number Generation จากค่าพารามิเตอร์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยกำหนดวิธีการสุ่มด้วยการกระจายตัวแบบ Poisson จะได้ชุดข้อมูลจำลองสำหรับใช้ในการทดสอบและประเมินตัวแบบการจัดสรรโลหิต ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ข้อมูลในการสร้างตัวแบบจำนวน 12 เดือน สามารถสะท้อนถึงช่วงเวลาที่มีความต้องการโลหิตปกติและค่อนข้างสูง ตลอดจนความไม่แน่นอนในการจัดหาโลหิตในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยทำให้การทดสอบตัวแบบการจัดสรรโลหิตมีความเหมาะสมเนื่องจากข้อมูลที่ใช้้นครอบคลุมความต้องการทั้งช่วงปกติและช่วงความต้องการสูงซึ่งมีลักษณะคล้ายกันในแต่ละปี

3.3 ข้อมูลอายุของโลหิต

โลหิตในการศึกษานี้ คือ เม็ดเลือดแดงเข้มข้น (Red Blood Cells Concentrate) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์โลหิตที่ใช้ในการถ่ายโลหิตและการผ่าตัดเป็นหลัก และมีความต้องการใช้ในการรักษาสูงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์โลหิตประเภทอื่น โดยมีช่วงอายุระหว่าง 35 วันต่อถุง และแบ่งช่วงกลุ่มอายุของโลหิตออกเป็น 5 ช่วง โดยจำลองให้อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบพลวัตซึ่งโลหิตแต่ละถุงจะหมดอายุลงไป 1 วันตามวันและเวลาจริงในการจำลองสถานการณ์ในการจัดสรรโลหิต โดยช่วงกลุ่มอายุของโลหิตประกอบไปด้วย

1) กลุ่มอายุช่วงที่ 1 = 1 - 7 วัน

2) กลุ่มอายุช่วงที่ 2 = 8 - 14 วัน

3) กลุ่มอายุช่วงที่ 3 = 15 - 21 วัน

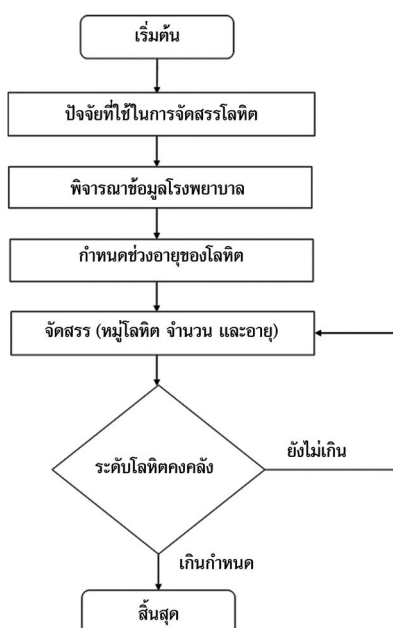
4) กลุ่มอายุช่วงที่ 4 = 22 - 28 วัน

5) กลุ่มอายุช่วงที่ 5 = 29 - 35 วัน

4. การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

4.1 ตรรกะและเงื่อนไขในการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต ได้ประยุกต์องค์ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญภายในภาคบริการโลหิตแห่งชาติ และหัวหน้าธนาคารเลือดของโรงพยาบาล ประกอบกับแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้โลหิต ในการพัฒนากฎในการจัดสรรโลหิต การทวนสอบความถูกต้องของตรรกะในการตัดสินใจ และการปรับปรุงพารามิเตอร์ในแต่ละเงื่อนไข ตลอดจนทวนสอบกับผู้เชี่ยวชาญเพื่อตรวจสอบจนเสร็จสิ้น โดยสามารถแสดงขั้นตอนหลักในการจัดสรรโลหิตของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

4.2 การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

การพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต ใช้วิธีการวิเคราะห์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญและการสร้างกฎและเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Rule-based Decision Model) ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของข้อเท็จจริง (Set of Fact) กลุ่มของกฎ (A Set of Rules) และเงื่อนไข (Condition) โดยมีรูปแบบของการเขียนกฎ โดยใช้ IF แสดงเงื่อนไขของกฎ และ THEN แสดงการกระทำที่ต้องการให้เกิดขึ้นเมื่อเงื่อนไขถูกต้อง นอกจากนี้กฎสามารถมีจำนวนเงื่อนไขในส่วนของ IF หรือการกระทำในส่วนของ THEN มากกว่าหนึ่งอย่างได้โดยใช้ AND และ OR เป็นตัวดำเนินการสำหรับเชื่อมการทำงานของเงื่อนไข [13]

ตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 5 ตัวแบบ ดังต่อไปนี้

- ตัวแบบที่ 1 การจัดสรรโลหิตในระบบปัจจุบัน
- ตัวแบบที่ 2 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาความต้องการโลหิต (Demand-based Allocation)
- ตัวแบบที่ 3 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับโลหิตคงคลัง (Stock Level-based Allocation)
- ตัวแบบที่ 4 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระยะเวลาการจองโลหิต (Crossmatched Release Period-based Allocation)
- ตัวแบบที่ 5 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล (Hospital Performance Level-based Allocation)

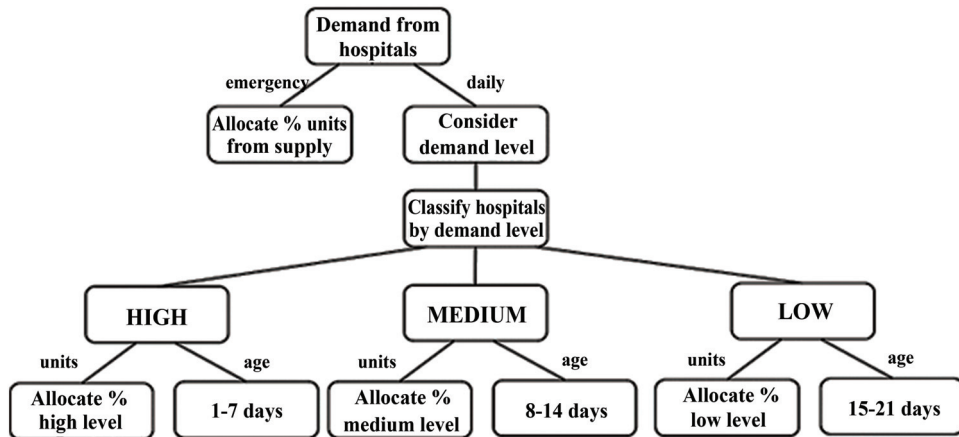
โดยตัวแบบที่ 2 - 5 ได้ผนวกปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนและอายุของโลหิตร่วมเข้าไปในตัวแบบซึ่งจะมีการพิจารณาอายุที่เหมาะสมร่วมด้วยในการจัดสรรโลหิต และสามารถแสดงตัวอย่างตรรกะของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิตได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตรรกะของตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต

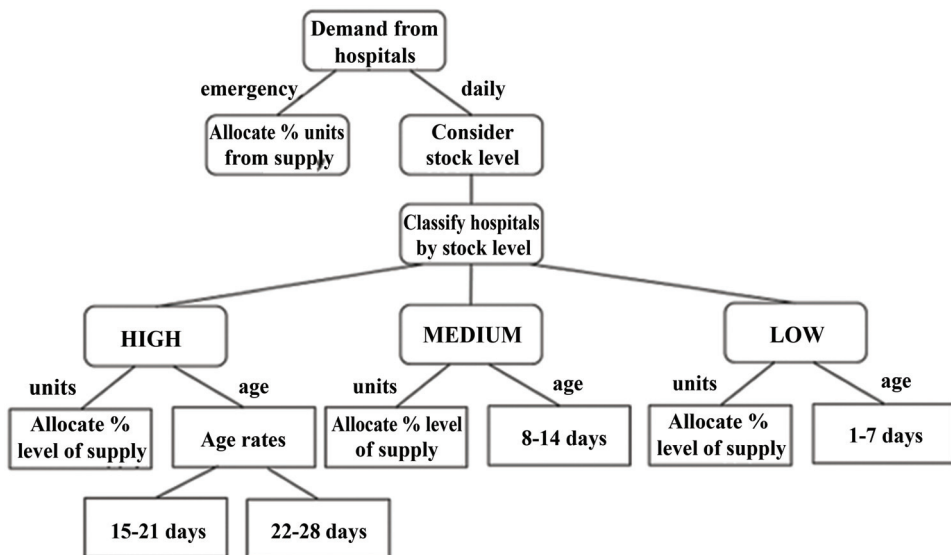
ตัวแบบที่ 1	ตัวแบบที่ 3	ตัวแบบที่ 5
<pre>(def rule allocate (type emergency); (type daily); antecedent => (allocate (HBBn1 full)); consequents (allocate (HBBn2 full)) Subrule 1 if type of demand = emergency then allocate first and full quantity Subrule 2 if requisition = null then allocate first Subrule 3 if requisition = one then allocate next Subrule 4 if type = daily then order HBB by allocated Subrule 5 if HBB = unallocated then allocate first Subrule 6 if requisition = one then allocate next</pre>	<pre>(def rule allocate (type stock level); antecedent => (allocate (HBB full)); consequents) Subrule 1 if requisition = null then order HBB by stock level Subrule 2 if stock level = 1 then allocate age in rate 3 or 4 Subrule 3 if stock level = 2 then allocate age in rate 2 Subrule 4 if demand = 3 then allocate age in rate 1</pre>	<pre>(def rule allocate (type performance); antecedent => (allocate (HBB full)); consequents) Subrule 1 if requisition = null then order HBB by performance Subrule 2 if performance = 1 then allocate age in rate 1 or 3 or 4 Subrule 3 if performance = 2 then allocate age in rate 1 or 2 Subrule 4 if performance = 3 then allocate age in rate 1 Subrule 5 if performance = 4 then allocate age in rate 1 Subrule 6 if performance = 5 then allocate age in rate 1</pre>

4.3 การสร้างฟังก์ชันไม่การตัดสินใจโดยใช้กฎการจัดสรรโลหิต

การสร้างฟังก์ชันไม่การตัดสินใจโดยใช้กฎของตัวแบบการจัดสรรโลหิต เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตรรกะของกฎและเงื่อนไขในการตัดสินใจ โดยสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4



(ก) ตัวแบบที่ 2



(ข) ตัวแบบที่ 4

รูปที่ 4 ตัวอย่างแผนฟังก์ชันไม่การตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิต

4.4 การทดสอบตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิต

การทดสอบตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิตกับชุดข้อมูลจำลองของคลังโลหิตและการร้องขอโลหิต เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของตัวแบบ โดยสามารถแสดงตัวอย่างการจัดสรรโลหิตโดยใช้กฎโดยพิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาลได้ดังนี้

4.4.1 ชุดข้อมูลการร้องขอโลหิตภายในระบบ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างชุดข้อมูลการร้องขอโลหิต

ที่	โรงพยาบาล	ระดับการรักษา	ประเภทการร้องขอ	หมู่โลหิต	จำนวน (ถุง)
1	Hospital A	A - S (type= 1)	Emergency	A	30
2	Hospital B	M1 - M2 (type= 2)	Daily	A	20
3	Hospital C	F1 (type = 3)	Daily	A	3
4	Hospital D	F2 (type = 4)	Daily	A	5

4.4.2 ชุดข้อมูลคลังโลหิตหมู่เอ จำนวน 80 ถุง โดยมีอายุ 5 ช่วง

- 1) 1 - 7 วัน = 10 ถุง
- 2) 8 - 15 วัน = 20 ถุง
- 3) 16 - 21 วัน = 25 ถุง
- 4) 22 - 28 วัน = 20 ถุง
- 5) 29 - 35 วัน = 5 ถุง

4.4.3 ผลการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล

- Limit Inventory: 100% | Maximum Allocate Units: 75 | Blood Age Rates: 1-4

```
SELECT * FROM request, hospital WHERE request.hospital_id=hospital.hospital_id
AND DATE(request_date)=DATE(NOW()) AND blood_group=A ORDER BY request_amount,
request_time ASC
```

- Allocate --->

>> Hospital D | Performance: 3 | Type: Daily | Request: 3 |

----->> Age rate: 1 | Allocate units = 3

----->> Total allocate in request: 3 | Stock remain: 72

>> Hospital C | Performance: 4 | Type: Daily | Request: 5 |

----->> Age rate: 1 | Allocate units = 5

----->> Total allocate in request: 5 | Stock remain: 67

>> Hospital B | Performance: 2 | Type: Daily | Request: 20 |

----->> Age rate: 1 | Allocate units = 2

----->> Age rate: 2 | Allocate units = 18

----->> Total allocate in request: 20 | Stock remain: 57

>> Hospital A | Performance: 1 | Type: Emergency | Request: 30 |

----->> Age rate: 3 | Allocate units = 25

----->> Age rate: 4 | Allocate units = 5

----->> Total allocate in request: 30 | Stock remain: 17

5. การประเมินตัวแบบการจัดสรรโลหิต

การประเมินตัวแบบการจัดสรรโลหิตด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์โดยใช้วิธีการสร้างระบบต้นแบบในการจัดสรรโลหิตซึ่งจัดเก็บอัลกอริทึมของตัวแบบในการตัดสินใจลงฐานข้อมูล โดยรวมไปถึงข้อมูลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการจัดการคลังโลหิตและการจัดสรรโลหิตในระบบ และการจำลองการจัดสรรโลหิตผ่านระบบต้นแบบได้รับการวางฟังก์ชันให้เหมือนกับขั้นตอนการจัดสรรโลหิตในระบบงานจริงของภาคบริการโลหิตแห่งชาติ โดยผลลัพธ์ในการจัดสรรโลหิตในแต่ละตัวแบบจะถูกจัดเก็บลงระบบฐานข้อมูล ในส่วนของการประเมินตัวแบบการจัดสรรโลหิตนั้นได้ใช้ชุดข้อมูลจำลองจำนวน 1 ปี (12 เดือน) ในการจำลองสถานการณ์โดยกำหนดให้ระบบต้นแบบจัดสรรโลหิตดำเนินไปโดยอัตโนมัติตามอัลกอริทึมของระบบ ซึ่งจะทำให้การคำนวณและแสดงผลข้อมูลการขาดแคลนโลหิตและอัตราการหมดอายุของโลหิต และเปรียบเทียบผลการประเมินดังกล่าวตามคาบเวลาในแต่ละตัวแบบ โดยอัตราการขาดแคลนโลหิตเท่ากับผลต่างระหว่างจำนวนร้องขอโลหิตและจำนวนโลหิตที่ได้รับจัดสรรของแต่ละโรงพยาบาล และอัตราการหมดอายุของโลหิตเท่ากับจำนวนโลหิตที่หมดอายุ ณ ช่วงเวลาที่กำหนด (อายุศูนย์วัน) ในแต่ละโรงพยาบาล

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดสอบตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิตใช้วิธีการจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่องในการทดสอบตัวแบบด้วยชุดข้อมูลที่จำลองด้วยวิธีการทางสถิติทั้งด้านอุปสงค์และอุปทานของโลหิต เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการจัดสรรโลหิตในช่วงเวลาทั้งสิ้น 1 รอบปี (มกราคม - ธันวาคม) และประเมินตัวแบบดังกล่าวด้วยอัตราการขาดแคลนโลหิตและอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบรายเดือนเพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละตัวแบบการจัดสรรโลหิต โดยสามารถแสดงผลการประเมินได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลประเมินอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตของตัวแบบการจัดสรรโลหิต

เดือน	การขาดแคลนโลหิต (จำนวนถุง)					การหมดอายุของโลหิต (จำนวนถุง)				
	ตัวแบบที่ 1	ตัวแบบที่ 2	ตัวแบบที่ 3	ตัวแบบที่ 4	ตัวแบบที่ 5	ตัวแบบที่ 1	ตัวแบบที่ 2	ตัวแบบที่ 3	ตัวแบบที่ 4	ตัวแบบที่ 5
มกราคม	1,467	982	1,342	1,437	1,434	175	135	125	114	102
กุมภาพันธ์	1,247	873	1,202	1,174	1,211	146	112	112	105	99
มีนาคม	1,256	1,103	1,452	1,152	1,423	124	124	127	109	94
เมษายน	1,465	1,392	1,537	1,467	1,220	114	97	98	121	86
พฤษภาคม	1,846	1,612	1,553	1,469	1,453	109	108	95	84	73
มิถุนายน	1,284	1,108	1,128	1,137	1,238	119	83	113	94	87
กรกฎาคม	1,387	937	913	1,348	1,024	141	134	136	101	93
สิงหาคม	1,192	1,012	967	1,026	956	135	94	121	98	104
กันยายน	1,156	1,056	1,135	977	1,173	141	103	109	92	90
ตุลาคม	1,374	1,391	1,243	1,357	1,279	146	112	121	102	112

ตารางที่ 3 ผลประเมินอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตของตัวแบบการจัดสรรโลหิต (ต่อ)

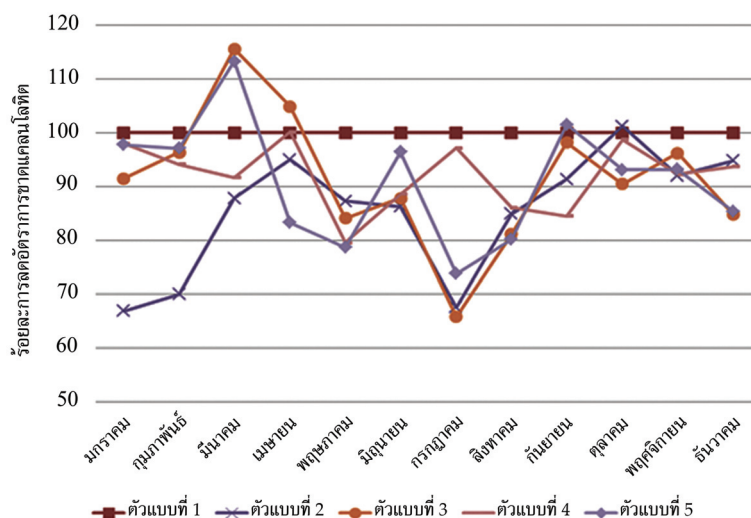
เดือน	การขาดแคลนโลหิต (จำนวนถุง)					การหมดอายุของโลหิต (จำนวนถุง)				
	ตัวแบบที่ 1	ตัวแบบที่ 2	ตัวแบบที่ 3	ตัวแบบที่ 4	ตัวแบบที่ 5	ตัวแบบที่ 1	ตัวแบบที่ 2	ตัวแบบที่ 3	ตัวแบบที่ 4	ตัวแบบที่ 5
พฤศจิกายน	1,813	1,668	1,744	1,673	1,689	127	105	127	112	94
ธันวาคม	1,354	1,284	1,149	1,269	1,156	122	115	103	132	119
รวม	16,841	14,418	15,365	15,486	15,256	1599	1322	1387	1264	1153
ค่าเฉลี่ย	1,403.4	1,201.5	1,280.4	1,290.5	1,271.3	133.25	110.17	115.58	105.33	96.08
ร้อยละการลด	-	14.39	8.76	8.05	9.41	-	17.33	13.26	20.95	27.89

ผลการประเมินอัตราการขาดแคลนโลหิตโดยการเปรียบเทียบตัวแบบการจัดสรรโลหิตในระบบปัจจุบันกับตัวแบบการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้พบว่า ตัวแบบการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาความต้องการโลหิตสามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตได้สูงที่สุดร้อยละ 14.39 เนื่องจากตัวแบบดังกล่าวได้รับการพัฒนาจากการวิเคราะห์ความต้องการโลหิตภายในโรงพยาบาล ซึ่งทำให้โรงพยาบาลที่มีแนวโน้มในการใช้โลหิตสูงจะได้รับการจัดสรรโลหิตจำนวนที่มากกว่าโรงพยาบาลที่มีแนวโน้มในการใช้โลหิตต่ำกว่า โดยเงื่อนไขในตัวแบบนี้กำหนดให้โรงพยาบาลทุกแห่งมีโอกาสได้รับการจัดสรรโลหิตเท่ากันแต่จำนวนที่ได้รับจะแตกต่างกันตามแนวโน้มของความต้องการโลหิตภายในโรงพยาบาล ซึ่งทำให้สามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบได้ค่อนข้างสูง โดยในส่วนของตัวแบบที่มีผลการประเมินอัตราการขาดแคลนโลหิตตรงลงมาคือตัวแบบที่ 5 (พิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล) ตัวแบบที่ 3 (พิจารณาระดับโลหิตคงคลัง) และตัวแบบที่ 4 (พิจารณาระยะเวลาการจองโลหิต) ซึ่งมีอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบเท่ากับร้อยละ 9.41 8.76 และ 8.05 ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ผลการประเมินอัตราการขาดแคลนโลหิตภายในระบบแสดงให้เห็นถึงปัจจัยด้านความต้องการโลหิตซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการขาดแคลนโลหิต เนื่องจากตัวแบบที่ 2 มีการพิจารณาถึงความต้องการโลหิตเป็นหลักในการจัดสรรโลหิต และสามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบได้สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวแบบการจัดสรรโลหิตอื่น ๆ ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงความต้องการโลหิตเป็นหลัก โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาใน [7] ที่ระบุถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนโลหิตในคลังโลหิตและความต้องการโลหิตที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีผลกระทบหลักต่ออัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบ

ผลการประเมินการลดอัตราการหมดอายุของโลหิตโดยการเปรียบเทียบตัวแบบการจัดสรรโลหิตในระบบปัจจุบันกับตัวแบบการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้พบว่า ตัวแบบที่ 3 (พิจารณาระดับโลหิตคงคลัง) ซึ่งใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมดอายุของโลหิตในโรงพยาบาลในการจัดสรรโลหิต มีค่าร้อยละการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตเท่ากับ 13.26 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบที่ 4 (พิจารณาระยะเวลาการจองโลหิต) ซึ่งมีร้อยละการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตเท่ากับ 20.95 โดยสามารถลดอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบได้สูงกว่าการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับโลหิตคงคลัง เนื่องจากระยะเวลาการจองโลหิตสะท้อนถึงระยะเวลาที่มีผลต่อการหมดอายุของโลหิตในการใช้โลหิต ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความแน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาที่มีความต้องการโลหิตแปรผัน ยิ่งไปกว่านั้น ระดับโลหิตคงคลังเป็นจำนวนในการสำรองโลหิตไว้ใช้ในอนาคตหรือเพื่อขาดเท่านั้นจึงไม่สะท้อนถึงผลกระทบโดยตรงต่อการหมดอายุของโลหิตเท่าใดนัก

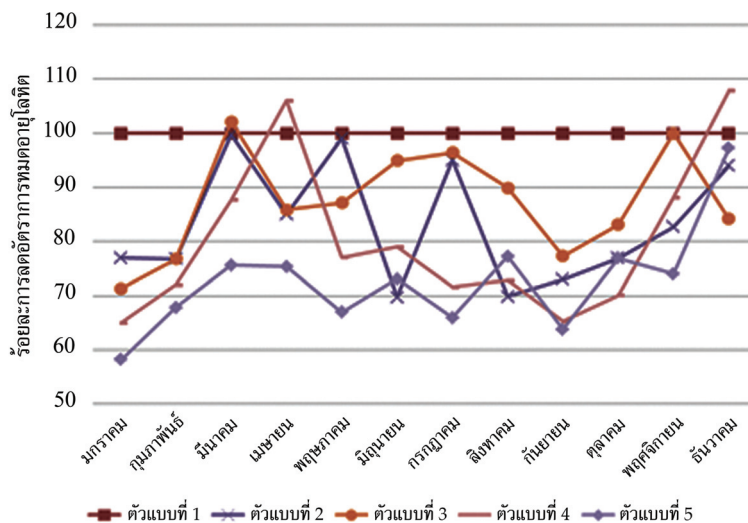
สำหรับตัวแบบที่ 2 (พิจารณาความต้องการโลหิต) พบว่า มีค่าร้อยละของการลดอัตราการหมดอายุของโลหิตเท่ากับ 17.33 เนื่องจากการผนวกแนวโน้มของความต้องการโลหิตจึงทำให้สามารถลดอัตราการหมดอายุของโลหิตได้ในระดับหนึ่ง แต่เมื่อพิจารณาถึงตัวแบบที่ 5 (พิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล) พบว่า มีค่าร้อยละการลดอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบที่สูงที่สุดเท่ากับ 27.89 เนื่องด้วยตัวแบบดังกล่าวนี้ได้รับการพัฒนาจากเงื่อนไขของรูปแบบของการใช้โลหิตในแต่ละโรงพยาบาลที่แตกต่างกัน เช่น กรณีฉุกเฉินจะได้รับโลหิตที่สามารถนำไปใช้ได้เลย และกรณีผ่าตัดพิเศษจะได้รับโลหิตที่สามารถนำไปสำรองเพื่อการรักษาได้ เป็นต้น โดยรูปแบบของเงื่อนไขในการได้รับการจัดสรรโลหิตตามช่วงอายุที่เหมาะสมกับระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาลส่งผลให้การหมดอายุของโลหิตลดลง เนื่องจากได้รับโลหิตที่มีช่วงอายุสอดคล้องกับระดับการรักษาของโรงพยาบาลแต่ละแห่ง ผลการประเมินดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษา [7] ซึ่งระบุถึงการจัดสรรโลหิตที่มีอายุการเก็บรักษาได้นานกว่าส่งผลให้การหมดอายุของโลหิตในระบบน้อยลง เนื่องจากตัวแบบที่ 4 และ 5 ได้ผนวกเงื่อนไขการจัดสรรโลหิตในช่วงอายุที่สามารถจัดเก็บในโรงพยาบาลได้นานกว่าจึงมีอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวแบบอื่น ๆ

ตัวแบบการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้สามารถสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดสรรโลหิตของบุคลากรในภาคบริการโลหิตแห่งชาติได้ ซึ่งส่งผลให้การขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระบบลดลง อย่างไรก็ตาม การจำลองสถานการณ์ในการทดสอบตัวแบบใช้ชุดข้อมูลที่จำลองขึ้นตามหลักสถิติจากข้อมูลจริงจำนวน 1 ปี ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟเส้นแสดงผลการประเมินการขาดแคลนโลหิตในรูปที่ 5 และการหมดอายุของโลหิตในรูปที่ 6 พบว่าในบางช่วงเวลาตัวแบบการจัดสรรโลหิตไม่สามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตได้ เนื่องจากความผันผวนของข้อมูลความต้องการโลหิตในความเป็นจริง เช่น ในเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงวันหยุดยาวที่มีการจราจรค่อนข้างหนาแน่นและมีสถิติการเกิดอุบัติเหตุมากกว่าช่วงเวลาปกติ ส่งผลให้มีความต้องการโลหิตสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนระหว่างความต้องการโลหิตและโลหิตที่มีไว้ในการจัดสรรในช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 5 กราฟข้อมูลผลการประเมินการขาดแคลนโลหิต

ในทางเดียวกันกับการทดสอบตัวแบบด้านการประเมินการหมดอายุของโลหิตพบว่า ในเดือนเมษายน และธันวาคม นั้น ตัวแบบการจัดสรรโลหิตไม่สามารถลดอัตราการหมดอายุได้เมื่อเทียบกับระบบการจัดสรรโลหิตในปัจจุบัน เนื่องจากโอกาสการเกิดอุบัติเหตุในช่วงระยะเวลาดังกล่าวค่อนข้างสูงกว่าช่วงเวลาอื่น ส่งผลให้ธนาคารเลือดจำเป็นต้องสำรองโลหิตไว้โรงพยาบาลของตนเองเป็นจำนวนมากกว่าปกติ ซึ่งข้อมูลจากการทดสอบตัวแบบได้สะท้อนถึงความเป็นจริงที่โลหิตมีโอกาสที่จะหมดอายุได้จำนวนมาก เช่นเดียวกันในช่วงระยะเวลามีความต้องการโลหิตสูง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอนในการจัดการคลังโลหิตอีกประการหนึ่ง



รูปที่ 6 กราฟข้อมูลผลการประเมินการหมดอายุของโลหิต

อย่างไรก็ตาม ลักษณะของเส้นกราฟมีแนวโน้มในการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตได้ในช่วงระยะเวลา 1 ปี ซึ่งความผันผวนที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในช่วงระยะเวลามีความต้องการโลหิตสูง และจำเป็นต้องสำรองโลหิตไว้จำนวนมากกว่าปกติ โดยหากพิจารณาถึงช่วงเดือนปกติพบว่า ตัวแบบการจัดสรรโลหิตในงานวิจัยนี้มีผลการประเมินที่สามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระยะยาว ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการจัดสรรโลหิตในช่วงเวลาที่มีความต้องการโลหิตอยู่ในระดับปกติได้ในระบบ ยิ่งไปกว่านั้น หากมีการใช้ชุดข้อมูลจำลองในคาบเวลาที่มากกว่า 1 ปี จะส่งผลให้ผลลัพธ์ในการจำลองสถานการณ์นั้นมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น และการใช้ชุดข้อมูลจากภาคบริการโลหิตแห่งชาติแห่งอื่น จะทำให้สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์ในแต่ละบริบทของภาคบริการโลหิตแห่งชาติได้อย่างหลากหลายยิ่งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะจากการศึกษา [5]

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การประเมินตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสำหรับการจัดสรรโลหิต ใช้วิธีการจำลองสถานการณ์ ตัวแบบที่ 2 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาความต้องการโลหิต สามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบได้สูงที่สุด ในขณะที่ตัวแบบที่ 5 การจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล สามารถลดอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการจัดสรรในระบบงานปัจจุบันและตัวแบบการจัดสรรที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึง

ปัจจัยด้านความต้องการโลหิตและระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาลที่ส่งผลกระทบต่อการจัดสรรโลหิต ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการลดอัตราการขาดแคลนและการหมดอายุของโลหิตในระบบ ยิ่งไปกว่านั้น ตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในแต่ละกฎให้เหมาะสมต่อการนำไปในการดำเนินงานจริง ซึ่งหากมีการผนวกทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวไว้ในกฎการจัดสรรโลหิตเดียวกันนั้นก็มีแนวโน้มในการลดอัตราการขาดแคลนและการหมดอายุของโลหิตในระบบได้อย่างควบคู่กัน

สรุป

การจัดสรรโลหิตเป็นกระบวนการที่สำคัญในการกระจายโลหิตจากศูนย์บริการโลหิตให้กับโรงพยาบาล ที่ทำการร้องขอโลหิตตามประเภทของโลหิต หมู่โลหิต และจำนวนที่ต้องการ โดยจำเป็นต้องคำนึงถึงการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระบบที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้น การศึกษาถึงปัจจัยด้านการจัดการคลังโลหิตที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตจึงควรมานำวิเคราะห์ในการจัดสรรโลหิตด้านจำนวนและอายุที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาวิธีการจัดสรรโลหิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิธีการจัดสรรโลหิตโดยใช้วิธีการพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการสร้างตรรกะในการจัดสรรโลหิตซึ่งผนวกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการคลังโลหิตจำนวน 4 ตัวแบบ คือ ความต้องการโลหิต (1) ระดับโลหิตคงคลัง (2) ระยะเวลาการจองโลหิต (3) และระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาล (4) ยิ่งไปกว่านั้น การทดสอบตัวแบบการจัดสรรโลหิตเพื่อประเมินการลดอัตราการขาดแคลนโลหิตและการหมดอายุของโลหิตในระบบด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดสรรโลหิตในแต่ละตัวแบบพบว่า ตัวแบบการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาความต้องการโลหิตสามารถลดอัตราการขาดแคลนโลหิตในระบบได้สูงที่สุด ในขณะที่ตัวแบบการจัดสรรโลหิตโดยพิจารณาระดับขีดความสามารถของโรงพยาบาลสามารถลดอัตราการหมดอายุของโลหิตในระบบได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการจัดสรรโลหิตในระบบงานปัจจุบัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงปัจจัยในการจัดสรรโลหิตที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการขาดแคลนและการหมดอายุของโลหิตซึ่งภาคบริการโลหิตแห่งชาติสามารถประยุกต์ใช้เงื่อนไขจากตัวแบบการตัดสินใจโดยใช้กฎในการจัดสรรโลหิตเพื่อปรับปรุงวิธีการจัดสรรโลหิตในระบบงานในปัจจุบันให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นได้ในอนาคต

References

- [1] Osorio, A. F., Brailsford, S. C., and Smith, H. K. (2015). A Structured Review of Quantitative Models in the Blood Supply Chain: A Taxonomic Framework for Decision-Making. **International Journal of Production Research**. Vol. 53, No. 24, pp. 7191-7212. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005766
- [2] Katsaliaki, K. and Brailsford, S. C. (2007). Using Simulation to Improve the Blood Supply Chain. **Journal of the Operational Research Society**. Vol. 58, No. 2, pp. 219-227

- [3] Pierskalla, W. P. (2005). **Supply Chain Management of Blood Banks**. In: Brandeau M.L., Sainfort F., Pierskalla W.P. (eds) Operations Research and Health Care. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 70, Springer, Boston, MA
- [4] Prastacos, G. P. and Brodheim, E. (1980). PBDS: A Decision Support System for Regional Blood Management. **Management Science**. Vol. 26, Issue 5, pp. 451-463. DOI: 10.1287/mnsc.26.5.451
- [5] Sapountzis, C. (1984). Allocating Blood to Hospitals from a Central Blood Bank. **European Journal of Operational Research**. Vol. 16, Issue 2, pp. 157-162. DOI: 10.1016/0377-2217(84)90070-5
- [6] Sapountzis, C. (1989). Allocating Blood to Hospitals. **The Journal of the Operational Research Society**. Vol. 40, No. 5, pp. 443-449. DOI: 10.2307/2583616
- [7] Qin, Y. (2011). **Optimal Allocation of Blood Inventories**. Doctoral dissertation. Business Administration. Information Systems and Operations Management. University of Florida
- [8] Nagurney, A. and Masoumi, A. H. (2012). **Supply Chain Network Design of a Sustainable Blood Banking System**. In: Sustainable Supply Chains: Models, Methods and Public Policy Implications T. Boone, V. Jayaraman, and R. Ganeshan, Editors, Springer, London, England, pp. 49-72
- [9] Li, B. N., Dong, M. C., and Chao, S. (2008). On Decision Making Support in Blood Bank Information Systems. **Expert Systems with Applications**. Vol. 34, Issue 2, pp. 1522-1532. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.01.016
- [10] Jagannathan, R. and Sen, T. (1991). Storing Crossmatched Blood: A Perishable Inventory Model With Prior Allocation. **Management Science**. Vol. 37, No. 3, pp. 251-266. DOI: 10.1287/mnsc.37.3.251
- [11] Levesque, H. J. and Lakemeyer, G. (2001). **The Logic of Knowledge Bases**. MIT Press.
- [12] Cohen, M. A., Pierskalla, W. P., and Yen, H. C. (1981). An Analysis of Ordering and Allocation Policies for Multi-echelon, Age-Differentiated Inventory Systems. **TIMS Studies in the Management Sciences**. Vol. 16, No. 1, pp. 353-378
- [13] Gonzalez, A. J. and Dankel, D. D. (1993). **The Engineering of Knowledge-based Systems**. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall. pp. 207-230.

การศึกษาอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนในการกัดวัสดุสแตนเลสแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

The Study of Workpiece Temperature During Machining in Dry Milling Stainless Steel

ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ^{1*} และชาญณรงค์ สายแก้ว¹

Paramet Baowan^{1*} and Charnnarong Saikaew¹

Received: August 3, 2018; Revised: September 17, 2018; Accepted: September 19, 2018

บทคัดย่อ

การกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการตัดโลหะที่สำคัญที่ต้องพยายามคิดค้นหาวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารหล่อเย็นเพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุสแตนเลสถูกขึ้นชื่อว่าตัดเฉือนได้ยากเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ความแข็งแรงสูง และการนำความร้อนต่ำเมื่อตัดเฉือนจะทำให้อุณหภูมิบริเวณการตัดเฉือนสูงเกิดการพอกติดของเศษบริเวณคมตัด วิธีแก้ไขส่วนใหญ่ใช้สารหล่อเย็นในการระบายความร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนกับรูปร่างดอกกัดและวัสดุเคลือบให้การตัดเฉือนวัสดุมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากผลวิจัยพบว่าดอกกัดมุมเฉลี่ย 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ TiAlN สามารถป้องกันการสึกหรอของคมตัดดอกกัดได้ดีที่สุดและอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนที่สูงขึ้นนอกจากมาจากปริมาณแหล่งความร้อนบริเวณคมตัดที่เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของมุมเฉลี่ยแล้ว การสึกหรอแบบแตกบิ่นก็มีส่วนทำให้อุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

คำสำคัญ : มุมเฉลี่ย; การสึกหรอแบบแตกบิ่น; งานเคลือบผิว

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

* Corresponding Author E - mail Address: paramet.ba@rmuti.ac.th

Abstract

Milling is one of the most important machining processes that can be developed for more effective cutting performance to avoid use of coolants and maintain environmental friendliness. Stainless steel is widely known as a hard-to-cut material due to its high ductility, strength and low thermal conductivity. The cutting temperature is high which causes a built-up edge on the cutting tool. A commonly used solution to this problem is to apply the coolant which has a harmful effect on workers' health. Therefore, this research aimed to study the relationship between cutting temperature of workpiece and shapes of end mill as well as coating material for higher efficiency and environmental friendliness. The results showed that the end mill with a 60-degree helix angle coated with TiAlN was the best one that could prevent the wear of the end mill's cutting edge and the increase in cutting temperature since the higher cutting temperature did not only stem from the wider cutting edge, but also the chipping wear.

Keywords: Helix Angle; Chipping; Hard Coating

บทนำ

การตัดเฉือนที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมดังที่เรียกว่า กรีนแมชชีนนิ่ง (Green Machining) ได้กลายเป็นทางเลือกใหม่ที่เข้ามาช่วยตอบโจทย์ปัญหาการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในสารหล่อเย็นมีสารเคมีบางตัวที่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะที่ควรหันมาให้ความสนใจมากขึ้น ในกระบวนการกัดด้วยวัสดุสเตนเลสถูกขึ้นชื่อว่าตัดเฉือนได้ยากก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะที่ต้องพยายามคิดค้นหาวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าสเตนเลสเป็นวัสดุที่มีความแข็งเหนียวสูง และการนำความร้อนต่ำ [1] โดยพื้นฐานวัสดุที่มีการระบายความร้อนต่ำเมื่อตัดเฉือนจะทำให้อุณหภูมิบริเวณการตัดเฉือนสูง [2] และเกิดการพอกติดบริเวณคมตัด (Built Up Edge, BUE) เป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานดอกกัดสั้นและคุณภาพชิ้นงานต่ำ วิธีการแก้ไขปัญหแบบนี้จะใช้สารหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิการตัดเฉือนแต่ก็จะมีผลกระทบหลายอย่างตามมา ทั้งการเกิดการแตกร้าวในเม็ดเกรนที่ปลายคมตัดและที่สำคัญจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน [3]

ดังนั้นการกัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Machining) ได้กลายเป็นทางเลือกใหม่ที่เข้ามาช่วยตอบโจทย์ความท้าทายเหล่านี้อย่างเลี่ยงไม่ได้ แนวทางหลักในเรื่องของการกัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นคือการพัฒนาสมบัติของวัสดุเครื่องมือตัดโดยให้มีความทนต่อความร้อนหรือทำให้เกิดความร้อนต่ำที่สุดในการทำงาน ซึ่งจะปลดปล่อยงานในการใช้แรงตัดเฉือนและแรงเสียดทาน ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยหลายคนคิดหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกัดด้วยวัสดุสเตนเลสแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น เช่น Emel Kuran, et al. [4] ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการหล่อเย็นและค่าตัวแปรในการตัดเฉือนวัสดุด้วยวิธีการออกแบบการทดลองพบว่า ค่าความหนาผิวและอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้นเมื่อตัดเฉือนด้วยค่าที่เหมาะสมและสามารถพยากรณ์ได้ค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ Deng Jianxin, et al. [5] ได้ศึกษาทั่วโลก

การสึกหรอของเครื่องมือตัดคาร์ไบด์ในการตัดเฉือนสแตนเลสพบว่า การสึกหรอบริเวณหลังคมตัด (Flank Wear) และอุณหภูมิการตัดเฉือนสูงขึ้นตามความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น Munoz-Escalona, P. et al. [3] ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดเฉือนที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและปริมาณการใช้พลังงาน การตัดเฉือนพบว่า การตัดเฉือนด้วยวิธีการไม่ใช้สารหล่อเย็นเป็นสภาวะการตัดเฉือนที่ดีที่สุดในด้านของการใช้พลังงานและค่าความหยาบผิวจะแปรผันไปตามการเลือกใช้ค่าตัวแปรการตัดเฉือนที่เลือก

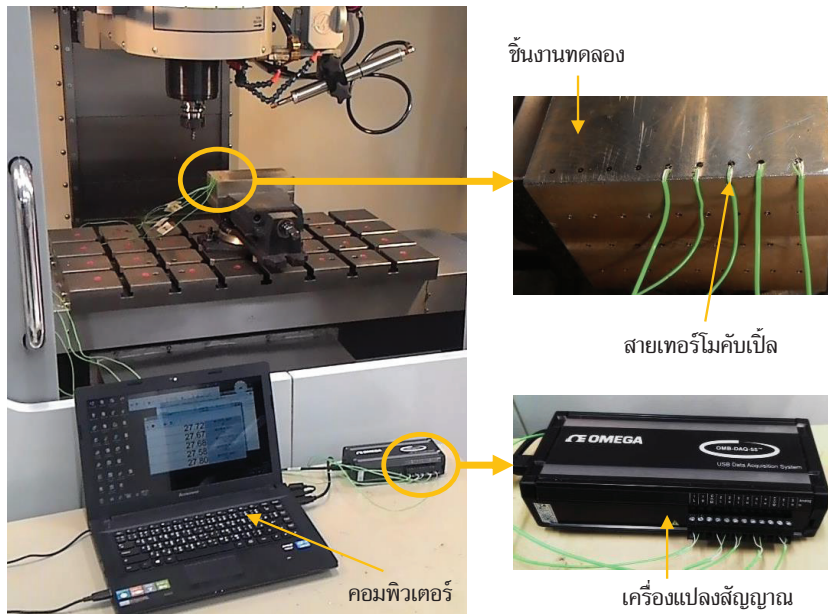
นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเครื่องมือตัดที่มีความทนต่อการสึกหรอและความร้อนด้วยการใช้สารเคลือบ เช่น Endrino, J. L. et al. [6] เปรียบเทียบดอกกัดเคลือบด้วย AlTiN กับ AlCrN รายงานว่า ดอกกัดเคลือบด้วย AlTiN มีอายุการใช้งานมากกว่า AlCrN ถึงสองเท่า Li Chen, et al. [7] ทำการปรับปรุงสมบัติสารเคลือบ TiAlN ด้วยการเคลือบ TiN เป็นชั้นที่สอง พบว่า TiAlN/TiN ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้กับเครื่องมือตัดมากกว่า TiAlN Dirk Biermann, et al. [8] ศึกษาสารเคลือบ CrN, TiN, AlCrN, AlTiN and TiAlN รายงานว่าการเคลือบด้วย TiAlN และ AlCrN มีส่วนช่วยป้องกันการสึกหรอได้โดยรวมไปถึงคุณภาพของผิวชิ้นงานและสารเคลือบที่ดีที่สุดคือ AlTiN จะเห็นว่าการวิจัยเหล่านี้มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาไปที่การหาสภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมและการหาสารเคลือบที่สามารถช่วยป้องกันการสึกหรอของเครื่องมือตัด และอีกอย่างหนึ่งการวิเคราะห์การเกิดขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนก็มีความสำคัญเช่นกันเพื่อที่จะหาวิธีการป้องกันเพื่อให้เกิดการตัดเฉือนเกิดความร้อนต่ำที่สุด ตามทฤษฎีแหล่งพลังงานความร้อนที่อธิบายโดย Sen Lin, et al. [9] อธิบายไว้ว่า ในขณะที่มีการกัดงาน เมื่อวิเคราะห์ที่จุดที่มีการเสียดสีกันระหว่างดอกกัดกับชิ้นงาน แหล่งพลังงานความร้อนที่เกิดอุณหภูมิของชิ้นงานมี 2 แหล่ง คือ บริเวณหน้าคมตัด (Shear Plane) และบริเวณด้านหลังคมตัด (Flank Wear - Land) ซึ่งพื้นที่ทั้งสองเป็นพื้นที่ที่เกิดจากการเสียดสีของวัสดุชิ้นงานในขณะที่เกิดการตัดเฉือน และยังสามารถคำนวณหาปริมาณพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานได้จากความสัมพันธ์กันของมุมเลี้ยวดอกกัดที่อธิบายในบทความของ Baowan, P. et al. [10] เมื่อระยะความยาวคมตัดด้านข้างของดอกกัดที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของมุมเลี้ยวดอกกัดและสามารถคำนวณหาความยาวนี้ได้ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติ เมื่อมุมเลี้ยวมีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ปริมาณพื้นที่ของแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นตาม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนกับมุมเลี้ยวดอกกัดและวัสดุเคลือบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนวัสดุสแตนเลสแบบแห้ง

วิธีดำเนินการ

1. การติดตั้งชุดการทดลอง

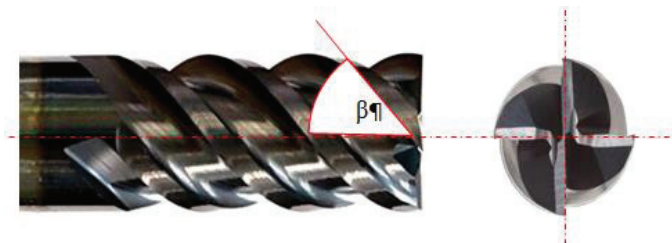
การออกแบบการทดลองในครั้งนี้มุ่งเน้นการกัดแบบด้านข้างแบบต่อเนื่องในระยะการตัดความยาว 50 เมตร ดังนั้นการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 1 ชิ้นงานจะถูกเจาะรูเพื่อฝังสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เข้าไปเพื่อวัดอุณหภูมิชิ้นงานจำนวน 5 จุด เมื่อดอกกัดตัดเฉือนชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิลจะเกิดความร้อนในชิ้นงานในขณะตัดเฉือนสัญญาณความร้อนจะถูกส่งเข้าไปที่ชุดแปลงสัญญาณ (Data Logger) แล้วแปลงเป็นตัวเลขอุณหภูมิของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในขณะนั้นแล้วแสดงผลส่งออกมาที่หน้าจอคอมพิวเตอร์และบันทึกผล เพื่อติดตามตรวจสอบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชิ้นงานในขณะตัดเฉือน



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดการทดลองเก็บข้อมูล

2. สภาวะการตัดเฉือน

วัสดุชิ้นงานทดลองใช้วัสดุสแตนเลสเกรด 304L มีสมบัติการนำความร้อนที่ $16.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [11] เครื่องมือตัดใช้เป็นดอกกัดคาร์ไบด์ที่มีมุมเลื่อยแตกต่างกันดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดในตารางที่ 1 และเคลือบด้วยวัสดุที่ต่างกันคือ Titanium Aluminium Nitride (TiAlN) และ Diamond Like Carbon (DLC) ที่มีสมบัติดังตารางที่ 2 รูปแบบการตัดเฉือนชิ้นงานแบบตัดด้านข้างคมตัด (Side Milling) บนเครื่องกัดอัตโนมัติแกนตั้งยี่ห้อ Haas VM02 ด้วยค่าตัวแปรการตัดเฉือนตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัด ดังตารางที่ 3 จากนั้นวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว Mitutoyo SJ210 Stylus ISO 1997 ในแนวขนานกับทิศทางอัตราป้อนตัดเฉือนแนวแกน ตรวจสอบการสึกหรอของคมตัดดอกกัดด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ในการทดลองครั้งนี้จะทำการออกแบบการทดลองแบบ 22 แฟคตอเรียล และมีจำนวน 3 ซ้ำรวมเป็น 12 ชุดการทดลองเพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ



รูปที่ 2 รูปร่างมุมเลื่อย (β) ของดอกกัด

ตารางที่ 1 ลักษณะและค่ารูปร่างดอกกัด

รายละเอียด	ค่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม)	10
ความยาวคมตัด (มม)	25
มุมเลี้ยว ($^{\circ}$)	30, 60
มุมหลบแนวแกน ($^{\circ}$)	4
มุมหลบแนวรัศมี ($^{\circ}$)	6
จำนวนฟัน (ฟัน)	4

ตารางที่ 2 สมบัติของสารเคลือบผิว

รายการ	TiAlN	DLC
ความหนาฟิล์ม (ไมโครเมตร)	2.87	1.12
ความแข็ง (Hv)	2300	3000
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.45	0.1

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรการตัดเฉือน

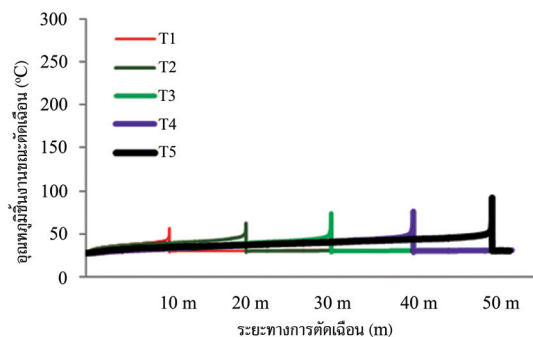
ตัวแปร	ค่า
ความเร็วตัด: V_c (ม/นาที)	120
อัตราป้อน: F (มม/ฟัน)	0.05
ความลึกกัดแนวแกน: a_p (มม)	20.0
ระยะป้อนตัดแนวรัศมี: a_e (มม)	0.2

ผลการทดลอง

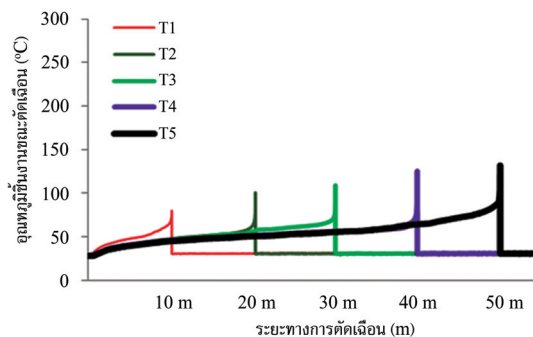
1. อุณหภูมิของชิ้นงาน

การกัดอย่างต่อเนื่องถือว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญในการนำไปวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการกัดแบบด้านข้างให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ในส่วนนี้เป็นการอธิบายอิทธิพลที่เกิดขึ้นระหว่างขนาดของมุมเลี้ยวดอกกัดและชนิดของสารเคลือบที่มีผลต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนจากรูปที่ 3 (ก) - (ง) จะเห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะทางการตัดเฉือนที่มากขึ้น ในแต่ละจุดที่มีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนที่ระยะ 10 - 50 เมตร T1 - T5 ในแต่ละจุดการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานจะเริ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ตัดเฉือนเข้ามาใกล้จุดที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิ้ลไว้ในแต่ละช่วงระยะการวัดจนมาสัมผัสกับจุดที่ฝังไว้ก็จะได้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนที่ระยะการตัดเฉือนนั้น ๆ หลังจากผ่านจุดที่ฝังสายเทอร์โมคัปเปิ้ลไปแล้วสัญญาณอุณหภูมิของจุดนั้นก็จะดิ่งลงมาสู่อุณหภูมิปกติ จากรูปที่ 3 (ก) - (ข) กราฟดอกกัดมุมเลี้ยวขนาด 30° และ 60° ที่เคลือบ

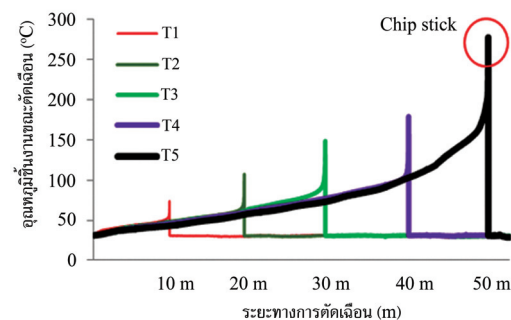
ด้วย TiAlN มีค่าอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนแตกต่างกัน สืบเนื่องจากค่าอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนที่กัดด้วยดอกกัดมุมเลี้ยว 60° มีค่าสูงกว่าดอกกัดมุมเลี้ยว 30° ทุกระยะการตัดเฉือน ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีแหล่งพลังงานความร้อนที่มีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของมุมเลี้ยว ในทำนองเดียวกันดอกกัดมุมเลี้ยวขนาด 30° และ 60° ที่เคลือบด้วย TiAlN มีความเสถียรมากในการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงาน สืบเนื่องจากมีความแปรผันน้อยสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือนให้ใกล้เคียงกันตลอดระยะการตัดเฉือน เนื่องจากสารเคลือบ TiAlN มีความโดดเด่นของความสามารถในการยึดเกาะที่ดี และมีความแข็งทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีที่อุณหภูมิสูง [12] - [13]



(ก) มุมเลี้ยว 30° เคลือบ TiAlN

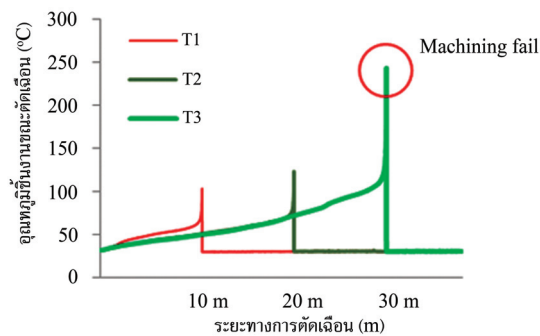


(ข) มุมเลี้ยว 60° เคลือบ TiAlN



(ค) มุมเลี้ยว 30° เคลือบ DLC

รูปที่ 3 อิทธิพลของมุมเลี้ยวและสารเคลือบต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือน



(ง) มุมเลื่อย 60° เคลือบ DLC

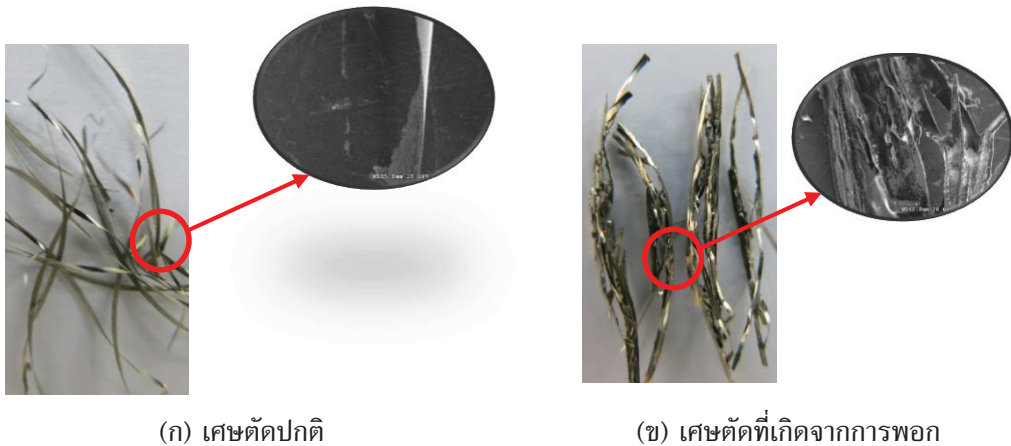
รูปที่ 3 อิทธิพลของมุมเลื่อยและสารเคลือบต่ออุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือน (ต่อ)

ในทางตรงกันข้ามดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 30° และ 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงกว่าดอกกัดเคลือบด้วย TiAlN อย่างชัดเจนประมาณ 3 เท่า ดังรูปที่ 3 (ค) - (ง) ดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 30° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงระยะทางการตัดเฉือน 50 เมตร มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงถึง 275 °C จนเกิดการหลอมของเศษตัดเข้าไปพอกติดที่คมตัด เช่นเดียวกันกับดอกกัดคมมุมเลื่อยขนาด 60° เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC มีอุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือนสูงถึง 250 °C อย่างรวดเร็วเพียงแค่ระยะทางการตัดเฉือนแค่ 30 เมตร เกิดการหลอมของเศษตัดเข้าไปพอกติดที่คมตัดอย่างรุนแรงจนทำให้ดอกกัดไม่สามารถตัดเฉือนต่อไปได้อีก เนื่องมาจากจุดด้อยของวัสดุเคลือบ DLC ที่มีกรวยกัดเกาะที่ไม่ดี [14] ทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอคมตัดจากการตัดเฉือนได้นานจึงเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วนำไปสู่การสูงขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัดเฉือน

จากรูปที่ 4 เป็นที่น่าประหลาดมากในการทดลองนี้เกิดการพอกติดของเศษที่คมตัดขึ้นกับดอกกัดที่เคลือบด้วย DLC เท่านั้น ทั้งที่มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้อธิบายว่า DLC มีสมบัติโดดเด่นอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำทำให้มีความลื่น [15] - [17] ซึ่งไม่อาจจะเกิดเหตุการณ์นี้ได้ อาจเป็นเพราะงานวิจัยนี้เป็นการตัดเฉือนแบบต่อเนื่องเป็นเวลานานจนทำให้ชั้นเคลือบของ DLC ที่มีความบางจนทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอได้นาน



รูปที่ 4 การพอกติดคมตัดของเศษตัดบนคมตัดดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุเคลือบ DLC



รูปที่ 5 รูปร่างของเศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือน

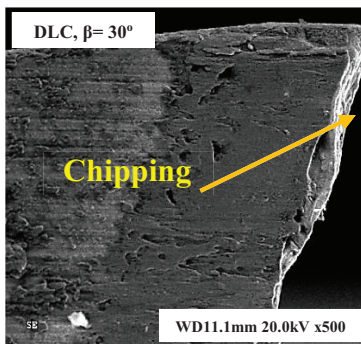
นอกจากนี้ก่อนเกิดการพอกอัดจนเครื่องมือตัดไม่สามารถตัดเฉือนได้จะมีสัญญาณเตือนก่อน โดยสามารถสังเกตได้จากลักษณะรูปร่างของเศษตัดดังรูปที่ 5 (ก) - (ข) เป็นความแตกต่างกันของเศษตัด รูปที่ 5 (ก) เป็นเศษตัดที่ได้จากการตัดเฉือนปกติทั่วไปที่มีรูปร่างแบนยาวและมันวาวเป็นเกลียวแตกต่างจากรูปที่ 5 (ข) เป็นลักษณะเศษตัดที่เกิดจากการตัดเฉือนที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากคมตัดเกิดการพอกอัดของเศษ

2. การสึกหรอของคมตัดด้านข้าง

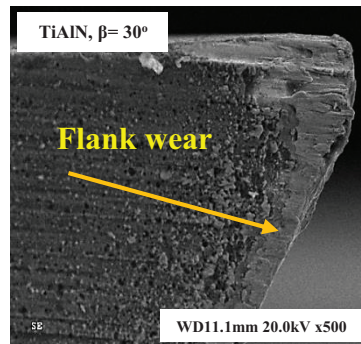
คมตัดด้านข้างของดอกกัดเป็นอีกปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของดอกกัดในการกัดแบบด้านข้างเนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้ตัดเฉือนวัสดุจึงกลายเป็นตัวชี้วัดอายุการใช้งานของดอกกัดจากรูปที่ 6 (ก) - (ง) เมื่อทำการทดลองกัดชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระยะการตัดเฉือนที่ 50 เมตร ดอกกัดที่มีมุมเลี้ยว 30° และ 60° ที่เคลือบด้วย TiAlN และ DLC พบว่าเกิดการสึกหรอที่ชัดเจน 2 ชนิด คือ การสึกหรอหลังคมตัด (Flank Wear) และการสึกหรอแบบแตกบิ่น (Chipping) การสึกหรอแบบหลังคมตัดเกิดบนดอกกัดที่เคลือบด้วยสาร TiAlN การสึกหรอนี้ถือว่าการสึกหรอที่ไม่มีความรุนแรงมากนัก สังเกตจากคมตัดที่มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยมากโดยเฉพาะดอกกัดมุมเลี้ยว 60° ดังรูปที่ 6 (ข), (ง) เนื่องจากดอกกัดที่มีมุมเลี้ยวสูงจะเกิดแรงในการตัดเฉือนต่ำ [18] - [19] รวมไปถึงสมบัติของสารเคลือบ TiAlN ที่มีความแข็งและยึดเกาะที่ดีทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการสึกหรอของดอกกัดดีขึ้น

ในขณะที่ดอกกัดที่เคลือบด้วยสารเคลือบ DLC พบการสึกหรอแบบแตกบิ่นที่เกิดจากการที่ปลายคมตัด ไม่สามารถรับภาระแรงในการตัดเฉือนได้นานทำให้คมตัดเสียรูปร่างเห็นได้ชัดตามรูปที่ 6 (จ) - (ช) เนื่องจากข้อด้อยของวัสดุเคลือบ DLC ที่มีการยึดเกาะที่ไม่ดี ทำให้ไม่สามารถป้องกันการสึกหรอของปลายคมตัดจากการตัดเฉือนได้นาน การสึกหรอแบบแตกบิ่นนี้ส่งผลกระทบท่อดอกกัดที่มีมุมเลี้ยวสูงอย่างมากเพราะที่มุมเลี้ยวสูงนั้นมีปริมาณพื้นที่แหล่งความร้อนมาก เมื่อดอกกัดเกิดการแพร่กระจายของรอยแตกบิ่นที่คมตัดทำให้การตัดเฉือนไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้เกิดความล้มเหลวของการตัดเฉือนดังดอกกัดมุมเลี้ยว 60° เคลือบด้วยสาร DLC ในการทดลองครั้งนี้

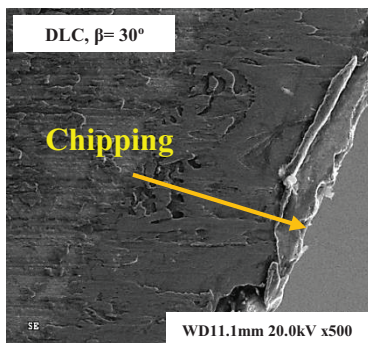
เมื่อวิเคราะห์เชื่อมโยงไปถึงอุณหภูมิของชิ้นงานนอกจากปริมาณของพื้นที่แหล่งความร้อนแล้ว การสึกหรอแบบแตกบิ่นก็มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งหมายรวมถึงอิทธิพลชนิดของสารเคลือบที่จะต้องมีความสามารถในการป้องกันการเกิดการสึกหรอแบบนี้



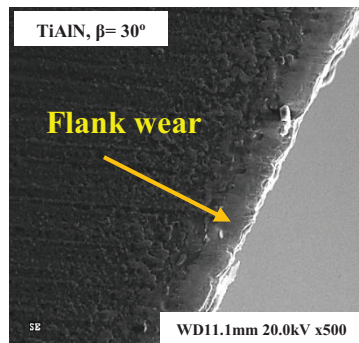
(ก) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย DLC



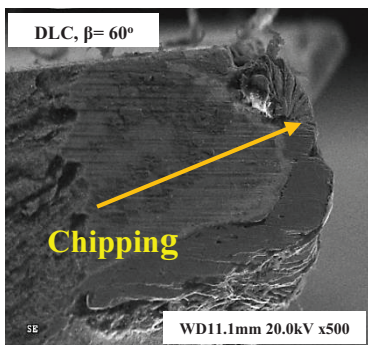
(ข) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย TiAlN



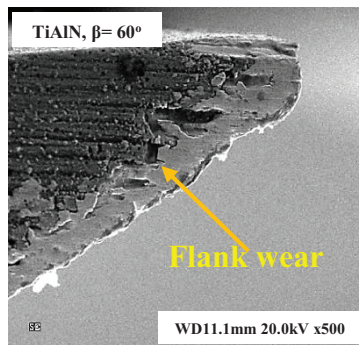
(ค) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย DLC



(ง) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 30°
เคลือบด้วย TiAlN

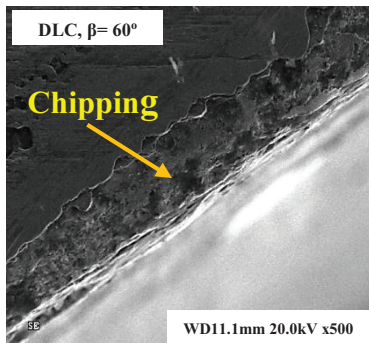


(จ) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย DLC

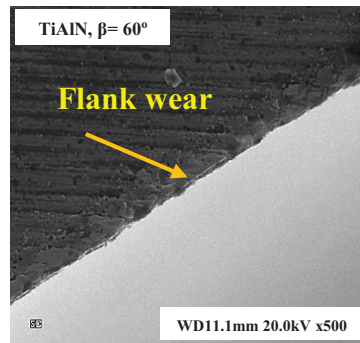


(ช) ปลายคมตัดดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย TiAlN

รูปที่ 6 การสึกหรอของคมตัดดอกกัดที่ตรวจสอบด้วย SEM



(ข) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย DLC



(ฅ) คมตัดด้านข้างดอกกัดมุมเลี้ยว 60°
เคลือบด้วย TiAlN

รูปที่ 6 การสึกหรอของคมตัดดอกกัดที่ตรวจสอบด้วย SEM (ต่อ)

สรุปผลการวิจัย

ดอกกัดมุมเลี้ยวสูงจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นตามเนื่องจากมีปริมาณของพื้นที่แหล่งความร้อนมากกว่าดอกกัดมุมเลี้ยวต่ำ ในขณะที่ความแตกต่างกันของวัสดุเคลือบก็มีผลทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนแตกต่างกันเช่นกัน ดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุ TiAlN จะมีอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะตัดเฉือนต่ำกว่าดอกกัดเคลือบด้วยวัสดุ DLC เนื่องจากสารเคลือบ TiAlN สามารถป้องกันการสึกหรอของคมตัดดอกกัดได้ดีกว่าสารเคลือบ DLC การสึกหรอแบบแตกบิ่นซึ่งเป็นการสึกหรอที่มีความรุนแรงสูงทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นำไปสู่ความล้มเหลวของดอกกัดในการตัดเฉือนจะเกิดขึ้นกับดอกกัดที่เคลือบด้วยวัสดุ DLC กล่าวได้ว่านอกจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณพื้นที่แหล่งความร้อนตามขนาดของมุมเลี้ยวดอกกัดแล้ว ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานมาจากการแพร่กระจายของการสึกหรอแบบแตกบิ่นบนคมตัดดอกกัดในการกัดวัสดุสแตนเลสแบบด้านข้างคมตัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ รหัสทุน 561T212

References

- [1] Muammer, N. and Yakup, Y. (2011). Effect of Cryogenic Cooling in Milling Process of AISI 304 Stainless Steel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. Vol. 21, pp. 72-79. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60680-8

- [2] Cordes, S. E. (2012). Thermal Stability of γ -alumina PVD Coatings and Analysis of Their Performance in Machining of Austenitic Stainless Steels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. Vol. 5, pp. 20-25. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.11.003
- [3] Munoz-Escalona, P., Shokrani, A., and Newman, S. T. (2015). Influence of Cutting Environments on Surface Integrity and Power Consumption of Austenitic Stainless Steel. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. Vol. 36, pp. 60-69. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.013
- [4] Emel Kuram, Babur Ozelik, Mahmut Bayramoglu, Erhan Demirbas, and Bilgin Tolga Simsek. (2013). Optimization of Cutting Fluids and Cutting Parameters During end Milling by using D-optimal Design of Experiments. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 42, pp. 159-166
- [5] Deng Jianxin, Zhou Jiantou, Zhang Hui, and Yan Pei. (2011). Wear Mechanisms of Cemented Carbide Tools in Dry Cutting of Precipitation Hardening Semi-Austenitic Stainless Steels. **Wear**. Vol. 270, Issue 7-8, pp. 520-527. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.006
- [6] Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., and Gey, C. (2005). Hard AlTiN, AlCrN PVD Coatings for Machining of Austenitic Stainless Steel. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 200, Issue 24, pp. 6840-6845. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.030
- [7] Li Chen, Yong Du, Xiang Xiong, Ke K. Chang, and Ming J. Wu. (2011). Improved Properties of Ti-Al-N Coating by Multilayer Structure. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 29, Issue 6, pp. 681-685. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2011.05.001
- [8] Dirk Biermann, Markus Steiner, and Eugen Krebs. (2013). Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. **Procedia CIRP**. Vol. 7, pp. 246-251. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.042
- [9] Sen Lin, Fangyu Peng, Jie Wen, Yizhi Liu, and Rong Yan. (2013). An Investigation of Workpiece Temperature Variation in end Milling Considering Flank Rubbing Effect. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 73, pp. 71-86. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.05.010
- [10] Baowan, P., Saikaew, C., and Wisitsoraat, A. (2017). Influence of Helix Angle on Tool Performances of TiAlN and DLC-Coated Carbide end Mills for Dry Side Milling of Stainless Steel. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 90, Issue 9-12, pp. 3085-3097. DOI: 10.1007/s00170-016-9601-5
- [11] Peckner, D. and Bernstein, I. M. (1977). **Handbook of Stainless Steels**. McGraw-Hill Book Company. New York
- [12] Prengel, H. G., Santhanam, A. T., Penich, R. M., Jindal, P. C., and Wendt, K. H. (1997). Advanced PVD-TiAlN Coatings on Carbide and Cermet Cutting Tools. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 94-95, pp. 597-602. DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00503-3
- [13] Jindal, P. C., Santhanam, A. T., Schleinkofer, U., and Shuster A. F. (1999). Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN Coated Cementedcarbide Tools in Turning. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 17, pp. 163-170. DOI: 10.1016/s0263-4368(99)000086

- [14] James, C., Sung, Ming-Chi Kan, and Michael Sung. (2009). Fluorinated DLC for Tribological Applications. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. Vol. 27, pp. 421-426
- [15] Haruyo Fukui, Junya Okida, Naoya Omori, Hideki Moriguchi, and Keiichi Tsuda. (2004). Cutting Performance of DLC Coated Tools in Dry Machining Aluminum Alloys. **Surface and Coatings Technology**. Vol. 187, pp. 70-76. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.01.014
- [16] Robertson, J. (1999). Deposition and Properties of Diamond Like Carbon. **Materials Research Society Symposium Proceedings**. Vol. 555, pp. 12. DOI: 10.1557/PROC-555-291
- [17] Yunn-Shiuan Liao, Ting-Chang Lin, Cheng-Yu Lai, Yen-Liang Chen, Hao-Hueng Chang, Chun-Pin Lin. (2014). Cutting Performance of Diamond-Like Carbon Coated Tips in Ultrasonic Osteotomy. **Journal of Dental Sciences**. Vol. 9, Issue 1, pp. 63-68. DOI: 10.1016/j.jds.2013.02.014
- [18] Ema, S. and Davies, R. (1989). Cutting Performance of End Mills with Different Helix Angles. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 29, Issue 2, pp. 217-227. DOI: 10.1016/0890-6955(89)90033-3
- [19] Omar, O. E. E. K., El-Wardany, T., and Elbestawi, M. A. (2007). An Improved Cutting Force and Surface Topography Prediction Model in End Milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 47, Issue 7-8, pp. 1263-1275. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.021

การศึกษาการเจริญ การสะสม และการปลดปล่อยธาตุอาหารของแหนแดงที่เลี้ยงด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร

Study on Growth, Nutrients Accumulation and Release from *Azolla* Cultured in Swine Farm Effluent

ศิราภรณ์ ชื่นบาล^{1*} และฐปน ชื่นบาล¹

Siraporn Cheunbarn^{1*} and Tapan Cheunbarn¹

Received: July 28, 2018; Revised: October 8, 2018; Accepted: October 11, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสะสมและการปลดปล่อยธาตุอาหารของแหนแดงที่เพาะเลี้ยงในน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร สำหรับใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงแหนแดงในน้ำทิ้งจากถังย่อยไร้อากาศจากฟาร์มสุกรที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 0 2 4 6 8 และ 10 % เป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการทดลองพบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งและระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง มีผลต่อการเจริญของแหนแดง แหนแดงเจริญได้ดีในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งต่ำ ๆ โดยพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 2 % แหนแดงมีการเจริญสูงสุด มีน้ำหนักแห้ง 16.46 ± 0.8 กรัม/ตร.ม. และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ 0.11 ต่อวัน ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงแหนแดงที่เหมาะสมคือ 2 สัปดาห์ แหนแดงที่เพาะเลี้ยงได้มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเท่ากับ 3.53 0.87 และ 7.43 % ตามลำดับ การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของแหนแดงด้วยการบ่มดินร่วมกับแหนแดง พบว่าแหนแดงสามารถเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินได้ และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้ตลอด 7 สัปดาห์ของการบ่ม โดยเริ่มปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาตั้งแต่ในช่วงสองสัปดาห์แรก ๆ ของการบ่ม สรุปได้ว่าแหนแดงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการพัฒนาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน เนื่องจากสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาได้เร็วและยาวนาน

คำสำคัญ : แหนแดง; การสะสมธาตุอาหาร; การปลดปล่อยธาตุอาหาร; น้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

¹ Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai

* Corresponding Author E - mail Address: siraporn@mju.ac.th

Abstract

This research aims to study the accumulation and the release of nutrients from *Azolla* that cultured in swine wastewater effluent for using as a soil amendment. In this study, *Azolla* were cultivated for 1 month in anaerobic swine wastewater effluent at 0, 2, 4, 6, 8 and 10 % dilutions. The results showed that the concentration of effluent and the duration of culture affected the growth of *Azolla*. *Azolla* could be growth better in low effluent dilutions. At 2 % effluent dilution, *Azolla* was reported as the highest growth with dry weight at $16.46 \pm 0.8 \text{ g/m}^2$ and the relative growth rate at 0.11 d^{-1} . The optimum period for cultivating *Azolla* was 2 weeks. The nutrient concentration of the cultivated *Azolla* of N, P and K were 3.35, 0.87 and 7.43 %, respectively. The study on nutrients release of *Azolla* was determined by incubation of soil mixed with *Azolla*. The results suggested that *Azolla* increased organic materials in soil and released nutrients during 7 weeks of incubation, starting from the first two weeks. In conclusion, *Azolla* is suitable for soil amendment development due to rapid and long- lasting nutrients release.

Keywords: *Azolla*; Nutrient Accumulation; Nutrient Release; Swine Farm Effluent

บทนำ

การเลี้ยงสุกรถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2560 มีเกษตรกรผู้เลี้ยงสุกรทั้งสิ้นจำนวน 180,606 ราย คิดเป็นจำนวนสุกรทั้งสิ้น 10,191,784 ตัว [1] สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้น นิยมใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพหรือถังย่อยไร้อากาศ เพราะนอกจากจะช่วยบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังได้ก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานได้อีกทางหนึ่งด้วย แต่อย่างไรก็ตามน้ำทิ้งที่ผ่านระบบถังย่อยไร้อากาศยังคงมีสารอินทรีย์ แอมโมเนีย และของแข็งแขวนลอยหลงเหลืออยู่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอาจก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้นได้ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเพิ่มเติมก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทำให้เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายที่เพิ่มสูงขึ้นในการบำบัด เป็นเหตุให้ปัญหาเหล่านี้ถูกละเลย อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้เนื่องจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกรนั้นเป็นสารอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำและสาหร่าย โดยพืชน้ำสามารถใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโต และเก็บสะสมให้เป็นชีวมวลที่สามารถนำไปผลิตเป็นปุ๋ยพืชสดหรือวัสดุปรับปรุงดินได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพที่ดีขึ้นและไม่ทำให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติเน่าเสียแล้ว เกษตรกรยังได้ปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดินไว้ใช้แทนการใช้ปุ๋ยเคมีสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์อีกด้วย

แหนแดงเป็นเฟิร์นน้ำ (Water Fern) ขนาดเล็กชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกในนาข้าวเพื่อใช้ในการเพิ่มปริมาณไนโตรเจน โดยนิยมนำมาใช้ทำปุ๋ยพืชสด เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิต เนื่องจากแหนแดงนั้นมีความสัมพันธ์กับสาหร่าย *Anabaena* sp. แบบพึ่งพาอาศัย (Mutualism) ซึ่งสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศ

(Nitrogen Fixation) ทำให้แทนแดงมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูงถึง 2 - 4.5 % ของน้ำหนักแห้ง [2] - [3] แทนแดงสามารถขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถให้ผลผลิตถึง 3 ต้นต่อไร่ ถ้าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม [4] แต่อย่างไรก็ตามแทนแดงนิยมใช้เป็นปุ๋ยพืชสดสำหรับในนาข้าวเท่านั้น ยังมีไดนามาเพาะเลี้ยงและใช้ประโยชน์อย่างจริงจังในรูปของปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน อีกทั้งยังพบว่าแทนแดงสามารถใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรได้ [5] โดยสามารถลดค่าความสกปรกในน้ำทิ้งได้ดีในช่วงระยะเวลาเพียง 3 สัปดาห์ [6] ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้ศึกษาขั้นตอนการเพาะเลี้ยงแทนแดงในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดถึงย่อยไร้อากาศจากฟาร์มเลี้ยงสุกร เพื่อให้ได้แทนแดงที่มีปริมาณของสารอาหารสูงรวมทั้งการปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดง เพื่อสามารถพัฒนาไปสู่การเพาะเลี้ยงแทนแดงเพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินสำหรับทดแทนหรือลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาความเข้มข้นของน้ำทิ้งและระยะเวลาที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงแทนแดง

1. วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำทิ้งจากถังย่อยไร้อากาศฟาร์มสุกร ดังนี้ Nitrate-N, Ammonia-N และ Orthophosphate (Soluble Reactive Phosphorus, SRP) ด้วย Spectrophotometer, BOD₅ ด้วยวิธี Azide Modification Method และ COD ด้วยวิธี Close Reflux Method [7]

2. ศึกษาการเจริญของแทนแดงที่เลี้ยงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร โดยเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) แบ่งเป็น 6 ชุดการทดลอง ชุดละ 3 ข้ำ ในแต่ละชุดการทดลองใช้น้ำทิ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้น 0 %

ชุดการทดลองที่ 2 ความเข้มข้น 2 % ใช้น้ำทิ้ง ปริมาตร 200 มล. ผสมน้ำประปา 9.8 ลิตร

ชุดการทดลองที่ 3 ความเข้มข้น 4 % ใช้น้ำทิ้ง ปริมาตร 400 มล. ผสมน้ำประปา 9.6 ลิตร

ชุดการทดลองที่ 4 ความเข้มข้น 6 % ใช้น้ำทิ้ง ปริมาตร 600 มล. ผสมน้ำประปา 9.4 ลิตร

ชุดการทดลองที่ 5 ความเข้มข้น 8 % ใช้น้ำทิ้ง ปริมาตร 800 มล. ผสมน้ำประปา 9.2 ลิตร

ชุดการทดลองที่ 6 ความเข้มข้น 10 % ใช้น้ำทิ้ง ปริมาตร 1,000 มล. ผสมน้ำประปา 9.0 ลิตร

ในแต่ละชุดการทดลอง ทำการศึกษาในอ่างดินเผา ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 10 ลิตร น้ำหนักแทนแดงเริ่มต้น 12 กรัม ตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งที่มีแสงแดดรำไร เป็นเวลา 1 เดือน เติมน้ำทิ้งที่ระดับความเข้มข้นเท่าเดิมลงในอ่างให้เท่ากับการระเหยในทุกสัปดาห์

3. ทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตแทนแดงและนำมาศึกษาการเจริญเติบโตของแทนแดงทุกสัปดาห์เป็นเวลา 4 สัปดาห์ วิเคราะห์ น้ำหนักแห้ง น้ำหนักสด อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) และระยะเวลาที่เพิ่มเป็น 2 เท่า (Doubling Time)

4. ศึกษาการสะสมธาตุอาหารของแทนแดงทุกสัปดาห์จากผลผลิตของแทนแดงที่เก็บเกี่ยวได้โดยศึกษาไนโตรเจน ด้วยวิธี Kjeldahl Method [8] ฟอสฟอรัส ด้วยวิธี Yellow Method และโพแทสเซียม ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometer [9]

5. ทำการเพาะเลี้ยงแทนแดงด้วยความเข้มข้นน้ำทิ้งและระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้างต้น เก็บเกี่ยวผลผลิตแทนแดงที่ได้และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุอาหารและ C/N Ratio

ศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดง

1. นำผลผลิตแทนแดงที่เพาะเลี้ยงไว้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 - 80 °C เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ ทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม.

2. ทำการเก็บตัวอย่างดินที่มีความลึก 0 - 10 เซนติเมตร จากแปลงนาข้าวในพื้นที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (ชุดดินสันทราย) มาตากจนแห้ง ทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม.

3. ทำการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดง โดยมีการออกแบบทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) และแบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง แต่ละชุดมี 3 ซ้ำ ชุดที่ 1 ไม่ใส่แทนแดง ชุดที่ 2 ดินผสมแทนแดง 0.5 กรัม ชุดที่ 3 ดินผสมแทนแดง 1 กรัม แต่ละชุดการทดลองใช้ตัวอย่างดินบรรจุในกระป๋องพลาสติกขนาด 6 ออนซ์ จำนวน 8 กระป๋อง ๆ ละ 100 กรัม รวมกับแทนแดงให้มีความชื้นเท่ากับ 60 % ความจุอุ้มน้ำ แล้วนำไปบ่มในโถพลาสติกที่ปิดสนิท เป็นเวลา 7 สัปดาห์

4. วิเคราะห์ธาตุอาหารเริ่มต้น และหลังสิ้นสุดในแต่ละสัปดาห์ โดยนำดินตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน โดยวิธี Kjeldahl Method ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ สกัดด้วยน้ำยา Bray II วัดความเข้มด้วย Spectrophotometer โพแทสเซียมที่สกัดได้ สกัดด้วย $\text{IN NH}_4\text{OAC}$ pH 7.0 วัดด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer [10]

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการเปรียบเทียบการเจริญของแทนแดงและความเข้มข้นของธาตุอาหารในแทนแดงที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูล (ANOVA) ในแต่ละชุดการทดลองและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

ศึกษาความเข้มข้นของน้ำทิ้งและระยะเวลาที่เหมาะสมในเพาะเลี้ยงแทนแดง

จากการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง มีคุณสมบัติดังนี้ COD 920 มก./ลิตร และ BOD 260 มก./ลิตร ในขณะที่ค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มสุกรประเภท ข. (จำนวนสุกร ตั้งแต่ 500 - 5,000 ตัว) นั้น COD ไม่เกิน 400 มก./ลิตร และ BOD ไม่เกิน 100 มก./ลิตร [11] จึงนับได้ว่าน้ำทิ้งมีสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก เหมาะสมที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเลี้ยงแทนแดงเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 พบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งมีผลต่อการเจริญของแทนแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แทนแดงสามารถเจริญได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งไม่สูง โดยพบว่าแทนแดงให้ผลผลิตมากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 2 % ในสัปดาห์ที่ 3 ของการเพาะเลี้ยง คิดเป็นผลผลิตของน้ำหนักแห้ง 16.46 ± 0.8 กรัม/ตร.ม. รองลงมา ได้แก่ ที่ระดับความเข้มข้น 0.4 และ 6 % ตามลำดับ ในขณะที่ระดับความเข้มข้น 8 และ 10 % แทนแดงเจริญได้ไม่ดี จากการศึกษาของ Tokhun, N. et al. [6] พบว่าแทนแดงเจริญเติบโตเต็มที่ในระยะเวลา 13 - 15 วันของการเพาะเลี้ยง ซึ่งเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งมากที่สุด

จากผลการทดลองในรูปที่ 1 พบว่า ในสัปดาห์แรกของการเพาะเลี้ยงแทนแดงมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) สูงที่สุดคือที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 2 % โดยมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

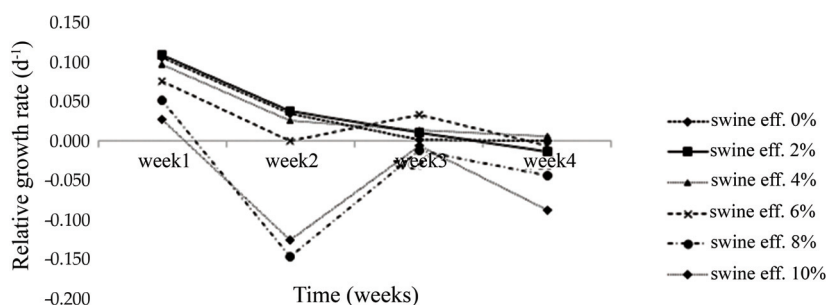
0.110 ต่อวัน รองลงมา ได้แก่ ที่ระดับความเข้มข้น 0.4 และ 6 % ตามลำดับ ในขณะที่ระดับความเข้มข้น 8 และ 10 % แหนแดงมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ต่ำ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารที่มากเกินไปจนเป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตของแหนแดงชะงัก โดยเฉพาะไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ ถ้ามีความเข้มข้นมาก อาจทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้น [12] เป็นเหตุให้ความยาวรากลดลง [13] ระบบรากไม่สามารถนำน้ำและอาหารไปเลี้ยงลำต้นได้ โดยพบว่าเริ่มเป็นสีเหลืองและแห้ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ 8 และ 10 % นั้น แหนแดงมีรากที่สั้นและไม่ค่อยเจริญ ในขณะที่ Singh, P. K. et al. [14] พบว่าถ้าแหนแดงได้รับธาตุอาหารในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้การเจริญของแหนแดงลดลงได้เช่นกัน

แหนแดงสามารถเพิ่มปริมาณเป็น 2 เท่า (Doubling Time) ได้ในระยะเวลา 4 - 5 วัน ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 4 % ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 6.8 และ 10 % ปริมาณของแหนแดงเพิ่มเป็น 2 เท่าที่ระยะเวลามากกว่า 7 วัน ทั้งนี้เนื่องจากแหนแดงมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ต่ำ และมีการตายเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แหนแดงหยุดชะงักการเจริญเติบโตได้เช่นกัน [15]

ตารางที่ 1 น้ำหนักแห้งของแหนแดงที่เลี้ยงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

Swine effluent concentrations (%)	Dry weight (g/m ²)			
	week 1	week 2	week 3	week 4
0	11.24 ± 0.38 ^{ab}	14.41 ± 0.66 ^a	14.63 ± 0.69 ^{ab}	14.50 ± 0.64 ^a
2	11.56 ± 0.22 ^a	15.24 ± 0.62 ^a	16.46 ± 0.80 ^a	15.26 ± 0.74 ^a
4	10.63 ± 0.28 ^b	12.72 ± 0.60 ^b	14.23 ± 0.91 ^b	14.77 ± 0.94 ^a
6	9.07 ± 0.54 ^c	9.15 ± 0.78 ^c	11.23 ± 0.84 ^c	11.15 ± 0.7 ^b
8	7.67 ± 0.68 ^d	2.7 ± 0.64 ^d	2.54 ± 0.69 ^d	1.86 ± 0.45 ^c
10	6.47 ± 0.70 ^e	2.68 ± 0.71 ^d	2.58 ± 0.64 ^d	1.41 ± 0.28 ^c
F-test	**	**	**	**

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแต่ละแถวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



รูปที่ 1 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของแหนแดงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 (ก) พบว่าแทนแดงมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อสูงที่สุดในสัปดาห์แรกของการเพาะเลี้ยง จากเริ่มต้น 2.73 % เป็น 3.26 3.4 3.7 3.42 4.2 และ 4.05 % ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 0 2 4 6 8 และ 10 % ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อจะลดลงเล็กน้อย โดยพบว่าความเข้มข้นของระดับน้ำทิ้ง มีผลต่อการสะสมของปริมาณไนโตรเจนในแทนแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตารางที่ 2) สำหรับการสะสมฟอสฟอรัส ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2 (ข) พบว่าในสัปดาห์แรกของการเพาะเลี้ยง แทนแดงมีปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อสูงที่สุดเช่นกัน จากเริ่มต้น 0.3 % เป็น 0.47 0.67 0.73 0.78 0.83 และ 0.82 % ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 0 2 4 6 8 และ 10 % ตามลำดับ และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย พบว่าความเข้มข้นของระดับน้ำทิ้ง มีผลต่อการสะสมของปริมาณฟอสฟอรัสในแทนแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตารางที่ 2) และสำหรับการสะสมโพแทสเซียม ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2 (ค) พบว่าแทนแดงมีปริมาณโพแทสเซียมในเนื้อเยื่อสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 2 ของการเพาะเลี้ยงจากเริ่มต้น 4.60 % เป็น 6.11 6.41 6.99 7.31 7.26 และ 5.94 % ในระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 0 2 4 6 8 และ 10 % ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มข้นของระดับน้ำทิ้ง มีผลต่อการสะสมของปริมาณฟอสฟอรัสในแทนแดงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตารางที่ 2)

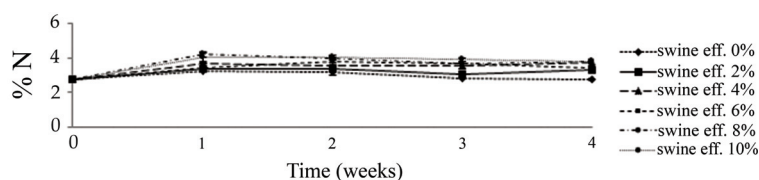
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของน้ำทิ้งสูงขึ้น ปริมาณธาตุอาหารในเนื้อเยื่อของแทนแดงมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการสะสมธาตุอาหารในเนื้อเยื่อของแทนแดงนั้นสอดคล้องกับปริมาณธาตุอาหารที่อยู่ในน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงเป็นสำคัญ [16] อย่างไรก็ตามในบางความเข้มข้นที่พบว่าธาตุอาหารในเนื้อเยื่อแตกต่างกัน โดยเฉพาะในความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10 % บางครั้งพบว่าปริมาณสะสมของธาตุอาหารไม่สูงที่สุด โดยเฉพาะในสัปดาห์แรก ๆ ของการเพาะเลี้ยง เนื่องจากปัญหาการเจริญของแทนแดงที่ไม่ค่อยดีนัก ทำให้รากทำงานได้ไม่ดี จึงอาจส่งผลต่อการสะสมของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อของแทนแดงได้ ผลที่ได้แสดงว่าแทนแดงสามารถดูดซับและสะสมธาตุอาหารไว้ในเนื้อเยื่อได้มากในระยะเวลา 1 - 2 สัปดาห์แรกของการเจริญ เนื่องจากแทนแดงจะมีการดูดซับสารอาหารต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเจริญ ทำให้เกิดการสะสมของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อค่อนข้างมาก แต่หลังจากนั้นปริมาณธาตุอาหารจะลดลงเมื่อเวลานานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแทนแดงมีอายุมากขึ้นและได้ส่งอาหารไปยังต้นใหม่ ๆ ที่เจริญขึ้น ซึ่งกระบวนการแตกต้นอ่อนมีผลต่อการลำเลียงธาตุอาหารที่เคลื่อนย้ายได้ไปสู่ต้นอ่อน [17] และเนื่องจากเมื่อแทนแดงมีอายุมากขึ้นจะได้รับผลกระทบได้ง่ายจากสารอาหารที่มีปริมาณมากเกินไปในน้ำเลี้ยง ในขณะที่แทนแดงที่อายุน้อย ๆ จะไม่ค่อยได้รับผลกระทบ [18] ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณของสะสมธาตุอาหารไว้ในเนื้อเยื่อน้อยลง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่เหมาะสมต่อการเจริญของแทนแดงคือ 2 % ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงคือ 2 สัปดาห์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แทนแดงให้ชีวมวลในรูปน้ำหนักแห้งมาก มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูง มีปริมาณการสะสมของธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในปริมาณสูง และเมื่อนำแทนแดงที่เพาะเลี้ยงได้ไปวิเคราะห์ พบว่าแทนแดงมี C/N Ratio 12.49 ซึ่งใกล้เคียงกับ มูลสุกร มูลควาย และมูลวัว ซึ่งการที่แทนแดงมีค่า C/N Ratio ที่แค่นี้จะทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว ใช้เวลาในการย่อยสลายน้อย ปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดี โดยทั่วไปอัตราส่วน C/N Ratio ตามมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรไม่ควรเกิน 20 [19] แทนแดงที่เพาะเลี้ยงได้นี้มีธาตุอาหารดังนี้ ไนโตรเจน 3.53 % ฟอสฟอรัส 0.87 % โพแทสเซียม 7.43 % ซึ่งแทนแดงที่เพาะเลี้ยงนี้พบว่าจะมีปริมาณธาตุอาหารมากกว่าแทนแดงที่เจริญในธรรมชาติทั่วไปที่มีปริมาณไนโตรเจน 3.3 % ฟอสฟอรัส 0.57 % โพแทสเซียม 1.23 % [20]

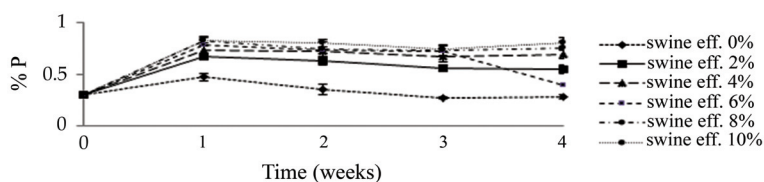
ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยธาตุอาหารในแหนแดงที่เลี้ยงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันในระยะเวลา 1 เดือน

Swine effluent concentrations (%)	Nutrient concentration in <i>Azolla</i> (%)		
	Nitrogen (N)	Phosphorus (P)	Potassium (K)
0	3.0050 ± 0.24 ^a	0.3425 ± 0.09 ^a	5.4150 ± 0.72
2	3.2700 ± 0.16 ^b	0.6025 ± 0.06 ^a	6.0275 ± 0.86
4	3.6275 ± 0.11 ^{bc}	0.7025 ± 0.03 ^b	6.3300 ± 1.04
6	3.5825 ± 0.18 ^c	0.6556 ± 0.18 ^b	6.2825 ± 1.40
8	3.9125 ± 0.23 ^c	0.7625 ± 0.05 ^c	6.0100 ± 1.06
10	3.9550 ± 0.13 ^c	0.7900 ± 0.04 ^c	6.1175 ± 0.94
F	**	**	ns

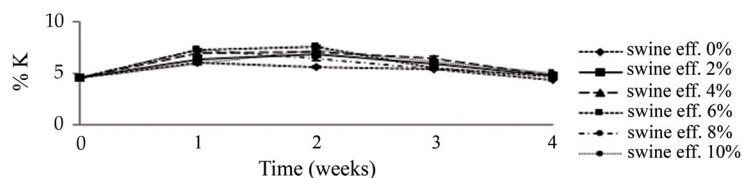
หมายเหตุ ** และ ns หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



(ก) ไนโตรเจน



(ข) ฟอสฟอรัส



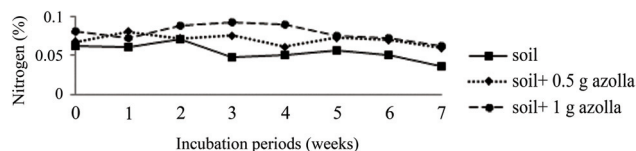
(ค) โพแทสเซียม

รูปที่ 2 ความเข้มข้นของธาตุอาหารในแหนแดงที่เลี้ยงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

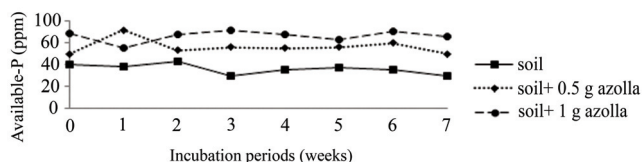
การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3 (ก) - (ค) พบว่าการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน ดินที่ผสมแทนแดงสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดี โดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์แรก ๆ ของการบ่ม และยังสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้ตลอดเวลาของการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากแทนแดงมีการสลายตัวที่รวดเร็ว โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรกของย่อยสลาย แทนแดงสามารถย่อยสลายได้ 50 % ในระยะเวลา 6 สัปดาห์ [21] ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่าย เช่น แป้ง และโปรตีน เป็นองค์ประกอบสำคัญของแทนแดง [22] โดยเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ ทำให้แบคทีเรียและราเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ๆ ของการสลายตัว ในขณะที่ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในแทนแดงนั้นเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนย่อยสลายได้ยาก ทำให้ตลอดระยะเวลา 7 สัปดาห์ของการบ่มแทนแดงยังสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้ โดย 75 % ของไนโตรเจนในแทนแดงจะถูกปลดปล่อยออกมาใน 6-8 สัปดาห์ เมื่อแทนแดงถูกย่อยสลาย [23]

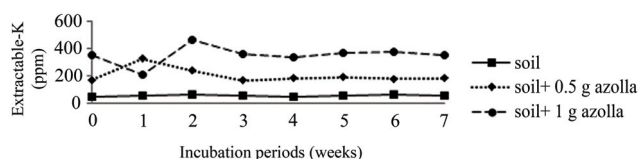
สำหรับดินเพียงอย่างเดียวพบว่าการปลดปล่อยธาตุอาหารได้เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้แสดงว่าดินที่ใช้ในการทดลองยังมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่เนื่องจากเป็นดินนา แต่เนื่องจากจำนวนธาตุอาหารในดินนั้นมีอยู่เป็นจำนวนน้อย ทำให้กิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์เป็นไปได้น้อย ในขณะที่ดินที่ผสมแทนแดงนั้นมีอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มมากขึ้น จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นอนินทรีย์ได้ดี จึงมีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาสู่ดินได้มากกว่า ซึ่งการปลดปล่อยนั้นจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณการของแทนแดงที่ใส่ลงในดิน อย่างไรก็ตามในช่วงของสัปดาห์แรกของการบ่มนั้น ดินที่ผสมแทนแดง 1 กรัม มีการปลดปล่อยธาตุอาหารได้น้อยกว่าดินที่ผสมแทนแดง 0.5 กรัม ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่ในช่วงแรกอาจน้อย จึงใช้เวลาในการปรับตัวและเริ่มทำงานได้ดีหลังจาก 1 สัปดาห์ของการบ่ม ซึ่งจะทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้นกว่าชุดการทดลองที่ใส่ดิน 0.5 กรัม และดินเพียงอย่างเดียวตลอดจนสิ้นสุดการทดลอง



(ก) ไนโตรเจน



(ข) ฟอสฟอรัส



(ค) โพแทสเซียม

รูปที่ 3 การปลดปล่อยธาตุอาหารของแทนแดงในระยะเวลา 7 สัปดาห์ของการบ่ม

สรุปผลการวิจัย

ระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งและระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง มีผลต่อการเจริญของแหนแดง แหนแดงเจริญได้ดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรความเข้มข้น 2 % ระยะเวลาเพาะเลี้ยง 2 สัปดาห์ ซึ่งแหนแดงให้ชีวมวลในรูปน้ำหนักแห้งสูง มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูง มีการสะสมของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อค่อนข้างมาก และเมื่อนำมาบ่มพบว่าแหนแดงสามารถเริ่มปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาตั้งแต่ในช่วงสัปดาห์แรก ๆ ของการบ่ม และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้ตลอด 7 สัปดาห์ของการบ่ม ทำให้มีสารอาหารค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาได้ยาวนาน แหนแดงจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการพัฒนาเป็นวัสดุปรับปรุงดิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย และสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือในการทำวิจัย

References

- [1] Department of Livestock Development. (2017). **The livestock in Thailand 2017**. Bangkok
- [2] Bocchi, S. and Malgioglio, A. (2010). *Azolla-anabaena* as a Biofertilizer for Rice Paddy Fields in the Po Valley, a Temperate Rice Area in Northern Italy. **International Journal of Agronomy**. Vol. 2010, pp. 1-5. DOI: 10.1155/2010/152158
- [3] Watanabe, I. and Ramirez, C. (1990). Phosphorus and Nitrogen Contents of *Azolla* Grown in the Philippines. **Soil Science and Plant Nutrition**. Vol. 36, Issue 2, pp. 319-331. DOI: 10.1080/00380768.1990.10414998
- [4] Wongbung, W. (1994). *Azolla* and Utilization in Rice Field. **Natural Agriculture Journal**. Vol. 11, No. 3, pp. 44-50
- [5] Klomje, P., Homhaul, W., Suwannasri, D., and Phonrit, N. (2015). Swine Wastewater Treatment Using Water fern (*Azolla microphylla*) in Floating Aquatic Plant Wastewater Treatment System. **KKU Science Journal**. Vol. 43, No. 4, pp. 698-714
- [6] Tokhun, N., Boonthai Iwai, C., and Ta-oun, M. (2011). Wastewater Treatment from Piggery farm by Using *Azolla microphylla*. In **Proceedings of the 12th Graduate Research Conference Khon Koen University**. pp. 779-783
- [7] APHA, AWWA and WEF. (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters**. (20th ed). Washington, D.C.: American Public Health Publisher Inc.
- [8] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis of AOAC International**. (17th ed). Maryland: Association of Analytical Communities.

- [9] Soil and Plant Analysis Council. (2000). Chapter 7: Major Cat ion (Potassium, Calcium, Magnesium, and Sodium). In **Soil Analysis Handbook of Reference Methods**. pp. 109-110. New York : CRS Press.
- [10] Land Development Department. (2010). **Handbook of Soil Chemical Analysis Processes**. Bangkok. Document No. OSD-03
- [11] Pollution Control Department. (2005). **Water Quality Standard**. Access (6 August 2018). Available (http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water.html)
- [12] Tylova-Munzarova, E., Lorenzen, B., Brix, H., and Votrubova, O. (2005). The Effects of NH_4^+ and NO_3^- on Growth, Resource Allocation and Nitrogen Uptake Kinetics of *Phragmites australis* and *Glyceria maxima*. **Aquatic Botany**. Vol. 81, pp. 326-342. DOI:10.1016/j.aquabot.2005.01.006
- [13] Jampeetong, A., Sripakdee, T., Khamphaya, T., and Chairuangstri, S. (2016). The Effects of Nitrogen as NO_3^- and NH_4^+ on the Growth and Symbiont (*Anabaena azollae*) of *Azolla pinnata* R. Brown. **Chiang Mai University Journal of Natural Sciences**. Vol. 15, No. 1, pp. 11-20. DOI: 10.12982/CMUJNS.2016.0002
- [14] Singh, P. K., Sing, D. P., and Sing, R. P. (1992). Growth, Acetylene Reduction Activity, Nitrate Uptake and Nitrate Reductase Activity of *Azolla caroliniana* and *Azolla pinnata* at Varying Nitrate Levels. **Biochemie and Physiologie der Pflanzen**. Vol. 188, Issue 2, pp. 121-127. DOI: 10.1016/S0015-3796(11)80019-3
- [15] Forni, C., Chen, J., Tancioni, L., and Caiola, M. G. (2001). Evaluation of the Fern *azolla* for Growth, Nitrogen and Phosphorus Removal from Wastewater. **Water Research**. Vol. 35, No. 6, pp. 1592-1598
- [16] Costa, M. L., Santos, M. C., and Carrapiç, F. (1999). Biomass Characterization of *Azolla filiculoides* Grown in Natural Ecosystems and Wastewater. **Hydrobiologia**. Vol. 415, pp. 323-327. DOI: 10.1023/A:1003824426183
- [17] Prakobmee, A., Isarangkool, Na Ayutthaya S., and Techawongstien, S. (2014). Effect of Leaves Age and Leaves Position on Macronutrients in Leaves of Rubber Tree Clone RRIM 600. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 42, Supp 1, pp. 180-185
- [18] Maejima, K., Kitoh, S., Uheda, E., and Shiomi, N. (2001). Response of 19 *Azolla* Strains to a High Concentration of Ammonium Ions. **Plant and Soil**. Vol. 234, Issue 2, pp. 247-252. DOI: 10.1023/A:1017912613526
- [19] Department of Agriculture announced in the organic fertilizer criteria B. E. 2557. (2014, 12, February). **Government Gazette**. Suppl. 29, Vol. 131, pp.4
- [20] Treeamnuk, T. (2014). **A Study on Appropriate Approaches for Integrated Management of Organic Fertilizer Production**. Research Report. Nakhorn Ratchasima: Suranaree University of Technology

- [21] Cheunbarn, S., Jaruthanakul, W., Cheunbarn, T., and Sillapawattana, P. (2017). Decomposition of Azolla and Nitrogen Concentration Changing. In **Proceedings of the Maejo University Annual Conference 2017**. pp. 139-147. Chiang Mai
- [22] Wongbun, V. (2551). Azolla and Utilization in Rice Field. **Agricultural Nature**. Vol. 3, pp. 44-50
- [23] Singh, P. K. and Sing, D. P. (1990). Azolla and Rice Cultivation. In **Biofertilizers**. Somani, L. L., S. C. Bhandari, S. C., Saxena, S. N. and Vgas, K. K., eds. pp. 39-65. Jodhpur: Scientific Publishers

ผลของการหมักฟางข้าวด้วยยูเรียร่วมกับฝักจามจูรีบดหมักต่อการเพิ่มคุณภาพฟางข้าวและลดระดับของอะฟลาทอกซิน B1 (AFB1) โดยวิธี *In vitro* Gas Production Technique

Effect of Urea Treated Rice Straw in Combination with Fermented Ground *Samanea Saman* Pods on Quality of Rice Straw and a Reduction of Aflatoxin B1 (AFB1) Level Using *In vitro* Gas Production Technique

อรอนงค์ พวงชมพู¹ จุฬาสินี แมนสทธิ¹ มิ่งขวัญ อุ่นสำโรง¹ สุรรัตน์ ศรีริม¹ ชัยณรงค์ ขาวทอง¹ และพิลาสลักษณ์ ปานประเสริฐ^{1*}

Onanong Pongchompu¹ Julasinee Mansatith¹ Mingquan Unsumrong¹ Sureerat Sririmoh¹ Chainarong Kaowthong¹ and Pilasrak Panprasert^{1*}

Received: June 4, 2018; Revised: October 22, 2018; Accepted: October 23, 2018

บทคัดย่อ

การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มคุณภาพของฟางข้าวปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B1 (AFB1) ด้วยยูเรียและฝักจามจูรีบดหมัก (GSSF) ต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ในกระเพาะรูเมนโดยวิธี *In vitro* Gas Technique จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการหมักฝักจามจูรีบดร่วมกับจุลินทรีย์กลุ่มแล็กติกที่ได้จากนมเปรี้ยวพร้อมดื่มทำการหมักเป็นระยะเวลา 0 3 5 7 และ 14 วัน พบว่ามีจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดโดยวิธีนับด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก ($P < 0.05$) และองค์ประกอบทางเคมีของฝักจามจูรีบดหมักพบว่า ปริมาณ DM อยู่ในช่วง 48-49 % ($P > 0.05$) และโปรตีนหยาบ เพิ่มขึ้นตามจำนวนวันหมัก ($P < 0.05$) ส่วนปริมาณของอะฟลาทอกซิน (ppb) หลังการหมักฟางข้าวร่วมกับฝักจามจูรีบดหมักอย่างเดียว มีค่าลดลงตามจำนวนวันหมักที่เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) นอกจากนั้นค่าโปรตีนหยาบในฟางที่หมักด้วยยูเรียและฝักจามจูรีบดหมัก ในวันที่ 5 และ 7 มีค่าสูงกว่า ฟางหมักด้วยฝักจามจูรีบดหมักอย่างเดียว ($P < 0.05$) สำหรับความสามารถในการย่อยได้ในโคเนื้อโดยใช้วิธี *In vitro* Gas Technique ของฟางข้าว

¹ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

¹ Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus

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

ที่หมักด้วยยูเรียและฝักจามจุรีคั้นหมัก มีความสามารถในการย่อยได้มากกว่าฟางที่หมักด้วยฝักจามจุรีคั้นหมักอย่างเดียว ($P < 0.05$) รวมทั้งปริมาณของอะฟลาทอกซิน (ppb) ในน้ำรูเมนหลังการบ่มที่ 0 5 16 และ 24 ชั่วโมง มีค่าลดลงตามชั่วโมงการบ่มที่เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) และความแปรปรวนของการลดลงของอะฟลาทอกซินภายในทรีทเมนต์ เมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ฟางข้าว; ยูเรีย; ฝักจามจุรี; อะฟลาทอกซิน

Abstract

This experiment aims to determine the effect of enhancement quality of rice straw contaminated with aflatoxin B1 (AFB1) by treated with urea and ground *Samanea saman* pods fermented (GSSF) on rumen degradability using in vitro gas technique. The results showed that when fermented ground *Samanea saman* pods with lactic acid bacteria from yogurt drink, 0, 3, 5, 7 and 14 days, the number of total bacteria by microscopic count increased over the period of fermentation ($P < 0.05$). The dry matter content as in the range 48 - 49 % ($P > 0.05$) and protein were increased by the number of days fermentation ($P < 0.05$). The amount of aflatoxin (ppb) after fermented rice straw with 5 % GSSF only was decreased with the number of days of fermentation ($P < 0.05$). The crude protein content in rice straw fermented with 2.5 % urea and 2.5 % GSSF of 5 and 7 days of fermentation were higher than 5 % GSSF ($P < 0.05$). The rumen degradability in beef cattle using in vitro gas technique of rice straw fermented with 2.5 % urea and 2.5 % GSSF were higher than fermented with 5 % GSSF ($P < 0.05$). The amount of aflatoxin (ppb) in rumen fluid after incubation at 0, 5, 16 and 24 h decreased with increasing incubation time ($P < 0.05$) and variability reduction of Aflatoxin in treatment when the incubation time increases.

Keywords: Rice Straw; Urea; *Samanea saman* pods; Aflatoxin

บทนำ

การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าวให้ดีขึ้นสามารถทำได้ในหลาย ๆ วิธี เช่น การใช้วิธีทางกายภาพ โดยการสับ การใช้วิธีทางเคมีโดยการหมักด้วย สารอัลคาไลน์ ยูเรีย หรือวิธีทางชีวภาพ เช่น การใช้น้ำหมักชีวภาพ น้ำหมักยีสต์ [1] - [3] สัตว์เคี้ยวเอื้องเป็นสัตว์กลุ่มหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องต่อภาวะเสี่ยงเนื่องจากสารพิษที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบอาหารสัตว์ และสามารถส่งผ่านสารพิษเหล่านั้นผ่านทางน้ำนมหรือเนื้อได้รวมถึงผลต่อสุขภาพของสัตว์ และผลเสียทางเศรษฐกิจ [4] - [5] ถึงแม้ว่าสัตว์เคี้ยวเอื้องจะมีศักยภาพในการกำจัดพิษหรือลดพิษจากสารพิษ โดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักก็ตาม [6] - [7] แต่ในบรรดาสารพิษต่าง ๆ aflatoxin ก็ยังเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการผลิตน้ำนม โดยเกิดการเปลี่ยนเป็นอนุพันธ์ aflatoxin M1 (AFM1)

ในน้ำมัน [8] และสามารถส่งผลเสียไปถึงผู้บริโภคน้ำมันที่มีการปนเปื้อนของ aflatoxin นอกจากนั้นแล้ว aflatoxin สามารถพบได้ในหลาย ๆ รูปแบบในอาหารสัตว์ ได้แก่ aflatoxin B1, B2, G1 และ G2 ซึ่ง aflatoxin B1 (AFB1) เป็นตัวที่มีบทบาททางชีวภาพและความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ โดยเฉพาะการเป็นสารก่อมะเร็ง [9] - [10] สารพิษอะฟลาทอกซินสามารถทำลายระบบภูมิคุ้มกันทำให้ความต้านทานโรคต่ำเกิดโรคแทรกซ้อนได้ง่าย เช่น โรคเต้านมอักเสบในแม่โค แม้จะได้รับวัคซีนก็ไม่สามารถสร้างภูมิคุ้มกันได้เต็มที่ [11] ดังนั้นถ้ามีการจัดการอาหารที่ดี ก็จะสามารถช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนเนื่องจากการสร้าง aflatoxin จากเชื้อรากลุ่ม *Aspergillus* [12] ในอาหารสัตว์ จากแนวทางการนำน้ำหมักชีวภาพมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอาหารสัตว์ ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมักนั้นมีหลากหลาย จามจุรี (*Samanea saman*) เป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นไม้ขนาดใหญ่ที่ขึ้นอยู่ทั่วไปในประเทศไทย และประเทศเขตร้อน ออกดอกและติดฝักในช่วงฤดูแล้ง โดยในฝักจามจุรีมีองค์ประกอบที่เป็นน้ำตาลสูง รวมถึงมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่ระดับ 18.1 % [13] - [14] และได้มีการนำมาใช้เป็นแหล่งของพลังงานและโปรตีนในอาหารสัตว์อย่างแพร่หลาย รวมทั้งเกษตรกรโดยทั่วไปก็มีการเก็บฝักจามจุรี มาให้โคกินเป็นเวลานานแล้ว การนำฝักจามจุรีมาบดและทำน้ำหมักฝักจามจุรีร่วมกับการใช้ยูเรียเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของฟางข้าว และช่วยป้องกันอันตรายจากการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน จึงเป็นการสร้างทางเลือกให้กับเกษตรกรในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเลี้ยงโค กระบือ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มคุณภาพของฟางข้าวปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B1 (AFB1) ด้วยยูเรียและฝักจามจุรีบดหมัก (GSSF) ต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ในกระเพาะหมักโดยวิธี *In vitro* Gas Technique

วิธีดำเนินการ

การเตรียมฝักจามจุรีบดหมัก (GSSF)

ทำการเตรียมน้ำหมักขั้นที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยวของผู้ผลิตทางการค้าที่ยังไม่หมดอายุ: กากน้ำตาล : น้ำ คือ 1 : 2 : 3 ใช้เวลาในการหมัก 3 วัน ในภาชนะปิดที่ไม่มีอากาศเมื่อทำการหมักครบ 3 วัน นำน้ำหมักที่ได้ มาหมักร่วมกับฝักจามจุรีในสัดส่วน น้ำหมัก : ฝักจามจุรีบด : น้ำ เป็น 1 : 25 : 25 แล้วทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 0 3 5 7 และ 14 วัน เพื่อนำไปนับเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำหมักโดยวิธี Microscopic Direct Count และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ วัตถุแห้ง (Dry Matter, DM) โปรตีนหยาบ (Crude Protein, CP) เถ้า (Ash) ตามวิธีการของ [15] และวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF) และ Acid Detergent Fiber (ADF) ตามวิธีการของ [16]

การเตรียมน้ำฟางหมักด้วยยูเรียและฝักจามจุรีบดหมัก

นำฟางข้าวมาทำการสับให้มีขนาดประมาณ 3-5 cm หลังจากนั้นนำมาทำการหมัก โดยมีส่วนประกอบของฟาง 1 กิโลกรัม น้ำ 1 ลิตร ผสมกับสารมาตรฐาน AFB1 (Aflatoxin B1 solution 20 µg/mL in methanol, analytical standard, 44647-U SUPELCO) โดยมีความเข้มข้นสุดท้าย 100 ppb เมื่อผสมกับน้ำ 1 ลิตร และใส่ส่วนผสมยูเรียและฝักจามจุรีบดหมัก โดยในส่วนของสารเคมีทั้งหมดนั้น เป็นการนำฟางข้าวมาผสมกับ AFB1 แล้วมาผสมกับสารละลายเพื่อทำการหมักที่ระดับ 5 % ของฟางข้าว โดยสารละลายที่ทำการหมักนั้นมีส่วนผสมของยูเรียและน้ำหมักฝักจามจุรีบด และทำการหมักเป็นระยะเวลา 0 3 5 และ 7 วัน โดยจัดเป็นทรีทเมนต์ ดังนี้

Ufd 0	=	ยูเรีย	2.5 %	:	น้ำหมัก	2.5 %	หมัก 0 วัน
Ufd 2	=	ยูเรีย	2.5 %	:	น้ำหมัก	2.5 %	หมัก 3 วัน
Ufd 3	=	ยูเรีย	2.5 %	:	น้ำหมัก	2.5 %	หมัก 5 วัน
Ufd 4	=	ยูเรีย	2.5 %	:	น้ำหมัก	2.5 %	หมัก 7 วัน
Fd 0	=	ยูเรีย	0 %	:	น้ำหมัก	5 %	หมัก 0 วัน
Fd 3	=	ยูเรีย	0 %	:	น้ำหมัก	5 %	หมัก 3 วัน
Fd 5	=	ยูเรีย	0 %	:	น้ำหมัก	5 %	หมัก 5 วัน
Fd 7	=	ยูเรีย	0 %	:	น้ำหมัก	5 %	หมัก 7 วัน

โดยทรีเพนทที่ศึกษาเป็นแบบ Combination และทำการลุ่มเก็บตัวอย่างฟางข้าวที่ได้จากการหมักร่วมกับยูเรียและฝักจามจุรีคหมัก นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ วัตถุแห้ง (Dry Matter, DM) โปรตีนหยาบ (Crude Protein, CP) เถ้า (Ash) ตามวิธีการของ [15] และวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF) และ Acid Detergent Fiber (ADF) ตามวิธีการของ [16] และทำการวิเคราะห์หาอะฟลาทอกซิน โดยวิธี Enzyme-Linked Immunosorbent Assay ในรูปแบบการแข่งขันแบบตรง (Direct Competitive) ด้วยชุดทดสอบ อะฟลาทอกซิน (91 test/กล่อง; Higher Enterprises Co. Ltd.) Limit of detection = 0.4 ppb อ่านผลทดสอบด้วยเครื่อง Micro Plate Reader (ASYS, UVM 340, version 1.8.0.2, Biochrome Ltd.)

การศึกษาการย่อยได้ในกระเพาะรูเมนโดยวิธี *In vitro* Gas Technique

ทำการลุ่มเก็บตัวอย่างของเหลวในกระเพาะหมักโคเนื้อเจาะกระเพาะที่ได้รับอาหารหยาบคือ ฟางข้าวแบบให้กินเต็มที่ และอาหารข้น 12 % โปรตีน ที่ 1 % ของน้ำหนักตัว เลี้ยงในคอกขังเดี่ยว และมีน้ำสะอาดให้กินตลอดเวลา โดยทำการลุ่มเก็บที่ชั่วโมงที่ 0 หลังการให้อาหาร หลังจากนั้นนำมาศึกษาการย่อยได้ ดัดแปลงตามวิธีของ [17] และทำการบ่มที่เวลา 0 3 5 8 16 24 48 และ 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 39 °C และทำการวัดผลผลิตแก๊สที่เวลาต่าง ๆ ของการบ่ม และนำค่าผลผลิตแก๊สมาคำนวณหาค่าความสามารถในการย่อยได้ตามสมการของ [18]

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Analysis of Variance (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ CRD โดยใช้ Proc GLM [19] และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปัจจัยทดลอง โดยวิธี Duncan's Multiple Range test [20]

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลจากการหมักฝักจามจุรีคหมัก พบว่าเมื่อทำการผสมน้ำหมักในวันที่ 0 ทำการนับเชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 20×10^{12} cell/ml ดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นพบว่าปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก และทำการเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้ายในวันที่ 14 โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์มากที่สุด ($P < 0.05$) และสังเกตพบว่า เมื่อทำการหมักฝักจามจุรีค ตั้งแต่วันที่ 5 เป็นต้นไปจะมีกลิ่นฉุนอย่างรุนแรง ซึ่งอาจสอดคล้องกับรายงานอื่น ๆ ที่พบว่า มีสารประกอบ (Secondary Compound) ในผลและเมล็ดของฝักจามจุรี เช่น Pitecolobina เป็นประเภท

ของสารอัลคาลอยด์ (Alkaloid) แทนนินส์ (Tannins) แซปโปนินส์ (Saponins) สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogenous Compounds) กลูโคไซด์ (Glucosides) เรซินส์ (Resines) และมิวซิเลจ (Mucilages) [21] - [23] ที่อาจก่อให้เกิดกลิ่นจืด เมื่อระยะเวลาในการหมักเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้วพบว่าฝักจามจุรีมีคุณค่าทางโภชนาการสูงสามารถนำมาเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14], [21], [24]

ตารางที่ 1 Total number of bacteria cells counted of GSSF by direct count using a counter chamber on 0, 3, 5, 7 and 14 days of fermentation

X 10 ¹²	0 day	3 day	5 day	7 day	14 day	SEM	Pr>F
Bacteria	2.00 ^a	6.33 ^a	25.66 ^b	25.33 ^b	47.22 ^c	38.43	0.0001

^{abc} Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM = Standard Error of the Mean

จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 เมื่อทำการเก็บตัวอย่างฝักจามจุรีบดหมักตามวันของการหมัก พบว่าฝักจามจุรีบดไม่ถูกย่อยสลายทั้งหมด ทำให้ค่าวัตถุแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 48 - 49 % และพบว่าค่าโปรตีนเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ [23] และบ่งชี้ว่าผลจากสารประกอบที่มีอยู่ในฝักจามจุรี เช่น แทนนินส์ และแซปโปนินส์ ไม่รบกวนการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรีย แต่ในส่วนของการเชื้อรา [25] ได้ทำการทดลองเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Aspergillus flavus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารประกอบจากเปลือกถั่ววอลนัท ได้แก่ Hydrolysable Tannins, Flavonoids และ Phenolic Acids พบว่าสามารถลดสารอะฟลาทอกซินได้ถึง 99.8 % โดยรายงานว่าการเพิ่มของสารอนุมูลอิสระของสารประกอบเหล่านี้เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์เชื้อรา ทำให้มีผลยับยั้งในการสร้างและสะสมอะฟลาทอกซินของเชื้อรา ส่วนค่าองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีรายงานว่า ฝักจามจุรีมีค่าโปรตีนอยู่ในช่วง 14.0 - 24.7 % [14], [26] - [27] ดังนั้นสารแทนนินส์ยังอยู่ในระดับที่จุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียยังสามารถเจริญได้ [28]

ตารางที่ 2 Chemical composition of GSSF on 0, 3, 5, 7 and 14 days of fermentation (%DM)

Chemical composition (%DM)	3 day	5 day	7 day	14 day	SEM	Pr>F
DM	49.58	49.25	48.34	49.11	9.87	0.9664
ASH	4.26	5.66	6.02	5.66	1.82	0.4446
CP	10.22 ^a	12.34 ^{ab}	14.22 ^{cb}	16.76 ^c	1.92	0.0025
NDF	51.00	48.33	43.00	42.66	59.16	0.5044
ADF	39.33	32.00	31.33	33.33	11.00	0.0640

^{abc} Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM = Standard Error of the Mean. DM = Dry Matter, CP = Crude Protein, ADF = Acid Detergent Fiber, NDF = Neutral Detergent Fiber

ตารางที่ 3 พบว่าปริมาณของอะฟลาทอกซิน (ppb) หลังการบ่มฟางข้าวร่วมกับน้ขหมัก ในวันที่ 3 5 และ 7 ในกลุ่มที่หมักร่วมกันระหว่างยูเรียและฝักจามจุรีบนหมัก มีค่าลดลงตามจำนวนวันหมักที่เพิ่มขึ้น ($P > 0.05$) โดยที่กลุ่มที่หมักด้วยฝักจามจุรีบนหมักอย่างเดียวมีค่าลดลงตามจำนวนวันหมักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า จุลินทรีย์จากอาหารหมักสามารถลดปริมาณของอะฟลาทอกซินได้ โดยส่วนหนึ่งนี้นันคือกลุ่มแลคติกแอซิด แบคทีเรีย (Lactic Acid Bacteria, LAB) เนื่องจากเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นกลุ่ม Starter ของการหมักในการทดลองครั้งนี้ ดังจะเห็นได้จากระดับของอะฟลาทอกซินลดลงตามจำนวนวันหมัก และกลุ่มที่หมักด้วยฝักจามจุรีบนหมักเพียงอย่างเดียวสามารถลดอะฟลาทอกซินได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ Lactic Acid Bacteria (LAB) สามารถจับกับอะฟลาทอกซินได้โดยใช้เทคนิค ELISA และ HPLC ในการทดสอบปริมาณของอะฟลาทอกซินที่ไม่ถูกจับโดย LAB [29] - [31] นอกจากนี้รายงานของ [32] - [33] พบว่า pH มีผลต่อความสามารถในการสร้างสารเมแทบอไลต์ (Metabolite) ของ LAB ในการเป็นสารยับยั้งเชื้อรา (Antifungal) โดยจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อมี pH ต่ำ ซึ่งการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับที่กล่าวมา คือ ในส่วนของทรีทเมนต์ที่มียูเรียเป็นส่วนผสมในการหมักนั้น เมื่อเกิดการหมักโดยจุลินทรีย์จะได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนีย และแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ [34] ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างทำให้ pH อาจสูงกว่ากลุ่มที่หมักด้วยน้ำหมักอย่างเดียว [30], [35] - [36] โดยรายงานของ [37] พบว่าความแข็งแรงในการจับกับอะฟลาทอกซินของแบคทีเรียนั้นมีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของ Peptidoglycans และชนิดของอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบ อีกทั้งความเข้มข้นของจำนวนเซลล์ของ LAB ก็มีผลต่อความสามารถในการจับกับอะฟลาทอกซิน [38] รายงานว่าที่ความเข้มข้น 10^8 CFU/ml มีประสิทธิภาพในการลดลงของทอกซินอย่างชัดเจน และพบว่าจุลินทรีย์สามารถเข้าจับกับทอกซินได้ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ของการหมักและพบการลดลงอย่างชัดเจนหลังการหมักที่ 24 ชั่วโมง [39] กล่าวว่าการลดลงของอะฟลาทอกซินเกิดจากการใช้กลไกการจับด้วยพันธะโควาเลนต์กับ AFB1 โดย LAB และการใช้คุณสมบัติ Hydrophobic Pockets บนผนังเซลล์ของแบคทีเรีย [30], [40]

ตารางที่ 3 Concentration (ppb) of aflatoxin after incubation with fermented rice straw

	3 day	5 day	7 day	SEM	Pr>F
UF	53.85	45.24	35.25	18.74	0.0531
F	49.33 ^a	34.91 ^b	20.25 ^c	13.66	0.0102

^{abc} Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM = Standard Error of Mean, UF = ยูเรีย 2.5 % : GSSF 2.5 %, F = urea 0 % : GSSF 5 %

ตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าวัตถุแห้ง พบว่าในฟางข้าวสับที่หมักด้วยยูเรียและฝักจามจุรีบนหมัก (UF) มีค่าอยู่ในช่วง 49.2 - 53.2 % ในขณะที่ฟางสับหมักด้วยฝักจามจุรีบนหมัก (Fd) มีค่าวัตถุแห้งอยู่ในช่วง 53.5 - 56.5 % ซึ่งมีค่าสูงกว่า ($P > 0.05$) อาจเนื่องมาจากส่วนวัตถุแห้งของฝักจามจุรีบนหมักแต่ในส่วนค่าโปรตีนหยาบพบว่า ฟางที่หมักด้วยยูเรียและฝักจามจุรีบนหมัก UFd5, UFd7 มีค่าสูงกว่า ($P < 0.05$) ฟางสับหมักด้วยฝักจามจุรีบนหมัก (Fd) ทั้งนี้เนื่องจากมียูเรียเป็นส่วนผสม จึงทำให้มีปริมาณไนโตรเจนอยู่สูงในทรีทเมนต์ และไนโตรเจนส่วนหนึ่งถูกจุลินทรีย์ นำไปใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ส่งผลให้

เพิ่มขึ้นของค่าโปรตีนหยาบ ในส่วนของค่า NDF และ ADF มีการลดลงตามวันหมักที่เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของ Ufd แต่เมื่อพิจารณาในกลุ่มของฝักจามจูริบคหมัก (Fd) พบว่ามีค่าต่ำกว่า Ufd0 Ufd3 Ufd5 ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับ Ufd7 ($P > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากผลของการแตกตัวของยูเรียได้เป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างมีผลทำให้เยื่อใยของฝักจามจูริมีความอ่อนนุ่ม จุลินทรีย์สามารถเข้าย่อยสลายได้ง่าย รวมถึงผลเนื่องมาจากกรดที่ได้จากการหมักของจุลินทรีย์ที่ทำให้เยื่อใยสามารถถูกย่อยสลายมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามฟางข้าวที่หมักด้วยฝักจามจูริบคหมัก (Fd) นั้นไม่ได้ถูกกระทบโดยจำนวนวันหมักที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของส่วนที่ไม่ถูกย่อยจากกระบวนการหมักของฝักจามจูริบคที่ใช้ในการหมักฟางข้าว ซึ่งมีทั้งส่วนเปลือก และส่วนเมล็ดที่มีเปลือกแข็ง อีกทั้งปริมาณกรดที่เกิดจากการหมักของจุลินทรีย์อาจมีจำนวนไม่มากพอสำหรับการทำให้เยื่อใยของเส้นฟางมีความเหมาะสมต่อการเข้าย่อยของจุลินทรีย์ โดยที่ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ใช้ยูเรียเพื่อเพิ่มโปรตีนหยาบในฟางข้าว ร่วมกับฝักจามจูริบคหมัก และการเพิ่มขึ้นของเซลล์จุลินทรีย์ เปรียบเทียบกับการใช้น้ำหมักอย่างเดียวในการเพิ่มโปรตีนและจุลินทรีย์ [41] รายงานว่า การหมักฟางด้วยยูเรีย 5 % สามารถเพิ่มโปรตีนหยาบและปริมาณการกินได้ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง รวมถึงการใช้น้ำหมักชีวภาพ น้ำหมักยีสต์ [1], [3] ช่วยปรับปรุงคุณภาพฟางข้าวได้

ตารางที่ 4 Chemical composition of rice straw treated with urea and GSSF (%DM)

	Ufd0	Ufd3	Ufd5	Ufd7	Fd0	Fd3	Fd5	Fd7	SEM	Pr>F
DM	49.21	50.46	53.21	52.78	53.57	56.48	56.18	53.55	6.93	0.2154
ASH	4.64 ^a	5.34 ^{bc}	4.54 ^a	4.57 ^a	4.92 ^{ab}	5.81 ^c	5.66 ^c	5.74 ^c	0.04	0.0008
CP	7.05 ^{ab}	7.47 ^{ad}	7.93 ^{cd}	8.33 ^c	6.32 ^c	6.51 ^{be}	6.56 ^{be}	6.98 ^{ab}	0.06	0.0004
NDF	61.31 ^a	56.18 ^b	52.75 ^c	44.17 ^{de}	42.16 ^c	44.22 ^{de}	46.23 ^d	43.66 ^c	0.86	0.0001
ADF	55.29 ^a	50.78 ^{ab}	46.27 ^{abc}	45.74 ^{bc}	42.27 ^{bc}	42.27 ^{bc}	42.73 ^{bc}	39.64 ^c	14.89	0.0271

abcde Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM = Standard Error of Mean, DM = (Dry Matter), ASH = Ash, CP = (Crude Protein), ADF = (Acid Detergent Fiber), NDF = (Neutral Detergent Fiber), Ufd0 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 0 day of fermentation, Ufd3 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 3 days of fermentation, Ufd5 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 5 days of fermentation

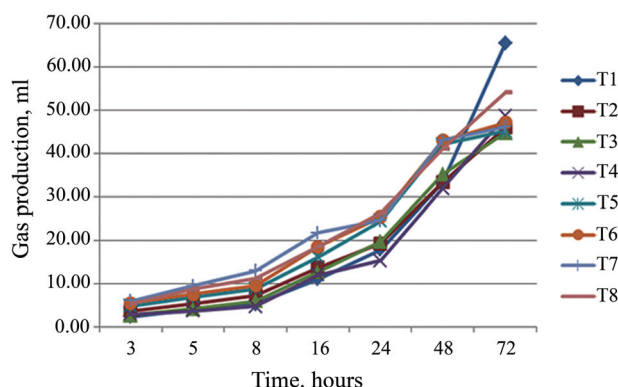
ตารางที่ 5 แสดงค่าผลผลิต และรูปแบบจลนศาสตร์ พบว่า ณ เวลาที่ 0 ของการบ่ม (a) มีค่าอยู่ในช่วง 0.27 - 2.67 ($P > 0.05$) เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่ม Ufd พบว่าค่า a ลดลงตามวันหมักที่เพิ่มขึ้น ($P > 0.05$) ในขณะที่กลุ่ม Fd กลับพบว่า ค่า a เพิ่มขึ้น ตามวันหมักที่เพิ่มขึ้น ($P > 0.05$) อาจเนื่องมาจากในกลุ่มของ Ufd นั้นมีสัดส่วนของฝักจามจูริบคหมักน้อยกว่ากลุ่ม Fd เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบโปรตีนคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยสลายง่ายที่มีมากในกลุ่ม Fd และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า b ซึ่งเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ในน้ำหมัก พบว่าเมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มของ Ufd ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) เป็นที่น่าสังเกตว่า Fd7 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบในกลุ่ม Fd อาจเป็นไปได้เนื่องจากเวลาหมักที่มากขึ้น สารประกอบ (Secondary Compound) ที่มีอยู่ในฝักจามจูริบางชนิดที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์รุ่มนั้นมีปริมาณลดลง และ

เมื่อพิจารณาค่า $a+b$ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการย่อยได้เป็นไปในทางเดียวกับค่า b จากข้อสังเกตที่ว่า สารประกอบ (Secondary Compound) ที่มีอยู่ในฝักจามจุรี เช่น แทนนินส์ แซปโพนินส์ และสารอื่น ๆ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นช้า ๆ ในช่วงเวลาที่ 3 - 5 ของการบ่ม และจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลาที่ 8 ของการบ่ม รูปที่ 1 นอกจากนั้นแล้ว เนื่องจากอาหารมีเยื่อใยสูงจึงทำให้การย่อยได้เกิดขึ้นช้า สอดคล้องกับ [27] รายงานว่า เมื่อทำการหมักเศษเหลือจากมันสำปะหลัง (Cassava Waste) ร่วมกับ *Aibizia Saman* Pod พบว่าเมื่อศึกษาในระบบ *In vitro* Gas Technique ให้ค่าปริมาณแก๊สดำเนินจากการย่อยได้ของ NDF และ ADF ต่ำ รวมถึงผลจากสารประกอบแทนนินส์ และแซปโพนินส์ ที่ไปขัดขวางการย่อยได้ของอาหาร

ตารางที่ 5 *In vitro* gas production characteristics of the studied rice straw treated with urea and GSSF

	Ufdo	UFd3	UFd5	UFd7	Fd0	Fd3	Fd5	Fd7	SEM	Pr>F
a	1.09	0.99	0.88	0.78	0.27	0.34	2.03	2.67	2.84	0.6608
b	141.66 ^a	136.01 ^a	130.69 ^a	151.24 ^a	61.03 ^b	58.79 ^b	57.66 ^b	122.42 ^a	16.89	0.0342
a+b	142.75 ^a	137.00 ^a	131.57 ^a	152.02 ^a	61.30 ^b	59.13 ^b	59.69 ^b	125.09 ^a	17.27	0.0363

^{ab} Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM = Standard Error of Mean, a = the gas production from the immediately soluble fraction (ml), b = the gas production from the insoluble fraction (ml), a+b : Potential gas production, Ufdo = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 0 day of fermentation, Ufd3 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 3 days of fermentation, Ufd5 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 5 days of fermentation, Ufd7 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 7 days of fermentation, fd0 = urea 0 % : GSSF 5 % : 0 day of fermentation, Fd3 = urea 0 % : GSSF 5 % : 3 days of fermentation, Fd5 = urea 0 % : GSSF 5 % : 5 days of fermentation, Fd7 = urea 0 % : GSSF 5 % : 7 days of fermentation



รูปที่ 1 Gas production during the fermentation period (ml) at 3, 5, 8, 16, 24, 48 and 72 hours of fermentation

ตารางที่ 6 ปริมาณของอะฟลาทอกซิน (ppb) ในน้ำรูเมนหลังการบ่มโดยวิธี *In vitro* Gas Technique โดยทำการสุ่มเก็บในชั่วโมงที่ 0 5 16 และ 24 ของการบ่ม มีค่าลดลงตามชั่วโมงการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่ในชั่วโมงที่ 0 ของการบ่มพบว่า ค่าอะฟลาทอกซินลดลงทุกกลุ่ม โดยเฉพาะ UFd7 และกลุ่ม Fd ($P < 0.05$) อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของอาหารหมักกับอะฟลาทอกซิน รวมทั้งการถูกเจือจางด้วยน้ำรูเมน แต่อย่างไรก็ตาม พบความแปรปรวนของระดับอะฟลาทอกซินเกิดขึ้นภายในทรีทเมนต์ที่เมื่อเปรียบเทียบตามชั่วโมงของการบ่มโดยเฉพาะกลุ่ม Fd ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาต่อไป แต่เมื่อเปรียบเทียบทรีทเมนต์ในแต่ละชั่วโมงของการบ่มพบว่ามีค่าลดลงตามวันของการหมักฟาง เมื่อพิจารณาภายในกลุ่มของ UFd และ Fd ($P < 0.05$) โดย [42] พบว่ากระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) AFB1 โดยจุลินทรีย์ในรูเมนนั้นมีการลดลงอย่างช้า ๆ ใน 30 นาทีแรก และหลังจากนั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับ [7] ศึกษาจุลินทรีย์กลุ่ม *Butyrivibrio fibrisolvens* ไม่พบความแตกต่างทางสถิติในการย่อย AFB1 โดยที่ [6] ได้ทำการเก็บน้ำรูเมนหลังการให้อาหารในชั่วโมงที่ 0 3 6 9 และ 12 นำมาเติม AFB1 มาตรฐานให้มีความเข้มข้นสุดท้าย 100 ppb พบว่าการย่อยสลายของอะฟลาทอกซินลดลงทันทีหลังการย่อยอาหาร [4] กล่าวว่าอะฟลาทอกซินบางส่วนถูกย่อยสลายโดยเชื้อราในรูเมน และเปลี่ยนเป็นอะฟลาทอกซิคอล (Aflatoxicol) และถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารโดย Passive Diffusion และเกิด Hydroxylated ในตับแล้วเปลี่ยนเป็น AFM1 [43] - [44] โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของ AFB1 ในน้ำรูเมนเกี่ยวข้องกับชนิดของสัตว์ พืชอาหารสัตว์ รวมถึงแหล่งของโปรตีนที่จุลินทรีย์ในรูเมนนำไปใช้ประโยชน์ [6], [45] - [47]

ตารางที่ 6 Aflatoxin concentration (ppb) of rumen fluid after incubation with fermented rice straw

	Ufdo	UFd3	UFd5	UFd7	Fd0	Fd3	Fd5	Fd7	SEM	Pr>F
Hr0	91.59 ^a	78.23 ^b	63.50 ^c	30.32 ^c	44.30 ^d	37.16 ^{de}	28.42 ^e	15.38 ^f	29.67	0.0001
Hr5	87.39 ^a	58.86 ^b	51.59 ^b	35.23 ^c	75.68 ^a	57.75 ^b	47.95 ^{bc}	20.48 ^d	31.07	0.001
Hr16	81.19 ^a	62.64 ^{bc}	52.11 ^c	36.71 ^d	71.12 ^{ab}	67.53 ^b	60.14 ^{bc}	53.86 ^c	27.45	0.0008
Hr24	58.30 ^a	27.62 ^{bc}	10.10 ^d	2.6 ^d	62.06 ^a	31.86 ^b	12.51 ^{cd}	5.71 ^d	46.02	0.0001

^{abcdef} Value in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$), SEM= standard error of mean , Ufdo = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 0 day of fermentation , Ufd3 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 3 days of fermentation, Ufd5 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 5 days of fermentation, Ufd7 = urea 2.5 % : GSSF 2.5 % : 7 days of fermentation, fd0 = urea 0 % : GSSF 5 % : 0 day of fermentation, Fd3 = urea 0 % : GSSF 5 % : 3 days of fermentation, Fd5 = urea 0 % : GSSF 5 % : 5 days of fermentation, Fd7 = urea 0 % : GSSF 5 % : 7 days of fermentation

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเพิ่มคุณภาพของฟางข้าวด้วยยูเรียต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ AFB1 พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ในฝักจามจุรีบดหมักมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามระยะของวันหมัก ในส่วนของค่าองค์ประกอบทางเคมีพบว่าค่าโปรตีนหยาบอยู่ในช่วง 10 - 16 % ซึ่งเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันที่หมัก โดยปริมาณความเข้มข้น ppb ของอะฟลาทอกซิน หลังการบ่มฟางข้าวร่วมกับฝักจามจุรีบดหมักอย่างเดียวมีค่าลดลงตามจำนวนวันหมักที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจเนื่องจากจำนวนของจุลินทรีย์กลุ่มแลคติก โดยพบว่าค่าองค์ประกอบทางเคมี โปรตีนหยาบในกลุ่มที่หมักฟางข้าวด้วยยูเรียมีค่าสูงกว่ากลุ่มหมักด้วยฝักจามจุรีบดอย่างเดียว แต่เมื่อหมักร่วมกับฝักจามจุรีบดเป็นเวลา 7 วัน ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่หมักร่วมกับยูเรีย 0 และ 3 วัน ส่วนค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ มีค่าต่ำในกลุ่มที่หมักด้วยฝักจามจุรีบดหมักอย่างเดียว และพบว่าปริมาณผลผลิตแก๊สเพิ่มขึ้นช้า ๆ ในช่วงที่ 3 - 5 ของการบ่ม และเพิ่มเร็วขึ้นในช่วงที่ 8 ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสารประกอบเช่น แทนนินส์ในฝักจามจุรี และอาหารที่มีเยื่อใยสูงเนื่องจากฟางข้าว จึงทำให้เกิดการย่อยได้ช้าในต้นชั่วโมงของกระบวนการหมัก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ขอขอบคุณสาขาวิชาสัตวศาสตร์และนักศึกษาสาขาวิชาสัตวศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร สาขาวิชาประมง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่อนุเคราะห์สถานที่ดำเนินการทดลอง

References

- [1] Wanapat, M. (2533). **Ruminant Nutrition**. Funny Publication. Bangkok. (in Thai).
- [2] Paengkoum, P. (2551). **Improved Rice Straw Fermented with Urea Note**. Department of Animal Production Technology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- [3] Wanapat, M., Kang, S., and Polyorach, S. (2013). Development of Feeding Systems and Strategies of Supplementation to Enhance Rumen Fermentation and Ruminant Production in the Tropics. **Journal of Animal Science and Biotechnology**. Vol. 4, Issue 1, p. 11. DOI: 10.1186/2049-1891-4-32
- [4] Fink-Gremmels, J. (2008). Mycotoxins in Cattle Feeds and Carry-Over to Dairy Milk: A Review. **Food Additives and Contaminants: Part A**. Vol. 25, Issue 2, pp. 172-180. DOI: 10.1080/02652030701823142
- [5] Wu, F. (2006). Mycotoxin Reduction in Bt Corn: Potential Economic, Health, and Regulatory Impacts. **Transgenic Research**. Vol. 15, Issue 3, pp. 277-289. DOI: 10.1007/s11248-005-5237-1

- [6] Upadhaya, S. D., Sung, H. G., Lee, C. H., Lee, S. Y., Kim, S. W., Cho, K. J., and Ha, K. J. (2009). Comparative Study on the Aflatoxin B1 Degradation Ability of Rumen Fluid from Holstein Steers and Korean Native Goats. **Journal Veterinary Science**. Vol. 10, Issue 1, pp. 29-34. DOI: 10.4142/jvs.2009.10.1.29
- [7] Westlake, K., Mackie, R. I., and Dutton, M. F. (1989). *In vitro* Metabolism of Mycotoxins by Bacterial, Protozoal and Ovine Ruminant Fluid Preparations. **Animal Feed Science and Technology**. Vol. 25, Issues 1-2, pp. 169-178. DOI: 10.1016/0377-8401(89)90117-X
- [8] Patterson, D. S. P., Glancy, E. M., and Robert, B. A. (1980). The 'carry-over' of Aflatoxin Cows Ded Rations Containing a Low Concentration of Aflatoxin B1. **Food and Cosmetic Toxicology**. Vol. 18, Issue 1, pp. 35-37. DOI: 10.1016/0015-6264(80)90008-5
- [9] Talkhan, O. F. A., Rady, F. M., and Mohamed, E. F. (2016). Detection of aflatoxins, ochratoxins and some chemical adulterants in raw Milk. **Benha Veterinary Medical Journal**. Vol. 31, No. 2, pp. 283-288
- [10] Schuster, R., Marx, G., and Rothaupt, M. (1993). **Analysis of Mycotoxins by HPLC with Automated Confirmation by Spectral Library**. (Application Note 12-5091-8692).
- [11] Sinprasobchai, L., Saijit, P., and Sookthinthai, L. (2006). Correlation of aflatoxin in concentrated feed and detection of the toxin in dairy milk. **Thai-NIAH eJournal**. V1 N2, (September - December 2006) (niah.dld.go.th/th/files/ejournal/v01n2t09.pdf)
- [12] Diekman, M. A. and Green, M. L. (1992). Mycotoxins and Reproduction in Domestic Livestock. **Journal of Animal Science**. Vol. 70, pp. 1615-1627
- [13] George, W. S. and Craig, R. E. (2006). **Samanea saman (rain tree)**. Species Profiles for Pacific Island Agroforestry. pp. 1-13
- [14] Anantasook, N. and Wanapat, M. (2012). Influence of Rain Tree Pod Meal Supplementation on Rice Straw Based Diets Using *In vitro* Gas Fermentation Technique. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**. Vol. 25, Issue 3, pp. 325-334. DOI: 10.5713/ajas.2011.11131
- [15] AOAC. (1985). **Official Methods of Analysis, 14th ed.** Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- [16] Georing, H. K. and Van Soest, P. J. (1970). **Forage Fiber Analyses (apparatus, reagent, procedures and some application)**. Agriculture Handbook No. 379. U.S. Agricultural Research Service
- [17] Menke, H. H. and Steingass, H. (1988). Estimation of the Energetic Feed Value Obtained from Chemical Analysis and *In vitro* Gas Production Using Rumen Fluid. **Animal Research and Development**. Vol. 28, pp. 7-55
- [18] Ørskov, E. R. and McDonald, I. (1979). The Estimation of Protein Degradability in the Rumen from Incubation Measurements Weighted According to Rate of Passage. **Journal of Agricultural Science Cambridge**. Vol. 92, pp. 499-503. DOI: 10.1017/S0021859600063048

- [19] SAS. (1985). **User's Guide: Statistics**. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina.
- [20] Steel, R. G. D. and Torrie, J. H. (1960). **Principles and Procedure of Statistics**. (With special Reference to the Biological Sciences.) McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto, London
- [21] Delgado, D. C., Hera, R., Cairo, J., and Orta, Y. (2014). *Samanea saman*, a Multi-Purpose Tree with Potentialities as Alternative Feed for Animals of Productive Interest. **Cuban Journal of Agricultural Science**. Vol. 48, No. 3, pp. 205-212
- [22] Obasi, N. L., Egbuonu, A. C. C., Ukoha, P. O., and Ejikeme, P. M. (2010). Comparative Phytochemical and Antimicrobial Screening of Some Solvent Extracts of *Samanea saman* (fabaceae or mimosaceae) pods. **African Journal of Pure and Applied Chemistry**. Vol. 4, No. 9, pp. 206-212
- [23] Ukoha, P. O., Cemaluk, E. A. C., Nnamdi, O. L., and Madaus, E. P. (2011). Tannins and Other Phytochemical of the *Samanea saman* Pods and Their Antimicrobial Activities. **African Journal of Pure and Applied Chemistry**. Vol. 5, No. 8, pp. 237-244
- [24] Semae, S., Kongmun, P., Vajrabukka, C., Chanpongsang, S., and Prasanphanich, S. (2013). Effects of Different Levels of Rain Tree (*Samanea saman*) Pods in Meal Concentrate on *In vitro* Fermentation by a Gas Production Technique. **Kasetsart Journal, Natural Science**. Vol. 47, No. 5, pp. 704-711
- [25] Mahoney, N., Molyneux, R. J., Kim, J. H., Cambell, B. C., Waiss, A. C., and Hagerman, A. E. (2010). Aflatoxigenesis Induced in *Aspergillus flavus* by Oxidative Stress and Reduction by Phenolic Antioxidants from Tree Nuts. **World Mycotoxin Journal**. Vol. 3, No. 1, pp. 49-57. DOI: 10.3920/WMJ2009.1185
- [26] Jetana, T., Usawang, S., and Sophon, S. (2015). The use of Tropical of Multiproposes Trees as a Feed Supplement to Thai Swamp Buffaloes (*Bubalus bubalis*) Reciving a Basal Diet of Pangola hay. **Buffalo Bulletin**. Vol. 34, No. 1, pp. 130-144
- [27] Babayemi, O. J., Inyang, U. A., Ifut, O. J., and Isaac, L. J. (2010). Nutritional Value of Cassava Wastes Ensiled with *Albizia saman* Pod as Feed for Ruminants in Off Season. **Agricultural Journal**. Vol. 5, No. 3, pp. 220-224
- [28] Tahmourespour, A., Tabatabaei, N., Khalkhali, H., and Amini, I. (2017). Study of Tannin-Degrading Bacteria Isolated from Pistachio Soft Hulls and Feces of Goat Feeding on it. **Biological Journal of Microorganism**. Vol. 5, No. 20, pp. 61-69
- [29] Haskard, C. A., El-Nezami, H. S., Kankaanpaa, P. E., Salminen, S., and Ahokas, J. T. (2001). Surface Binding of Aflatoxin B₁ by Lactic Acid Bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 67, No. 7, pp. 3086-3091. DOI: 10.1128/AEM.67.7.3086-3091.2001
- [30] Peltonen, K. D., El-Nezami, H. S., Salminen, S. J., and Ahogas, J. T. (2000). Binding of Aflatoxin B₁ by Probiotic Bacteria. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 80, Issue 13, pp. 1942-1945. DOI: 10.1002/1097-0010(200010)80:13<1942::AID-JSFA741>3.0.CO;2-7

- [31] Peltonen, K. D., El-Nezami, H. S., Haskard, C. A., Ahokas, J. T., and Salminen, S. J. (2001). Aflatoxin B₁ Binding by Dairy Strains of Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria. **Journal of Dairy Science**. Vol. 84, Issue 10, pp. 2152-2156. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(01)74660-7
- [32] Batish, V. K., Roy, U., Lal, R., and Grover, S. (1997). Antifungal Attributes of Lactic Acid Bacteria - A review. **Critical Reviews in Biotechnology**. Vol. 17, Issue 3, pp. 2009-2225. DOI: 10.3109/07388559709146614
- [33] Sathe, S. J., Nawani, N. N., Dhakephalkar, P. K., and Kapadnis, B. P. (2007). Antifungal Lactic Acid Bacteria with Potential to Prolong Shelf-Life of Fresh Vegetables. **Journal of Applied Microbiology**. Vol. 103, Issue 6, pp. 2622-2628. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2007.03525.x
- [34] Intanool, M. and Pattarajinda, V. (2015). Effect of Aflatoxin and Roughage Sources on Nutrients Digestibility and *In vitro* Gas Production. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 43, SUPPL. 1, pp. 33-38
- [35] Dali, D. K. D., Deschamps, A. M., and Richard-Forget, F. (2010). Lactic Acid Bacteria - Potential for Control of Mould Growth and Mycotoxins: A Review. **Food Control**. Vol. 21, Issue 4, pp. 370-380. DOI:10.1016/j.foodcont.2009.07.011
- [36] Zinedine, A., Faid, M., and Benlemlih, M. (2005). In Vitro Reduction of Aflatoxin B₁ by Strains of Lactic Acid Bacteria Isolated from Moroccan Sourdough Bread. **International Journal of Agriculture and Biology**. Vol. 7, No. 1, pp. 67-70
- [37] Niderkorn, V., Boudra, H., and Morgavi, D. (2006). Binding of *Fusarium mycotoxins* by Fermentative Bacteria *In vitro*. **Journal Applied Microbiology**. Vol. 101, Issue 4, pp. 849-856. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2006.02958.x
- [38] Sezer, C., Guven, A., Oral, N. B., and Vatansever, L. (2013). Detoxification of aflatoxin B₁ by bacteriocins and bacteriocinogenic lactic acid bacteria. **Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences**. Vol. 37, pp. 594-601. DOI: 10.3906/vet-1301-31
- [39] El-Nezami, H., Kankaanpaa, P., Salminen, S., and Ahokas, J. (1998). Ability of Dairy Strains of Lactic Acid Bacteria to Bind a Common Food Carcinogen, Aflatoxin B₁. **Food and Chemical Toxicology**. Vol. 36, Issue 4, pp. 321-326. DOI: 10.1016/S0278-6915(97)00160-9
- [40] Zhang, X. B. and Ohta, Y. (1991). Binding of Mutagens by Fractions of the Cell Wall Skeleton of Lactic Acid Bacteria on Mutagens. **Journal of Dairy Science**. Vol. 74, Issue 5, pp. 477-481. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78306-9
- [41] Wanapat, M. (1985). **Improving Rice Straw Quality as Ruminant Feed by Urea Treatment in Thailand**. pp. 121-145. In: Wanapat, M. and Devendra, C. (eds.). *Relevance of Crop Residues as Animal Feeds in Developing Countries*. Funny Press, Bangkok, Thailand.
- [42] Kiessling, K. H., Pettersson, H., Sandholm, K., and Olsen, M. (1984). Metabolism of Aflatoxin, Ochratoxin, Zearalenone, and Threotrichothecenes by Intact Rumen Fluid, Rumen Protozoa, and Rumen Bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 47, pp. 1070-1073

- [43] Kuilman, M. E. M., Maas, R. F. M., Judah, D. J., and Gremmels, J. (1998). Bovine Hepatic Metabolism of Aflatoxin B₁. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 46, pp. 2707-2713. DOI: 10.1021/jf980062x
- [44] Upadhaya, S. D., Park, M.A., and Ha, J. K. (2010). Mycotoxins and Their Biotransformation in the Rumen: A Review. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**. Vol. 23, No. 9, pp. 1250-1260. DOI: 10.5713/ajas.2010.r.06
- [45] Xiao, H., Marquardt, R.R., Frohlich, A. A., Phillips, G. D., and Vitti, T.G. (1991). Effect of a Hay and a Grain Diet on the Rate of Hydrolysis of Ochratoxin A in the Rumen of Sheep. **Journal of Animal Science**. Vol. 69, Issue 93, pp. 706-3714. DOI: 10.2527/1991.6993706x
- [46] Muller, H. M., Muller, K., and Steingass, H. (2001). Effect of Feeding Regime on the Metabolism of Ochratoxin A During the *In vitro* Incubation in Buffered Rumen Fluid from Cows. **Archiv für Tierernaehrung**. Vol. 54, Issue 4, pp. 265-279. DOI: 10.1080/17450390109381984
- [47] Yang, L. (2010). **Effects of Feed Types on OTA biodegradation by Korean Native Goats**. Masters' Thesis, Seoul National University, Seoul.

อัตลักษณ์เรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

The Identity of Community Traditional Shophouse Along the Makong River, Nakhon Phanom Province

สุธน คงศักดิ์ตระกูล^{1*}

Suthon Kongsaktrakul^{1*}

Received: April 30, 2018; Revised: September 25, 2018; Accepted: September 25, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้ต้องการนำเสนออัตลักษณ์เรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิม ริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม โดยมีวัตถุประสงค์การศึกษาเพื่อ 1) ศึกษาพัฒนาการของการตั้งถิ่นฐาน และอัตลักษณ์ทางสถาปัตยกรรมของเรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม 2) ศึกษารูปแบบทางสถาปัตยกรรม และลักษณะเฉพาะของอาคาร เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการกำหนดแนวทางอนุรักษ์อาคารประเภทเรือนค้าขายชั้นเดียว โดยใช้วิธีการศึกษาจากการทบทวนเอกสาร งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการสำรวจพื้นที่ลักษณะทางกายภาพ และการสัมภาษณ์ผู้อยู่อาศัยภายในเรือนค้าขาย ผลการศึกษาพบว่า 1) ชุมชนดั้งเดิมตามแนวริมแม่น้ำโขงในอดีต มีการตั้งถิ่นฐานเพื่อการค้าขาย และรูปแบบของเรือนค้าขายระยะแรกได้รับอิทธิพลมาจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ต่อมาได้รับเอารูปแบบอิทธิพลตะวันตกมาใช้ในวิธีการก่อสร้าง 2) อัตลักษณ์ของเรือนค้าขาย คือ พื้นที่ใช้สอยเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการอยู่อาศัย และรูปลักษณะภายนอก มีการปรับรูปแบบตามบริบททางสังคมและวัฒนธรรมในพื้นที่อย่างชัดเจน 3) การเติบโตหรือการพัฒนาของเมือง มีผลทำให้ชุมชนค้าขายดั้งเดิมริมแม่น้ำโขงถูกลดบทบาทลง เกิดเป็นชุมชนแห่งใหม่ตามการขยายตัวของเส้นทางถนน และรูปแบบเรือนค้าขายมีการปรับเปลี่ยนให้มีความสมัยใหม่มากขึ้น ผลที่ได้จากการศึกษา นำเสนอพัฒนาการของการตั้งถิ่นฐาน และรูปแบบเฉพาะทางสถาปัตยกรรมของอาคารประเภทเรือนค้าขายชั้นเดียว เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์อาคาร ให้คงความเป็นอัตลักษณ์ทางสถาปัตยกรรมของชุมชนดั้งเดิม ริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนมต่อไป

คำสำคัญ : อัตลักษณ์ทางสถาปัตยกรรม; เรือนค้าขาย; ชุมชนดั้งเดิมนครพนม

¹ คณะศิลปกรรมและออกแบบอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

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

* Corresponding Author E - mail Address: tok_2519@hotmail.com

Abstract

This article aimed to present the identity of community traditional shophouse along the Mekong River of Nakhon Phanom Province. The objectives of the article are to study the settlement and architectural identity of traditional shophouse along the Mekong River of Nakhon Phanom Province and to study the architectural pattern and the characteristic of buildings in order to use as database to set up some guidelines for single-storey shophouse conservation. The methods of the study are related literatures and theories reviewing, physical characteristics surveying and shophouse residents interviewing. The result of the study were found that first, In the past, traditional communities along the Mekong River were settle by commercial purpose and the initial style of those shophouse was influenced by Vernacular architecture and Chinese architecture and later western styles methods of construction was adopted. Second, the distinct identity of the shophouse was the adaptation of its utility space that could be changed in accordance with residential characteristic and external appearance. The shophouse was distinctly adjusted to be in line with social context and local culture. Third, the growth and the development of the city reduced roles of the traditional commercial community along the Mekong River and new communities were occurred along the expansion of roads. The style of the shophouse was changed to be more modern. The result of this study was presented as the development of settlement and the architectural identity of single-storey shophouse and also as the promotion of building conservation to further maintain architectural identity of the traditional community along the Mekong River of Nakhon Phanom Province.

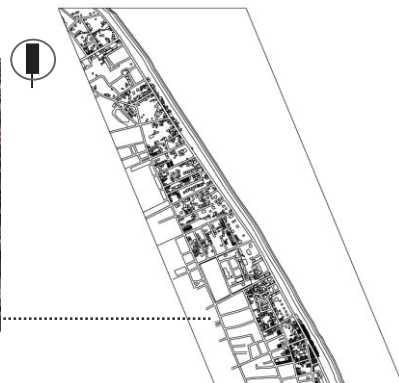
Keywords: Architectural Identity; Shophouse; Traditional Community of Nakhon Phanom Province

บทนำ

ในประเทศไทยมีการศึกษาชุมชนดั้งเดิมอยู่เป็นจำนวนมากกระจายอยู่ตามพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งในชุมชนแต่ละแห่งล้วนมีคุณค่าและเป็นมรดกทางวัฒนธรรม มีความหมายต่อผู้อยู่อาศัย มีรูปแบบทางสถาปัตยกรรมที่โดดเด่น รวมไปถึงวิถีชีวิต ประเพณีที่สืบทอดต่อกันมา [1] ชุมชนตลาด หรือชุมชนการค้า เป็นชุมชนที่มีกิจกรรมหรือเคยมีกิจกรรมด้านการค้าเป็นหลัก มีลักษณะความเป็นย่านตลาดของเมือง หรือของชุมชนในละแวกนั้น อาจประกอบไปด้วยพื้นที่ค้าขายรวม และสถาปัตยกรรมประเภทเรือนแถว หรือเรือนแถวค้าขาย [2] และรูปแบบของเรือนค้าขาย จะเป็นอาคารที่มีการก่อสร้างติดกันเป็นแถวหลายคูหา การใช้ประโยชน์พื้นที่ภายในแบ่งเป็นพื้นที่อยู่อาศัยและพื้นที่ค้าขาย โดยส่วนใหญ่จะมีการต่อเติมหรือดัดแปลงพื้นที่ใช้สอยภายหลังเพื่อรองรับการกระจายผลผลิตและเก็บสินค้า [3] อีกทั้งเรือนค้าขายจะมีลักษณะเกาะกลุ่มรวมกัน จึงเกิดเป็นย่านสำคัญของชุมชนหรือเป็นพื้นที่สำหรับรวมกลุ่มของคนในชุมชนเพื่อมาพบกันและเกิดระบบความสัมพันธ์ทางอ้อมทำให้คนในชุมชนสนิทสนมและรู้จักกันในวงกว้าง [4]

ชุมชนดั้งเดิมย่านเมืองเก่า ถนนสุนทรวิจิตร จังหวัดนครพนม (รูปที่ 1) มีเอกลักษณ์ในด้านการดำเนินชีวิตแบบธุรกิจค้าขายสินค้า ทำให้อาคารส่วนใหญ่เป็นเรือนค้าขาย และมีลักษณะเฉพาะทางรูปแบบสถาปัตยกรรมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามยุคสมัยดังนี้ เรือนค้าขายระยะแรกได้รับอิทธิพลจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ระยะที่สองที่ได้รับอิทธิพลจากตะวันตก ระยะที่สามได้รับอิทธิพลจากสถาปัตยกรรมก่อนสมัยใหม่ และระยะที่สี่ได้รับอิทธิพลจากสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ [5] จากการสำรวจและทบทวนวรรณกรรมเบื้องต้นพบว่า การเติบโตและการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ตามแผนพัฒนาของจังหวัด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิม ริมแม่น้ำโขง โดยอาคารบางส่วนถูกรื้อถอนเพื่อการพัฒนาเมือง การเปลี่ยนแปลงลักษณะกายภาพอันเกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงวิถีการดำรงชีวิตที่ส่งผลด้านการต่อเติมอาคารที่มีความขัดแย้งกับรูปแบบดั้งเดิมของพื้นที่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้ มีการศึกษารูปแบบและลักษณะเฉพาะของอาคารตึกแถวย่านเมืองเก่า เพื่อเสนอแนวทางการพัฒนารูปแบบทางสถาปัตยกรรม เช่น ขนาดอาคาร รูปด้านหน้าอาคาร การใช้วัสดุประกอบอาคาร เป็นต้น [5] การศึกษาคึกแถวในชุมชนวัดโกลาสสอง ถนนสุนทรวิจิตร จังหวัดนครพนม เพื่อเสนอแนวทางการบริหารจัดการสถาปัตยกรรมในย่านเมืองเก่าและส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม [6]

ชุมชนดั้งเดิมนครพนม



(ก) ชุมชนดั้งเดิมนครพนม

(ข) ชุมชนดั้งเดิม ย่านเมืองเก่านครพนม

รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งชุมชนดั้งเดิมนครพนม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษานี้ต้องการนำเสนอพัฒนาการของการตั้งถิ่นฐาน และอัตลักษณ์ของเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม โดยมีขอบเขตการศึกษา คือ การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใช้สอยใหม่ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนค้าขายชั้นเดียว จำนวน 4 หลัง เนื่องจากเป็นอาคารที่ก่อสร้างในระยะแรก หรือได้รับอิทธิพลจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น และมีตำแหน่งที่ตั้งบริเวณริมแม่น้ำโขง ย่านเมืองเก่า จังหวัดนครพนม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาพัฒนาการของการตั้งถิ่นฐาน และอิทธิพลที่ส่งผลต่อรูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนค้าขายชั้นเดียว 2) นำเสนออัตลักษณ์ของเรือนค้าขายชั้นเดียว เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์อาคารที่มีคุณค่าทางสถาปัตยกรรม ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การทบทวนวรรณกรรม ได้แก่ การศึกษากรอบแนวคิด ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำเสนอพัฒนาการการตั้งถิ่นฐานและอิทธิพลที่ส่งผลต่อรูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนคำชายชั้นเดียวชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม
2. การสำรวจภาคสนาม โดยวิธีการสำรวจจริงวัดและเขียนแบบ การถ่ายภาพ และการสัมภาษณ์ผู้อยู่อาศัย เพื่อขอบเขตการศึกษาเรือนคำชายชั้นเดียว โดยพิจารณาจากลักษณะความสำคัญ ในด้านคุณค่าและสภาพความแท้ดั้งเดิมของอาคาร
3. การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลด้านลักษณะการวางผัง การใช้พื้นที่ เพื่อนำเสนออัตลักษณ์ของเรือนคำชายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม
4. การสรุปผลการศึกษาพัฒนาการของการตั้งถิ่นฐานและอัตลักษณ์ของเรือนคำชายชั้นเดียวชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม และข้อเสนอแนะในการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. กรอบแนวคิด ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
 - 1.1 กรอบแนวคิดการศึกษาย่านเมืองเก่า และอัตลักษณ์เรือนพื้นถิ่น

อัตลักษณ์ หมายถึง คุณลักษณะเฉพาะตัว ที่ใช้เพื่อบ่งชี้ลักษณะของบุคคล ชุมชน หรือพื้นที่นั้น ๆ แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวกับอัตลักษณ์สถานที่ [7] เป็นกรอบทฤษฎีที่ทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสถานที่ และสิ่งที่เป็นอัตลักษณ์ หรือคุณลักษณะที่แท้จริงของสถานที่ ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ

 - 1) ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏเด่นชัดภายในชุมชนที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง สถาปัตยกรรม
 - 2) กิจกรรมบนพื้นที่ หรือความสัมพันธ์ระหว่างคนกับพื้นที่ เป็นกิจกรรมที่ชุมชนให้ความสำคัญ และขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพที่สามารถรองรับกิจกรรมได้
 - 3) สัญลักษณ์ของสถานที่ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างสถานที่ และความสามารถในการรับรู้หรือการอธิบายลักษณะของสถานที่ได้ชัดเจน เมื่อมีการอ้างอิงถึงสถานที่นั้น

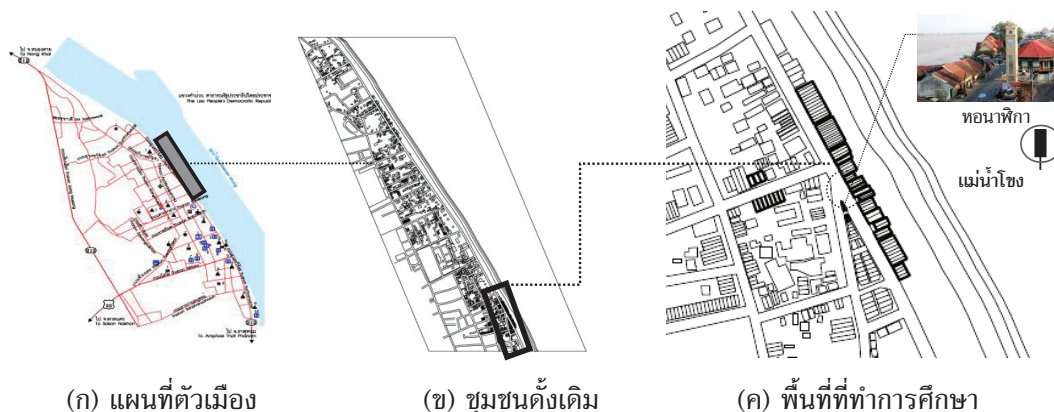
การศึกษาย่านเมืองเก่า ตามแนวคิดของเควินลินซ์ ได้ศึกษาองค์ประกอบของเมืองจากการสังเกตด้านเอกลักษณ์ โครงสร้าง และความหมาย ส่วนประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันก่อให้เกิดจินตภาพได้ชัดเจน ปรากฏเป็นร่องรอยในความทรงจำแก่ผู้พบเห็น องค์ประกอบของเมืองมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพ เศรษฐกิจ สังคม และกิจกรรมที่เกิดขึ้นในเมืองสามารถบ่งชี้ความแตกต่างจากพื้นที่บริเวณอื่น โดยมีความเป็นเอกลักษณ์ชัดเจน และมีลักษณะพิเศษในองค์ประกอบอย่างใดอย่างหนึ่ง [2] และการศึกษามาตรฐานที่อยู่อาศัยและชุมชนเพื่อคงไว้ซึ่งเอกลักษณ์และคุณค่าของเมือง [1] ได้กำหนดคุณค่าและความสำคัญของชุมชนดั้งเดิม คือ ชุมชนดั้งเดิมเป็นลักษณะพิเศษที่ทำให้เกิดย่านหรือชุมชนที่มีความแตกต่างไปจากชุมชนใหม่ โดยมีประเด็นที่ต้องพิจารณาและให้ความสำคัญ คือ ด้านความสำคัญทางประวัติศาสตร์ และด้านโบราณคดี

การศึกษาอัตลักษณ์ทางสถาปัตยกรรมของเรือนพื้นถิ่น [8] พบว่า อัตลักษณ์ของเรือนมีความเกี่ยวพันในด้านชาติพันธุ์ ความหลากหลายทางเชื้อชาติ วัฒนธรรม ประเพณี และชีวิตความเป็นอยู่

โดยสาเหตุการเปลี่ยนแปลงลักษณะตัวเรือนเกิดจากการฟุ่พังและเสื่อมสลายของวัสดุ การอพยพย้ายถิ่นฐาน การขาดแคลนช่างฝีมือ และค่านิยมสมัยใหม่ และการศึกษารูปแบบเรือนพื้นถิ่นในภาคอีสาน [9] พบว่า อัตลักษณ์ของเรือนพื้นถิ่นรูปแบบดั้งเดิม เป็นผลผลิตทางวัฒนธรรมของกลุ่มชาติพันธุ์ต่าง ๆ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการอพยพเข้ามาตั้งถิ่นฐานของกลุ่มคนหลายชาติพันธุ์ และการปรับตัวของคนในพื้นที่ เพื่อรับวัฒนธรรมการสร้างที่อยู่อาศัยจากภายนอก มีผลให้เรือนพื้นถิ่นดั้งเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ และมีความสัมพันธ์กับเหตุการณ์สำคัญทางประวัติศาสตร์แต่ละช่วงเวลา เช่น เรือนประยุกต์รูปแบบสถาปัตยกรรมตะวันตก เรือนประยุกต์รูปแบบเรือนอีสานและเรือนภาคกลาง รูปแบบเรือนสมัยใหม่ สอดคล้องกับการศึกษารูปแบบสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ที่ได้รับอิทธิพลจากสถาปัตยกรรมตะวันตก จีน และเวียดนาม [10] พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงผ่านวัฒนธรรมของชนชาติที่เข้ามาครอบครองพื้นที่ มีผลให้โครงสร้าง วัสดุก่อสร้าง ทิศทางการวางอาคาร รายละเอียดการออกแบบ เช่น รูปทรงหลังคา วัสดุบางประเภท มีการปรับเปลี่ยนและประยุกต์เข้ากับสถาปัตยกรรมรูปแบบดั้งเดิม

1.2 การตั้งถิ่นฐานของชุมชนดั้งเดิมริมน้ำโขง จังหวัดนครพนม

ชุมชนดั้งเดิมนครพนม มีพัฒนาการทางสังคมและวัฒนธรรม ตั้งแต่สมัยรัตนโกสินทร์ จนถึงปัจจุบัน [11] เมืองนครพนม หรือเมืองมรุกขนคร (ชื่อเดิม) ตั้งอยู่บ้านธาตุน้อย ริมท่าวังบังสวก ถูกน้ำกัดเซาะตลิ่งโขงเสียหายทำให้บ้านเรือนพังลงแม่น้ำโขงเป็นจำนวนมาก ต่อมาได้ย้ายเมืองขึ้นไป ตั้งเมืองที่บ้านหนองจันทร์ (อยู่ห่างจากที่ตั้งจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน ไปทางทิศใต้ประมาณ 3 กิโลเมตร) ในปี พ.ศ. 2329 ได้เปลี่ยนชื่อเป็น เมืองนครพนม และในปี พ.ศ. 2340 ได้ย้ายตำแหน่งจากบ้านหนองจันทร์ ไปตั้งอยู่บ้านโพธิ์คา (ที่ตั้งจังหวัดนครพนมในปัจจุบัน) ในสมัยรัชกาลที่ 3 เกิดการสู้รบกันหลายครั้งและมีการอพยพผู้คนข้ามฝั่งโขงหลายกลุ่มชาติพันธุ์ เช่น กลุ่มชาติพันธุ์ภูไท กะโซ่ กะเลิง แส็ก ญ้อและโย้ย มาย้งเมืองนครพนม สกลนคร มุกดาหาร และกาฬสินธุ์ ขณะเดียวกันเป็นช่วงที่คนจีนเริ่มอพยพเข้ามาในพื้นที่ จังหวัดนครพนม ในสมัยรัชกาลที่ 5 ปี พ.ศ. 2428 องค์การศาสนาคริสต์ นิกายโรมันคาทอลิก ได้เข้ามาตั้งวัดคริสต์ที่เมืองนครพนมเป็นครั้งแรก และเป็นช่วงที่ฝรั่งเศสล่าเมืองขึ้น [12] อิทธิพลจากราชสำนักสยามแผ่เข้าสู่เมืองนครพนมในด้านการบริหารบ้านเมือง อาคารสถานที่ราชการต่าง ๆ จึงเป็นรูปแบบสถาปัตยกรรมที่มาจากส่วนกลาง จนมาถึงสมัยรัชกาลที่ 6 ได้เปลี่ยนชื่อเมืองนครพนมเป็น จังหวัดนครพนม ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รูปแบบงานสถาปัตยกรรม ได้แก่ เรือนพักอาศัย (เรือนคหบดี) และจวนผู้ว่าได้รับเอารูปแบบมาจากกรุงเทพ ต่อมาปี พ.ศ. 2488 เกิดสงครามอินโดจีน ต่อเนื่องเป็นสงครามโลกครั้งที่ 2 เวียดนามได้รับผลกระทบจากฝรั่งเศสในการทำสงคราม ชาวเวียดนามได้อพยพหนีภัยสงครามเข้ามาในประเทศไทย ในพื้นที่จังหวัดนครพนม สกลนคร มุกดาหาร และหนองคาย ในพื้นที่จังหวัดนครพนม ชาวไทยเชื้อสายเวียดนาม ได้ตั้งถิ่นฐานอยู่บริเวณชุมชนหนองญาติ ดอนโหมง และหนองแสง โดยประกอบอาชีพค้าขาย ช่างก่อสร้าง และทำเครื่องเรือน ต่อมาเริ่มมีการสร้างอาคารตึกแถวในย่านการค้าบนถนนสุนทรวิจิตร ซึ่งจะพบเรือนค้าขายเป็นอาคารตึกแถวตั้งขนานไปกับแม่น้ำโขง (รูปที่ 2) ซึ่งเกิดเป็นย่านกิจกรรมการค้า และเป็นจุดศูนย์กลางของเมือง [4]

(ก) แผนที่ตัวเมือง
นครพนม [12](ข) ชุมชนดั้งเดิม
ย่านเมืองเก่านครพนม

(ค) พื้นที่ที่ทำการศึกษ

รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งชุมชนดั้งเดิมย่านเมืองเก่านครพนม ที่ทำการศึกษ

ชุมชนดั้งเดิมนครพนม หรือย่านเมืองเก่าที่ตั้งอยู่บนถนนสุนทรวิจิตร เริ่มตั้งแต่ทิศเหนือบริเวณโบสถ์นักบุญอันนา เลียบแม่น้ำโขงมาทางทิศใต้ถึงถนนช้างศาลเจ้าพ่อหมื่น [1] คนในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นคนไทลาวอาศัยรวมกับคนจีนแต้จิ๋วและจีนไหหลำที่เดินทางเข้ามาสู่นครพนมด้วยเรือจากประเทศจีนฝั่งทางใต้มาขึ้นที่ท่าเรือกรุงเทพฯ ผ่านเข้าสู่เมืองโคราช และตามขบวนชนสินค้ามาสู่จังหวัดนครพนม และบางกลุ่มใช้เส้นทางโดยการเดินทางเข้ามายังประเทศลาว ผ่านเข้าสู่จังหวัดหนองคายและล่องเรือตามแม่น้ำโขงมายังจังหวัดนครพนม [4] อีกกลุ่มชาติพันธุ์หนึ่งที่มืบทบาทในพื้นที่ คือ ชาวเวียดนาม ที่เริ่มอพยพเข้าสู่เมืองนครพนม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2405 เนื่องจากลัทธิทางการเมืองและทางศาสนา เดินทางเข้ามาโดยผ่านทางประเทศลาว [13] การอพยพอีกครั้งสำคัญ คือ ช่วงหลังจากสงครามโลกครั้งที่สองยุติลง (ปี พ.ศ. 2488) ฝรั่งเศสกลับเข้ามาครอบครองพื้นที่ มีการสู้รบปราบผู้ต่อต้าน ส่งผลให้พื้นที่นครพนมแบ่งเป็นกลุ่มคนเวียดนามรุ่นเก่าและเวียดนามรุ่นใหม่ โดยกลุ่มเวียดนามรุ่นเก่าส่วนใหญ่ อาศัยอยู่บริเวณพื้นที่รอบนอกตัวเมืองในปัจจุบัน คือ ชุมชนหนองแสงและชุมชนหนองญาติ และเวียดนามรุ่นใหม่จะเข้ามาอาศัยอยู่ในเขตตัวเมือง

1.3 รูปแบบเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

จากประวัติศาสตร์การตั้งถิ่นฐานพบว่า คนจีนและคนเวียดนาม มีบทบาทต่อการก่อสร้างเรือนค้าขายในพื้นที่เป็นอย่างมาก เริ่มจากคนจีนที่อพยพเข้ามาในพื้นที่เพื่อการค้าขาย ได้นำเอารูปแบบและวิธีการก่อสร้างแบบจีนเข้ามาในพื้นที่ ขณะเดียวกันคนเวียดนามที่อพยพเข้ามาจากการลัทธิทางสงครามและชาวตะวันตก เช่น ฝรั่งเศสที่เข้ามาในพื้นที่จากการทำสงคราม ทำให้พื้นที่เมืองนครพนม มีรูปแบบการอาศัยของผู้คนหลายเชื้อชาติ และเกิดการปรับตัวต่อการอยู่อาศัยสะท้อนผ่านรูปแบบทางสถาปัตยกรรม [4] เรือนค้าขายระยะแรกในชุมชนดั้งเดิม มีอายุประมาณ 70 - 100 ปี รูปแบบอาคารได้รับอิทธิพลจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น (รูปที่ 3) ลักษณะเป็นเรือนค้าขายเรียงกันเป็นแถว มีลักษณะคล้ายเรือนพื้นถิ่นอีสาน คือ หลังคาทรงจั่วและยกใต้ถุนสูง ด้านหน้าอาคารก่อสร้างด้วยปูน มีลักษณะทึบตัน ความกว้างประมาณ 2.60 - 3.00 เมตร บานประตูด้านหน้าเป็นบานเฟี้ยมทั้งหมด (รูปที่ 4) ส่วนด้านหลังอาคารก่อสร้างด้วยไม้และยกใต้ถุน มีความสูงประมาณ 1.00 - 1.50 เมตร เพื่อปรับระดับพื้นอาคาร เนื่องจากก่อสร้างอาคารตามแนว

ริมขอบคลองแม่น้ำโขง จึงไม่สามารถใช้ประโยชน์พื้นที่ได้จนได้ ส่วนรูปแบบหลังคา หากมองจากมุมสูง จะเห็นเป็นโครงสร้างหลังคาจั่วสองชุดวางชนกัน มีความสูงประมาณ 2.00 - 3.00 เมตร (รูปที่ 5)



รูปที่ 3 รูปแบบเรือนค้าขายดั้งเดิม ในย่านเมืองเก่านครพนมในอดีต



รูปที่ 4 พื้นที่ส่วนด้านหน้าของเรือนค้าขายชั้นเดียว



รูปที่ 5 ตัวอย่างพื้นที่ส่วนด้านข้างและด้านหลังของเรือนค้าขายชั้นเดียว

เอกลักษณ์ของวัฒนธรรมท้องถิ่นที่มีการดำเนินชีวิตแบบธุรกิจค้าขายสินค้า ทำให้อาคารส่วนใหญ่เป็นเรือนค้าขาย มีรูปแบบทางสถาปัตยกรรมที่มีลักษณะเฉพาะในแต่ละยุคสมัย เป็นพื้นที่ทอดยาวไปตามแม่น้ำโขง และลักษณะทางด้านกายภาพ ส่งผลให้เกิดอิทธิพลทางด้านขนบธรรมเนียม วัฒนธรรม ประเพณีของคนไทยเชื้อสายจีน ลาว และเวียดนาม วิธีการก่อสร้างเรือนค้าขาย ตึกแถว มีลวดลายศิลปะแบบสกุลช่างชาวจีน และเวียดนามที่มีความชำนาญในด้านการหล่อ ปั้นปูน ทำให้อาคารตึกแถวเก่าเหล่านี้มีคุณค่าและความสำคัญต่อการบอกเล่าเหตุการณ์ทางประวัติศาสตร์ และเป็นศูนย์กลางด้านการค้าขายของเมืองนครพนม เช่น ร้านค้า โรงแรม ร้านอาหาร และอาคารทางศาสนา ได้แก่ วัดโอกาส วัดมหาธาตุ และวัดนักบุญอันนาหนองแสง เป็นสถานที่ยึดเหนี่ยวจิตใจผู้คนในพื้นที่มาช้านาน

1.4 มิติด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม

ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม หรือย่านเมืองเก่าที่ตั้งอยู่บนถนนสุนทรวิจิตร มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพการขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงทางสังคม วัฒนธรรม แบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเฉพาะพัฒนาการจากการตั้งถิ่นฐานและการขยายตัวของเมือง เช่น การก่อตั้ง ชุมชนบ้านมิตรภาพไทย - เวียดนามของท่านโฮจิมินห์ (อดีตประธานาธิบดีเวียดนาม) เป็นกลุ่มคนที่ลี้ภัย มาในช่วงปี พ.ศ. 2466 - 2472 อาคารในชุมชนมีลักษณะเป็นอาคารชั้นเดียว แสดงถึงความสัมพันธ์ใน มิติทางสังคมที่มีการแลกเปลี่ยนวัฒนธรรม และเอกลักษณ์ของอาคารได้อย่างดี และจากการที่ชุมชน มีคนอาศัยทั้งคนไทย จีน ลาว เวียดนาม และฝรั่งเศส ทำให้ได้รับเอาวัฒนธรรมที่หลากหลายของกลุ่มชาติพันธุ์ กิจกรรมการค้าขายมีความรุ่งเรืองเกิดจากชาวจีนได้ล่องเรือตามแม่น้ำโขง ผสมกับชาวลาวและคนเวียดนาม ก็เข้ามาค้าขายในพื้นที่ ทำให้ชุมชนบริเวณถนนวิจิตรสุนทร มีการก่อสร้างอาคารตามริมแม่น้ำโขงขึ้น โดยมีถนนสุนทรวิจิตรเป็นถนนสายหลัก และมีถนนสายรองหลายสายทำให้ง่ายต่อการเข้าถึง ปัจจุบัน หน่วยงานเทศบาลได้จัดให้เป็นพื้นที่ถนนคนเดิน และถนนวัฒนธรรมการส่งเสริมการท่องเที่ยว เช่น ประเพณีไหลเรือไฟช่วงเดือนตุลาคมตามลำน้ำโขงเพื่อบูชาพระแม่คงคา เป็นต้น

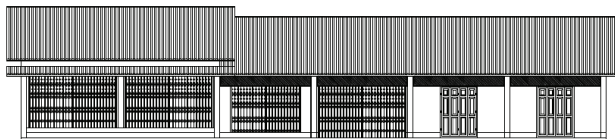
วิถีชีวิตของคนในพื้นที่ชุมชนดั้งเดิมในอดีต มีกิจกรรมและการค้าขายสินค้าประเภท งานฝีมือ เช่น งานเย็บผ้า จัดดอกไม้ เสริมสวย และวัตถุดิบที่มีในท้องที่ เช่น พิน หนังกวู ปลาข้าว เป็นต้น เมื่อการบริโภคสินค้าประเภทนี้มีความขบเซาะลง เนื่องจากผู้คนสนใจบริโภคสินค้าที่ผลิตจากเมืองหลวงมากขึ้น และการขาดผู้สืบทอดกิจการต่อของคนรุ่นหลัง ทำให้กิจการบางประเภทปิดตัวและมีจำนวนร้านค้าลดลง อีกทั้งเรือนค้าขายที่มีการปรับเปลี่ยนเจ้าของกิจการ จะถูกปรับการใช้งานแต่ยังคงรูปแบบดั้งเดิมของ เรือนค้าขายไว้ เช่น ร้านอาหาร ร้านเครื่องดื่ม โรงแรมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากได้รับความนิยมและความสนใจจากนักท่องเที่ยว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของชุมชน ในลักษณะ ชุมชนท่องเที่ยวและอยู่อาศัยมากกว่าชุมชนค้าขายอย่างในอดีต และความสัมพันธ์ของคนในชุมชน ลักษณะ สังคมค้าขายแบบเมืองเกิดการผสมผสานกับลักษณะสังคมแบบรวมกลุ่มของคนจีน และคนเวียดนาม สืบทอด มาอยู่ลูกหลานในปัจจุบัน เป็นระบบที่มีการเกื้อหนุน และช่วยเหลือกันในหมู่เครือญาติ บางครอบครัว ก็มีเครือญาติสัมพันธ์กันไปหลายชั้น ที่เกิดจากการแต่งงานกันระหว่างคนภายในชุมชนและคนภายนอก

การส่งเสริมและการอนุรักษ์อาคารที่มีคุณค่าทางสถาปัตยกรรมของจังหวัดนครพนม ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาและจัดทำแผนต่าง ๆ เช่น แผนการอนุรักษ์และปรับปรุงสภาพแวดล้อมย่านชุมชนเก่า อำเภอกาบัง จังหวัดนครพนม เสนอโครงการอนุรักษ์ฟื้นฟูอาคารเก่าและเรือนพื้นถิ่น เพื่อส่งเสริมให้เกิด การรักษาสภาพอาคาร อนุรักษ์ และบูรณะอาคารให้คงสภาพที่ดี [14] โครงการศึกษาวิจัยมาตรฐาน ที่อยู่อาศัยและชุมชนเพื่อคงไว้ซึ่งเอกลักษณ์และคุณค่าของเมือง ได้ศึกษาโดยการสำรวจภาคสนามเบื้องต้น และคัดเลือกชุมชนบริเวณถนนสุนทรวิจิตร เป็นชุมชนนำร่องภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากเป็นพื้นที่ ที่มีศักยภาพในด้านการอนุรักษ์หรือการรักษาชุมชนในระดับท้องถิ่น แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์หรือกลไกการดำเนินการ ที่ชัดเจน [1] ดังนั้น การศึกษาพัฒนาการการตั้งถิ่นฐาน และอัตลักษณ์ของเรือนค้าขาย ช่วยส่งเสริมการอนุรักษ์ อาคารประเภทเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม ให้คงความเป็นเอกลักษณ์ ทางสถาปัตยกรรมต่อไป

2. การสำรวจและเก็บข้อมูลเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

2.1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

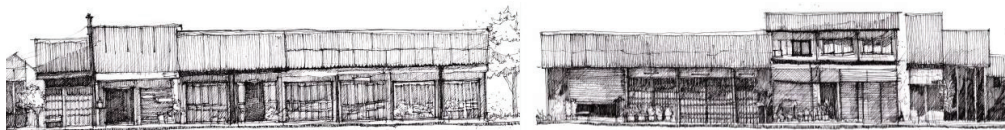
เรือนค้าขายชุมชนดั้งเดิมในระยะแรกได้รับเอาอิทธิพลจากจีนผสมกับสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น จนถึงสมัยสงครามอินโดจีน ได้รับอิทธิพลจากฝรั่งเศสจากทางฝั่งเมืองท่าแขก สปป.ลาว จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า เรือนค้าขายในย่านเมืองเก่าท่าแขก สปป.ลาว จากเดิมเคยใช้เป็นพื้นที่ค้าขาย และปรับเปลี่ยนการใช้งานเป็นที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน (รูปที่ 6) ซึ่งจะพบรูปแบบเรือนค้าขายที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เรือนค้าขายในพื้นที่ย่านเก่า อาคารห้องแถวก่ออิฐชั้นเดียวมีลักษณะพิเศษ คือ ด้านหน้าอาคารจะมีการก่ออิฐเสาสีขาวเรียบขนาดใหญ่ บางหลังมีซุ้มโค้ง ก่อนเข้าประตู รูปทรงหลังคามีลักษณะเป็นทรงจั่วสองซุดชนกัน ทางเดินด้านหน้ามีหลังคาคลุม ใช้เป็นทางเดินเชื่อมต่อกันระหว่างอาคาร จากเดิมเคยใช้เป็นพื้นที่ค้าขาย และปรับเปลี่ยนการใช้งานเป็นพื้นที่ค้าขายและเก็บสินค้า (รูปที่ 7) เมื่อมองจากด้านหน้าจะเห็นเป็นอาคารชั้นเดียว (รูปที่ 8) แต่เมื่อมองจากริมแม่น้ำโขงเข้ามายังตัวอาคาร จะพบว่า อาคารดังกล่าวมีความสูงประมาณ 2 - 3 ชั้น (รูปที่ 9) ซึ่งเป็นลักษณะการต่อเติมโครงสร้างจากด้านหน้าวัสดุส่วนใหญ่จะใช้ไม้ และเสาดอาคารจะวางอยู่แนวดลิ่งของแม่น้ำโขง ส่วนการใช้งานของอาคารชั้นเดียวส่วนใหญ่ จะใช้เพื่อการค้าขายหรือทำธุรกิจร้านอาหาร ข้อมูลจากการสำรวจพบอาคารประเภทนี้อยู่ 6 หลัง และมีการปรับปรุงโดยเจ้าของเรือนไปบางส่วน โดยมีการปรับเปลี่ยนผนังไม้ บานประตู วัสดุมุงหลังคา และการทาสีผนัง เท่านั้น



รูปที่ 6 ตัวอย่างเรือนค้าขายที่พบในย่านเมืองเก่าท่าแขก สปป.ลาว



รูปที่ 7 ตัวอย่างเรือนค้าขายที่พบในย่านเมืองเก่านครพนม



รูปที่ 8 ตัวอย่างมุมมองด้านหน้าเรือนค้าขายติดถนนสุนทรวิจิตร



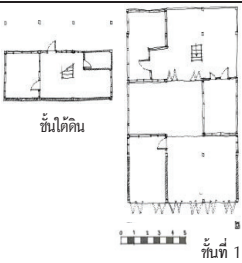
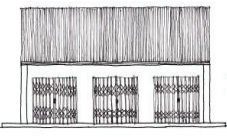
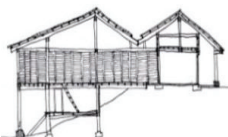
รูปที่ 9 ตัวอย่างมุมมองด้านข้างเรือนค้าขาย ตำแหน่งด้านหน้าติดถนนสุนทรวิจิตร และด้านหลังติดแม่น้ำโขง

องค์ประกอบหลักของเรือนค้าขายประกอบด้วย พื้นที่ค้าขายและพื้นที่พักอาศัย ส่วนพื้นที่ค้าขายจะเป็นพื้นที่เด่นสุด มีทั้งรูปแบบการค้าแบบธุรกิจขนาดเล็ก เช่น ขายของชำ ร้านเสริมสวย ร้านซ่อมรถ และธุรกิจการค้าขนาดใหญ่ เช่น ร้านอาหาร โรงแรม เป็นต้น ลักษณะการใช้พื้นที่เป็นแบบเปิด เข้าถึงพื้นที่ได้สะดวก และเป็นพื้นที่โล่ง มีการแบ่งหรือกั้นพื้นที่ใช้งานด้วยชั้นวางของหรือเฟอร์นิเจอร์ ส่วนพื้นที่พักอาศัยโดยส่วนใหญ่จะถูกจัดตำแหน่งไว้ด้านหลัง หากเป็นอาคารที่มีความสูง 2 - 3 ชั้น ส่วนพักอาศัยก็จะอยู่ตำแหน่งด้านบน และแยกเป็นส่วนกิจกรรมหลักที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย เช่น ห้องรับแขก ส่วนนั่งเล่น และส่วนกิจกรรมรองที่เข้าถึงได้ยาก เช่น ห้องนอน ห้องพระ และห้องทำงาน เป็นต้น

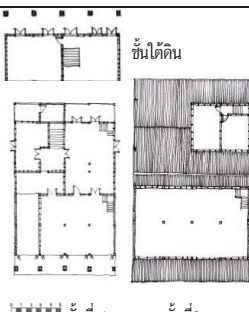
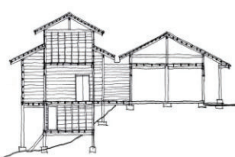
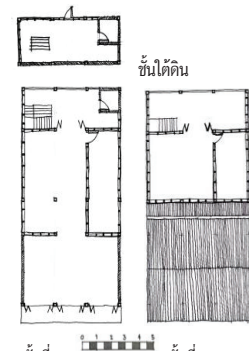
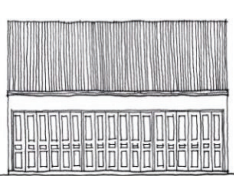
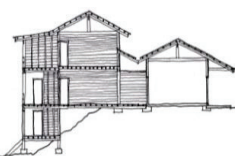
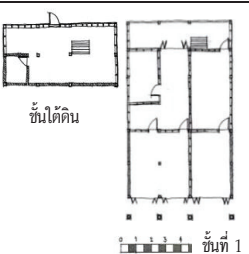
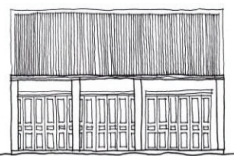
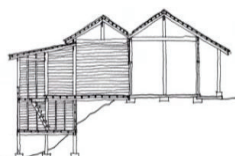
2.2 การสำรวจและรังวัดข้อมูลของเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

การศึกษารูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนค้าขายชั้นเดียวใช้การคัดเลือกโดยพิจารณาจากลักษณะความสำคัญ ในด้านคุณค่าและสภาพความแท้ดั้งเดิมของอาคารพบว่า มีอาคารเรือนค้าขายดั้งเดิมจำนวน 4 หลัง ซึ่งเป็นอาคารที่ก่อสร้างในระยะแรกที่ได้รับอิทธิพลจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น และมีตำแหน่งที่ตั้งบริเวณริมแม่น้ำโขง ย่านเมืองเก่า จังหวัดนครพนม (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

หลังที่	การวางผัง	รูปแบบอาคาร	วัสดุและโครงสร้าง
1. เลขที่ 230 ถนนสุนทรวิจิตร อายุเรือน 105 ปี เจ้าของ: นางปานิศา สุขประณะ	 ชั้นใต้ดิน พื้นที่ 1	 รูปด้านหน้า	 รูปดัด
	ตัวอาคารแบ่งเป็น 2 ส่วนด้านหน้าใช้ค้าขาย ด้านหลังใช้พักอาศัย	อาคารขนาด 3 ช่วงเสาหลังคาจั่ว ด้านหน้าก่ออิฐถือปูน ด้านหลังสร้างด้วยไม้	โครงสร้างเสา - คาน วัสดุเป็นไม้ วัสดุผนังเป็นกระเบื้องดินเผาต่อมาเปลี่ยนเป็นสังกะสี

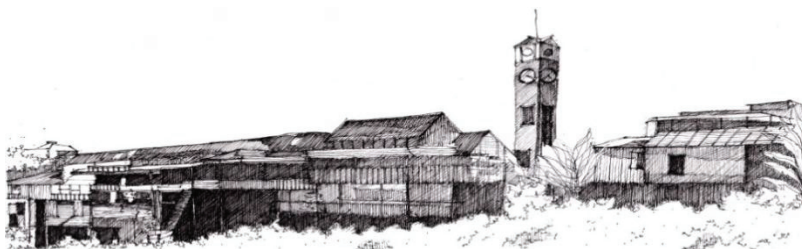
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม (ต่อ)

หลังที่	การวางผัง	รูปแบบอาคาร	วัสดุและโครงสร้าง
2. เลขที่ 249 ถนนสุนทรวิจิตร อายุเรือน 102 ปี เจ้าของ: นางมณีนันท์ รัตนโกสินทร์		 รูปด้านหน้า	 รูปดัด
	อาคารแบ่งเป็น 2 ส่วนด้านหน้าใช้ค้าขาย ด้านหลังใช้พักอาศัย ด้านหลังสุดเป็นที่โล่งใช้ปลูกผักสวนครัวและเชื่อมลงแม่น้ำโขง	หากมองจากถนนจะเห็นเป็นอาคารชั้นเดียวและถ้ามองจากด้านหลังจะเห็นเป็นอาคาร 3 ชั้น	โครงสร้างเสา - คาน วัสดุเป็นไม้พื้นคอนกรีตปูกระเบื้อง วัสดุมุงเป็นกระเบื้องดินเผาต่อมาเปลี่ยนเป็นสังกะสี
3. เลขที่ 235 ถนนสุนทรวิจิตร อายุเรือน 92 ปี เจ้าของ: นางบัวศรี อธิราช		 รูปด้านหน้า	 รูปดัด
	ตัวอาคารแบ่งเป็น 2 ส่วน ด้านหน้าใช้ค้าขาย ด้านหลังใช้พักอาศัย ด้านหลังสุดเป็นที่โล่งใช้ปลูกผักสวนครัว	ทางเดินด้านหน้ามีหลังคาคลุม ด้านหลังเป็นพื้นไม้ยกใต้ถุน ตัวอาคารมีช่องเปิดเป็นประตูบานเพี้ยม	โครงสร้างเสา - คาน วัสดุเป็นไม้พื้นคอนกรีตปูกระเบื้อง วัสดุมุงเป็นกระเบื้องดินเผาต่อมาเปลี่ยนเป็นสังกะสี
4. เลขที่ 179 - 181 ถนนสุนทรวิจิตร อายุเรือน 80 ปี เจ้าของ: นางโสภา ชิน		 รูปด้านหน้า	 รูปดัด
	ตัวอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบ่งเป็น 2 ส่วน ด้านหน้าใช้ค้าขาย ด้านหลังใช้พักอาศัย	อาคารหลังคาจั่วด้านหน้ามีหลังคาคลุม อาคารก่ออิฐถือปูน ด้านหลังเป็นไม้ ตัวอาคารมีช่องเปิดเป็นประตูบานเพี้ยม	โครงสร้างเสา - คาน วัสดุเป็นไม้ ด้านสกัดเป็นผนังรับน้ำหนัก วัสดุมุงเป็นกระเบื้องดินเผา

3. อัตลักษณ์ของเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

3.1 การวางผัง และการใช้พื้นที่

การวางผังอาคาร และการใช้พื้นที่แบ่งออกเป็นสองส่วน ด้านหน้าเป็นพื้นที่สำหรับค้าขาย และด้านหลังเป็นพื้นที่สำหรับพักอาศัย ซึ่งหากมองจากตำแหน่งผังบริเวณจะพบว่า อาคารจะถูกแบ่งโดยใช้หลังคาจั่วสองชุดวางชนกัน อาคารกลุ่มนี้เป็นอาคารในยุคแรกของย่านชุมชนดั้งเดิมนครพนม ซึ่งตั้งอยู่ติดแม่น้ำโขง มีวิถีชีวิตและความสัมพันธ์กับแม่น้ำ การใช้ที่ว่างด้านหลังโดยการต่อเติมระเบียง เมื่อมองจากตำแหน่งริมฝั่งแม่น้ำโขง จะเห็นเป็นโครงสร้างอาคารเป็นโครงสร้างไม้ และมีโครงสร้างบันได ต่อจากระเบียงด้านหลัง เพื่อลงไปสู่พื้นที่ปลูกพืชผักสวนครัว (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 ตัวอย่างพื้นที่ส่วนด้านหลังของเรือนค้าขายชั้นเดียว

3.2 รูปแบบอาคาร

รูปแบบเรือนค้าขายได้รับอิทธิพลเงินผสมกับรูปแบบพื้นถิ่นที่สามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี รูปทรงหลังคา เป็นหลังคาทรงจั่วหันด้านจั่วตั้งฉากกับถนน ความสูงหลังคาสูงประมาณ 2 - 3 เมตร ประตูด้านหน้าเป็นบานเฟี้ยมไม้ยาวตลอดช่วงเสาเพื่อใช้พื้นที่สำหรับค้าขาย ระเบียงด้านหลังทำบันไดเพื่อลงไปสู่พื้นที่สวน ทางเดินด้านหน้ามีหลังคาคลุมเพื่อวางสินค้า และสามารถเดินเชื่อมต่อกับร้านค้าข้างเคียงได้ ความกว้างของทางเดิน มีขนาดประมาณ 1 - 2 เมตร



(ก) พื้นที่ส่วนหน้าเป็นโครงสร้างผนังรับน้ำหนัก (ข) ส่วนต่อเติมด้านหลังเป็นโครงสร้างไม้

รูปที่ 11 ตัวอย่างโครงสร้างพื้นที่ส่วนด้านหน้า และโครงสร้างพื้นที่ส่วนต่อเติมด้านหลัง



รูปที่ 12 ตัวอย่างเสาอิฐ และเสาไม้ ตำแหน่งทางเดินส่วนด้านหน้าอาคาร



รูปที่ 13 ตัวอย่างเสาอิฐ และเสาไม้ ตำแหน่งทางเดินส่วนด้านหน้าอาคาร

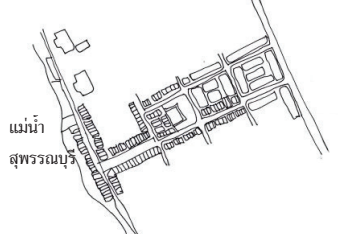
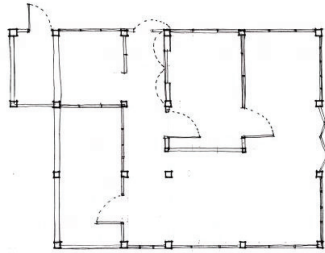
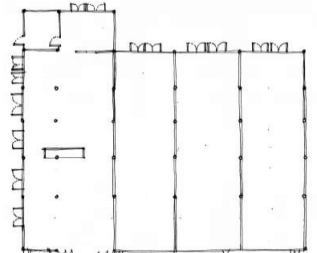
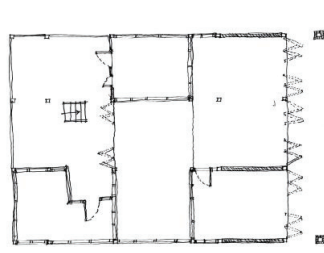
3.3 โครงสร้างและวัสดุ

เรือนค้าขายชั้นเดียวมีโครงสร้างเป็นผนังรับน้ำหนักร่วมกับโครงสร้างเสา - คาน ลักษณะพิเศษด้านหน้า ผนังด้านสกัดเป็นผนังรับน้ำหนักที่ใช้อิฐวางซ้อนกันแบบลายสลับ โครงสร้างหลังคาเป็นโครงสร้างไม้ทั้งหมด พื้นด้านหน้าเทคอนกรีตปูด้วยกระเบื้องดินเผา ด้านหลังเป็นพื้นไม้ (รูปที่ 11) ผนังด้านหน้าก่ออิฐฉาบปูน ด้านหลังเป็นผนังไม้ตีเกล็ดซ้อนทางนอน วัสดุผนังหลังคาเดิมเป็นกระเบื้องดินเผา และบางส่วนใช้โครงสร้างหลังคาเดิมและปรับวัสดุเป็นสังกะสี เนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ (รูปที่ 12) และตำแหน่งเสาคลุมทางเดินส่วนด้านหน้ายังคงลักษณะเดิมไว้ คือ เสาก่ออิฐขนาดใหญ่ แต่บางหลังเปลี่ยนเป็นเสาไม้แทน พื้นที่ส่วนหน้าใช้โครงสร้างก่ออิฐฉาบปูน ส่วนพื้นที่ด้านหลังเป็นโครงสร้างไม้ (รูปที่ 13)

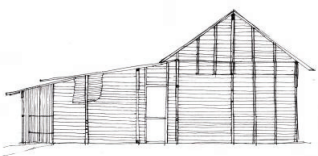
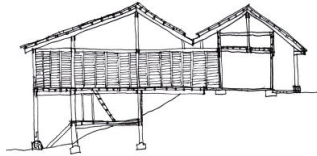
3.4 การเปรียบเทียบอัตลักษณ์ของเรือนค้าขายชั้นเดียวในพื้นที่ศึกษาและกรณีตัวอย่าง

การศึกษาเปรียบเทียบเรือนค้าขายชั้นเดียวใช้การคัดเลือกตัวอย่างจากชุมชนดั้งเดิม ที่มีพื้นที่ตั้งเป็นชุมชนริมน้ำ และใช้ประโยชน์อาคารเพื่อการค้าขายและอยู่อาศัย โดยเปรียบเทียบคุณลักษณะของเรือนค้าขายในด้านการวางผังอาคาร การใช้พื้นที่ รูปแบบอาคาร โครงสร้างและวัสดุอาคาร ได้แก่ 1) เรือนค้าขาย พื้นที่เชียงคาน 2) เรือนค้าขาย พื้นที่ตลาดศรีประจันต์ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบอัครลักษณะเรือนค้าขาย

เรือนค้าขาย เชียงคาน [4]	เรือนค้าขาย ตลาดศรีประจันต์ [3]	เรือนค้าขาย นครพนม
 แม่น้ำโขง ผังอาคารเริ่มขึ้นตามริมแม่น้ำโขง และกระจายตัวตามถนนชายโขง	 แม่น้ำ สุพรรณบุรี ผังอาคารเริ่มขึ้นบริเวณริมฝั่งแม่น้ำสุพรรณบุรี ก่อนขยายออกมาตามแนวแกนสู่ถนนใหญ่	 แม่น้ำโขง ผังอาคารเริ่มขึ้นตามริมแม่น้ำโขง และกระจายตัวตามถนนสุนทรวิจิตร และถนนเฟื่องนคร
 อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผังพื้นด้านหน้าเป็นส่วนค้าขายด้านหลังเป็นส่วนพักอาศัย	 อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผังพื้นด้านหน้าเป็นส่วนค้าขาย ด้านหลังเป็นส่วนพักอาศัยพื้นที่ส่วนต่อเติมไปทางด้านหลังลงสู่แม่น้ำ	 อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผังพื้นด้านหน้าเป็นส่วนค้าขาย ด้านหลังเป็นส่วนพักอาศัยตำแหน่งด้านหน้าของอาคาร ใช้เสาก่ออิฐขนาดใหญ่หรือเสาไม้ที่มีหลังคาคลุมเพื่อเป็นพื้นที่ค้าขาย และพื้นที่ส่วนต่อเติมไปทางด้านหลังมีโครงสร้างบันไดลงไปสู่พื้นที่เพาะปลูกริมแม่น้ำ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบอัตลักษณ์เรือนคำขาย (ต่อ)

เรือนคำขาย เชียงคน [4]	เรือนคำขาย ตลาดศรีประจันต์ [3]	เรือนคำขาย นครพนม
 - โครงสร้างอาคาร ใช้วิธีการก่อสร้างแบบเสาและคาน - วัสดุอาคารเป็นไม้ - รูปทรงหลังคาจั่วเดียว ส่วนต่อเติมด้านหลังเป็นหลังลาดเอียง	 - โครงสร้างอาคาร ใช้วิธีการก่อสร้างแบบเสาและคาน - วัสดุอาคารเป็นไม้ - รูปทรงหลังคาจั่วเดียว ส่วนต่อเติมด้านหลังเป็นหลังลาดเอียง	 - โครงสร้างส่วนด้านหน้าของอาคาร ใช้วิธีการก่อสร้างแบบเสาและคาน ผนังด้านสกัดเป็นผนังรับน้ำหนัก ที่ใช้อิฐวางซ้อนกันแบบลายสลับ - วัสดุอาคารเป็นไม้ และก่ออิฐถือปูน - รูปทรงหลังคาส่วนพื้นที่ด้านหน้า และส่วนต่อเติมด้านหลัง เป็นหลังคาจั่วสองซุงวางชนกัน

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาพัฒนาการการตั้งถิ่นฐานและอัตลักษณ์ของเรือนคำขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนมพบว่า 1) ย่านเมืองเก่ามีความสำคัญทางประวัติศาสตร์และเคยเป็นศูนย์กลางทางการค้า ศาสนา และวัฒนธรรม ตำแหน่งที่ตั้งของชุมชนและเรือนคำขายดั้งเดิมตั้งแต่อดีต มีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมและระบบนิเวศท้องถิ่น โดยการอพยพและเลือกทำเลที่ตั้งให้ความสำคัญกับแหล่งน้ำในการอุปโภค การบริโภค และการปลูกสร้างเรือนมีลักษณะติดกันเป็นแถวหลายคูหา อาคารมีลักษณะเกาะกลุ่มรวมกันเป็นย่านสำคัญของชุมชน โดยกลุ่มเรือนคำขายระยะแรก หรืออาคารที่ได้รับอิทธิพลจากจีนผสมสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ที่ตั้งอยู่ริมแม่น้ำโขง เป็นกลุ่มอาคารทางประวัติศาสตร์ที่แสดงถึงการปรับเปลี่ยนการใช้งานไปตามยุคสมัย แต่ยังคงความเป็นเอกลักษณ์ดั้งเดิมได้อย่างดี 2) อัตลักษณ์ของเรือนคำขายชั้นเดียว จังหวัดนครพนม ที่ได้จากการศึกษานี้คือ โครงสร้างเรือนใช้ระบบเสา - คาน ร่วมกับผนังรับน้ำหนัก ลักษณะเด่นของรูปทรงหลังคาจั่วสองซุงวางชนกัน การใช้เสาก่ออิฐขนาดใหญ่ มีโครงสร้างหลังคาคลุมเพื่อเป็นพื้นที่ค้าขาย และการต่อเติมพื้นที่ระเบียงด้านหลังและโครงสร้างบันไดเพื่อเชื่อมโยงพื้นที่เพาะปลูกริมน้ำสอดคล้องกับการศึกษารูปแบบและอัตลักษณ์เรือนพื้นถิ่น [15] พบว่า รูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเรือนพื้นถิ่น มีลักษณะเฉพาะที่เป็นการผสมผสานจากวัฒนธรรม และการปรับตัวด้านวิธีการอยู่อาศัย ตั้งแต่สมัยตั้งถิ่นฐานแรกเริ่ม ทำให้เกิดเป็นลักษณะเฉพาะอันเป็นอัตลักษณ์ที่โดดเด่น และทรงคุณค่า และการศึกษาการจัดพื้นที่ใช้สอยภายในเรือนพื้นถิ่นภาคอีสาน [16] พบว่า เรือนคำขายดั้งเดิมของจังหวัดนครพนม สะท้อนถึงลักษณะการใช้ชีวิตและรูปแบบการอยู่อาศัยที่แตกต่างกัน แต่ยังคงอยู่ร่วมกัน และผสมผสานกับบริบทได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะในการศึกษา

จากการศึกษาพัฒนาการการตั้งถิ่นฐานและอัตลักษณ์ของเรือนค้าขายชั้นเดียว ชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม มีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมจากการศึกษานี้ คือ 1) การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางสถาปัตยกรรม เช่น การบริหารจัดการและการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์อาคารเดิม โดยเจ้าของอาคาร หน่วยงาน หรือผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง 2) การศึกษาแนวทางการปรับปรุงหรือต่อเติมอาคารเดิม เช่น รูปแบบทางสถาปัตยกรรม โครงสร้างและวัสดุประกอบอาคารที่เหมาะสมและไม่เกิดความขัดแย้งกับรูปแบบอาคารเดิม ขั้นตอนและงบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงอาคารเดิม เป็นต้น เพื่อกำหนดแนวทางอนุรักษ์อาคารประเภทเรือนค้าขายชั้นเดียว ให้คงคุณค่าทางสถาปัตยกรรมของชุมชนดั้งเดิมริมแม่น้ำโขง จังหวัดนครพนม

References

- [1] Faculty of Architecture and Planning Thammasat University. (2010). **Residential and Community Standards Research Project to Maintain the Identity and Values of The City**. Bangkok: Thammasat University. (in Thai)
- [2] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2012). **Quality Standards Project. Fine Arts Environment Old Town Neighborhoods In the Central Region and East**. Bangkok : Property Printing Co.,Ltd.
- [3] Ornsiri, P. and Somkid, J. (2001). **The Local Trading House in the City**. Bangkok: Thailand Research Fund. (in Thai)
- [4] Chinoros, P. (2010). **The Study of Vernacular Shop in Town of Chiangkhan as the Community's Remembrance**. Master thesis in Architecture. Silpakorn University. (in Thai)
- [5] Tawatchai, S. (2015). **Architectural Characteristics of Row Houses in Nakhon Phanom Old Town**. Master thesis in Architecture. Khon Kaen University. (in Thai)
- [6] Nattavut, C. (2014). **An Architectural Management in the Old Town District for Cultural Tourism: Case Study of Shophouses in Wat O-Kas Song Community, Sunthornvijit Road, Nakhonphanom Province**. Master thesis in Architecture. Thammasat University. (in Thai)
- [7] Punyanutwipha, S. and Ekapol, S. (2017). A Study on the Architectural Identity of the Chanthaboon Waterfront Community for Store Interior Environment Design Guideline. **Built Environment Inquiry Journal**. Vol. 16, No. 1, pp. 44-54 (in Thai)
- [8] Winai, M. (2011). **The Home Stays Style of Reflective Architectural Identities for Samut Songkram**. Research Reports: Faculty of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University. pp. 63-64

- [9] Thanit, S. and Nopadon, T. (2017). Dynamics of House Styles in the Northeast of Thailand. **Academic Journal Faculty of Architecture, Khon Kaen University**. Vol. 15, No. 2, pp. 14-15
- [10] Anon, C. (2017). Urban Development and Architectural Typologies in Luang Prabang Under the Western Influences During the Period of Colonial State. **Academic Journal Faculty of Architecture, Khon Kaen University**. Vol. 15, No. 2, pp. 45-46
- [11] Sujit, W. (2011). **Where is Nakhon Phanom from**. Bangkok: Mae Kham Phang Publishing.
- [12] Umaporn, B., et al. (2008). The Study on Housing Development and Rehabilitation That Promotes The Identity of The City Area of Old Town Sakon Nakhon. **Built Environment Research Associates Conference (BERAC)**. pp. 84
- [13] Jatuporn, D. (2008). **The Ethic Indentity Construction of the Vietnamese Thai in Ban Na Jok, Tambon Nongyat, Amphoe Muang, Changwat Nakhonphanom**. Khon Kaen: Khon Kaen University. (in Thai)
- [14] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2015). **Project Quality standards Began Art environment Old Neighborhoods to Practice: A Management Plan Conservation and improvement of the Environment in the Old Town of Tha-UThen**. Nakhon Phanom Province. Bangkok : Property Printing Co.,Ltd. (in Thai)
- [15] Thungsakul, N., Weerataweemat, S., Suphamityotin, K., Promnar, S., Utaiwattananont, A., Arunee, N., and Thungsakul, K. (2017). Style and Identity of Vernacular Houses in Mun River and Phra Pleng Basin, Nakhon Ratchasima Province. **Academic Journal of Home of Proudness (AJHP)**. pp. 43
- [16] Danai, N. (2006). Spatial Usage in Earthen Dwellings : A Case Study in Southern Isan. **Journal of Makong Societies**. Vol. 2, No. 2, pp. 23-37

ผลของกระบวนการออสโมซิสของน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตสต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของชิ้นสับประดแวน

Effects of Coconut Flower Sugar and Oligofructose Osmotic Process on Mass Exchange and Sensory of Pineapple Rings

วิชมนี ยืนยงพุททกาล^{1*} ธีรารัตน์ อิทธิโสภณกุล² ศุภิสรา แสนกกล้า¹ และสุทธิดา คุ่มทรัพย์¹
Wichamaneeyuenyongputtakal^{1*} Teerarat Itthisoponkul² Suphisara Sankla¹ and
Sutthida Khumsub¹

Received: May 18, 2018; Revised: September 12, 2018; Accepted: September 13, 2018

บทคัดย่อ

การใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากสารให้ความหวานที่มีประโยชน์ต่อร่างกายเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ผลิตอาหารเพื่อสุขภาพได้ งานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวซึ่งมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำและใช้โอลิโกฟรุคโตสซึ่งให้ความหวานต่ำกว่าน้ำตาลซูโครสและมีสมบัติเป็นพรีไบโอติก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตส ในการออสโมซิสต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของชิ้นสับประดที่หั่นแบบเต็มแวน โดยแปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าวต่อโอลิโกฟรุคโตส ได้แก่ 60:0, 45:15, 30:30, 15:45 และ 0:60 (กรัม/100 กรัม) และเปรียบเทียบกับการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว เมื่อใช้เวลาออสโมซิส 360 นาที พบว่าการใช้สารละลายผสมต่างกันทำให้ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสาร ปริมาณความชื้น และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสแตกต่างกัน ($p < 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่า a_w ($p > 0.05$) การใช้สารละลายน้ำตาลดอกมะพร้าว 60 กรัม/ 100 กรัม ทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) และปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง (WR) สูงที่สุด แต่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมต่ำที่สุด ($p < 0.05$) สิ่งทดลองที่เหมาะสมที่สุด คือ สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวต่อโอลิโก ฟรุคโตส 15:45 กรัม/ 100 กรัม เมื่อใช้เวลาออสโมซิส 360 นาที มีค่า WL SG และ WR เท่ากับ 17.69 6.82 และ 10.70 % ตามลำดับ และได้รับคะแนนความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.03 การใช้สารละลายออสโมติกในรูปแบบผสมจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการออสโมซิสผลไม้ได้

คำสำคัญ : การออสโมซิส; สับประด; น้ำตาล; การแลกเปลี่ยนมวลสาร; การยอมรับทางประสาทสัมผัส

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

¹ Faculty of Science, Burapha University, Chonburi

² คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก

² Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok

* Corresponding Author E - mail Address: wich@buu.ac.th

Abstract

Healthy sweeteners are beneficial for healthy food production. Coconut flower sugar is low in a glycemic index value. Oligofructose is prebiotic which lower in sweetness intensity than sucrose. This research aimed to study the effect of coconut flower sugar and oligofructose mixtures on mass exchange and sensory perception in osmosis process of pineapple rings. The ratio of coconut flower sugar to oligofructose was varied to 60:0, 45:15, 30:30, 15:45 and 0:60 (g/ 100 g), and compared with a sucrose solution. After osmosis of pineapple rings for 360 min., it was found that the sugar solutions showed different effects on mass exchange value, moisture content and sensory acceptance score ($p < 0.05$), but not on aw ($p \geq 0.05$). The solution of 60 g/ 100 g coconut flower sugar resulted in the highest WL and WR, but the lowest overall sensory acceptance score ($p < 0.05$). The best condition was a ratio of coconut flower sugar to oligofructose as 15:45 g/100 g. After osmosis for 360 min., the WL, SG and WR values were equal to 17.69, 6.82 and 10.70 %, respectively. The overall sensory acceptance score was 7.03. An application of osmotic solution in a mixed form is an appropriate approach to osmotic dehydration of fruit.

Keywords: Osmosis; Pineapple; Sugar; Mass Exchange; Sensory Perception

บทนำ

สับปะรดเป็นผลไม้เศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศ โดยเป็นสินค้าที่จัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีศักยภาพในการส่งออกอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสับปะรดจึงเป็นสินค้าที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาแปรรูปโดยสร้างมูลค่าให้สูงขึ้น สับปะรดพันธุ์ตราดสีทองเป็นสับปะรดสายพันธุ์หนึ่งที่มีการปลูกในภาคตะวันออกโดยเฉพาะจังหวัดตราด โดยสับปะรดสายพันธุ์นี้ได้รับการรับรองเป็นสินค้าเกษตรบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสินค้านั้นมีคุณภาพหรือคุณลักษณะพิเศษโดยต้องผลิตจากแหล่งผลิตเฉพาะเจาะจง มีเนื้อสีเหลืองทอง แท่ง กรอบ รสชาติหวานอมเปรี้ยว และมีกลิ่นหอม [1] ด้วยลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์นี้จึงเกิดแนวคิดนำสับปะรดพันธุ์ตราดสีทองมาแปรรูป โดยมุ่งเน้นให้มีอายุการเก็บรักษานานกว่าของสดและใช้ส่วนผสมที่เอื้อต่อการผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดแปรรูปสับปะรดเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ โดยมีแนวคิดผลิตภัณฑ์ คือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์สับปะรดกึ่งแห้งมูลค่าสูงพร้อมรับประทาน โดยพยายามคงลักษณะรสชาติและกลิ่นรสของสับปะรดสดให้ได้มากที่สุด และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคที่รักสุขภาพ มีอายุการเก็บนานมากกว่าของสดและมีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา โดยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สับปะรดกึ่งแห้งมูลค่าสูงนี้มีหลักการที่สำคัญ คือ การแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้งซึ่งสามารถดำเนินการได้ภายใต้หลักการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic Dehydration) ร่วมกับการอบแห้ง สำหรับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากผักผลไม้โดยอาศัย

ความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ระหว่างภายในเซลล์ของผลไม้กับสารละลายภายนอกซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำจากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายที่เข้มข้นขึ้นกว่า โดยโมเลกุลของน้ำจะแพร่ผ่านเยื่อบาง ๆ ที่เรียกว่า เยื่อเลือกผ่าน (Semi Permeable Membrane) เป็นการกักตุนน้ำบางส่วนออกจากผลไม้ก่อนนำไปอบแห้งจนได้ความชื้นที่ต้องการ การออสโมซิสดำเนินการโดยการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างสารละลายออสโมติกกับชิ้นผลไม้และยังเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย (Physiologically Active Compound) เข้าสู่ชิ้นอาหารได้ [2] การเลือกใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลที่มีประโยชน์ต่อร่างกายแทนการใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแนวทางหนึ่งที่จะผลิตอาหารเพื่อสุขภาพได้ ตัวอย่างเช่น การใช้น้ำตาลจากธรรมชาติพวกน้ำผึ้ง น้ำเชื่อมเมเปิล โอลิโกฟรุคโตส เป็นต้น อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความสามารถในการกระตุ้นการแพร่ออกของน้ำในระหว่างการแลกเปลี่ยนมวลสารและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ด้วย [3]

งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำตาลดอกมะพร้าว ซึ่งมีกลิ่นหอมเป็นเอกลักษณ์ ผลิตจากน้ำหวานของช่อดอกมะพร้าว มีแร่ธาตุและวิตามินมากกว่าน้ำตาลซูโครส เช่น โพแทสเซียม เหล็ก และทองแดง ให้พลังงานต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส นอกจากนี้น้ำตาลดอกมะพร้าวยังมีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index; GI) เท่ากับ 35 ซึ่งต่ำกว่าค่า GI ของน้ำตาลซูโครส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 65 นอกจากนี้ยังเลือกใช้โอลิโกฟรุคโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีรสชาติหวานเล็กน้อย ให้พลังงานและให้ความหวานต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส มีสมบัติเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) ชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ มีประโยชน์กับจุลินทรีย์ชนิดดีในร่างกายที่ทำงานอยู่ในระบบย่อยอาหารและระบบขับถ่าย [4] โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารละลายออสโมติกจากน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตสในการออสโมซิสต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของชิ้นสับประคตวนที่หั่นแบบเต็มแวน

วิธีดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างสับประคต

นำสับประคตพันธุ์ตราคัสทอง ผลแก่เต็มที่ โดยเนื้อสับประคตมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 15 - 18 องศาบริกซ์ คัดเลือกผลที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (น้ำหนักผลประมาณ 1,200 - 1,400 กรัม) ไม่มีตำหนิและรอยช้ำ นำสับประคตมาปอกเปลือกและหั่นเนื้อสับประคตแบบเต็มแวนหรือวงแหวน ควบคุมชิ้นสับประคตให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 เซนติเมตร และหนาประมาณ 1.5 เซนติเมตร โดยเจาะแกนออกเป็นรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร นำชิ้นสับประคตมาแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.5 % เป็นเวลา 10 นาที เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

2. การเตรียมสารละลายออสโมติก

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตส แทนการใช้ซูโครส จึงเตรียมสารละลายออสโมติกโดยแปรสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำตาลดอกมะพร้าว (ตรา Cobie brown, ประเทศไทย) ต่อโอลิโกฟรุคโตส (P95, Beneo ORAFIT[®], ประเทศเบลเยียม) เป็น 5 ระดับ ได้แก่ 60:0, 45:15, 30:30, 15:45 และ 0:60 (กรัม/ 100 กรัม) และเปรียบเทียบกับ การใช้ซูโครส (ตรามิตรผล, ประเทศไทย) เพียงอย่างเดียว (ตัวควบคุม) รวมเป็น 6 สิ่งทดลอง

โดยควบคุมความเข้มข้นของทุกสิ่งทดลองเท่ากับ 60 กรัม/ 100 กรัม ดำเนินการโดยชั่งน้ำตาลตามปริมาณที่กำหนด ผสมน้ำแล้วคนให้น้ำตาลละลาย นำสารละลายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 - 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที เพื่อฆ่าเชื้อในสารละลาย โดยใช้เตาให้ความร้อน (Hot Plate) ตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้งาน

3. การออสโมซิสและการวิเคราะห์คุณภาพ

นำชิ้นสับประดที่เตรียมไว้มาใส่ในตะกร้าสแตนเลสแบบโปร่ง รูปทรงกระบอกแบบมีฝาปิด ซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 2 x 2 เซนติเมตร แล้วนำมาแช่ให้จมน้ำในสารละลายออสโมติกที่บรรจุในโหลแก้ว ปิดด้วยลูนีเนียมฟอยด์ กำหนดอัตราส่วนสารละลายออสโมติกต่อชิ้นสับประดเท่ากับ 4:1 (โดยน้ำหนัก) แช่เป็นเวลา 360 นาที ที่อุณหภูมิห้อง [5] สุ่มตัวอย่างทุก 60 นาที นำตัวอย่างมาชั่งให้แห้งด้วยกระดาษชั่งน้ำหนักและหาปริมาณความชื้น [6] แล้วคำนวณค่าการแลกเปลี่ยนมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR) เพื่ออธิบายการแลกเปลี่ยนมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส โดยคำนวณจากสมการที่ (1) - (3) [7]

$$WL(\%) = \frac{(W_0 M_0 - W_t M_t)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{[W_t - (1 - M_t) - W_0(1 - M_0)]}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

$$WR(\%) = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (กรัม)

W_t = น้ำหนักตัวอย่างหลังการออสโมซิส (กรัม)

M_0 = ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (กรัมน้ำ/ 100 กรัมตัวอย่าง)

M_t = ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิส (กรัมน้ำ/ 100 กรัมตัวอย่าง)

นอกจากนี้สุ่มตัวอย่างสับประดหลังการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที มาวิเคราะห์ค่า a_w โดยใช้เครื่องวัดค่า a_w (Novasina, รุ่น AG LabMASTER- a_w) รวมทั้งประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยการประเมินความชอบด้วยวิธี 9-point hedonic scale ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน สำหรับการคัดเลือกสิ่งทดลองที่เหมาะสม มีเกณฑ์การพิจารณา คือ เลือกสิ่งทดลอง (ใช้น้ำตาลคอกมมะพร้าวและ/หรือน้ำตาลโตนด) ที่ทำให้มีค่า WL และค่า WR สูง มีปริมาณความชื้นและค่า a_w ต่ำ รวมถึงได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยได้รับคะแนนความชอบโดยรวมอย่างน้อย 6 คะแนน

ผลการทดลองและวิจารณ์

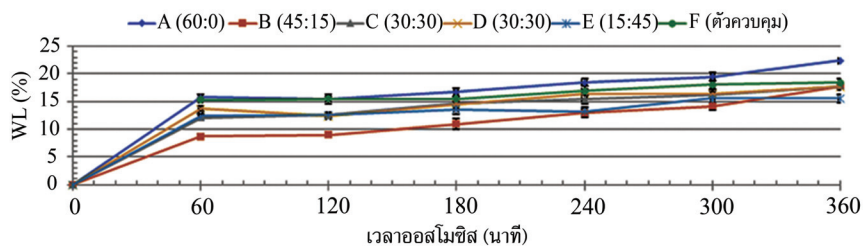
1. ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างการออสโมซิส

ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารของสับประคั่วระหว่างการออสโมซิส ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรวมที่ลดลง (WR) แสดงผลดังรูปที่ 1 - 3 พบว่าเมื่อใช้เวลาการออสโมซิสเพิ่มขึ้นมีผลให้แนวโน้มค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารทุกค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกและความเข้มข้นภายในชิ้นสับประคั่วมีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ผลไม้กับสารละลายภายนอก เกิดเป็นแรงขับทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างภายในเซลล์ของชิ้นสับประคั่วและสารละลายภายนอกจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ผ่านเซลล์เมมเบรนของผลไม้ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารในทิศทางสวนทางกันเป็น 2 ทิศทางหลัก ทิศทางแรกคือ น้ำภายในเซลล์ของผลไม้จะแพร่ออกสู่สารละลายออสโมติก และทิศทางที่สอง คือ ตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกจะแพร่เข้าสู่เซลล์ของผลไม้ [8] จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงเวลา 60 นาทีแรกเกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารอย่างมาก ทำให้ทุกสิ่งทดลองมีค่า WL SG และ WR อยู่ในช่วงประมาณ 8 - 15, 5 - 10 และ 3 - 5 % ตามลำดับ สอดคล้องกับที่มีการรายงานว่าการออสโมซิสผลบลูเบอร์รี่โดยการแช่ในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากซูโครสความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณน้ำที่สูญเสียและของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดในการออสโมซิสช่วง 60 นาทีแรก โดยมีค่า WL ประมาณ 6.5 % และมีค่า SG ประมาณ 5.5 % และพบว่ามีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาการออสโมซิสนานขึ้น [9] ทั้งนี้เนื่องมาจากการในระยะแรกของการออสโมซิสมีความแตกต่างของแรงดันออสโมติกมากจึงมีแรงขับให้เกิดการแพร่มวลน้ำและของแข็งมากและรวดเร็ว เมื่อเวลาออสโมซิสนานขึ้นความแตกต่างของแรงดันออสโมติกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการแพร่ของมวลน้ำออกจากตัวอย่างมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็มีการแพร่ของของแข็งเข้าสู่ตัวอย่างมากขึ้นเช่นกัน จึงเป็นผลให้การแลกเปลี่ยนมวลสารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นน้อยกว่าช่วงแรกของการออสโมซิสและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาออสโมซิสนานขึ้น

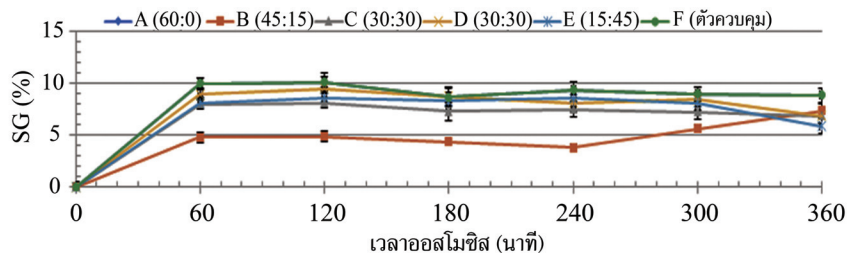
2. ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารและคุณภาพของชิ้นสับประคั่วหลังการออสโมซิส

2.1 ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสาร

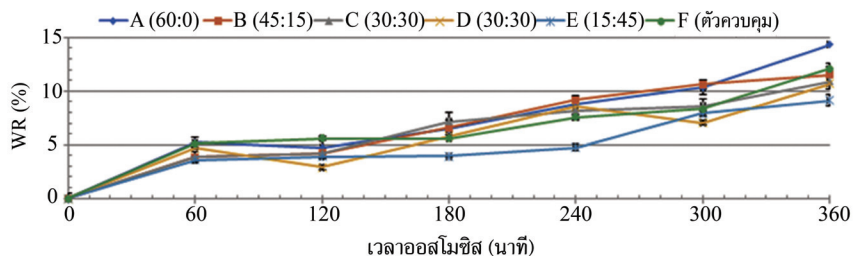
ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสาร ได้แก่ ค่า WL SG และ WR ของชิ้นสับประคั่วที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตสแตกต่างกันมีผลทำให้ชิ้นสับประคั่วมีค่า WL SG และ WR แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากตารางที่ 1 หากพิจารณาเฉพาะสิ่งทดลองที่ใช้ น้ำตาลเพียงชนิดเดียว (สิ่งทดลองที่ 1 5 และ 6) พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ที่มีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียว 60 กรัม/ 100 กรัม มีค่า WL และ WR สูงที่สุด เท่ากับ 22.43 และ 14.34 % และมีค่า SG สูงเท่ากับ 8.08 % รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว 60 กรัม/ 100 กรัม มีค่า WL SG และ WR เท่ากับ 18.44 8.83 และ 12.11 % ตามลำดับ ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 5 ซึ่งใช้โอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว 60 กรัม/100กรัม มีแนวโน้มค่า WL SG และ WR ต่ำที่สุดเท่ากับ 15.55 5.86 และ 9.14 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลดอกมะพร้าวช่วยกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารได้มากที่สุด รองลงมาคือ การใช้ซูโครส และโอลิโกฟรุคโตส



รูปที่ 1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ระหว่างการออสโมซิสสับประรด เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (A-E) และซูโครส (F)



รูปที่ 2 ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) ระหว่างการออสโมซิสสับประรด เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (A-E) และซูโครส (F)



รูปที่ 3 ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) ระหว่างการออสโมซิสสับประรด เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (A-E) และซูโครส (F)

ชนิดของสารละลายออสโมติกที่ต่างกันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยสาเหตุหนึ่งที่มีความสำคัญคือ น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ของน้ำตาลที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติก หากใช้น้ำตาลมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารมากกว่าน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยในระหว่างการออสโมซิสน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ของผักผลไม้ได้ง่ายกว่าน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลสูง ส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกสูงกว่า จึงมีโอกาสดันน้ำให้เกิดการถ่ายเทมวลของแข็งและมวลน้ำได้มากกว่า นอกจากนี้มีรายงานว่าองค์ประกอบของน้ำตาลที่ใช้และโครงสร้างของน้ำตาลมีผลต่อพฤติกรรมของการเป็นสารออสโมติก (Osmotic Behavior) และอัตราการแพร่ (Rate of Diffusion) ในระหว่างการแลกเปลี่ยนมวลสารด้วย [3], [8] จากผลการทดลองพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของน้ำตาลที่ใช้ในสารละลายออสโมติกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าการแลกเปลี่ยน

มวลสาร กล่าวคือ โอลิโกฟรุคโตส มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 342 - 1,638 กรัม/ โมล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าระดับความเป็นโพลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โอลิโกฟรุคโตส ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 700 กรัม/ โมล ซึ่งน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสเป็นน้ำตาลที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จัดเป็นอนุพันธ์ของสารอินลินที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากหน่วยฟรุคโตสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -2, 1 glycosidic เป็นฟรุคแทนที่มีค่า DP ตั้งแต่ 3 - 10 โดยมีหน่วยโมเลกุลของกลูโคสมาต่อท้าย ส่วนน้ำตาลดอกมะพร้าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซูโครส (มีน้ำหนักโมเลกุล 342.30 กรัม/โมล) กลูโคส (มีน้ำหนักโมเลกุล 180.16 กรัม/โมล) และฟรุคโตส (มีน้ำหนักโมเลกุล 180.16 กรัม/โมล) [10] จึงกล่าวได้ว่า โอลิโกฟรุคโตสมีองค์ประกอบของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด รองลงมาคือ ซูโครส และน้ำตาลดอกมะพร้าว จึงส่งผลให้พบแนวโน้มว่าสิ่งทดลองที่ 1 ซึ่งมีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียว มีค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารสูงที่สุด รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งมีการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว และสิ่งทดลองที่ 5 ซึ่งมีการใช้โอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว ($p < 0.05$)

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) ของชิ้นสับประคั่วที่ผ่านการอบนํ้าเป็นเวลา 360 นาที เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (สิ่งทดลองที่ 1 - 5) และซูโครส (สิ่งทดลองที่ 6)

สิ่งทดลอง	ปริมาณที่ใช้ในสารละลายออสโมติก 100 กรัม			ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารหลังออสโมซิส (%)		
	น้ำตาลดอกมะพร้าว	โอลิโกฟรุคโตส	ซูโครส	WL	SG	WR
1	60	0	0	22.43 ^a $\pm$ 0.44	8.08 ^{ab} $\pm$ 0.16	14.34 ^a $\pm$ 0.61
2	45	15	0	17.73 ^b $\pm$ 0.87	7.33 ^{abc} $\pm$ 0.10	11.54 ^b $\pm$ 0.71
3	30	30	0	17.72 ^b $\pm$ 0.95	6.88 ^{bc} $\pm$ 0.60	10.88 ^b $\pm$ 0.66
4	15	45	0	17.69 ^b $\pm$ 0.43	6.82 ^{bc} $\pm$ 0.84	10.70 ^b $\pm$ 0.28
5	0	60	0	15.55 ^c $\pm$ 0.77	5.86 ^c $\pm$ 1.11	9.14 ^c $\pm$ 0.42
6	0	0	60	18.44 ^b $\pm$ 0.64	8.83 ^a $\pm$ 0.23	12.11 ^b $\pm$ 0.35

a, b, c คือ ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า WL และค่า WR พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ที่ใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด จึงส่งผลให้มีค่า WL เท่ากับ 22.43 % และค่า WR เท่ากับ 14.34 % ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว มีค่า WL เท่ากับ 18.44 % และค่า WR เท่ากับ 12.11 % และสิ่งทดลองที่ 5 ซึ่งใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว มีค่า WL เท่ากับ 15.55 % และค่า WR เท่ากับ 9.14 % ตามลำดับ โดยเรียงลำดับตามน้ำหนักโมเลกุลจากต่ำไปสูง เมื่อพิจารณาค่า SG พบแนวโน้มว่า สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว มีค่า SG สูงที่สุดเท่ากับ 8.83 % ซึ่งสูงกว่าสิ่งทดลองที่ 1 ที่ใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียวที่มีค่า SG เท่ากับ 8.08 % ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำตาลดอกมะพร้าวที่ใช้เป็นน้ำตาลจากธรรมชาติที่ไม่ได้มีเพียงองค์ประกอบของน้ำตาล

เพียงอย่างเดียว ยังมีแร่ธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบด้วย เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจขัดขวางการแพร่เข้าของน้ำตาลได้ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพกตินบริเวณชั้นมิลเดิลลามลลาของผนังเซลล์พืช เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตตที่ไม่ละลายน้ำ จึงทำให้เกิดชั้นกีดขวางซึ่งมีโอกาสไปขัดขวางการแพร่ของตัวถูกละลายในสารละลายที่เข้าไปในเซลล์เนื้อเยื่อของผลไม้ [11] จึงอาจมีผลทำให้สิ่งทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียว มีค่า SG ต่ำกว่าสิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวที่เป็นน้ำตาลที่ค่อนข้างมีความบริสุทธิ์มาก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยพบแนวโน้มว่าการใช้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะแพร่เข้าไปในเนื้อเยื่อผลไม้ได้มากกว่าจึงส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกสูงกว่าและทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารได้มากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลโพลิโกฟรุคโตส มีผลให้ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารของแอปเปิ้ลแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำตาลที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างที่แตกต่างกันจึง มีผลให้พฤติกรรมของการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ผลไม้มีความแตกต่างกันด้วย โดยพบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสทำให้ชั้นแอปเปิ้ลมีค่า WL และค่า SG สูงกว่าการใช้น้ำตาลโพลิโกฟรุคโตสที่สภาวะการออสโมซิสและความเข้มข้นเดียวกัน โดยน้ำตาลซูโครสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าน้ำตาลโพลิโกฟรุคโตส จึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปยังเนื้อเยื่อชั้นแอปเปิ้ลได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกสูงกว่า และทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารได้มากกว่า [12] และสอดคล้องกับการออสโมซิสส้มสายน้ำผึ้งโดยใช้สารละลายออสโมติกเป็นส่วนผสมของซูโครส 60 % และกลีเซอรอล 60 % (ที่อัตราส่วน 9:1, 8:2, 7:3, 6:4 และ 5:5 w/w ตามลำดับ) พบว่า เมื่อใช้ปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น (ที่อัตราส่วนเท่ากับ 5:5 w/w) ทำให้มีค่า WL และ SG สูงที่สุด เนื่องจากการใช้กลีเซอรอลมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใช้กลีเซอรอลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าซูโครสส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารได้มากขึ้น [13]

จากตารางที่ 1 พบว่า สิ่งทดลองที่มีการใช้สารละลายออสโมติกในรูปแบบสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและโพลิโกฟรุคโตสในสิ่งทดลองที่ 2 3 และ 4 มีแนวโน้มทำให้ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสาร ได้แก่ ค่า WL SG และ WR มากกว่าการใช้โพลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารต่ำกว่าการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียว ($p < 0.05$) โดยการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวผสมร่วมกับโพลิโกฟรุคโตส ในสิ่งทดลองที่ 2 3 และ 4 มีผลต่อค่า WL SG และ WR ในแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ การใช้ปริมาณโพลิโกฟรุคโตส 15 30 และ 45 กรัม/ 100 กรัม ผสมกับน้ำตาลดอกมะพร้าวในปริมาณ 45 30 และ 15 กรัม/ 100 กรัม ตามลำดับ ในสิ่งทดลองที่ 2 3 และ 4 มีผลทำให้ค่า WL ของชิ้นสับประดามีค่าเท่ากับ 17.73 17.72 และ 17.69 % ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ค่า SG ของชิ้นสับประดามีค่าเท่ากับ 7.33 6.88 และ 6.82 % ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และค่า WR ของชิ้นสับประดามีค่าเท่ากับ 11.54 10.88 และ 10.70 % ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เช่นกัน โดยแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าว (ปริมาณ 45 30 และ 15 กรัม/ 100 กรัม) ผสมกับโพลิโกฟรุคโตส (15 30 และ 45 กรัม/ 100 กรัม) ทำให้ช่วยเพิ่มค่า WL (17.69 - 17.73 %) ค่า SG (6.82 - 7.33 %) และค่า WR (10.70 - 11.54 %) ให้มากกว่าการใช้โพลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว ที่มีค่า WL ค่า SG และค่า WR เท่ากับ 15.55 5.86 และ 12.11 % ตามลำดับ

2.2 ปริมาณความชื้นและค่า a_w

ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของขึ้นสับประดานที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและโอลิโกฟรุคโตสแตกต่างกันมีผลทำให้ขึ้นสับประดานมีปริมาณความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้น เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสแตกต่างกันพบว่า สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส มีผลต่อปริมาณความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสิ่งทดลองที่ 1 ที่มีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียวมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด (72.86 %) แต่ไม่แตกต่างกับสิ่งทดลองที่ 6 ที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวที่มีปริมาณความชื้น 73.45 % ($p \geq 0.05$) ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 5 ที่มีการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียวมีค่าปริมาณความชื้นสูงที่สุด (75.80 %) แต่ไม่แตกต่างกับสิ่งทดลองที่ 2 3 และ 4 ที่มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 74.78 - 74.91 % ($p \geq 0.05$) จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่า WL ซึ่งค่า WL หมายถึง ปริมาณน้ำที่สูญเสีย นั่นคือ เมื่อค่า WL เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ขึ้นสับประดานมีปริมาณความชื้นลดลง เกิดจากกลไกการถ่ายเทมวลน้ำของขึ้นสับประดานกับสารละลายออสโมติกในกระบวนการออสโมซิส เมื่อขึ้นสับประดานเกิดการแพร่ออกของน้ำที่อยู่ภายในขึ้นสับประดานได้มากย่อมมีแนวโน้มให้ขึ้นสับประดานมีปริมาณความชื้นลดลงนั่นเอง โดยพบว่าขึ้นสับประดานที่ผ่านการออสโมซิสทุกสิ่งทดลองมีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าขึ้นสับประดานที่ไม่ผ่านการออสโมซิส (สับประดานสดปริมาณความชื้นเริ่มต้น 84.84 %) แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการออสโมซิสในงานวิจัยนี้สามารถลดปริมาณความชื้นในขึ้นสับประดานได้ประมาณ 10.66 - 14.12 %

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้น และค่า a_w ของขึ้นสับประดานที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (สิ่งทดลองที่ 1 - 5) และซูโครส (สิ่งทดลองที่ 6)

สิ่งทดลอง	ปริมาณที่ใช้ในสารละลายออสโมติก 100 กรัม	ค่าการแลกเปลี่ยนมวลสารหลังออสโมซิส (%)			
	น้ำตาลดอกมะพร้าว	โอลิโกฟรุคโตส	ซูโครส	ความชื้น (%)	a_w^{ns}
1	60	0	0	72.86 ^c ± 0.42	0.980 ± 0.004
2	45	15	0	74.78 ^{ab} ± 0.90	0.985 ± 0.007
3	30	30	0	74.90 ^{ab} ± 0.52	0.986 ± 0.004
4	15	45	0	74.91 ^{ab} ± 0.05	0.986 ± 0.008
5	0	60	0	75.80 ^a ± 0.85	0.988 ± 0.002
6	0	0	60	73.45 ^{bc} ± 0.71	0.984 ± 0.005

a, b, c คือ ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ns คือ ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า a_w พบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.980 - 0.988 แต่พบว่าชั้นสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสมีค่า a_w ต่ำกว่า ชั้นสับปะรดที่ไม่ผ่านการออสโมซิส (0.994) ในระหว่างการออสโมซิสจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนมวลสารที่มีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) ในชั้นสับปะรด กล่าวคือ น้ำภายในเซลล์ของผลไม้จะแพร่ออกสู่สารละลายออสโมติกจึงมีโอกาสน้ำอิสระในชั้นสับปะรดลดลงได้ นอกจากนี้ตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติก ซึ่งได้แก่ น้ำตาลชนิดต่าง ๆ ที่ใช้จะแพร่เข้าสู่เซลล์ของชั้นสับปะรดได้ โมเลกุลของน้ำตาลที่เข้าไปในเซลล์นี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำอิสระ จึงมีโอกาสน้ำอิสระที่อยู่ในชั้นสับปะรดเปลี่ยนเป็นน้ำที่พันธะ (Bound Water) จึงไม่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ [11] เป็นผลให้ชั้นสับปะรดมีปริมาณน้ำอิสระในเซลล์ลดลง นั่นคือค่า a_w ต่ำลงนั่นเอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้กระบวนการออสโมซิสสามารถลดค่า a_w ในชั้นสับปะรดได้ประมาณ 0.014 - 0.006 สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่าการออสโมซิสผลโกจิเบอร์รี่ โดยแช่ผลโกจิเบอร์รี่ในสารละลายออสโมติกที่เวลา 60 และ 180 นาที และที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าผลโกจิเบอร์รี่ที่ผ่านการออสโมซิสมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.788 - 0.917 ซึ่งต่ำกว่าผลโกจิเบอร์รี่ที่ยังไม่ผ่านการออสโมซิส (0.937) ซึ่งสามารถลดค่า a_w ได้ประมาณ 0.020 - 0.149 [14] แสดงให้เห็นว่าการออสโมซิสสามารถลดค่า a_w ของผลไม้สดลงได้

2.3 ความชอบทางประสาทสัมผัส

จากตารางที่ 3 แสดงคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของชั้นสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและโพลิฟรุคโตสแตกต่างกันพบว่า คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมของทุกสิ่งทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏพบว่า สิ่งทดลองที่ 5 ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด (7.30 คะแนน) อยู่ในระดับชอบปานกลาง เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบด้านสีพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 และ 5 ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด (7.03 คะแนน) อยู่ในระดับชอบปานกลาง จากการทดลองสังเกตพบว่าสารละลายออสโมติกที่ใช้มีสีไม่เหมือนกัน โดยสารละลายน้ำตาลดอกมะพร้าวมีสีน้ำตาล ในขณะที่สารละลายซูโครสและโพลิฟรุคโตสมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมค่อนข้างใส ดังนั้นเมื่อนำน้ำตาลดอกมะพร้าวในสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้นทำให้สารละลายออสโมติกมีสีออกน้ำตาลเข้มขึ้น การแช่ชั้นสับปะรดในสารละลายออสโมติกเป็นเวลาถึง 360 นาที จึงมีโอกาสน้ำอิสระมีสีน้ำตาลหรือมีสีคล้ำขึ้นด้วย ลักษณะของชั้นสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ซึ่งมีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียวทำให้ชั้นสับปะรดมีสีออกน้ำตาลหรือมีสีคล้ำขึ้นมากกว่าสิ่งทดลองอื่น ซึ่งอาจมีผลให้ผู้ทดสอบชอบสีและลักษณะปรากฏน้อยที่สุด จึงได้รับคะแนนความชอบด้านสีและลักษณะปรากฏต่ำที่สุด ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 4 5 และ 6 ที่มีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวลดลงหรือไม่ใช้เลย สีของชั้นสับปะรดหลังการออสโมซิสจึงมีความใกล้เคียงกับสับปะรดสดมากกว่า ผู้ทดสอบจึงมีแนวโน้มให้คะแนนความชอบมากกว่าตัวอย่างอื่น (7.03 7.03 และ 7.00 คะแนน ตามลำดับ) การที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากน้ำตาลที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติกมีกลิ่นที่แตกต่างกัน โดยน้ำตาลดอกมะพร้าวมีกลิ่นหอมหวานของน้ำตาลค่อนข้างเข้ม ในขณะที่โพลิฟรุคโตสมีกลิ่นหอมหวานอ่อน ๆ และน้ำตาลซูโครสไม่มีกลิ่นเลย พบข้อสังเกตว่าการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียวในสิ่งทดลองที่ 1 สับปะรด

หลังการอบสโมซิสมีกลิ่นหอมของน้ำตาลดอกมะพร้าวเข้มข้นกว่ากลิ่นสับปะรด การใช้โอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียวในสิ่งทดลองที่ 5 และการใช้ซูโครสอย่างเดียวในสิ่งทดลองที่ 6 สับปะรดหลังการอบสโมซิสยังคงมีกลิ่นหอมของสับปะรด ซึ่งกล่าวได้ว่าให้กลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ของน้ำตาลดอกมะพร้าวหรือกลิ่นสับปะรดอย่างชัดเจน ผู้ทดสอบมีความคุ้นเคยกับกลิ่นและเป็นกลิ่นที่พึงประสงค์ จึงให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นสำหรับสิ่งทดลองที่ 1 5 และ 6 มากกว่าสิ่งทดลองอื่น (6.23 6.83 และ 6.77 คะแนน ตามลำดับ) แต่เมื่อใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวผสมกับโอลิโกฟรุคโตสในสัดส่วนน้ำตาลดอกมะพร้าว 45 และ 30 กรัม/100 กรัม ในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 พบว่าสับปะรดหลังการอบสโมซิสมีกลิ่นผสมกันระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวกับสับปะรด กล่าวคือ เกิดเป็นกลิ่นใหม่ที่ไม่เหมือนกับกลิ่นน้ำตาลดอกมะพร้าวหรือกลิ่นสับปะรดอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้ทดสอบไม่คุ้นเคย ผู้ทดสอบจึงให้คะแนนความชอบกลิ่นในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 น้อยกว่าสิ่งทดลองอื่น และในขณะที่สิ่งทดลองที่ 4 เป็นสิ่งทดลองที่มีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวต่ำที่สุด มีความเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของกลิ่นน้ำตาลดอกมะพร้าวไปรบกวนกลิ่นของสับปะรดน้อย จึงไม่เกิดเป็นกลิ่นใหม่ที่ผู้ทดสอบไม่คุ้นเคย ทำให้ได้รับคะแนนความชอบสูง (6.17 คะแนน) อยู่ในระดับชอบเล็กน้อย และโดยพบว่าสิ่งทดลองที่ 5 ได้รับคะแนนความชอบกลิ่นสูงที่สุด (6.83 คะแนน) อยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง การที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านรสชาติแตกต่างกันอาจเนื่องมาจากน้ำตาลที่ใช้ในการเตรียมสารละลายอบสโมติคมีระดับความหวานที่แตกต่างกัน ระดับความหวานของสารละลายอบสโมติคที่ใช้เรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ โอลิโกฟรุคโตส น้ำตาลดอกมะพร้าว และซูโครส ตามลำดับ โดยโอลิโกฟรุคโตส และน้ำตาลดอกมะพร้าวมีระดับความหวานเท่ากับ 40 % และ 90 % ของน้ำตาลซูโครส [15] รวมทั้งลักษณะของรสหวานของน้ำตาลมีความแตกต่างกันด้วย กล่าวคือ น้ำตาลมะพร้าวมีกลิ่นรสหอมหวานของดอกมะพร้าวในขณะที่ซูโครสและโอลิโกฟรุคโตสไม่มีกลิ่นรสเฉพาะอื่น

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของชั้นสับปะรดที่ผ่านการอบสโมซิสเป็นเวลา 360 นาทีเมื่อใช้สารละลายอบสโมติคที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (สิ่งทดลองที่ 1 - 5) และซูโครส (สิ่งทดลองที่ 6)

สิ่งทดลอง	ปริมาณที่ใช้ในสารละลายอบสโมติค 100 กรัม			คะแนนความชอบเฉลี่ย				
	น้ำตาลดอกมะพร้าว	โอลิโกฟรุคโตส	ซูโครส	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
1	60	0	0	6.00 ^c ± 1.60	6.00 ^b ± 1.64	6.23 ^{ab} ± 1.53	5.83 ^b ± 1.86	6.10 ^b ± 1.71
2	45	15	0	6.23 ^{bc} ± 1.45	6.17 ^{ab} ± 1.64	5.87 ^b ± 1.46	5.77 ^b ± 1.91	6.17 ^b ± 1.60
3	30	30	0	6.03 ^c ± 1.52	6.17 ^{ab} ± 1.66	5.87 ^b ± 1.38	5.83 ^b ± 1.88	6.10 ^b ± 1.56
4	15	45	0	7.00 ^{ab} ± 1.41	7.03 ^a ± 1.13	6.17 ^{ab} ± 1.17	6.87 ^a ± 0.94	7.03 ^a ± 0.93
5	0	60	0	7.30 ^a ± 1.37	7.03 ^a ± 1.43	6.83 ^a ± 1.56	7.57 ^a ± 1.45	7.67 ^a ± 1.42
6	0	0	60	6.93 ^{ab} ± 1.34	7.00 ^a ± 1.23	6.77 ^a ± 1.45	7.77 ^a ± 0.97	7.87 ^a ± 1.01

a,b,c คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบด้านรสชาติ พบแนวโน้มว่าสิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ซึ่งมีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวค่อนข้างมากเท่ากับ 60 45 และ 30 กรัม/ 100 กรัม ตามลำดับ ได้รับคะแนนความชอบรสนาน้อยกว่าสิ่งทดลองที่ 4 5 และ 6 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวปริมาณมาก มีโอกาสทำให้รสขมมีรสหวานมากและมีกลิ่นรสนองน้ำตาลมะพร้าวมากขึ้นด้วย ซึ่งผู้ทดสอบอาจคุ้นเคยกับรสนาน้อยกว่าสิ่งทดลองอื่น นอกจากนี้พบข้อสังเกตว่าสิ่งทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งมีการใช้น้ำตาลมะพร้าวค่อนข้างมากมีการแลกเปลี่ยนมวลสารสูง โดยพบว่ามีค่า SG เท่ากับ 7.33 และ 8.08 % ซึ่งอยู่ในระดับสูงที่สุด (ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสเกิดการแพร่เข้าของของแข็ง (น้ำตาล) จากสารละลายออสโมติกเข้าสู่ชิ้นสับประดามากที่สุด จึงมีโอกาสทำให้ชิ้นสับประดามีรสหวานมาก เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบโดยรวมพบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับคะแนนความชอบรสชาติ กล่าวคือ สิ่งทดลองที่ 4 5 และ 6 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด (7.03 - 7.87) อยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก โดยลักษณะของชิ้นสับประดที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที ทั้ง 6 สิ่งทดลองแสดงดังรูปที่ 4



(ก) สิ่งทดลองที่ 1 (60:0)



(ข) สิ่งทดลองที่ 2 (45:15)



(ค) สิ่งทดลองที่ 3 (30:30)



(ง) สิ่งทดลองที่ 4 (15:45)

รูปที่ 4 ลักษณะของชิ้นสับประดที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที ทั้ง 6 สิ่งทดลอง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โอลิโกฟรุคโตส (สิ่งทดลองที่ 1 - 5) และ ซูโครส (สิ่งทดลองที่ 6)



(จ) สิ่งทดลองที่ 5 (0:60)



(ฉ) สิ่งทดลองที่ 6 (ตัวควบคุม)

รูปที่ 4 ลักษณะของชิ้นสับประคั่ววนผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 360 นาที ทั้ง 6 สิ่งทดลอง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่แปรสัดส่วนของน้ำตาลดอกมะพร้าว : โพลิฟรุคโตส (สิ่งทดลองที่ 1 - 5) และซูโครส (สิ่งทดลองที่ 6) (ต่อ)

3. การเลือกสิ่งทดลองที่เหมาะสมที่สุด

สิ่งทดลองที่ 4 ซึ่งใช้สารละลายออสโมติกในรูปแบบสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวและโพลิฟรุคโตสในอัตราส่วน 15:45 (กรัม/ 100 กรัม) มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า WL และค่า WR สูง (17.69 และ 10.70 % ตามลำดับ) มีปริมาณความชื้นและค่า a_w เท่ากับ 74.91 และ 0.986 % ตามลำดับ และได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูง (7.03 คะแนน) ซึ่งอยู่ในระดับชอบปานกลาง จากผลการทดลองพบข้อสังเกตว่า แม้สิ่งทดลองที่ 1 ที่มีการใช้น้ำตาลดอกมะพร้าวเพียงอย่างเดียวมีค่า WL และค่า WR สูงที่สุด (22.43 และ 14.34 %) แต่เมื่อพิจารณาความชอบทางประสาทสัมผัสร่วมด้วยพบว่า ได้รับคะแนนความชอบโดยรวม 6.10 คะแนน ซึ่งน้อยกว่าสิ่งทดลองที่ 4

สรุป

การใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลดอกมะพร้าวต่อโพลิฟรุคโตสในสัดส่วนที่เหมาะสม เป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารระหว่างการออสโมซิสไม่แตกต่างกับการใช้น้ำตาลซูโครส รวมทั้งได้สับประคั่วหลังการออสโมซิสที่มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับได้

References

- [1] Department of Intellectual Property. (2017). **Geographical Indication Announcement: Trat Si Thong Pineapple**. Access (28 December 2017). Available (<http://www.ipthailand.go.th/images/2284/GI60100094.pdf>) (in Thai)
- [2] Jacob, J. K. and Palliyath, G. (2012). Infusion of Fruits with Nutraceuticals and Health Regulatory Components for Enhanced Functionality. **Food Research International**. Vol. 45, Issue 1, pp. 93-102. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.10.017

- [3] Ahmed, I., Qazi, I. M., and Jamal, S. (2016). Developments in Osmotic Dehydration Technique for the Preservation of Fruits and Vegetables. **Innovative Food Science and Emerging Technologies (INNOV FOOD SCI EMERG)**. Vol. 34, pp. 29-43. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.01.003
- [4] Secretaria, M. I. (2003). **Comparison of The Elemental Content of 3 Sources of Edible Sugar-Analyzed**. Access (29 December 2017). Available (<https://realrawfood.com/coconut-nectar-and-sugar>)
- [5] Silva, K. S., Fernandes, M. A., and Mauro, M. A. (2014). Effect of Calcium on the Osmotic Dehydration Kinetics and Quality of Pineapple. **Journal of Food Engineering**. Vol. 134, pp. 37-44. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.02.020
- [6] Association of Official Analytical Chemist (AOAC). (1990). **Official Method of Analysis**. 15theds. Virginia: The Association of official Analysis Chemists. 972.20, Vol.2, Chapter 37, pp. 3-4
- [7] Correa, J. L. G., Pereira, L. M., Vieira, G. V., and Hubinger, M. D. (2010). Mass Transfer Kinetics of Pulse Vacuum Osmotic Dehydration of Guavas. **Journal of Food Engineering**. Vol. 96, Issue 4, pp. 498-504. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032
- [8] Naknean, P. (2012). Factors Affecting Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits. **International Food Research Journal**. Vol. 19, pp. 7-18
- [9] Alfaro, L., Siramard, S., Chouljenko, A., and Sathivel, S. (2018). Effect of Liquid Nitrogen Pretreatment on the Osmotic Dehydration and Quality of Cryogenically Frozen Blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). **Food Bioscience**. Vol. 22, pp. 165-169. DOI: 10.1016/j.fbio.2018.02.006
- [10] Sinngam, A. (2012). **Study on Prebiotic Properties of Fructo-oligosaccharide from Jerusalem Artichoke Extract**. MSc. Biotechnology, Graduate School, Silpakorn University (in Thai)
- [11] Nithiya, R. (2010). **Food Chemistry**. Bangkok: O-dean Store (in Thai)
- [12] Matusek, A., Czukur, K., and Meresz, P. (2008). Comparison of Sucrose and Fructo-oligosaccharides as Osmotic Agent in Apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. Vol. 9, No. 3, pp. 365-373. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.10.003
- [13] Pattanapa, K., Therdthai, N., Chantrapornchai, W., and Zhou, W. (2010). Effect of Sucrose and Glycerol Mixtures in the Osmotic Solution on Characteristics of Osmotically Dehydrated Mandarin cv. (*Sai-Namphaung*). **International Journal of Food Science and Technology**. Vol. 45, No. 9, pp. 1918-1924. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02353.x
- [14] Dermesolouoglou, E., Chalkia, A., and Taoukis, P. (2018). Application of Osmotic Dehydration to Improve the Quality of Dried Goji Berry. **Journal of Food Engineering**. Vol. 232, pp. 36-43. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.03.012
- [15] Nutrients Review. (2016). **Sweeteners**. Access (6 April 2018). Available (<http://www.nutrientsreview.com/articles/sweeteners.html>)

การพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมา

Development of an E-Commerce System from a Requirement of the OTOP Entrepreneurs in Nakhon Ratchasima

รณชัย ชื่นธวัช^{1*} เจษฎา รัตนสุพร¹ และศรายุทธ เนียนกระโทก¹

Ronnachai Chuentawat^{1*} Jessada Rattanasuporn¹ and Sarayut Neankratok¹

Received: June 27, 2018; Revised: August 6, 2018; Accepted: August 8, 2018

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป (OTOP) ในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งกลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป จำนวน 15 ราย ในอำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา โดยการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ จะจัดทำฐานข้อมูลคอมพิวเตอร์ ที่อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โอท็อป และพัฒนาระบบฯ ในรูปแบบของเว็บไซต์และโปรแกรมที่ทำงานบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอนดรอยด์ส്മาร์ตโฟน ซึ่งการออกแบบและพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ใช้รูปแบบการพัฒนาระบบแบบน้ำตก (The Waterfall Model) ผลสมผสานกระบวนการต้นแบบ (Prototyping Paradigm) เมื่อดำเนินการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์แล้วเสร็จ ได้ให้กลุ่มตัวอย่างประเมินผลการใช้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยแบบประเมินความคิดเห็น ผลการประเมินพบว่า ภาพรวมของการประเมินอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเรื่องของความสะดวกในการเพิ่มรายการสินค้าลงในระบบได้ค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 4.1 ส่วนเรื่องของความครบถ้วนในการนำเสนอข้อมูลสินค้า และความสามารถในการแจ้งเตือนรายการสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้า ได้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 4.8 ดังนั้น สรุปได้ว่า สามารถพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์โอท็อป; พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์; เว็บไซต์; โปรแกรมบนโทรศัพท์เคลื่อนที่

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา นครราชสีมา

¹ Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima

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

Abstract

This research aims to develop an E-commerce system from a requirement of the OTOP (One Tambon One Product) distribution entrepreneurs in Nakhon Ratchasima. The sample set of this research is 15 OTOP entrepreneurs in Pakthongchai, Nakhon Ratchasima. In the development of E-commerce system, we develop a computer database as a relational database to store data that involve with OTOP products and develop a system as a website together with an Android mobile application. The design and development of an E-commerce system use the waterfall model integrate with the prototyping paradigm. When an E-commerce system was developed completely, we evaluated our E-commerce system by our sample set with an opinion questionnaire. From the results of evaluation, we found that the overview of evaluation was good. The issue of convenience to insert new product data has a minimum average score, it's equal to 4.1. The issue of completeness to present a detail of data and the ability to alert order from customer have a maximum average score, it's equal to 4.8. Therefore, we can conclude that an E-commerce system of this research meet with a requirement of the OTOP entrepreneurs.

Keywords: OTOP Products; E-Commerce; Website; Mobile Application

บทนำ

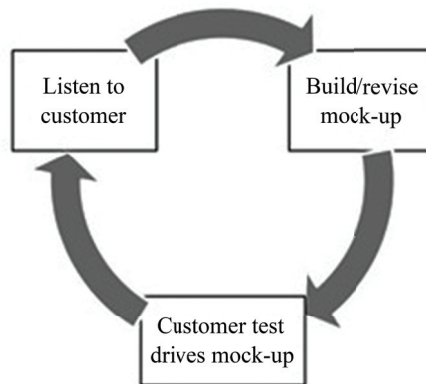
ผลิตภัณฑ์โอท็อป (OTOP) คือ ผลิตภัณฑ์ของโครงการหนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์ (One Tambon One Product) ซึ่งเป็นโครงการที่รัฐบาลกำหนดขึ้น เพื่อต่อสู้กับความยากจน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 โดยกำหนดโครงการให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 9 ซึ่งนอกเหนือจากการมุ่งเน้นพัฒนาเศรษฐกิจตามแนวกระแสหลักแล้ว ยังให้ความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจในกระแสรองหรือเศรษฐกิจพอเพียงที่มีพื้นฐานความคิดเชื่อมโยงกับชุมชนทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม วัฒนธรรม วิถีชีวิตของคนในชุมชนด้วย โดยแนวคิดของโครงการหนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์ คือ การผลิตและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ชุมชนบนพื้นฐานของภูมิปัญญาชาวบ้าน วัฒนธรรมประเพณี และการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นเพื่อเสริมสร้างความเป็นเอกลักษณ์ของชุมชน กระตุ้นให้เกิดการเรียนรู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมาตรฐานตรงกับความต้องการของตลาด ก่อให้เกิดรายได้แก่ชุมชน และการศึกษางานวิจัยเรื่อง “ปัญหาและแนวทางการปรับตัวของ OTOP เพื่อพร้อมรับการเปิด AEC” [1] พบว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์โอท็อป ก่อให้เกิดผลดีในการสร้างรายได้ให้ชุมชน ก่อให้เกิดการหมุนเวียนเงินตราภายในชุมชน ส่งผลให้เกิดการสร้างรายได้ให้ประเทศไทยจำนวนมาก แต่การรวมตัวกันของประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC) นั้น มีผลกระทบต่อปรับตัวของกลุ่มผู้ประกอบการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) โดยที่ปัญหาของ OTOP โดยรวมของทุกกลุ่มผลิตภัณฑ์นั้น เกี่ยวข้องกับการสร้างเครือข่ายธุรกิจ ด้านการบริหารจัดการ ด้านการตลาด ด้านการผลิต ด้านการเงิน และแหล่งเงินทุน ด้านเทคโนโลยี และด้านการสนับสนุนจากภาครัฐ ซึ่งปัญหา

ด้านเทคโนโลยีนั้น ควรมีการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการระบบการทำงาน รวมถึงระบบสารสนเทศ และด้านการสร้างเครือข่ายธุรกิจ ผู้ประกอบการควรหาพันธมิตรธุรกิจทั้งในด้านการผลิตและการจัดจำหน่าย จังหวัดนครราชสีมา เป็นจังหวัดหนึ่งที่มีผลิตภัณฑ์โอท็อปมากมายหลากหลายผลิตภัณฑ์ โดยมีอำเภอปรางค์กู่ เป็นอำเภอหนึ่งที่มีผลิตภัณฑ์โอท็อปที่มีชื่อเสียงระดับประเทศ เช่น ผ้าไหม หรือหมี่โคราช เป็นต้น และจากการศึกษาบริบทการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของจังหวัดนครราชสีมา ในเบื้องต้นพบว่าการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปอยู่ในรูปแบบการจัดจำหน่ายผ่านร้านค้าที่ตั้งอยู่ภายในชุมชน และการจัดจำหน่ายผ่านการจัดงานแสดงสินค้าโอท็อปเป็นครั้งคราว ซึ่งช่องทางการจัดจำหน่ายสินค้าในลักษณะดังกล่าว มีข้อดีอย่างประการ เช่น มีค่าใช้จ่ายในการตั้งพื้นที่จำหน่ายสินค้า เข้าถึงลูกค้าได้ในวงแคบ มีข้อจำกัดด้านเวลาในการจำหน่ายสินค้า เป็นต้น นอกจากนี้การศึกษานโยบาย Thailand 4.0 ซึ่งเป็นนโยบายที่มีความเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โอท็อป จากเอกสารเรื่อง “พิมพ์เขียว Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน” โดยสถาบันส่งเสริมการจัดการความรู้เพื่อสังคม (Knowledge Management Institution) ซึ่งเป็นหน่วยงานในสังกัดของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) พบว่าโมเดล Thailand 4.0 ต้องการผลักดันให้เกิด SME 4.0 ที่หมายถึง “SME 4.0 ที่สามารถสร้างหรือใช้นวัตกรรม เทคโนโลยี ความคิดสร้างสรรค์ ในการสร้างมูลค่าในสินค้าและบริการ มีความสามารถทางการค้าขาย สามารถเข้าถึงตลาดในประเทศ ตลาดอาเซียน และตลาดโลก ทำให้มีรายได้สูงขึ้น มีชีวิตความเป็นอยู่ดีขึ้น และมีอนาคตที่สดใส” [2]

พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Commerce) หรือการค้าอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้มีนักวิชาการหลายท่าน ให้คำจำกัดความไว้ เช่น Kanjanasuwat, T. [3] ได้ให้ความหมายไว้ว่า “พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง การใช้เทคโนโลยีเป็นสื่อกลางสำหรับแลกเปลี่ยนสินค้าและบริการระหว่างผู้ที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ ตัวบุคคล องค์กร หรือตัวบุคคลกับองค์กร เพื่อช่วยสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกองค์กร” Chayavivatkul, P. [4] ได้ให้ความหมายไว้ว่า “พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นกระบวนการที่ใช้วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำธุรกิจให้บรรลุเป้าหมายขององค์กร พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ใช้เทคโนโลยีประเภทต่าง ๆ ซึ่งครอบคลุมรูปแบบทางการเงินทั้งหลาย เช่น ธนาคารอิเล็กทรอนิกส์ การค้าอิเล็กทรอนิกส์ การแลกเปลี่ยนข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Data Interchange: EDI) ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ โทรสาร การประชุมทางไกล และรูปแบบต่าง ๆ ที่เป็นข้อมูลระหว่างองค์กร” Aiamsrivong, O. [5] ได้ให้ความหมายไว้ว่า “พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ คือ การดำเนินธุรกรรมทางการค้าผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการซื้อสินค้า ขายสินค้า จัดส่งสินค้า การแลกเปลี่ยนสินค้า บริการ หรือสารสนเทศผ่านอินเทอร์เน็ต” จากความหมายของพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่นักวิชาการให้ความหมายไว้ สรุปได้ว่า พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ คือ การทำธุรกรรมทางการค้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการซื้อขายสินค้า จัดส่งสินค้า แลกเปลี่ยนสินค้าหรือบริการผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เครือข่ายอินเทอร์เน็ต หรือระบบสื่อสารโทรคมนาคม

ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นระบบสารสนเทศรูปแบบหนึ่งที่ประกอบด้วย 1) ฐานข้อมูลคอมพิวเตอร์ สำหรับจัดเก็บข้อมูลที่น่าไปใช้ประมวลผลให้ได้สารสนเทศตามต้องการ 2) ส่วนโต้ตอบกับผู้ใช้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบเว็บไซต์ โปรแกรมประยุกต์ที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยส่วนโต้ตอบกับผู้ใช้จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้เข้าไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล หรือแสดงผลสารสนเทศตามที่ผู้ใช้ต้องการ โดยการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ควรดำเนินการพัฒนาตามหลักการพัฒนาซอฟต์แวร์และ

หลักการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ที่มีการกำหนดตัวแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์ไว้ชัดเจน และตัวแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่งานวิจัยนี้นำมาใช้ คือ ตัวแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบน้ำตก (The Waterfall Model) ที่นำเสนอโดย Royce, W. W. ในปี ค.ศ. 1970 [6] ซึ่งมีการส่งผลลัพธ์จากขั้นตอนเริ่มต้นสู่ขั้นตอนที่อยู่ถัดไป คล้ายการไหลของน้ำที่ตกเป็นชั้น ๆ นอกจากนี้แต่ละขั้นตอนยังสามารถย้อนกลับไปขั้นตอนก่อนหน้าได้ ถ้าพบว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่สมบูรณ์ โดยที่ไม่ต้องกลับไปเริ่มต้นใหม่ทั้งหมด และเนื่องจากงานวิจัยนี้ ดำเนินการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ จากความต้องการของผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปซึ่งเป็น ผู้ใช้ระบบ จึงได้ผสมผสานกระบวนการต้นแบบ (Prototyping Paradigm) เข้ากับตัวแบบการพัฒนา แบบน้ำตก โดยกระบวนการต้นแบบ คือ การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เป็นต้นแบบขึ้นมาอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำต้นแบบไปนำเสนอต่อผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้ได้ทราบและเห็นภาพกระบวนการทำงานของซอฟต์แวร์ ได้ชัดเจน ซึ่งต้นแบบของซอฟต์แวร์จะถูกตรวจสอบและประเมินการทำงานของซอฟต์แวร์โดยผู้ใช้ แล้วนำผลการประเมินไปปรับปรุงต้นแบบให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ สุดท้ายทำให้ได้ซอฟต์แวร์ หรือระบบสารสนเทศที่มาจากความต้องการของผู้ใช้ โดยกระบวนการต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 1 [7]



รูปที่ 1 กระบวนการต้นแบบ

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยในอดีตที่นักวิจัยได้ศึกษาและนำเสนอ ผลการวิจัยไว้ ได้แก่ 1) การศึกษางานวิจัยของ Putjusakmai, K. [8] เรื่อง “เว็บไซต์สินค้าหนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์” โดยเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โอท็อป ซึ่งจัดจำหน่ายที่ทัศนวิสัยต่ำ ชั้นใต้ดิน ทางอิมพีเรียล ลาดพร้าว ผลการวิจัยพบว่า เว็บไซต์ที่ได้ออกแบบไว้ สามารถซื้อขายสินค้า OTOP ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ แต่ไม่สามารถชำระเงินผ่านบัตรเครดิตได้ 2) การศึกษางานวิจัยของ Janthatit, J. et al. [9] เรื่อง “การพัฒนาช่องทางจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชน (OTOP) ด้วยระบบพาณิชย์ อิเล็กทรอนิกส์ กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์จากเกลือปลา กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรเขาภูช้าง (บ้านบางคาน) ตำบล เขาภูช้าง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา” ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรเขาภูช้างควรเพิ่ม ศักยภาพการตลาดในส่วนประสมทางการตลาด เป็นผู้นำด้านราคาในสินค้าประเภทเดียวกัน และเพิ่มช่องทางการ จัดจำหน่ายสินค้า หากต้องการพัฒนาช่องทางจำหน่ายสินค้าด้วยระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ กลุ่มแม่บ้านฯ จำเป็นต้องฝึกอบรมเรื่องคอมพิวเตอร์ให้กับสมาชิกในกลุ่ม หรือจัดหาบุคคลที่มีความรู้ในเรื่อง พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์มาเข้าร่วมเป็นสมาชิกในกลุ่ม 3) การศึกษางานวิจัยของ Seelapan, W. [10] เรื่อง

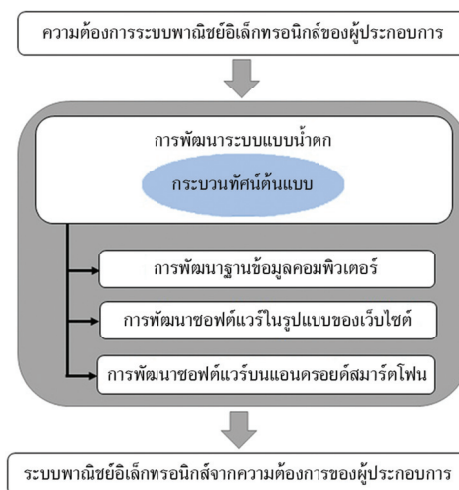
“ทัศนคติและความคิดเห็น ความเข้าใจของกลุ่มผู้ผลิตสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ในจังหวัดมหาสารคาม เกี่ยวกับการประกอบการพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์” ผลการวิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ไม่มีเว็บไซต์ผลิตภัณฑ์ คิดเป็นร้อยละ 54.1 ด้านการเข้ารับการอบรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศหรือด้านธุรกิจพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ คิดเป็นร้อยละ 31.1 และด้านความรู้ความเข้าใจทางด้านพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในระดับปานกลางคิดเป็น ร้อยละ 59.5 4) การศึกษางานวิจัยของ Trongwattanawuth, S. [11] เรื่อง “ปัจจัยความสำเร็จในการทำ ธุรกิจบนระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของผู้ประกอบการในจังหวัดเชียงใหม่” ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ผู้ประกอบการ ประสบความสำเร็จและไม่ประสบความสำเร็จให้ความสำคัญแตกต่างกัน คือ สินค้าหรือบริการเป็นที่ต้องการ ของลูกค้า สินค้าหรือบริการมีความโดดเด่นกว่าคู่แข่ง สินค้าหรือบริการมีคุณภาพดี สินค้าหรือบริการสามารถ เลือกหรือจัดชุดเองได้ และสินค้าหรือบริการมีการรับประกันคุณภาพ ราคาต่ำกว่าคู่แข่ง เว็บไซต์ที่จดจำได้ง่ายและ มีความหมายตามสินค้าหรือบริการ หน้าแรกโฮมเพจของเว็บไซต์สามารถดึงดูดให้ลูกค้าเกิดความสนใจ การออกแบบเว็บเพจแต่ละหน้ามีความสม่ำเสมอและมีรูปแบบเดียวกัน เว็บไซต์มีการจัดเนื้อหาดี หาข้อมูลได้ง่าย และครบถ้วน มีการอัปเดตข้อมูลและเนื้อหาต่าง ๆ ในเว็บไซต์อยู่เสมอ มีเว็บไซต์ที่ร่วมมือกัน เว็บไซต์มีความน่าเชื่อถือ มีการให้ข้อมูลเจ้าของเว็บไซต์และวิธีการติดต่อ และลูกค้าสามารถซื้อสินค้าหรือบริการได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว การโฆษณาผ่านสื่อและมีการโปรโมทเว็บไซต์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต มีการเก็บสถิติการซื้อขายของลูกค้าและมีการ ส่งข้อมูลสินค้าในกลุ่มสินค้าที่ลูกค้าซื้อประจำ 5) การศึกษางานวิจัยของ Suanpang, P. [12] เรื่อง “การพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวไทย” ผลการวิจัยสรุปได้ว่าได้ระบบ พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของร้านขายของที่ระลึก ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับบริษัทนำเที่ยว ระบบพาณิชย์ อิเล็กทรอนิกส์สำหรับโรงแรม/ที่พัก และระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับร้านอาหารที่มีประสิทธิภาพดี

จากที่กล่าวมา ถ้ามีการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-Commerce System) ที่หมายถึง ระบบสารสนเทศที่ใช้ในการซื้อขายสินค้าและบริการ ผ่านระบบคอมพิวเตอร์และเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จะช่วยเพิ่มช่องทางการจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป เพิ่มขีดความสามารถในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป ให้เพิ่มขึ้นได้ และสอดคล้องกับนโยบาย Thailand 4.0 ในการขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ซึ่งการศึกษาลักษณะการณปัจจุบันเกี่ยวกับระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผลิตภัณฑ์โอท็อป ของจังหวัดนครราชสีมาพบว่า มีหน่วยงานภาครัฐเข้าไปสนับสนุนเทคโนโลยีสารสนเทศในการส่งเสริมการขาย ผลิตภัณฑ์โอท็อป แต่ไม่ได้อยู่ในรูปแบบของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ลูกค้าสามารถสั่งซื้อสินค้าจากผู้จำหน่ายสินค้าได้โดยตรง นอกจากนี้พบว่า ผู้ประกอบการจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอ ปักธงชัยบางราย มีการจำหน่ายสินค้าของตนเองผ่านระบบคอมพิวเตอร์และเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้ เครือข่ายสังคมออนไลน์ (Social Network) ด้วยเว็บไซต์ Facebook และแอปพลิเคชัน Line ทำให้ทราบว่า ผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปมีความต้องการเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อใช้ส่งเสริมการขายผลิตภัณฑ์โอท็อป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ประกอบการ จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมา และกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-Commerce System) จากผู้ประกอบการ จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป (OTOP) ของจังหวัดนครราชสีมา
2. เพื่อพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบของเว็บไซต์และโปรแกรมที่ทำงานบน โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอนดรอยด์ส്മาร์ทโฟน จากความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของ ผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป จังหวัดนครราชสีมา

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมา โดยกำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปรางค์กู่ ซึ่งเหตุผลที่เลือกกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว เนื่องจากผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปรางค์กู่ มีชื่อเสียงระดับประเทศ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการจัดส่งทางไปรษณีย์ นอกจากนี้มีผู้ประกอบการบางราย จำหน่ายผลิตภัณฑ์ผ่านระบบออนไลน์ด้วยเว็บไซต์ Facebook หรือแอปพลิเคชัน Line จึงเป็นกลุ่มตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในการใช้ศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการศึกษาความต้องการจากผู้ประกอบการ เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการมีส่วนร่วมในการพัฒนาระบบจากผู้ใช้งาน สร้างความคุ้นเคยต่อระบบใหม่ ทำให้เกิดการยอมรับการเปลี่ยนแปลงจากระบบใหม่ และได้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการของผู้ใช้ระบบตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ ดังนั้น การดำเนินงานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นจากการศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นนำไปพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้การพัฒนาระบบแบบน้ำตก ผสานกับกระบวนการต้นแบบ ภายใต้กรอบแนวคิดงานวิจัย ดังรูปที่ 2

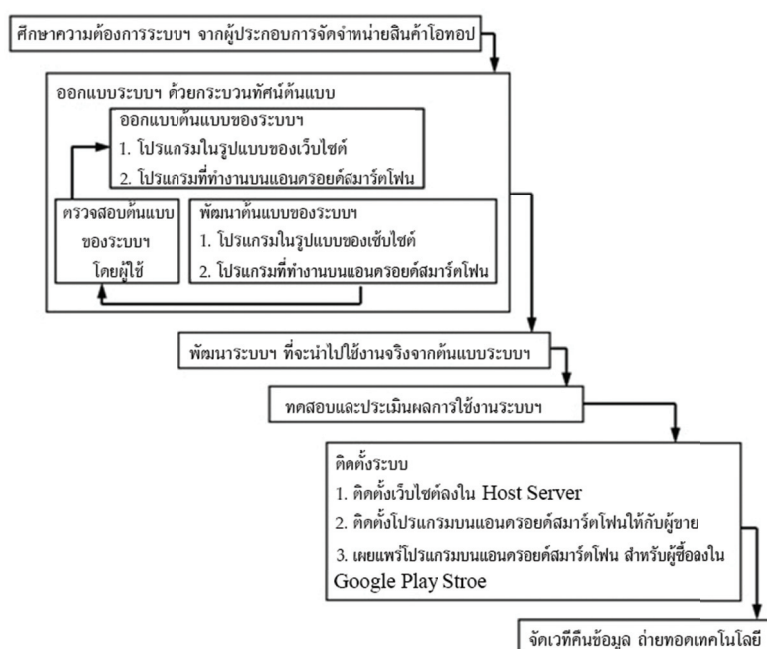


รูปที่ 2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

จากกรอบแนวคิดงานวิจัยได้นำมากำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ได้ดังนี้

1. ศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปรางค์กู่ จังหวัดนครราชสีมา ด้วยการจัดประชุมกลุ่มร่วมกับเครือข่ายผู้ประกอบการจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปเพื่อรวบรวมความต้องการจากผู้ประกอบการ ว่าต้องการให้ระบบมีฟังก์ชันการทำงานในด้านใดบ้าง และแลกเปลี่ยนเรียนรู้เพื่อกำหนดกระบวนการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์โอท็อปผ่านระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์

2. ออกแบบระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการวนทัศน์ต้นแบบ (Prototyping Paradigm) จากความต้องการระบบที่ได้ศึกษาไว้ จากนั้นพัฒนาต้นแบบระบบแล้วนำไปให้ผู้ใช้ตรวจสอบการทำงาน
3. พัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ หลังจากผ่านการพัฒนาต้นแบบระบบด้วยกระบวนการวนทัศน์ต้นแบบ
4. ทดสอบและประเมินผลการใช้งานระบบฯ ด้วยการจำลองกระบวนการซื้อขายผลิตภัณฑ์โอท็อปผ่านระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์
5. ติดตั้งระบบให้สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งระบบที่ได้พัฒนาขึ้นประกอบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวน 3 โปรแกรม ดังนี้
 - 5.1 โปรแกรมในรูปแบบของเว็บไซต์จะดำเนินการติดตั้งเว็บไซต์ลงในเว็บเซิร์ฟเวอร์ (Web Server)
 - 5.2 โปรแกรมที่ทำงานบนแอนดรอยด์สมาร์ตโฟนสำหรับผู้ขาย เพื่อรับคำสั่งซื้อจากผู้ซื้อในลักษณะของข้อความแจ้งเตือน ซึ่งสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมเพื่อติดตั้งลงในโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ขายได้ผ่านทางเว็บไซต์ของระบบ
 - 5.3 โปรแกรมที่ทำงานบนแอนดรอยด์สมาร์ตโฟนสำหรับผู้ซื้อ เพื่อทำการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์โอท็อปผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตนเอง สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมเพื่อติดตั้งลงในโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ซื้อได้จากระบบ Google Play Store
6. จัดเวทีคืนข้อมูล ถ่ายทอดเทคโนโลยี และกระบวนการนาระบบฯ ไปใช้อย่างถูกต้อง และเกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน ให้แก่ผู้ประกอบการ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัย

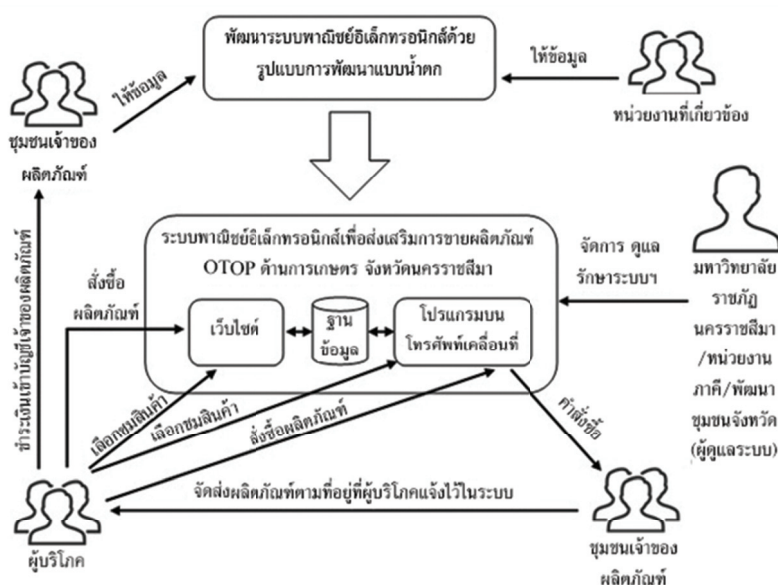
เมื่อดำเนินการตามวัตถุประสงค์การวิจัย โดยเริ่มต้นจากการศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของกลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปรางค์กู่ ซึ่งการศึกษาความต้องการระบบใช้วิธีจัดประชุมกลุ่มดังรูปที่ 4 เพื่อให้กลุ่มตัวอย่างได้เสนอความต้องการของตนเอง ผลการศึกษาพบว่า ช่องทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของกลุ่มตัวอย่างแบบเดิมเป็นการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ 1 ช่องทาง คือ การจำหน่ายผลิตภัณฑ์เฉพาะหน้าร้านเท่านั้น แต่จากการจัดประชุมกลุ่มเพื่อศึกษาความต้องการของผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปรางค์กู่ ผลการศึกษาพบว่า ผู้ประกอบการมีความต้องการเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์นอกเหนือจากการขายหน้าร้านเพื่อขยายฐานลูกค้าเพิ่มขึ้น จึงได้มีการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่าย ซึ่งสามารถจำหน่ายผลิตภัณฑ์ได้ตลอด 24 ชั่วโมง และไม่มีต้นทุนจากการเช่าพื้นที่จำหน่ายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ทางผู้ประกอบการได้มีการระบุถึงความต้องการของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของกลุ่มสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ต้องการให้มีการจัดประเภทสินค้า
2. ต้องการให้ระบบแยกรายการสินค้าของผู้ประกอบการแต่ละราย เมื่อมีการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จะส่งคำสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ให้ผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของผลิตภัณฑ์โดยตรง
3. ต้องการให้ส่งคำสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ ในรูปแบบของข้อความแจ้งเตือนบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อให้สะดวกในการตรวจสอบคำสั่งซื้อ
4. ต้องการให้ระบบส่งอีเมลแจ้งเตือนการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ให้ผู้ประกอบการด้วย
5. ผู้ประกอบการต้องการเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขรายการสินค้าของตนเอง เสมือนมีร้านค้าของตนเองที่จะสามารถจัดการสินค้าในร้านค้าได้ด้วยตนเอง
6. ต้องการให้มีรายการสินค้าแนะนำ



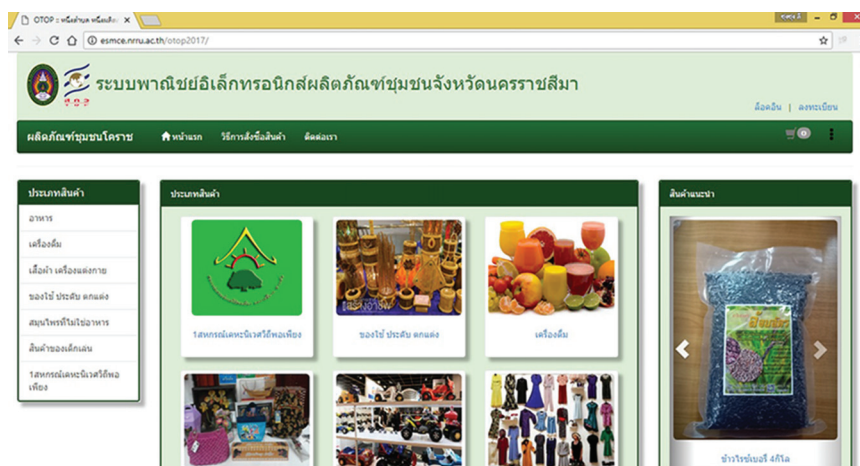
รูปที่ 4 การประชุมกลุ่มเพื่อศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของกลุ่มตัวอย่าง

เมื่อได้ความต้องการหลักจากกลุ่มตัวอย่าง จึงนำมากำหนดกรอบการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อกำหนดกระบวนการซื้อขายผลิตภัณฑ์โอท็อปผ่านระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ให้สอดคล้องกับความต้องการระบบของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งดำเนินการพัฒนาระบบให้เป็นซอฟต์แวร์ 2 รูปแบบ คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรูปแบบของเว็บไซต์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอนดรอยด์ส്മาร์ตโฟน โดยมีฐานข้อมูลเป็นศูนย์กลาง ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการซื้อขายผลิตภัณฑ์โอท็อป เชื่อมโยงข้อมูลผ่านเว็บไซต์และโปรแกรมบนแอนดรอยด์ส്മาร์ตโฟน และกรอบการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5



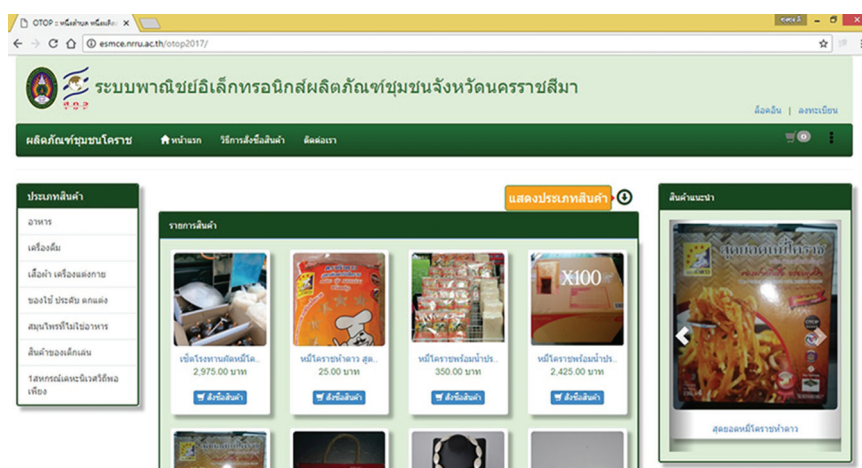
รูปที่ 5 กรอบการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์

จากกรอบการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ จึงนำไปออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อใช้บันทึกข้อมูลของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นฐานข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โอท็อปของจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลของงานวิจัยนี้ อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) ที่มีการใช้แผนภาพอี-อาร์ (Entity-Relationship Diagram) เป็นเครื่องมือในการออกแบบฐานข้อมูล และได้ผลการออกแบบฐานข้อมูลตามความต้องการระบบของกลุ่มตัวอย่างดังรูปที่ 6 จากนั้นนำไปพัฒนาเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้จัดเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม phpMyAdmin เป็นโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลดังรูปที่ 7

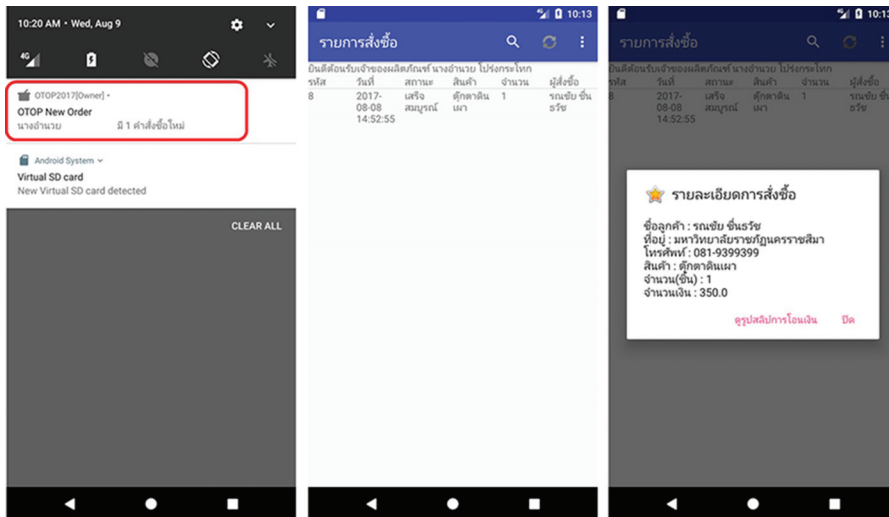


รูปที่ 8 หน้าหลักของเว็บไซต์ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์

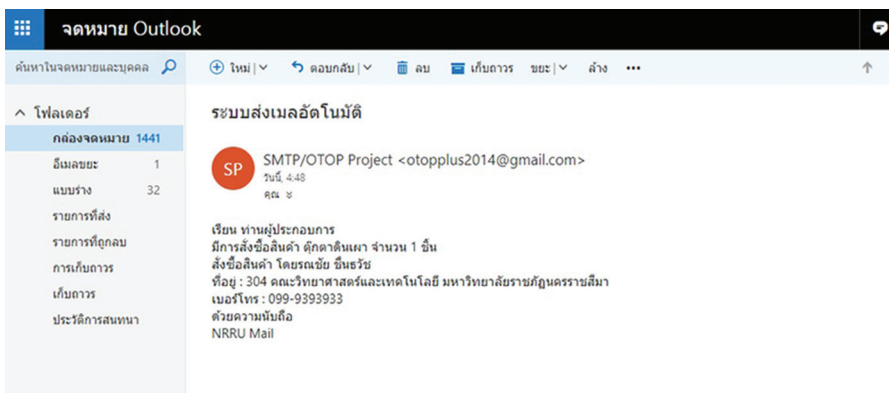
เมื่อต้องการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์สามารถเลือกสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ตามประเภทสินค้า จากนั้นจะเข้าสู่หน้าแสดงรายการสินค้าที่มีการแยกการรายการสินค้าของผู้ประกอบการแต่ละรายดังรูปที่ 9 และคำสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จะส่งถึงผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของผลิตภัณฑ์โดยตรง หลังจากดำเนินการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์โอท็อปตามกระบวนการสั่งซื้อจนเสร็จสมบูรณ์ ระบบจะดำเนินการแจ้งคำสั่งซื้อในรูปแบบของข้อความผ่านโปรแกรมที่ทำงานบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอนดรอยด์ส്മาร์ตโฟน ซึ่งผู้ประกอบการสามารถตรวจสอบรายละเอียดของคำสั่งซื้อผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตนเองได้โดยง่ายดังรูปที่ 10 และส่งอีเมลแจ้งรายการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ไปยังผู้ประกอบการดังรูปที่ 11



รูปที่ 9 หน้าเว็บแสดงรายการสินค้า



รูปที่ 10 การแจ้งคำสั่งซื้อบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ประกอบการ



รูปที่ 11 อีเมลแจ้งรายการสั่งซื้อสินค้าไปยังผู้ประกอบการ

หลังจากได้ค้นแบบระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ จึงได้นำค้นแบบระบบไปให้กลุ่มตัวอย่างในฐานะผู้ใช้ระบบดำเนินการตรวจสอบและทดลองใช้งานต้นแบบระบบ ซึ่งได้ผลการตรวจสอบระบบจากผู้ใช้ระบบที่ต้องการให้ปรับแก้ต้นแบบระบบแบ่งเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

1. ต้องการให้สร้าง QR Code เพื่อใช้เข้าสู่เว็บไซต์ของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการนำไปประชาสัมพันธ์ช่องทางในการเลือกชมสินค้าและสั่งซื้อสินค้าผ่านระบบออนไลน์
2. ต้องการระบุหมายเลขบัญชีธนาคาร เพื่อให้ลูกค้าโอนเงินค่าสินค้าได้ด้วยตนเอง
3. ต้องการช่องป้อนหมายเลขพัสดุไปรษณีย์ เพื่อให้ผู้สั่งซื้อตรวจสอบสถานะส่งสินค้าได้โดยง่าย
4. ผู้ขายต้องการให้มีการระบุค่าจัดส่งสินค้า สำหรับสินค้าแต่ละอย่าง
5. แก้ไขปุ่มเพิ่มจำนวนสินค้าให้อยู่ด้านขวา ส่วนปุ่มลดจำนวนสินค้าให้อยู่ด้านซ้าย

รูปที่ 12 ตัวอย่างการปรับแก้ไขต้นแบบระบบจากการตรวจสอบระบบโดยผู้ใช้งาน

จากประเด็นการปรับแก้ไขต้นแบบระบบที่ได้ผ่านการตรวจสอบระบบจากผู้ใช้งาน จึงได้นำมาดำเนินการปรับแก้ไขตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยมีตัวอย่างการปรับแก้ไขระบบ ดังรูปที่ 12 จากนั้นนำระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ผ่านการตรวจสอบระบบจากผู้ใช้งาน มาประเมินผลการใช้ระบบกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป จำนวน 15 ราย ด้วยแบบประเมินความคิดเห็น ซึ่งเป็นแบบประเมินที่มีคำถามวัดระดับความคิดเห็น 5 ระดับ จำนวน 10 คำถาม และประเมินผลการตอบแบบประเมินด้วยการวัดค่าสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ที่ใช้วัดระดับความพึงพอใจเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ที่ใช้วัดการกระจายตัวของคำตอบจากกลุ่มตัวอย่าง ผลการตอบแบบประเมินความคิดเห็น สามารถสรุปเป็นตารางแสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของคำถามแต่ละข้อดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการตอบแบบประเมินความคิดเห็น

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.
1. ความรวดเร็วในการสืบค้นรายการสินค้าที่ต้องการอยู่ในระดับใด	4.6	0.51
2. ความรวดเร็วในการสั่งซื้อสินค้าผ่านระบบฯ อยู่ในระดับใด	4.3	0.46
3. ความสะดวกในการเพิ่มรายการสินค้าลงในระบบฯ อยู่ในระดับใด	4.1	0.35
4. ความสะดวกในการแก้ไขรายการสินค้าอยู่ในระดับใด	4.3	0.46
5. ความสะดวกในการสืบค้นรายการสินค้าอยู่ในระดับใด	4.7	0.46
6. ความสะดวกในการสั่งซื้อสินค้าผ่านระบบฯ อยู่ในระดับใด	4.3	0.46
7. ความสะดวกในการตรวจสอบรายการสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้าอยู่ในระดับใด	4.7	0.46
8. ความครบถ้วนของการนำเสนอข้อมูลสินค้าอยู่ในระดับใด	4.8	0.41
9. ระบบฯ มีความสามารถในการแจ้งเตือนรายการสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้าอยู่ในระดับใด	4.8	0.41
10. ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์มีประโยชน์ต่อการส่งเสริมการขายสินค้าของท่านอยู่ในระดับใด	4.5	0.52

การอภิปรายผล

การพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของผู้ประกอบการ จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป (OTOP) ในจังหวัดนครราชสีมา โดยศึกษาความต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากกลุ่มตัวอย่าง ที่เป็นผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อป จำนวน 15 ราย ในอำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ผลการศึกษาความต้องการระบบพบว่า ผู้ประกอบการไม่มีระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของตนเอง จึงต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเพิ่มช่องทางจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของตนเอง นอกจากนี้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ไม่ได้นำเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามาช่วยส่งเสริมการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของตนเอง มีเพียงผู้ประกอบการบางรายที่มีการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของตนเอง ผ่านเครือข่ายสังคมออนไลน์ด้วยเว็บไซต์ Facebook หรือแอปพลิเคชัน Line โดยผู้ประกอบการต้องการระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถจัดประเภทผลิตภัณฑ์ได้ สามารถจัดการรายการผลิตภัณฑ์ของตนเองได้ สามารถสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ และส่งคำสั่งซื้อถึงผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง จากนั้นนำความต้องการระบบของกลุ่มตัวอย่างมากำหนดกรอบการพัฒนาระบบที่ประกอบด้วย การพัฒนาฐานข้อมูลคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โอท็อป และการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในรูปแบบของเว็บไซต์ และโปรแกรมที่ทำงานบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบแอนดรอยด์ส്മาร์ตโฟน ซึ่งการออกแบบและพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ใช้รูปแบบการพัฒนาระบบแบบน้ำตก (The Waterfall Model) ผสมผสาน กระบวนทัศน์ต้นแบบ (Prototyping Paradigm) โดยดำเนินการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากความต้องการระบบของกลุ่มตัวอย่าง จากนั้นนำไปให้กลุ่มตัวอย่างในฐานะผู้ใช้ระบบ ดำเนินการตรวจสอบการทำงานของระบบว่ามีความถูกต้อง ตรงตามความต้องการของผู้ใช้หรือไม่ แล้วดำเนินการปรับแก้ขั้นตอนระบบ จนกระทั่งได้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ระบบ

หลังจากดำเนินการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์แล้วเสร็จ ได้ให้กลุ่มตัวอย่างประเมินผลการใช้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยแบบประเมินความคิดเห็น ผลการประเมินพบว่า ทุกคำถามมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 4.0 นั่นคือ ทุกคำถามมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับดี และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.35 - 0.52 นั่นคือ มีการกระจายตัวของคำตอบแบบปกติ โดยเรื่องของความสะดวกในการเพิ่มรายการสินค้าลงในระบบได้ค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 4.1 ส่วนเรื่องของความครบถ้วนในการนำเสนอข้อมูลสินค้า และความสามารถในการแจ้งเตือนรายการสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้า ได้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 4.8 นอกจากนี้จากการติดตามผู้ประกอบการที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง หลังจากใช้ระบบด้วยวิธีการสัมภาษณ์พบว่า มีการนำระบบไปใช้ประโยชน์โดยจัดทำป้าย QR Code เข้าสู่เว็บไซต์ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ไว้ที่ร้านค้าของตนเอง รวมถึงการติดไว้ใน Facebook และ Line เพื่อให้ลูกค้ารู้จักสินค้าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการพบว่า หลังจากนำระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ประโยชน์ ทำให้ลูกค้ารู้จักผลิตภัณฑ์ของผู้ประกอบการและเชื่อมั่นในคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของผู้ประกอบการปรากฏในระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีตราสัญลักษณ์ของหน่วยงานรัฐ ดังนั้น สรุปได้ว่าผลของงานวิจัยนี้ได้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของผู้ประกอบการได้ และระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ตามความต้องการของผู้ประกอบการ จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมาตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

บทสรุป

การดำเนินงานโครงการวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ สรุปเป็นผลสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการวิจัย คือ ได้ระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่มาจากความต้องการของผู้ใช้ประโยชน์งานวิจัย ซึ่งเป็นผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปในจังหวัดนครราชสีมา โดยระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นผลจากงานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีสารสนเทศ มาใช้ในการเพิ่มขีดความสามารถการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปให้สูงขึ้น และสอดคล้องกับนโยบาย Thailand 4.0 ในการขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ซึ่งระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จากงานวิจัยนี้ มีจุดเด่นที่แตกต่างจากงานวิจัยในอดีต คือ การส่งคำสั่งซื้อถึงผู้ประกอบการโดยตรงผ่านอีเมลและข้อความแจ้งเตือนบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ประกอบการ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแอปพลิเคชัน “ผลิตภัณฑ์ชุมชนโคราช” เผยแพร่ลงในระบบ Google Play Store ให้ผู้บริโภคสามารถดาวน์โหลดติดตั้งลงบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตนเอง เพื่อใช้สั่งซื้อสินค้าได้โดยง่าย ส่วนข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้ จากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้ประกอบการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปของอำเภอปักธงชัย คือ ต้องการให้มีผู้จำหน่ายสินค้าจากพื้นที่อื่น ๆ มาเข้าร่วมนำเสนอสินค้าในระบบฯ เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากต้องการให้ระบบฯ มีการนำเสนอสินค้าที่หลากหลายเป็นจำนวนมาก ซึ่งความหลากหลายของสินค้าจะช่วยเพิ่มความน่าสนใจในการเข้ามาใช้งานและสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้าได้ เมื่อนำข้อเสนอแนะมาพิจารณาประกอบกับโครงสร้างของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์แล้ว พบว่า โครงสร้างของระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สามารถรองรับการนำเสนอสินค้าอื่น ๆ ได้ เนื่องจากมีการจัดแบ่งประเภทของสินค้าไว้ และการสั่งซื้อสินค้าแต่ละครั้ง ระบบจะส่งคำสั่งซื้อให้ผู้จำหน่ายสินค้าที่เป็นเจ้าของสินค้าเท่านั้น เปรียบเสมือนผู้จำหน่ายสินค้ามีร้านค้าเสมือนเป็นของตนเองแยกจากกันโดยอิสระ ดังนั้น อาจมีการขยายผลการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ไปยังกลุ่มผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์โอท็อปหรือผลิตภัณฑ์ชุมชนกลุ่มอื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นผลงานจากโครงการวิจัยภายใต้ “โครงการนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาพื้นที่ทุนเสริมขีดความสามารถภาคการเกษตรและยกระดับเศรษฐกิจฐานรากในจังหวัดนครราชสีมา” โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ รวมถึงผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้บริหาร และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [1] Chiarakul, T. (2014). The Problems and the Adaptation of OTOP to AEC. **Executive Journal**. Vol. 34, No. 1, pp. 177-191

- [2] The Knowledge Management Institute Foundation. (2017). **The blueprint of Thailand 4.0, A Model to Impel Thailand to Sustainability and Sustainable Wealth**. Access (17 December 2017). Available (<http://www.libarts.up.ac.th/v2/img/Thailand-4.0.pdf>)
- [3] Kanjanasuwan, T. (2009). **E-Commerce**. Bangkok : KTP COMP & CONSULT.
- [4] Chayavivatkul, P. (2004). E-Commerce. **HCU Journal**. Vol. 7, No. 14, pp. 61-69
- [5] Aiamsririvong, O. (2013). **E-Commerce (A Managerial Perspective)**. Bangkok: SE-ED Publishing.
- [6] Royce, W. W. (1970). Managing the Development of Large Software Systems. In **Proceedings of IEEE WESCON**. pp. 1-9.
- [7] Pressman, R. S. (2001). **Software Engineering a Practitioner's Approach**. 5th ed. NY: Mc Grew Hill.
- [8] Putjusamai, K. (2004). **E-COMMERCE OTOP ONLINE**. Bangkok: Rajabhat Chandrakasem University
- [9] Janthatit, J., Vongvipusana, J., Lomaphom, P., Lemtae, M., Nuallert, S., and Chaisuriya, S. (2007). **Development of Distribution Channels for OTOP Products by Using an E-commerce System, A Case Study: Products of Fish Scale from an Agriculture Housewife Group in Ban Bang Dan, Khao Roop Chang, Songkhla**. Songkhla: Songkhla Rajabhat University
- [10] Seelapan, W. (2007). **Maha Sarakham OTOP Manufacturer's Knowledge and Attitude Towards Electronics Commercial**. Maha Sarakham: Rajabhat Maha Sarakham University.
- [11] Trongwattanawuth, S. (2012). **Success Factors in Doing Business on E-Commerce Systems of Entrepreneur in Chiang Mai Province**. Chiang Mai: The Far Eastern University
- [12] Suanpang, P. (2014). **The Development E-Commerce Systems for Thai Tourism Industry**. Bangkok: Suan Dusit Rajabhat University.

การเตรียมนาโนคอมพอสิตของแป้งแคโทอิกและมอนต์มอริลโลไนต์ สำหรับการดูดซับสีเมทิลีนบลู

Preparation of Cationic Starch-Montmorillonite Nanocomposites for Methylene Blue Adsorption

สิรินันท์ วิริยะสุนทร^{1*}

Sirinun Wiriyaasontorn^{1*}

Received: July 26, 2018; Revised: October 3, 2018; Accepted: October 3, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างแป้งแคโทอิก (CST) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เพื่อใช้ในการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดย CST สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งน้ำหนกโมเลกุลต่ำและแคโทอิกมอนอเมอร์ (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล-N-N-N-ไตรเอมโมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC)) วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนโดยใช้เทคนิค CHN Analysis แล้วนำ CST ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU):CHPTAC เป็น 1:3 นำมาเตรียมนาโนคอมพอสิต CST:MMT อัตราส่วนต่าง ๆ วิเคราะห์ลักษณะวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMTs มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเกิดการแทรกสอดด้วยแสงประจุบวกเข้าไปในชั้นมอนต์มอริลโลไนต์ การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลูโดยใช้เทคนิคการวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (UV-Vis) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัมระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าวัสดุนาโนคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงกว่า MMT โดย CST-MMT 0.5:1 สามารถกำจัดสีเมทิลีนบลูได้สูงสุดร้อยละ 99.99 และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 93.61 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาไอโซเทอม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยใช้วัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 93.46 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

คำสำคัญ : แป้งแคโทอิก; มอนต์มอริลโลไนต์; เมทิลีนบลู; นาโนคอมพอสิต; การดูดซับ

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี อุบลราชธานี

¹ Faculty of Science, Ubonratchathani Rajabhat University, Ubonratchathani

* Corresponding Author E - mail Address: ing_sirinun25@hotmail.com

Abstract

This research aims to study the preparation of nanocomposites from montmorillonite (MMT) and cationic starch (CST) for dyes adsorption applications. CSTs were synthesized by the reaction of low molecular weight starch (LMW-ST) with 3-chloro-2-hydroxypropyl-N-N-N-trimethyl ammonium chloride (CHPTAC) as cationizing agent. The synthesized CSTs were used to determine the nitrogen content by CHN analysis. CST (molar ratio of anhydroglucose unit (AGU):CHPTAC is 1:3) was applied to prepare the CST-MMT nanocomposites, at difference mass ratio, and characterized by XRD. The dye adsorption ability of nanocomposites (methylene blue) was investigated by using UV-VIS spectrophotometry. From XRD result, it could be said that the CST-MMT composites had the intercalated nanostructure. The dye adsorption of MMT and CST-MMT nanocomposites was measured at initial concentration of 500 mg/L adsorbent for 24 hrs. The CST-MMT nanocomposites showed better adsorption efficiency than the neat MMT. The percentage of dye removal of methylene blue (CST:MMT 0.5:1 was representative for the CST-MMT nanocomposites) was 99.99 %. The maximum value for adsorption capacity of methylene blue on the CST-MMT nanocomposite was 93.61 mg.g⁻¹ adsorbent. The adsorption ability of CST-MMT nanocomposites at the different times and concentrations was also studied. The result of the adsorption behavior of methylene blue on CST-MMT nanocomposite indicated that the adsorption capacity process followed the Langmuir isotherm model with the maximum adsorption capacity of 93.45 mg.g⁻¹. The adsorption kinetics behavior was fit to the pseudo-second-order model.

Keywords: Cationic Starch; Montmorillonite; Adsorption; Nanocomposites; Methylene Blue

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดน้ำเสียมากที่สุดอุตสาหกรรมหนึ่ง เนื่องจากจะใช้น้ำในกระบวนการผลิตในส่วนของการฟอกย้อม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใยกระบวนการเหล่านี้ใช้น้ำในปริมาณมาก ดังนั้นน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนจากสารเคมีหลักที่ใช้ในการย้อม คือ สีย้อม สีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายประเภท สีย้อมที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเอโซเป็นกลุ่มที่ใช้มากที่สุด และมีสารที่ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ โดยสีย้อมที่มีสารฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ก่อให้เกิดสารประกอบ Absorbable Organic Halogen ซึ่งเป็นสารที่สลายตัวได้ยากมาก ก่อให้เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนสีย้อมที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง โดยโลหะหนักเหล่านี้อาจเจือปนออกมากับน้ำทิ้งได้ หากไม่มีการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิด

ผลกระทบด้านสุขอนามัยได้ และนอกจากนี้ยังพบว่า สีที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำด้วยเช่นกัน [1] - [4]

เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างที่ทำให้เกิดสี เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำ ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ ควรมีกระบวนการบำบัดก่อนเพื่อลดความเป็นพิษเนื่องจากสีย้อม ในปัจจุบันการบำบัดน้ำทั้งในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี กระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยม ได้แก่ กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทางกายภาพเชิงเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการนี้สารปนเปื้อนในน้ำเสียจะถูกดูดซับไปเกาะอยู่บนผิวของวัสดุของแข็งที่เรียกว่าสารดูดซับ สารดูดซับที่มีการใช้งานในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมมีหลายชนิดทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น ซีโอไลต์ แกลลอย ไคโตซาน คาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น จากข้อมูลข้างต้นวัสดุธรรมชาติที่ใช้งานด้านดูดซับมีหลายประเภท งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพัฒนาวัสดุดูดซับจากวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูกให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น โดยวัตถุดิบธรรมชาติที่เลือกใช้ ได้แก่ แร่ดินเหนียวกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากแร่ดินเหนียวสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก และไอออนลบได้ โดยลักษณะของแร่ดินเหนียวเป็นแผ่นบางประกบของชั้นซิลิเกตซ้อนกันหลายชั้น ทำให้พื้นที่ผิวของแร่ดินเหนียวเป็นแหล่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การมีประจุลบที่บริเวณพื้นผิวเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถยึดไอออนที่มีประจุบวกหรือที่เรียกว่า แคโทไอออนของธาตุต่าง ๆ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ เป็นต้น ไว้ที่พื้นผิวได้ไอออนเหล่านี้จะถูกยึดเอาไว้อย่างหลวม ๆ และสามารถถูกไอออนบวกชนิดอื่นเข้ามาแทนที่ได้ กระบวนการแลกเปลี่ยนนี้เรียกว่า กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โครงสร้างลักษณะดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามขนาดของช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวนั้นมีขนาดเล็กมากประมาณ 1.3 นาโนเมตร จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของแร่ดินเหนียวไม่ค่อยสูง เนื่องจากสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสีทอส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ จึงแพร่เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้ไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของแร่ดินเหนียว ในงานวิจัยนี้จึงได้นำแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ [5] - [9] มาดัดแปรด้วยแป้งแคโทออลิก โดยนำแป้งมันสำปะหลังมาดัดแปรให้เป็นแป้งแคโทออลิก [10] - [11] ซึ่งเป็นแป้งที่มีประจุบวก จึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกระหว่างแป้งแคโทออลิกกับคอลลอยด์ประจุบวกที่อยู่ในแต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับสีย้อม [2] ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบพื้นฐาน [12] เนื่องจากมีราคาถูก และหาได้ง่ายในประเทศไทย สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัสดุที่เตรียมได้จะเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีสีย้อมเจือปนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวก ราคาถูก ช่วยเพิ่มมูลค่า ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมสีทอ รวมไปถึงอุตสาหกรรมอื่น ๆ ด้วย

วิธีการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมีในงานวิจัย

แป้งมันสำปะหลัง จากบริษัทอุตสาหกรรมแป้งไทย (จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย) โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-MMT) ชื่อทางการค้า คือ Mac-Gel จากบริษัทไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม

(จังหวัดสมุทรสาคร ประเทศไทย) 3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล N-N-N-ไตรแอมโมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC) เมทิลีนบลู และสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การสังเคราะห์แป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight Starch, LMW-ST)

แป้งมันสำปะหลัง 5 กรัม แขนวลอยในเมทานอล 100 มิลลิลิตร เดิมกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับให้สารแขวนลอยเป็นกลางด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ล้างตะกอน LMW-ST ที่ได้ด้วยเอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นำตะกอนที่กรองได้ไปอบให้แห้ง [13] - [14]

2.2 การสังเคราะห์แป้งแคตไอออนิก (Cationic Starch, CST)

นำ LMW-ST ทำปฏิกิริยากับ 3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล N-N-N-ไตรเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC) (อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU) ต่อ CHPTAC เป็น 1:3) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง กรองและล้างตะกอนด้วยเอทานอลนำไป อบแห้ง [15] นำ CST ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (% N) ด้วยเทคนิค CHN Analysis และคำนวณองศาการแทนที่ (DS) (สมการที่ (1)) [15]

$$\text{องศาการแทนที่ (DS)} = \frac{162.15 \times \%N}{1401 - (154.64 \times \%N)} \quad (1)$$

2.3 การเตรียมนานาโนคอมพอสิตแป้งแคตไอออนิกมอดิฟายด์ (CST-MMT)

เตรียมสารละลายแป้งแคตไอออนิกเข้มข้น 0.01 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งละลายหมดนำมาผสมมอดิฟายด์กระจายตัวในน้ำกลั่นแล้วนำไปอัลตราโซนิก จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายแป้งแคตไอออนิกลงในสารแขวนลอยมอดิฟายด์ในตัวอย่างช้า ๆ โดยให้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปั่นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แยกวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง นำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT

สัญลักษณ์ CST:MMT	ปริมาณ (กรัม)	
	CST	MMT
0.5:1	0.5	1
1:1	1.0	1
1.5:1	1.5	1
2:1	2.0	1
2.5:1	2.5	1

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของ MMT และวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT

นำ MMT และวัสดุดูดซับ CST-MMT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ดังตารางที่ 1) ปริมาณ 0.25 กรัม ในสารละลายสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับเป็นเวลา 1,440 นาที จากนั้นแยกตะกอนและนำสารละลายที่แยกวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร นำมาคำนวณร้อยละการกำจัดตามสมการที่ (2) [7] $C_0 - C_e$

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายก่อนการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

4. การศึกษาผลของเวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

ซึ่งวัสดุดูดซับ CST-MMT 0.5:1 ปริมาณ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม ในขวดรูปชมพู่เติมสารละลายสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นศึกษาการดูดซับที่ระยะเวลา 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 1,440 นาที หลังจากนั้นแยกตะกอนและนำสารละลายที่แยกวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร นำมาคำนวณร้อยละการกำจัดตามสมการที่ (2)

5. การศึกษาผลของเวลาสัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเมทิลีนบลู

ซึ่งวัสดุดูดซับ CST-MMT 0.5:1 ปริมาณ 0.10 กรัม ในขวดรูปชมพู่เติมสารละลายสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปั่นจนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นศึกษาการดูดซับที่ระยะเวลา 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 1,440 นาที หลังจากนั้นแยกตะกอนและนำสารละลายที่แยกวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร นำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับตามสมการที่ (3) [16] - [18]

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (3)$$

เมื่อ

q_e หมายถึง ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e หมายถึง ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

W หมายถึง น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

V หมายถึง ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (ลิตร)

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

7. ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

สร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ดังสมการที่ (4) และ (5) [16] - [18]

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (4)$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (5)$$

เมื่อ

q_e	คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล
q_m	คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัม/กรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว
K_L	คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)
C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
K_F	คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัม/กรัม)
$1/n$	คือ ความแรงของการดูดซับ (Adsorption Intensity) ตามสมการของฟรุนดลิช

8. จลนศาสตร์ของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ศึกษาจากแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order) ดังสมการที่ (6) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) ดังสมการที่ (7) [16] - [18]

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (6)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (7)$$

เมื่อ

q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับของวัสดุที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
K_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)
t	หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
K_2	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม - นาที)

วิเคราะห์ความสอดคล้องของการดูดซับกับไอโซเทอมทั้งสองแบบโดยใช้ค่า R^2

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนและค่าองค์การแทนที่ของแป้งแคทไอออนิกโดยใช้เทคนิค CHN Analysis

การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนและค่าองค์การแทนที่ของแป้งแคทไอออนิก พบว่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนที่ได้จากการวิเคราะห์เท่ากับ 0.508 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาคำนวณทางองค์การแทนที่ (สมการที่ (1)) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.062

2. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ในวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ Philips X'Pert โดยวัดที่มุม 2θ ตั้งแต่ 2 - 15 องศา คำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ 001(d_{001}) ของมอนต์มอริลโลไนต์จากสมการของแบรกก์ (Bragg's Equation) (สมการที่ (8))

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (8)$$

เมื่อ

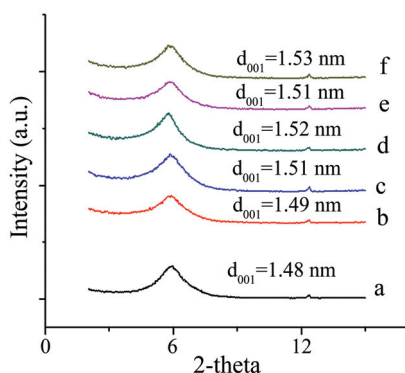
λ	คือ ความยาวของคลื่นรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 0.1542 นาโนเมตร
θ	คือ มุมตกกระทบ(องศา)
d	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ MMT
n	คือ ค่าคงที่จำนวนเต็ม [12]

ตารางที่ 2 ค่า 2θ และค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{001}) ของมอนต์มอริลโลไนต์และวัสดุประกอบ (CST-MMT)

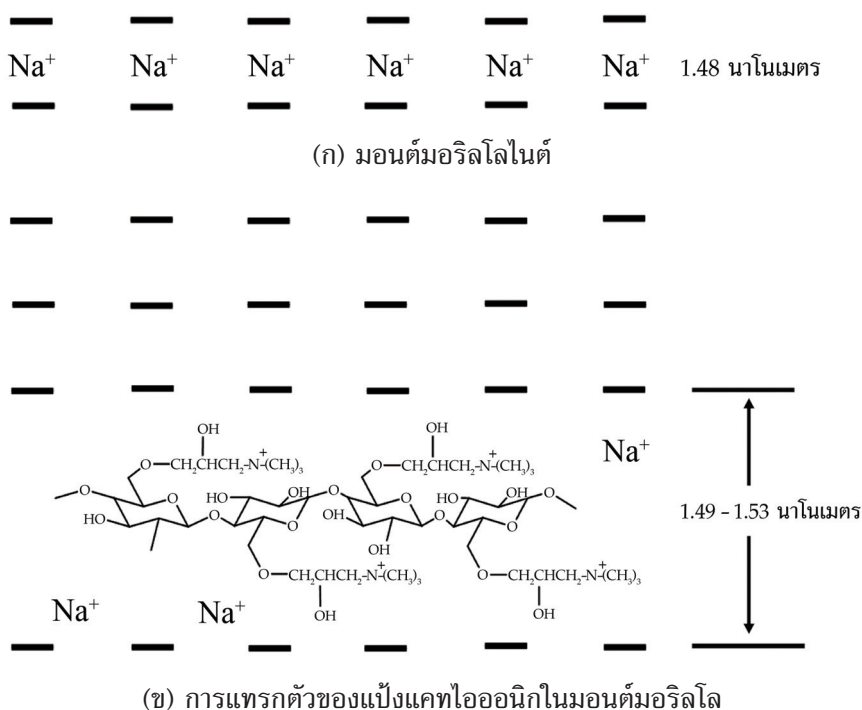
วัสดุ	ค่า 2θ	ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} (นาโนเมตร)
MMT	5.96	1.48
0.5:1	5.90	1.49
1:1	5.84	1.51
1.5:1	5.78	1.52
2:1	5.84	1.51
2.5:1	5.76	1.53

จากผลการวิเคราะห์ MMT ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.96 และคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ได้เท่ากับ 1.48 นาโนเมตร และวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ที่สังเคราะห์ได้ใช้อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 1 และตารางที่ 2 วัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ทุกตัวอย่างจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งต่ำกว่าของ MMT จากการคำนวณพบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT มีค่ามากกว่า MMT แสดงให้เห็นว่าหลังจากการดัดแปร

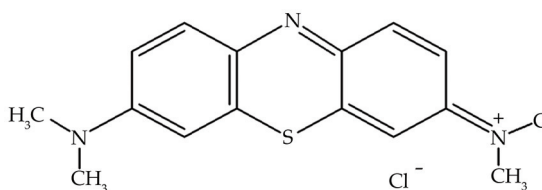
มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยแป้งแคทไอออนิก สามารถทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นแต่ละชั้นขยายกว้างขึ้น เนื่องจาก CST ที่แทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของ MMT ส่งผลให้วัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น [1], [2], [9] แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) MMT (b) 0.5:1 (c) 1:1 (d) 1.5:1 (e) 2:1 และ (f) 2.5:1



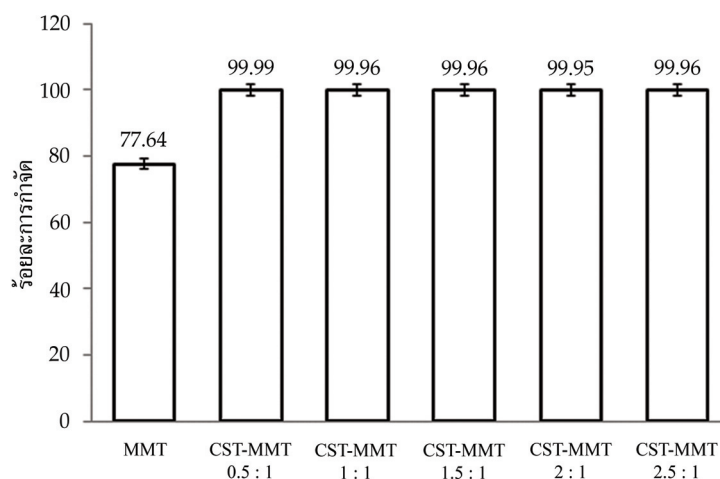
รูปที่ 2 แบบจำลองของมอนต์มอริลโลไนต์และการแทรกตัวของแป้งแคทไอออนิกในมอนต์มอริลโลไนต์ [2]



รูปที่ 3 โครงสร้างของสีเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

3. ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลูของ MMT และวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT

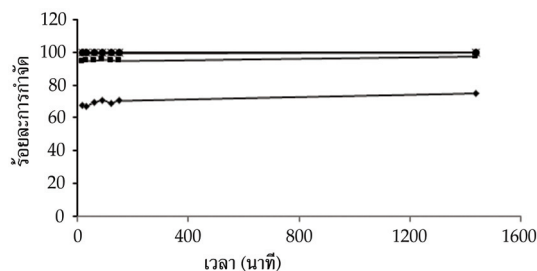
ประสิทธิภาพของวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์และวัสดุนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในการดูดซับสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าร้อยละการกำจัดสีของมอนต์มอริลโลไนต์มีค่า 77.64 และวัสดุนาโนคอมพอสิตให้ค่าร้อยละการกำจัดได้สูงกว่า MMT เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมเบสิกที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ประจุบวก แสดงดังรูปที่ 3 แต่ MMT มีพื้นผิวประจุของโครงสร้างเป็นลบ ทำให้ MMT มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดี และเมื่อทำการดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วย CST ทำให้มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ MMT เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของ MMT ได้ง่ายขึ้น [18] ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต มีค่าร้อยละการกำจัดใกล้เคียงกัน โดยปริมาณ CST ที่เพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าในช่วง 99.96 - 99.99 โดยอัตราส่วน 0.5:1 เป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณ CST น้อยสุด จึงนำวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 ไปศึกษาในขั้นตอนถัดไป



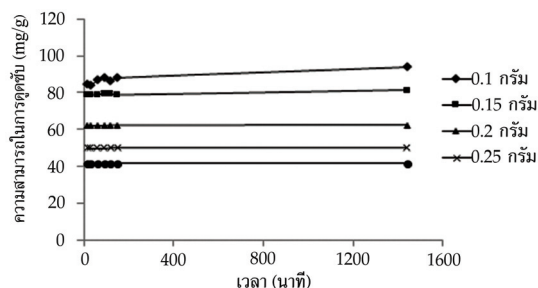
รูปที่ 4 ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลู โดยใช้ MMT และ CST-MMT เป็นตัวดูดซับ ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.25 กรัม ปริมาตรสีย้อม 25 มิลลิลิตร)

4. เวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู

ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 5 (ก) ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมง และค่อย ๆ คงที่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับมีค่ามากขึ้น สามารถดูดซับสีเมทิลีนบลูได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับแสดงดังรูปที่ 5 (ข) พบว่าปริมาณ 0.1 กรัม จะมีความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงสุดโดยที่ระยะเวลา 1,440 นาที มีค่าเท่ากับ 93.61 มิลลิกรัมต่อกรัม



(ก) ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลู



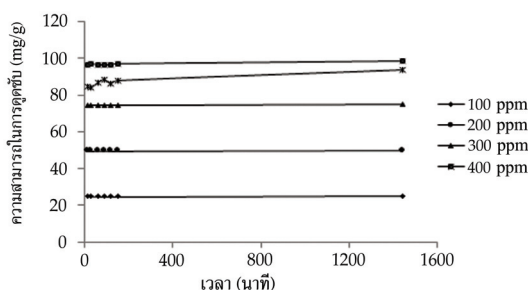
(ข) ค่าความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ในปริมาณที่แตกต่างกัน

รูปที่ 5 ร้อยละการกำจัดสีเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT ในปริมาณที่แตกต่างกัน

5. เวลาสัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเมทิลีนบลู

ความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ปริมาตรสีย้อม 25 มิลลิลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 6 ในช่วงเวลา 15 นาทีแรกความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีค่าเท่ากับ 24.92 9.89 74.25 96.54 และ 84.49 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลามากขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจึงเท่ากับ 30 นาที และระยะเวลาในการดูดซับ 1,440 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 24.95 49.94 74.80 98.4 และ 93.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การเพิ่ม

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นสีย้อมและบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดแรงผลักดัน หรือการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น [16] และค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับคงที่ทำให้ร้อยละการดูดซับลดลง เพราะถูกจำกัดด้วยที่ว่างบนผิวตัวดูดซับ โดยความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 400 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 98.4 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ



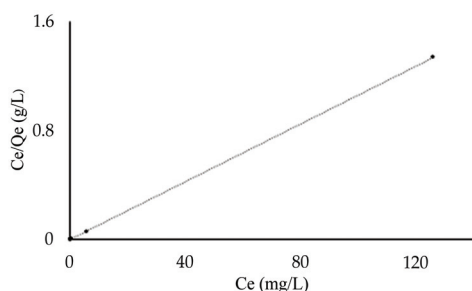
รูปที่ 6 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 100 200 300 400 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

6. ไอโซเทอมของการดูดซับ

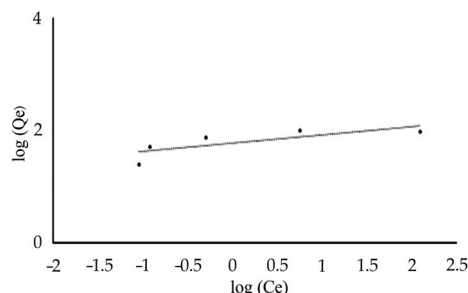
ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมฟีนอลด้วยวัสดุคาร์บอนนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 อธิบายจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังสมการที่ (4) และ (5) แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาค่า R^2 การดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์เท่ากับ 1.00 ซึ่งเข้าใกล้ 1 มากกว่า R^2 ที่ได้จากการกราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.598 แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ [2] โดยสามารถคำนวณค่า q_m และ K_L ได้มีค่าเท่ากับ 93.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 17.83 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชคำนวณค่าคงที่ K_F และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 58.87 (มิลลิกรัมต่อกรัม) $1/n$ และ 0.15 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมฟีนอลของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช

Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
K_L	q_m	R^2	K_F	$1/n$	R^2
17.83	93.46	1	58.87	0.15	0.598



(ก) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

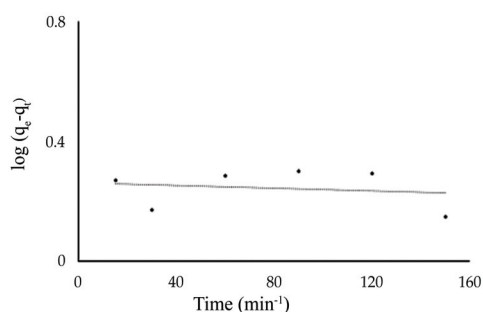


(ข) ไอโซเทอมของฟรุนดลิช

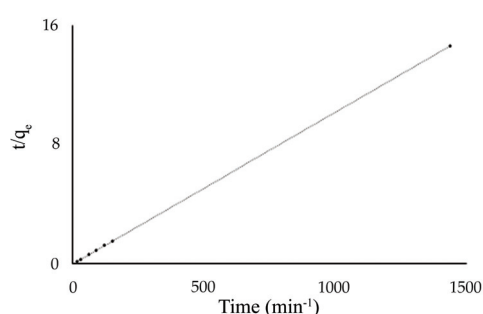
รูปที่ 7 ไอโซเทอมของการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST- MMT

7. จลนศาสตร์ของการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT

จลนศาสตร์ของการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT 0.5:1 ศึกษาจากแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ดังสมการที่ (6) และ (7) แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8 พบว่ากราฟที่ได้จากสมการจลนศาสตร์ Pseudo- Second Order มีค่า R^2 เท่ากับ 1.00 ซึ่งเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการจลนศาสตร์ Pseudo-First Order ซึ่งได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.0281 จึงแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิตเป็นไปตามจลนศาสตร์ของ Pseudo- Second Order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี [2], [18]



(ก) Pseudo-First Order



(ข) Pseudo-Second Order

รูปที่ 8 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT

ตารางที่ 4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและอันดับการเกิดปฏิกิริยา

Pseudo-First Order			Pseudo-Second Order		
K_1	q_e (mg/g)	R^2	K_2	q_e (mg/g)	R^2
4.6×10^{-4}	1.826	0.0281	0.0071	98.04	1

บทสรุป

วัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ได้สูงกว่า MMT โดย CST-MMT มีระยะห่างระหว่างชั้นและพื้นที่ผิวของ MMT เพิ่มขึ้น การศึกษาไอโซเทอมและไอโซเทอมของการดูดซับวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT อัตราส่วน 0.5:1 ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลู 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสีย้อม 25 มิลลิลิตร มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 98.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ จลนศาสตร์เป็นไปตาม Pseudo- Second Order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี จากผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวัสดุนาโนคอมพอสิต CST-MMT สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมในน้ำเสียได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2561

References

- [1] Wang, L. and Wang, A. (2007). Adsorption Characteristics of Congo Red onto the Chitosan / Montmorillonite Nanocomposite. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 147, Issue 3, pp. 979-985. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.145
- [2] Xing, G., Liu, S., Xu, Q., and Liu, Q. (2012). Preparation and Adsorption Behavior for Brilliant Blue X-BR of the Cost-Effective Cationic Starch Intercalated Clay Composite Matrix. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 87, Issue 2, pp. 1447-1452. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.09.038
- [3] Liu, P. and Zhang, L. (2007). Adsorption of Dyes from Aqueous Solutions or Suspensions with Clay Nano-Adsorbents. **Separation and Purification Technology**. Vol. 58, Issue 1, pp.32-39. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.07.007
- [4] Qiao, S., Hua, Q., Hanghereshta, F., Hu, X., and Lu, G. Q. (2009). An Investigation on the Adsorption of Acid Dyes on Bentonite Based Composite Adsorbent. **Separation and Purification Technology**. Vol. 67, Issue 2, pp. 218-225. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.03.012
- [5] Klimaviciute, A., Riauka, R., and Zemaitaitis, A. (2007). The Binding of Anionic Dyes by Cross-Linked Cationic Starches. **Journal of Polymer Research**. Vol. 14, Issue 1, pp. 67-73
- [6] Ngulube, T., Gumboj, R., Masindi, V., and Maity, A. (2017). An Update on Synthetic Dyes Adsorption onto Clay Based Minerals: A State-of-Art Review. **Journal of Environmental Management**. Vol. 19, pp. 35-57. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.031

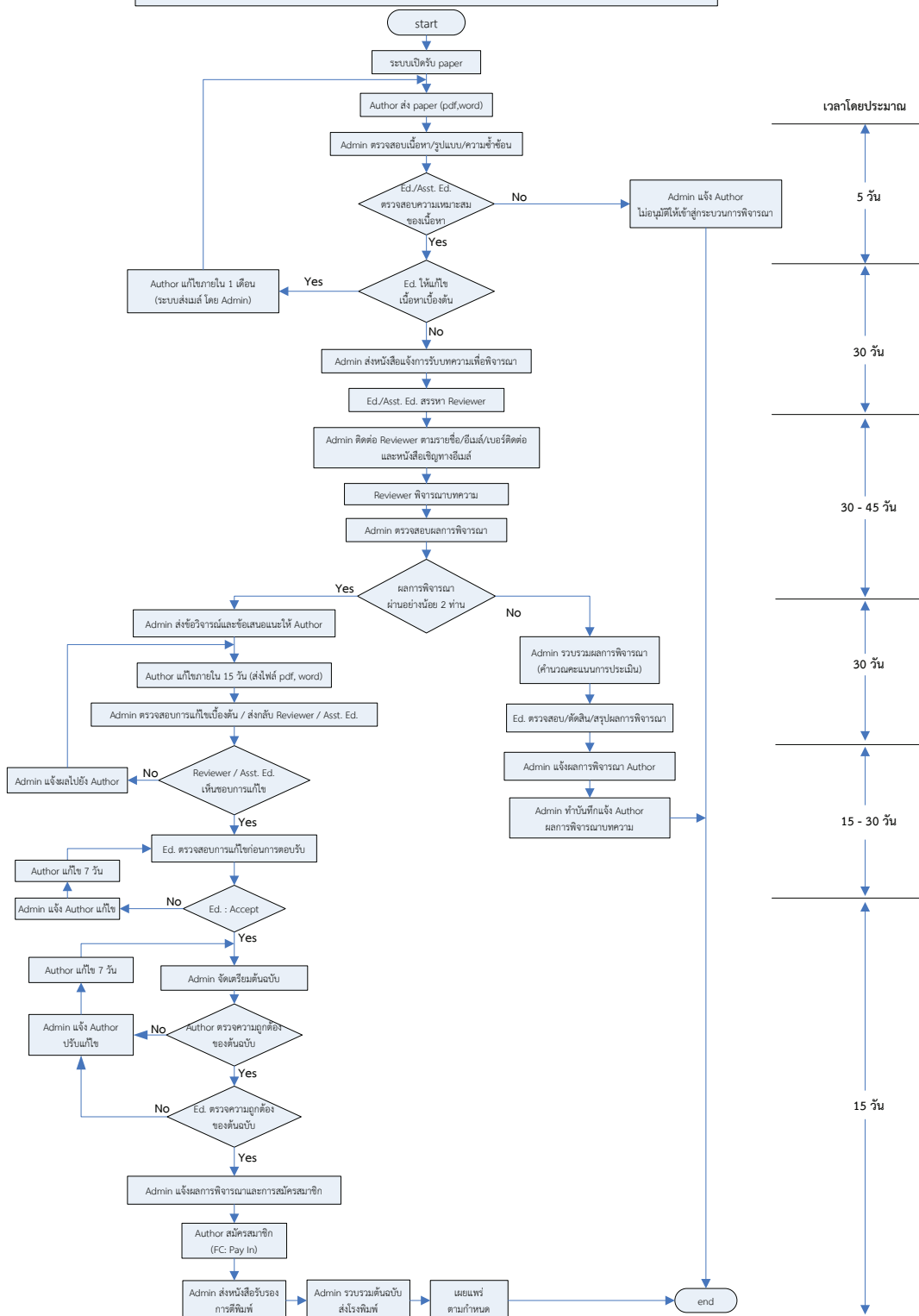
- [7] Gürses, A., Doğar, Ç., Yalçın, M., Açıkyıldız, M., Bayrak, R., and Karaca, S. (2006). The Adsorption Kinetics of the Cationic Dye, Methylene Blue, Onto Clay. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 131, pp 217-228. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.036
- [8] Santos, S. C. R., Oliveira, A. F. M., and Boaventura, R. A. R. (2016). Bentonitic Clay as Adsorbent for the Decolourisation of Dyehouse Effluents. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 126, pp. 667-676. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.092
- [9] Acisli, O., Khataee, A., Karaca, S., and Sheydaei, M. (2016). Modification of Nanosized Natural Montmorillonite for Ultrasound-Enhanced Adsorption of Acid Red 17. **Ultrasonics Sonochemistry**. Vol. 31, pp.116-121. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.12.012
- [10] Wing, R. E., Rayford, W. E., Doane, W. M., and Russell, C. R. (1978). Preparation of Insoluble Cationic Starches and Their Use in Heavy Metal Anion Removal. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 22, Issue 5, pp. 1405-1416. DOI: 10.1002/app.1978.070220519
- [11] Kuo, W. Y. and Lai, H. M. (2007). Changes of Property and Morphology of Cationic Corn starches. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 69, Issue 3, pp. 544-553. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.01.012
- [12] Wiriya-Soontorn, S. and Sripalang, S. (2015). Preparation of Cassava Starch/Poly(vinyl alcohol)/Montmorillonite Nanocomposites for Coating Controlled-Release Fertilizer. **KKU Science Journal**. Vol. 43, Number 3, pp. 503-514 (in Thai)
- [13] Lin, J. H., Leeb, S. Y., and Changa, Y. H. (2003). Effect of Acid-Alcohol Treatment on the Molecular Structure and Physicochemical Properties of Maize and Potato Starches. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 53, Issue 4, pp. 475-482. DOI: 10.1016/S0144-8617(03)00145-0
- [14] Pal, S., Mal, D., and Singh, R. P. (2005). Cationic Starch: An Effective Flocculating Agent. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 59, Issue 4, pp. 417-423. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.06.047
- [15] Heinze, T., Haack, V., and Rensing, S. (2004). Starch Derivatives of High Degree of Functionalization 7. Preparation of Cationic 2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride Starches. **Starch/Stärke**. Vol. 56, Issue 7, pp.288- 296. DOI: 10.1002/star.200300243
- [16] Su-aaron, K. and Piyamongkala, K. (2012). Kinetic Adsorption of Silver Ion by Chitosan Resin. **KKU Science Journal**. Vol. 40, Number 4, pp.1285-1300 (in Thai)
- [17] Rakchaiwan, A., Kulratkitiwong, Y., and Piyamongkala, K. (2014). Equilibrium and Kinetic Adsorption of Silver Ion by Blend Chitosan-Polyvinyl Alcohol Resin. **SWU Engineering Journal**. Vol. 9, No. 2, pp. 12-22 (in Thai)
- [18] Lawchoochaisakul, S., Monvisade, P., Siriphannon, P., and Nukeaw, J. (2012). Adsorption of Basic Yellow 1 (BY1) by Cationic Starch Intercalated Montmorillonite Nanocomposite. In **The 9th National Kasetsart University Kamphaengsaen Conference**. Kasetsart University. Nakhonpathom. Thailand. pp. 437-444 (in Thai)



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมถึงไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ

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

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

- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า

- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman

- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8

- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า

- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย

- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14

- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 13

ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 11

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

“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11

- ชื่อตาราง

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

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

- ชื่อรูปภาพ

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

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

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียด ต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ด้วยกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

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

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

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

ข. ส่วนเนื้อหา

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

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

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

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

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

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

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

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (**Method**) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือ การดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

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

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

5. เอกสารอ้างอิง (**References**) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิง ต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

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

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

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference list)

1) หนังสือ

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

ตัวอย่างเช่น

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

2) หนังสือแปล

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

ตัวอย่างเช่น

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

3) บทความหรือบทในหนังสือ

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

ตัวอย่างเช่น

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

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/ สัมมนาทางวิชาการ

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

ตัวอย่างเช่น

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

5) วารสาร

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

ตัวอย่างเช่น

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

6) บทความในหนังสือพิมพ์

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

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

7) บทความในสารานุกรม

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

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

8) วิทยานิพนธ์

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

ตัวอย่างเช่น

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

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

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

ตัวอย่างเช่น

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

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

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

ตัวอย่างเช่น

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

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

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

ตัวอย่างเช่น

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

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภูษนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภษย่อย ควรจัดให้รูปภษย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

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

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

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

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutjo/index> โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี
- 2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ วิศวกรรมศาสตร์ ENG ☐ เกษตรศาสตร์ AGR ☐ สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

☐ 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)

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
(.....)

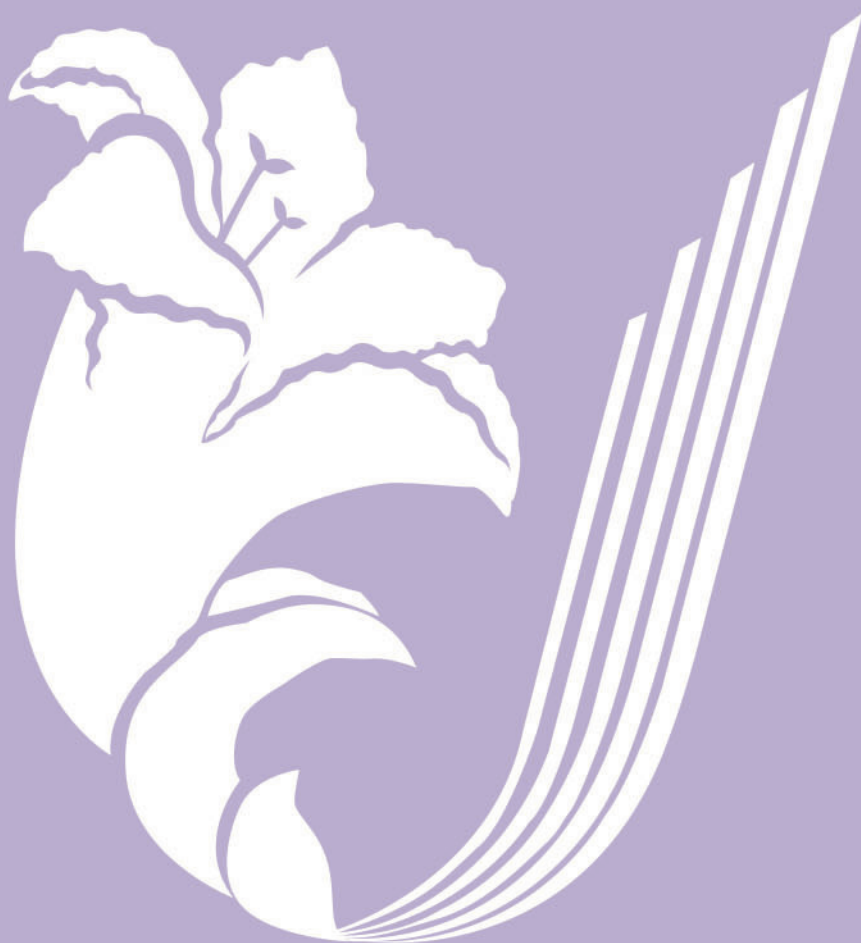


หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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. 12 No. 1 January - April 2019



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

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

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