



วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2563



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

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

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป

ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป

เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวัรรต ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

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

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

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
รองศาสตราจารย์ กาญจน
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

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

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์

นางสาวอรุณรักษ์

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

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

บรรณาธิการ

วงศ์ไตรรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

ตีราชมัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

ผลกระทบของความชื้นของวัสดุต่อประสิทธิภาพของการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ ชนะรบ วิชาลัย	1
การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั้นเม็คเล็ดแดงความเร็วสูง อภิสิทธิ์ ทวีอภิรติรัตน์, ศิริพงษ์ ปะวะโก, อัมภฎายุธ รอดพ่าย และจิระพล ศรีเสริฐผล	20
การเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่โดยการทำความเย็นแบบระเหย ร่วมกับการบังคับอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น ภานุวิชญ์ พุทธิรักษา และสุลักษณ์ มงคล	37
การหมักย่อยเศษก้านและใบไม้รวมร่วมกับเศษอาหารในสภาวะไร้ออกซิเจน แบบถังหมักเดี่ยวและแบบสองถัง กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, จุฑามาศ มณีสว่าง และนัฐญา บุญสิริ	59
การประยุกต์ใช้วิธีพัฒนาการโดยใช้ผลต่างกับปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางโดยมีข้อจำกัด ด้านกรอบเวลาและความต้องการที่หลากหลาย พรรัตน์ อารังวุฒิ, วิศิตพงศ์ จำรัส, ณัฐสุพร ชื่นสุวรรณ, ศุภนิตา จิตจักร และศิริพันธ์ บุญสุชาติ	75
การวางแผนเพาะปลูกและจัดจำหน่ายพืชผลทางการเกษตรระยะสั้น ด้วยตัวแบบกำหนดการ เชิงคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มรายได้ของเกษตรกร: กรณีศึกษาเกษตรกรอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ นรัตวี รัตนวัย และนราธิป สุพัฒน์ธนานนท์	89
อิทธิพลของการบ่มแข็งสองครั้งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 สิริพร ชันทองคำ, สมศักดิ์ ศิวคำรังหงส์ และธวัชชัย ปลูกผล	102
โรคติดเชื้อแบคทีเรียในกบนาและความไวต่อยาปฏิชีวนะ ปณรัตน์ ผาดี และไกรจักร แก้วพรม	115
กระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้า ธีรยุทธ คุณสุข และจारी ทองคำ	129
ผลของสารยึดเกาะต่อคุณภาพของซูปก้อนปรุงรสมะเขว่น บุษบา มะโนแสน และจิรัชต์ กันทะขู้	144
พฤษเคมีและฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา <i>Colletotrichum capsici</i> ของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุด สุนิษา สุวรรณเจริญ, ธีรพิชญ์ เกษมสุข, สุวรรณมา มิ่งจงเจริญ, วันวิภา ทำประโยชน์, วิไลวรรณ แจ้งชัด, ธิดารัตน์ ชุ่มมาตร และอาภาพร บุญมี	153
การพัฒนาโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว้านมหาหงส์ อำพล บุญเพียร, ศิริพร อินธิแสน, ปฐมา จันทรพล และวรัญญา อรุโณทยานันท์	166

Table of Contents

Research Articles

An Effect of Sub-Surface Moisture Content on GPR Survey Performance	1
<i>Chanarop Vichalai</i>	
Analysis and Design for High Speed Hematocrit Centrifuge Machine	20
<i>Apisit Taweepiradeerattana, Siripong Pawako, Autsadayut Rodpai, and Jiraphon Srisertpol</i>	
Increase of Cooling Capacity of Strawberry Canopy by Evaporative Cooling Together with Air Flow Controlling Under Culture Bench and Cool Water Tube	37
<i>Panuwit Puttaraksa and Sulaksana Mongkon</i>	
Anaerobic Digestion of Mixed Leaf and Petiole Waste and Food Waste in Single and Two Anaerobic Reactors	59
<i>Klinpratoom Panyaping, Jutamas Maneesawang and Nuttaya Boonsiri</i>	
Differential Evolution Optimization Applied to the Vehicle Routing with Time Windows and Multiple Demands	75
<i>Pornrat Thumrongvut, Thitipong Jamrus, Nutsuporn Chinsuwan, Suphanida Jitjakr, and Sirin Boonsuchat</i>	
Cultivation and Agricultural Products Distribution Short-term Planning with Mathematical Schedule Model to Increase Farmers' Revenue: A Case Study of the Farmers in Kao Kho District, Phetchabun Province	89
<i>Narat Rattanawai and Naratip Supattananon</i>	
Influence of Double Artificial Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Semi Solid Aluminium Alloy 2024	102
<i>Siriporn Khantongkum, Somsak Siwadamrongpong, and Thawatchai Plookphon</i>	
Bacterial Infection in Common Lowland Frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) and Antibiotic Susceptibility	115
<i>Panarat Phadee and Kraijak Keawprom</i>	
Feature Selection Method for Improving Customer Reviews Classification	129
<i>Teerayut Khunsuk and Jaree Thongkam</i>	
Effects of Binders on Ma-khaen (<i>Zanthoxylum limonella</i> Alston) Bouillon Cube Qualities	144
<i>Busaba Manosan and Jirarat Kantakhoo</i>	
Phytochemicals Screening and Antifungal Activity Against <i>Colletotrichum capsici</i> of Wood Vinegar from <i>Garcinia mangostana</i> Fruit	153
<i>Sunisa Suwancharoen, Teerapich Kasemsuk, Suwanna Mingjongjaroen, Wanwipa Tamprayort, Wilaiwan Jangchud, Thidarat Chummat, and Apaporn Boonmee</i>	
Development of Herbal Mosquito Repellent Lamp from Ginger Lily Oil	166
<i>Aumpol Bunpean, Siriporn Inthisan, Patama Chantarapon, and Warunya Arunotayanun</i>	

ผลกระทบของความชื้นของวัสดุต่อประสิทธิภาพของการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์

An Effect of Sub-Surface Moisture Content on GPR Survey Performance

ชนะรบ วิชาลัย^{1*}

Chanarop Vichalai^{1*}

Received: December 10, 2018; Revised: October 28, 2019; Accepted: November 5, 2019

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ (Ground Penetration Radar; GPR) ขึ้นอยู่กับความชื้นของสัญญาณสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากความสูงยอดคลื่น (Amplitude) ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดยความชื้นในวัสดุเป็นผลกระทบหลักต่อการสะท้อนของคลื่นซึ่งก่อให้เกิดการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความชื้นในผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตและพื้นทางซีเมนต์ (Cement-Treated Base; CTB) ที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นเรดาร์ในการตรวจพบระดับน้ำใต้ดิน โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant; ϵ) ด้วยการใช้วิธีการวัดระยะเวลาไป - กลับของคลื่นผ่านตัวอย่างที่ได้จากภาคสนาม ผลที่ได้จากการทดสอบถูกใช้ในการแปลงระยะเวลาไป - กลับของคลื่นให้เป็นระยะความลึกและเพื่ออธิบายผลเนื่องจากแรงดึงผิวที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุที่ทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดินได้ในผลการสำรวจ ตัวอย่างพื้นทางซีเมนต์ได้ถูกทำการทดสอบเพื่อหาการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงผิวในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลการสะท้อนคลื่นเนื่องจากแรงดึงผิวด้วยการจำลองผลคลื่นเพื่อตรวจทานผลการสำรวจที่ได้จากภาคสนามและห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเฉลี่ยจากตัวอย่างแห้งและตัวอย่างเปียก คือ 7 และ 20 ตามลำดับ ผลการทดสอบแรงดึงผิวของน้ำในแท่งตัวอย่างพื้นทางคอนกรีตแห้ง พบว่าระดับความสูงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำในช่วงเวลา 24 ชม. มีค่าเท่ากับ 4.3 ซม. การจำลองผลคลื่นพบว่ายอดคลื่นที่เกิดการสะท้อนผ่านชั้นวัสดุที่เกิดแรงดึงผิวมีความสูงลดลง

คำสำคัญ : การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ (GPR); ความชื้น; ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก; แบบจำลอง; ระดับน้ำใต้ดิน; แรงดึงผิว

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

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

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

Abstract

Performance of the Ground Penetrating Radar (GPR) depends on the wave reflectivity as shown as the amplitude height that varied with environmental conditions. Moisture content in sub-surface material has a large effect on signal attenuation. This research presents an effect of moisture content in asphaltic concrete road pavement and Concrete Treated Base (CTB) layers that would cause GPR signal to detection of water table. The simple methods to examine dielectric constant (ϵ) from two-way travel time of samples those collected from the field were tested in laboratory both dry and wet conditions. These test results were employed for time-to-depth conversion for GPR data interpretation and explanation of capillary effect that caused GPR results as it has difficulty to indicate groundwater table on the radar gram. The CTB sample was tested for rising of capillary force in the laboratory. However, GPR signal modelling was done to verify capillary effect on filed data and laboratory testing results. Study results found the dielectric constant of dry and wet asphaltic concrete samples are 7 and 20, respectively. The modelling of capillary test in 24 hrs indicate the capillary zone is height of 4.3 cm and GPR wave modelling shows reflectivity of GPR signal was reduced due to capillary effect.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR); Moisture Content; Dielectric Constant; Modeling; Groundwater Table; Capillary

บทนำ

Ground Penetration Radar (GPR) เป็นวิธีการสำรวจทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินในระดับตื้น โดยให้ผลเป็นภาพสะท้อนของคลื่นที่มีความละเอียดสูง สามารถประยุกต์เพื่อใช้งานด้านสำรวจทำแผนที่ของโครงสร้างทางธรณีวิทยา ตลอดจนจนถึงการใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต ใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพในงานด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งจัดเป็นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test; NDT) วิธีการหนึ่ง

ค่าตัวแปรหลักที่สำคัญในการตรวจสอบวัสดุทางวิศวกรรมด้วยคลื่นเรดาร์ คือ ค่าความชื้นในวัสดุทางวิศวกรรมนั้น ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงต่อการลดทอนสัญญาณคลื่นเรดาร์ [1] เนื่องด้วยย่านความถี่ที่เครื่องมือ GPR ใช้งานอยู่ในช่วงคลื่นความถี่ไมโครเวฟ คือ มีความถี่ระหว่าง 5 MHz [1] ถึง 2.6 GHz [2] จากผลการศึกษาในเบื้องต้นด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [3] พบว่า การตรวจพบวัตถุโลหะขึ้นอยู่กับความชื้นที่มีอยู่ในดิน ประเภทของดิน ความลึกของวัตถุ และความถี่ของคลื่นเรดาร์

ความถี่ในวัสดุต่าง ๆ ยังแปรผันตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริก [4] ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนี้ยังเกี่ยวข้องกับความลึกของการสำรวจด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในขั้นตอนแรกในการตั้งค่าตัวแปรการเก็บข้อมูล (Acquisition Parameters) ในส่วนของการกำหนดช่วงเวลาไป - กลับของผลข้อมูลคลื่นที่ทำการบันทึก (Trace Length) ในพื้นที่การทดสอบที่เปียกชื้น หากละเลยการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบที่เปียกชื้น ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าปกติตามปริมาณของความชื้นในวัสดุนั้น จะทำให้ความลึกในการสำรวจไม่เพียงพอจนทำให้พลาดระดับความลึกของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการตรวจสอบ [5]

แต่อย่างไรก็ตามการประมาณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในการตั้งค่าตัวแปรการเก็บข้อมูลในภาคสนามที่สอดคล้องกับค่าความชื้นของวัสดุยังเป็นการยาก บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการทดสอบตัวอย่างจากภาคสนามในห้องปฏิบัติการทดสอบ และการจำลองผลการสะท้อนคลื่นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่จำเป็นในการประมวลผลและแปลผลคลื่นสะท้อนเรดาร์ที่ได้จากการสำรวจที่ยังลึกด้วยคลื่นเรดาร์ของสนามบินสุวรรณภูมิ โดยในขั้นตอนระหว่างการเก็บข้อมูลการสำรวจอยู่ในช่วงฤดูฝน ซึ่งพื้นผิวทางที่ทำการทดสอบมีความเปียกชื้นเนื่องจากฝนที่ตกลงมา โดยความชื้นและความนำไฟฟ้าเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการสำรวจที่ยังลึกด้วยคลื่นเรดาร์

ทฤษฎี

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยสมการของ Maxwell's (Maxwell's Equation) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (Electric Field; E) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field; H) ช่วงเวลา (Time; T) พื้นที่ (Area; A) และคุณสมบัติด้านไฟฟ้าของวัสดุ (Electric Permittivity; ϵ)

คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ แรงต้านสนามไฟฟ้า (Electric Permittivity; ϵ) และสภาพนำไฟฟ้า (Electric Conductivity; σ) หากพิจารณาถึงความเกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ทางไฟฟ้า (Electrodynamics) [6] สามารถสรุปให้อยู่ในรูปของแรงต้านสนามไฟฟ้ารวม (Complex Permittivity; ϵ^*) ที่พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศและการถูกเหนี่ยวนำเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (AsV^{-1}m^{-1}) \quad (1)$$

เมื่อ $i = \sqrt{-1}$

โดยที่

ϵ' เป็นค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอุดมคติที่พิจารณาการสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศ

ϵ'' เป็นค่าสูญเสียเนื่องจากการถูกเหนี่ยวนำเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f [s^{-1}]$ และ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า แต่สำหรับแรงดันสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ (ε_0) มีค่าเท่ากับ $8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}m^{-1}$ ที่ในหัวข้อมีการพิจารณาเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว จะสามารถหาค่าแรงดันสนามไฟฟ้ารวม (Complex Permittivity; ε^*) ได้ดังสมการที่ (3)

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'} = \varepsilon' - i\varepsilon_r'' \quad (3)$$

การสูญเสียเชิงสัมผัส (Tangent Loss) เป็นอัตราส่วนของการเคลื่อนที่กระแสแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (4)$$

เมื่อ ε_r' เป็นค่าแรงดันสนามไฟฟ้าเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

โดยที่ $\tan \delta = 1$ ความเหนียวน้ำกระแสเท่ากับเคลื่อนที่ของกระแส แต่สำหรับ GPR แล้วการเคลื่อนที่ของคลื่นจะมีค่า $\tan \delta < 1$, แต่สำหรับ $\tan \delta > 1$ จะเกิดขึ้นได้ในกรณีของการกระจายตัวของคลื่น (Diffusive Process)

เมื่อพิจารณาคอนสแตนต์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุทางธรณี [7] และสมการที่ (4) สามารถพบได้ว่าทรายแห้ง ($\sigma = 1 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 4$) ทรายเปียก ($\sigma = 10 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 25$) และดินเลน ($\sigma = 50 \text{ mS/m}$, $\varepsilon = 25$) ภายใต้การทดสอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 50 MHz พบว่า ทรายแห้ง $\tan \delta = 0.09$ มีความเหมาะสมต่อการสำรวจด้วย GPR ทรายเปียก $\tan \delta = 0.14$ ก็ยังพอที่จะสามารถทำการสำรวจด้วย GPR แต่ดินเลน $\tan \delta = 0.72$ มีผลต่อการจำกัดการเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นไม่เหมาะสมกับการสำรวจด้วย GPR

คุณสมบัติสภาพการซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability; μ) ของวัสดุทางธรณีแทบไม่มีหรือมีค่าน้อยมากสำหรับการสำรวจด้วย GPR โดยค่าสภาพการซึมได้ของแม่เหล็กในสุญญากาศจากสมการที่ (5)

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในระบบแกนพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate System) สนามไฟฟ้า (Electric Field) $E = (E_x, 0, 0)$ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field) $H = (0, E_y, 0)$ เคลื่อนที่ในแนวแกน z [8] - [9] สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (6) - (7)

$$E_x(z, t) = E_{x0} e^{yz - \omega t} \quad [Vm^{-1}] \quad (6)$$

$$E_y(z,t) = E_{y0} e^{yz - \omega t} \quad [Am^{-1}] \quad (7)$$

เมื่อค่าคงที่ของการแพร่กระจายที่ซับซ้อน (Complex Propagation Constant; γ) ดังสมการที่ (8) คือ

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad [m^{-1}] \quad (8)$$

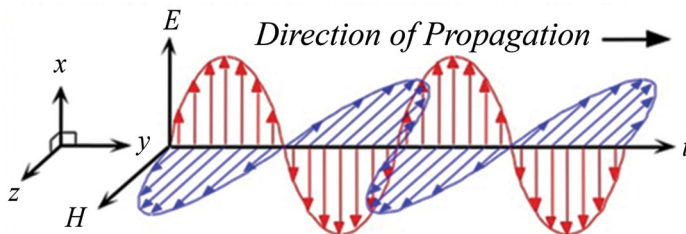
สนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (9)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\beta z - \omega t)} e^{-\alpha z} \quad (9)$$

สนามไฟฟ้า (Electric Field; E) และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Field; H) จะเคลื่อนที่ดังฉากซึ่งกันและกันไปตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 1) สมการของการเคลื่อนที่ของคลื่นสมการที่ (10) ในด้านเฟส (Phase) ที่เกี่ยวข้องกับเวลาและพื้นที่ และสมการที่ (11) ได้อธิบายถึงการถูกลดทอนคลื่น โดยมีค่าคงที่การลดทอน (Attenuation Constant; α) และค่าคงที่ของเฟส (Phase Constant; β) ทั้งสองตัวแปรเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ (f) และค่าแรงต้านสนามไฟฟ้า (ε)

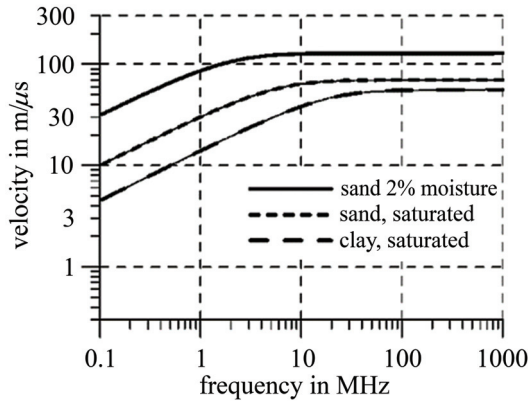
$$\alpha = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{e'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \quad [Neper m^{-1}] \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{e'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} \quad [rad m^{-1}] \quad (11)$$

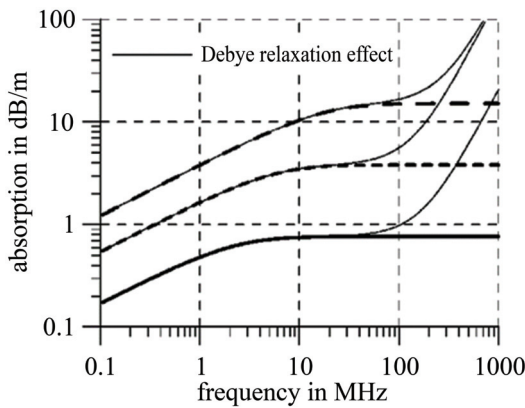


รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [10]

เมื่อความเร็วของแสงในสุญญากาศ $c_0 = 2.998 \times 10^8 m/s \approx 300m/\mu s = 0.3m/ns$ ในการคำนวณจะใช้สัมประสิทธิ์การดูดซับ (Absorption Coefficient; α') = 8.686 α (in dB/m) ในการแทนค่าตัวประกอบการลดทอนคลื่น (Attenuation Factor; α) ดังนั้นถ้า $\tan \delta \ll 1$ แล้ว α จะมีค่าน้อย นั่นหมายถึงว่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) มีค่าน้อยตามสำหรับการดูดซับคลื่นต่ำ นอกจากนั้นแล้วการดูดซับของคลื่นยังขึ้นอยู่กับความเร็วและความถี่ของสัญญาณด้วย ดังรูปที่ 2



(ก) การดูดซับคลื่นของทรายชื้น ทรายเปียก และดินเลน



(ข) ความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นและความถี่

รูปที่ 2 ความเร็วและการถูกดูดซับของคลื่นที่ขึ้นอยู่กับความถี่ [10]

ความเร็วคลื่น (v) เป็นความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นเรดาร์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \tag{12}$$

สำหรับการเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ (Low-Loss) คือ $\tan \delta \ll 1$ สมการที่ (13)

$$\lambda \approx \frac{c_0}{f\sqrt{\epsilon}} \tag{13}$$

กฎการสะท้อนคลื่นของสเนล (Snell's Law) ได้อธิบายการสะท้อนคลื่นไว้ คือ มุมตกกระทบ (θ_i) จะเท่ากับมุมสะท้อน (θ_r') และมุมหักเห (θ_t) จะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบที่ทำให้ไม่เกิดคลื่นสะท้อนโดยมุมนี้เรียกว่า "มุมวิกฤต" ของคลื่น ได้ดังสมการที่ (14)

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{v_2}{v_1} \tag{14}$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) เป็นค่าที่แสดงความเข้มของคลื่นเมื่อเกิดการสะท้อนเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$r = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \tag{15}$$

โดยสามารถหาค่าความลึกของชั้นวัสดุที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น (d) ได้จากความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (v) ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ (τ) ตามสมการที่ (16)

$$d = \frac{v\tau}{2} \tag{16}$$

โดยที่

- d คือ ความลึกของวัสดุที่เป็นตัวสะท้อน (m)
- v คือ ความเร็วไปและกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)
- τ คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นไปและกลับ

ดังนั้น จากสมการที่ (12) และสมการที่ (16) สามารถหาค่าความลึกในการสำรวจ (d) ได้ดังนี้

$$d = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\tau}{2} \tag{17}$$

ในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการเผยแพร่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนค่าความชื้นในดินและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จากสมการที่ (17) โดย Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. [4] สามารถช่วยในการเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในชั้นวัสดุใต้ดินที่มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังสมการที่ (18)

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r + 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^{-4} + 10^{-6} \epsilon_r^3 \tag{18}$$

โดยที่

- θ คือ ค่าร้อยละของความชื้นในดิน
- ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

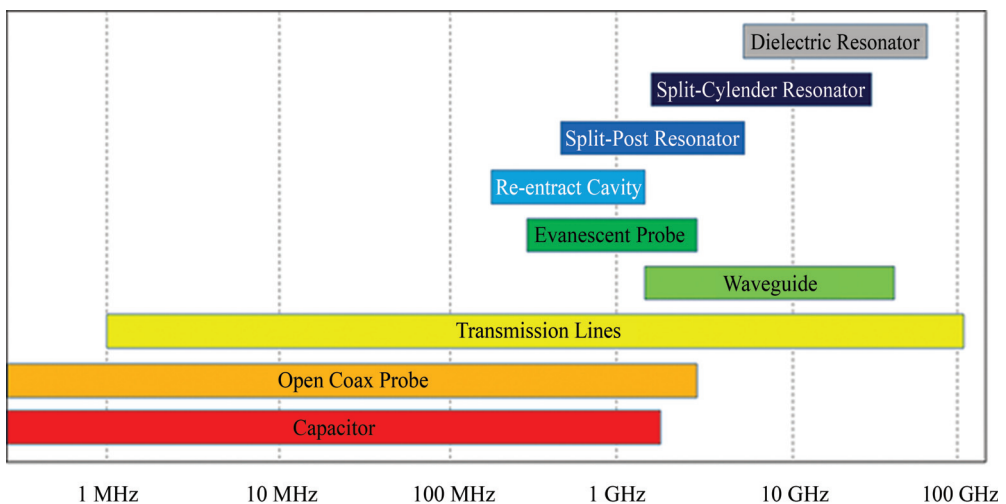
การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

วิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถทำได้หลายวิธีการขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่ทดสอบและลักษณะทางกายภาพของวัตถุที่ทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3 สำหรับการสำรวจด้วย GPR ที่มีช่วงคลื่นความถี่ 5 MHz - 2.6 GHz

มีวิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมคือ 1) Transmission Lines Method 2) Open Coax Probe Method และ 3) Capacitor Method

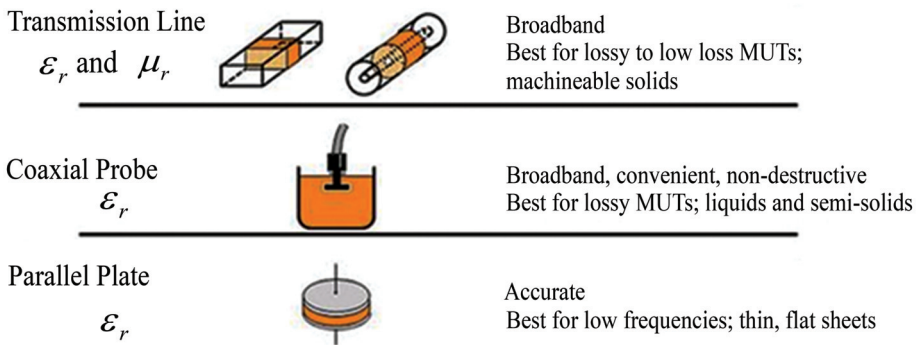
การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการ Transmission Lines Method เป็นการวัดค่าด้วยการบรรจุวัสดุที่ต้องการทดสอบลงในอุปกรณ์ทดสอบที่มีลักษณะคล้ายกับลักษณะของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial) โดยมีสายนำสัญญาณเชื่อมต่อด้านปลายทั้งสองด้านที่มีต่อเข้ากับอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณที่อยู่ด้านปลายของอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถจำกัดค่าการสูญเสีย (Loss) ให้ต่ำได้ด้วยการจำกัดความยาวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ สามารถทำการทดสอบกับวัสดุที่เป็นแม่เหล็กได้ และสามารถวัดค่าในช่วงความถี่ที่กว้าง (Broadband) ได้

วิธีการ Open Coax Probe Method เป็นวิธีการที่สามารถวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้ในช่วงความถี่ที่กว้าง เป็นวิธีที่ทำการทดสอบได้ง่ายไม่ยุ่งยากและเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT) เหมาะกับวัสดุที่เป็นของเหลว วัสดุแข็ง หรือวัสดุผง - แบ่ง โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด (Probe) ที่ประยุกต์มาจากวิธีการ Transmission Lines Method ด้วยการตัดอุปกรณ์บางส่วนออกให้เหลือเฉพาะสายนำสัญญาณและอุปกรณ์ส่งสัญญาณเพียง 1 ข้าง วิธีการนี้ทำการวัดค่าโดยจุ่มหัววัดค่าที่มีอุปกรณ์ส่งสัญญาณลงในของเหลวหรือสัมผัสที่ผิวของวัสดุที่แข็ง



รูปที่ 3 วิธีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของช่วงความถี่ต่างๆ [11] - [12]

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการ Capacitor Method หรือ Parallel Plate Method เป็นวิธีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยการวางตัวอย่างที่ต้องการทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับขั้ววัด โดยมีขั้ววัดประกบอยู่ทั้งที่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุตัวอย่าง แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Electric Capacitance) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

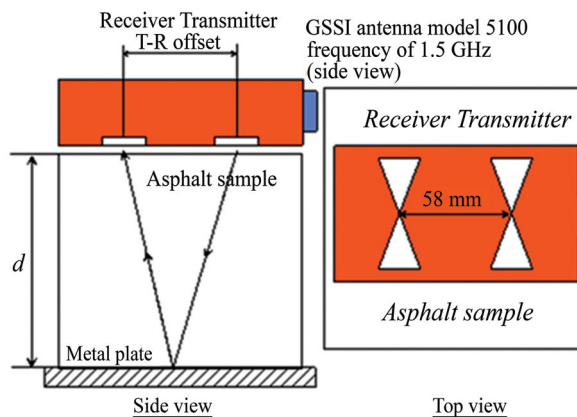


รูปที่ 4 วิธีการทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

วิธีดำเนินการวิจัย

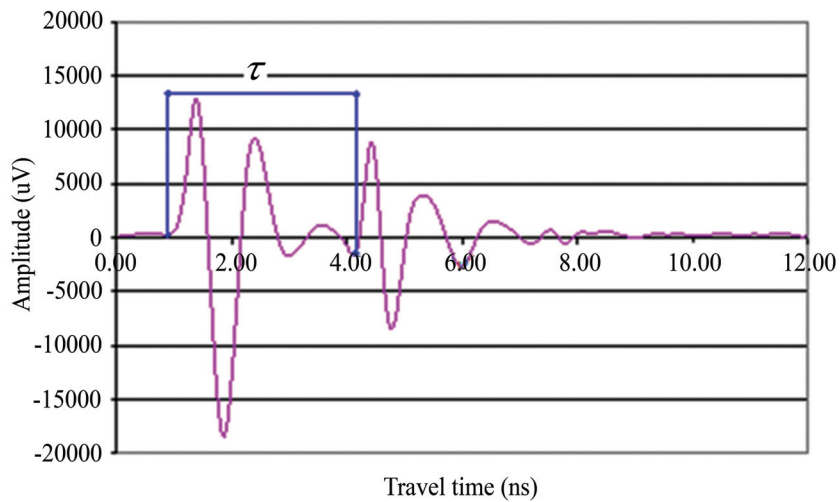
การศึกษานี้มีกรณีศึกษาจากสนามบินสุวรรณภูมิที่มีการก่อสร้างทางขับและทางวิ่งบนดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีการ Prefabricated Vertical Drain (PVD) ซึ่งโครงสร้างของทางขับและทางวิ่งประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ชั้นซีเมนต์ (CTB) ชั้นทรายถม (Sand Blanked) และชั้นดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุง ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 5

ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 [13] ด้วยการทดสอบกับตัวอย่างที่ทราบความหนา (d) โดยวัดค่าระยะเวลาไป - กลับ (τ) ของคลื่นเรดาร์ด้วยสายอากาศความถี่ 1.5 GHz แล้วทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตามสมการที่ (16) เพื่อนำไปใช้ประกอบการแปลผลการสำรวจ โดยทำการทดสอบกับวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่แห้งและตัวอย่างที่ได้แช่น้ำแล้ว 24 ชั่วโมง โดยมีรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 5



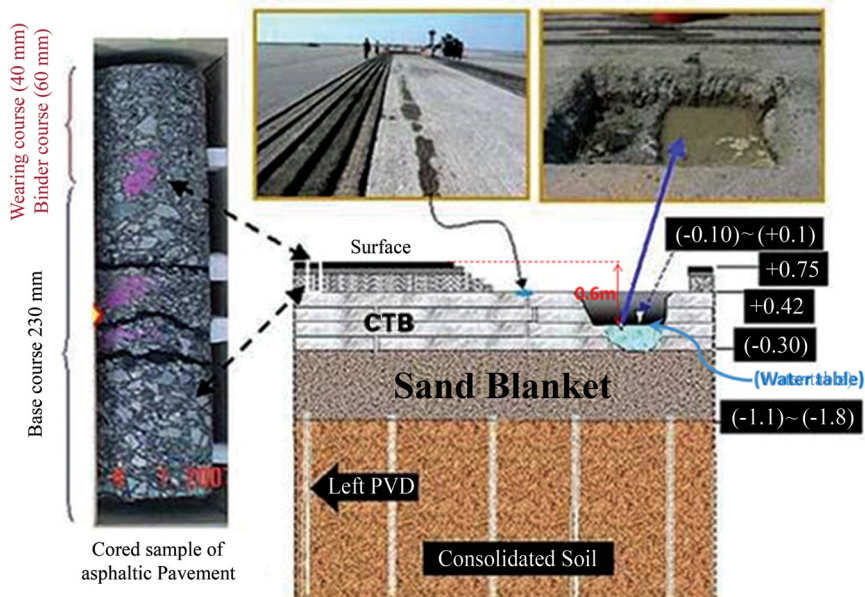
(ก) รูปแบบการทดสอบ

รูปที่ 5 วิธีการทดสอบหาความหนาของวัสดุด้วยเวฟเล็ต (Wavelet) ของสัญญาณเรดาร์ ASTM D4748-10 [13]



(ข) ระยะเวลาไปและกลับของคลื่น (τ)

รูปที่ 5 วิธีการทดสอบหาความหนาของวัสดุด้วยเวฟเล็ต (Wavelet) ของสัญญาณเรดาร์ ASTM D4748-10 [13] (ต่อ)



รูปที่ 6 โครงสร้างของชั้นวัสดุโครงสร้างทางที่ศึกษา [14]

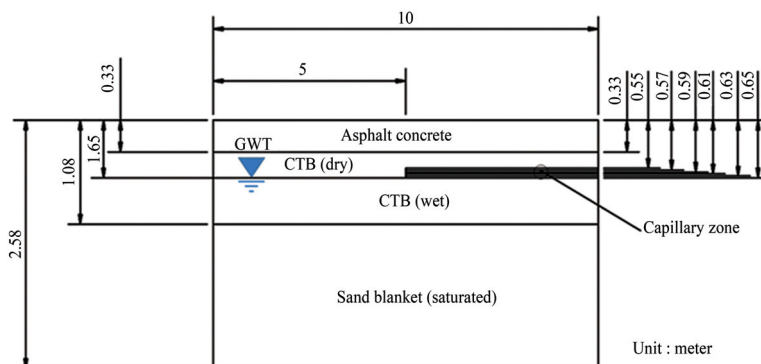
จากรายงานผลการศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) [14] พบว่าระดับของน้ำใต้ดินมีระดับความลึกประมาณ 65 ซม. (รูปที่ 6) การศึกษาในครั้งนี้จึงได้ทำการจำลองผลเนื่องจากแรงตึงผิว (Capillary) ของน้ำใต้ดินที่อยู่ในชั้น CTB ที่อยู่บนชั้นทราย ด้วยการวางแท่งตัวอย่างบนทรายเปียก

เพื่อวัดระยะยกตัวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง CTB อันมีผลกระทบต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้น CTB และชั้นแอสฟัลต์ติกคอนกรีต แล้วทำการจำลองผลการสำรวจด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการณ์สะท้อนของคลื่นในกรณีที่มีแรงตึงผิวและไม่มีแรงตึงผิวทั้งในแบบ 1 มิติ [15] และ 2 มิติ [16] ด้วยความถี่ 200 400 และ 900 MHz เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อการณ์สะท้อนของคลื่นของปรากฏการณ์แรงตึงผิวที่เกิดขึ้นในชั้น CTB โดยค่าตัวแปรทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการจำลองผลแสดงไว้ในตารางที่ 1 และมีรายละเอียดของแบบจำลองดังรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [4], [15] - [17]

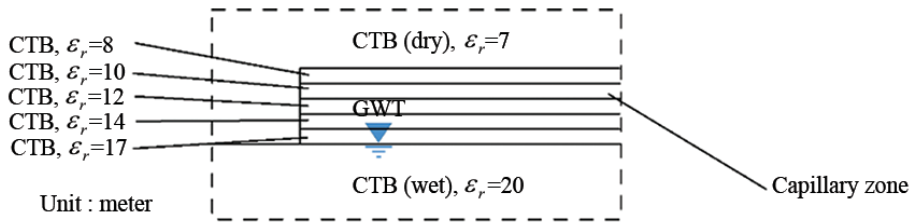
Material	Dielectric constant	Conductivity (Siem/m)
Asphaltic concrete5	0.01	
Cement Treaded Base (CTB) : dry	7	0.01
Cement Treaded Base (CTB)	8	0.012
Cement Treaded Base (CTB) with variation of moisture content due to the capillary zone	10	0.015
	12	0.02
	14	0.05
	17	0.075
Cement Treaded Base (CTB)_wet	20	0.1
Sand blanket	30	0.01

ในเบื้องต้นคาดหวังว่าแบบจำลองผลคลื่นที่ได้จะสามารถอธิบายผลการสำรวจในสถานที่จริงที่ยากที่จะจำแนกชั้นวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะชั้นน้ำใต้ดินที่อยู่ระหว่างชั้น CTB ได้



(ก) รายละเอียดของแบบจำลอง

รูปที่ 7 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงตึงผิวต่อผลการสำรวจ



(ข) การกระจายตัวของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในช่วงที่เกิดการยกตัวของน้ำ เนื่องจากแรงดึงผิว (Capillary)

รูปที่ 7 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดึงผิวต่อผลการสำรวจ (ต่อ)

ผลการวิจัย

การทดสอบวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตแบบแห้งและเปียก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 - 9 ส่วนผลการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (17) พบว่าตัวอย่างเปียกและตัวอย่างแห้งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 20 และ 7 ตามลำดับ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแปรผกผันกับค่าความชื้นสอดคล้องกับผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตด้วยวิธีการ Coaxial Test [13], [17] - [18]

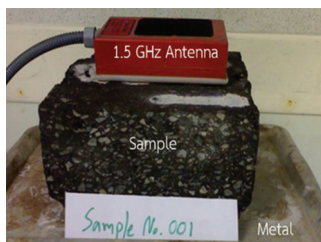


(ก) ตัวอย่างแห้ง



(ข) ตัวอย่างเปียก

รูปที่ 8 วัสดุผิวทางตัวอย่าง



(ก) การวัดค่าต้านบนผิวตัวอย่าง



(ข) การวัดค่าต้านข้างผิวตัวอย่าง

รูปที่ 9 การทดสอบวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 ด้วยสัญญาณเรดาร์ [14]

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความหนาของวัสดุตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D4748-10 [14]

ตัวอย่างเปียก

ตัวอย่าง ที่	วัดค่าด้านบน			ด้านข้าง		
	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r
1	0.226	6.75	20.04	0.323	9.65	20.06
2	0.232	6.94	20.11	0.293	8.82	20.36
3	0.219	6.53	19.98	0.305	9.23	20.58
		เฉลี่ย	20.04		เฉลี่ย	20.33

ตัวอย่างแห้ง

ตัวอย่าง ที่	วัดค่าด้านบน			ด้านข้าง		
	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r	ความหนา (เมตร)	ระยะเวลา (ns)	ϵ_r
1	0.226	3.98	6.97	0.323	5.71	7.02
2	0.232	4.1	7.02	0.293	5.16	6.97
3	0.219	3.86	6.98	0.305	5.37	6.97
		เฉลี่ย	6.99		เฉลี่ย	6.99

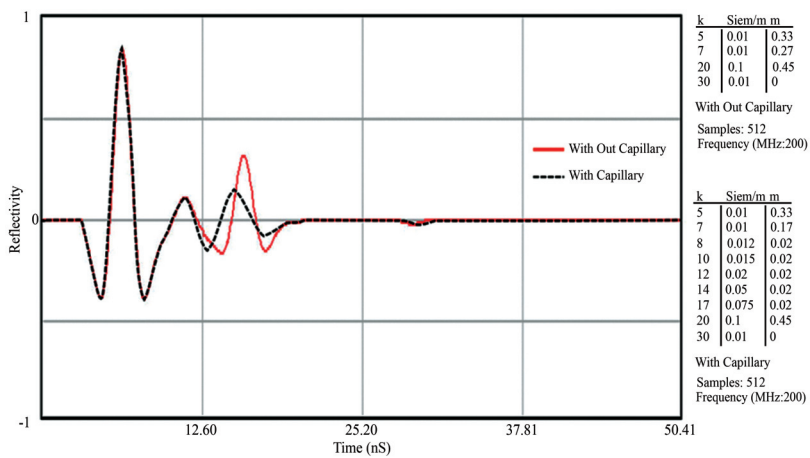
การทดสอบการยกตัวเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ภายหลังจากการวางตัวอย่าง CTB บนทรายที่อ้อมตัวไปด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบได้ถึงการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงผิวเท่ากับ 4.3 ซม. หรือเท่ากับ 5×10^{-4} มม./วินาที เทียบเท่ากับค่าความซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต [19] หรือเท่ากับช่วงของค่าการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวปนตะกอน (Silty Clay) [19] ซึ่งมีระยะการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงผิวเต็มที่เท่ากับ 0.75 - 75 ม. [19] ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบได้ถึงผลของแรงดึงผิวที่ทำให้ชั้น CTB ในสถานที่จริงเปียกชุ่มไปด้วยน้ำและรวมถึงชั้นรอยต่อระหว่างผิววัสดุ CTB และแอสฟัลต์ ตลอดจนบางส่วนของชั้นแอสฟัลต์ด้วย

การจำลองคลื่นทั้ง 3 ความถี่พบว่าแบบจำลอง 1 มิติ สามารถอธิบายพฤติกรรมของการสะท้อนคลื่นเนื่องจากปรากฏการณ์แรงดึงผิวที่ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด และเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (15) ที่แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ลดลงของแบบจำลองที่มีและไม่มีแรงดึงผิวโดยพิจารณาได้จากยอดคลื่นสะท้อนในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์แรงดึงผิว (รูปที่ 11) และยังแสดงได้อย่างชัดเจนในแบบจำลอง 2 มิติ (รูปที่ 12) ผลการจำลองคลื่นในความถี่ที่ต่ำกว่ามีการสะท้อนในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์แรงดึงผิวได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูงโดยเฉพาะความถี่สูงสุดคือ 900 MHz มีการลดทอนสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับการทดสอบด้วยวิธีการ Coaxial Test [13], [18]

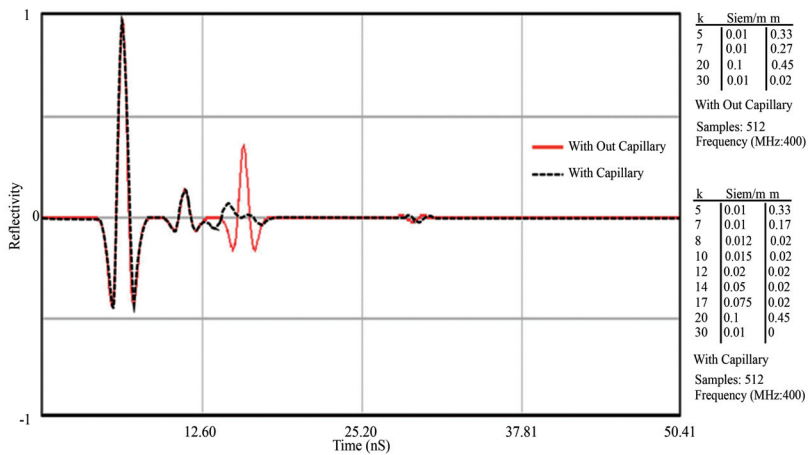


ระยะยกตัวเนื่องจากแรงดึงผิว
เท่ากับ 4.3 เซนติเมตร

รูปที่ 10 การทดสอบการยกตัวของน้ำเนื่องจากแรงดึงผิวน้ำในคอนกรีต (CTB)

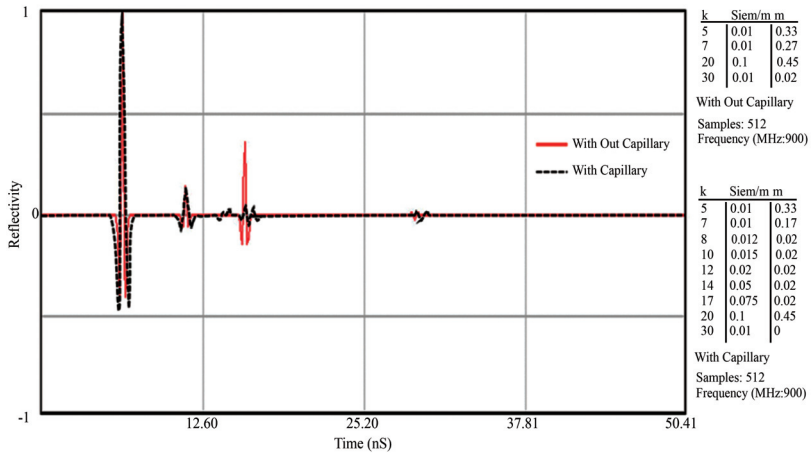


(ก) ความถี่ 200 MHz



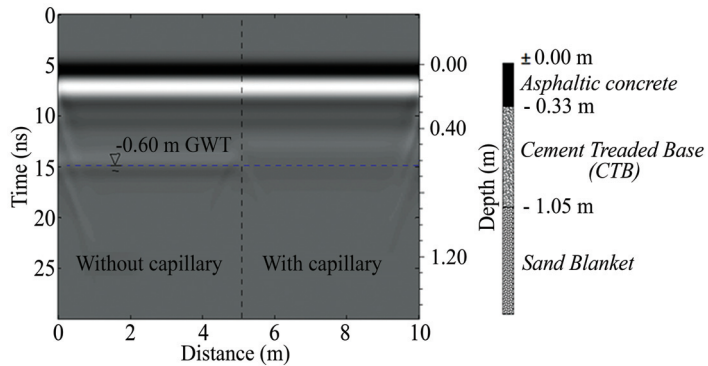
(ข) ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 11 ผลการจำลองคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 1 มิติ

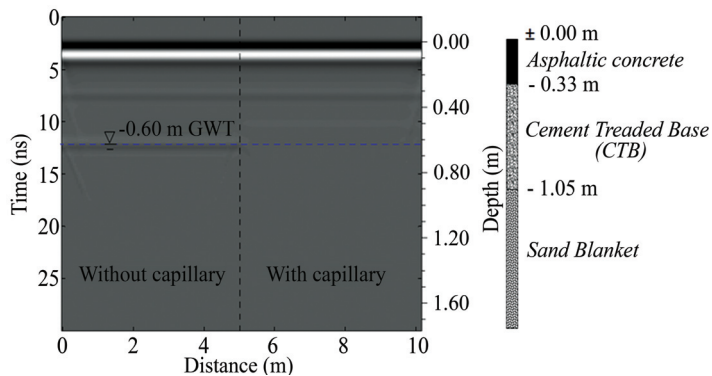


(ค) ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 11 ผลการจำลองคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 1 มิติ (ต่อ)

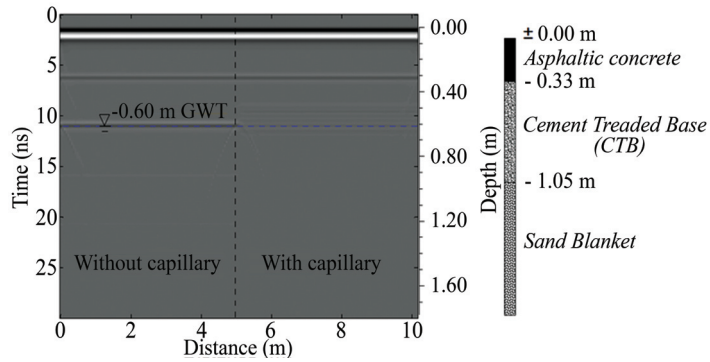


(ก) ความถี่ 200 MHz



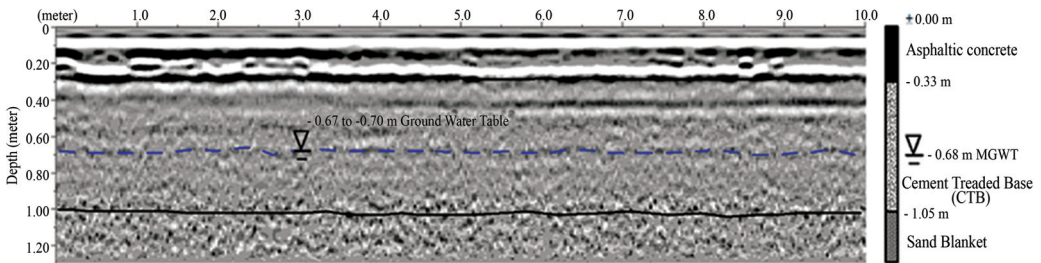
(ข) ความถี่ 400 MHz

รูปที่ 12 ผลการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติ



(ค) ความถี่ 900 MHz

รูปที่ 12 ผลการจำลองผลคลื่นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบ 2 มิติ (ต่อ)



รูปที่ 13 ผลการสำรวจในภาคสนามด้วยความถี่ 900 MHz

เมื่อพิจารณาผลการสำรวจในสถานที่จริงจากภาคสนามดังรูปที่ 13 ที่ใช้ความถี่ 900 MHz โดยมีการใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการประมวลผล พบว่ามีลักษณะการสะท้อนคลื่นของแต่ละชั้นวัสดุไม่ชัดเจนยากต่อการแปลผลการสำรวจสอดคล้องกับการจำลองผลคลื่นเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำ แต่เมื่อพิจารณาผลการสำรวจร่วมกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองผลคลื่นสามารถจำแนกชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าหากปราศจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการแล้ว ยังเป็นการยากที่จะระบุได้ถึงความหนาของระดับน้ำใต้ดิน แต่เนื่องด้วยข้อมูลจากบ่อสังเกตการณ์และข้อมูลประกอบด้านอื่น ๆ จึงสามารถแปลผลการสำรวจได้ง่ายและถูกต้องยิ่งขึ้น

อภิปรายผลและสรุป

ในทางวิศวกรรมแล้วการทดสอบเพื่อหาค่าที่ไดอิเล็กตริกในห้องทดสอบเป็นการยากโดยทางปฏิบัติแล้ว การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากค่าความชื้นด้วยสมการที่ (18) [4] สามารถกระทำได้ง่ายกว่า แม้ว่า การทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการและมาตรฐานต่าง ๆ ให้ได้ค่าที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการวางแผนการสำรวจด้วย GPR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังคงเป็นการยากที่จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนออกสำรวจภาคสนามเสมอ ดังนั้น การทดสอบเพื่อวัดความหนาของวัสดุในภาคสนามหรือวิธีการใดวิธีการหนึ่งเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลด้านความหนาของชั้นวัสดุเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่

ไดอิเล็กตริก เป็นวิธีการที่พึงกระทำเพื่อให้การสำรวจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแปลผลได้ในภายหลัง

เนื่องจากในระยะเวลาที่ได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นช่วงที่มีฝนตกพื้นผิวทางและสภาพแวดล้อมมีความชื้นสูงทำให้ผลการสำรวจมีความไม่ชัดเจนจึงได้มีการเก็บเอาตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์มาเพื่อทดสอบ พบว่าได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแอสฟัลต์แห้งและเปียกมีค่าเท่ากับ 7 และ 20 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากตัวอย่างแอสฟัลต์เปียกเมื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความลึกของชั้นวัสดุพบว่ามีความสอดคล้องกับระดับน้ำที่ปรากฏในพื้นที่ทดสอบ

การทดสอบการจำลองการยกตัวของน้ำในแท่งตัวอย่าง CTB พบว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงมีระยะยกตัวที่ 4.3 ซม. และยังพบว่าหากทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องจะมีระยะการยกตัวของน้ำมากกว่า 1 ม. ดังนั้นชั้นตัวอย่างแอสฟัลต์ในสถานที่จริงจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีความชื้นอยู่ภายในเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณความยาวคลื่น (λ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความถี่ (f) ของสัญญาณเรดาร์ตามสมการที่ (17)

Dielectric constant (ϵ_r)	Frequency ; f (MHz)		
	200	400	900
Wave Length; λ (cm)			
7 (CTB-Dry)	56.695	28.347	12.599
10	47.434	23.717	10.541
20 (CTB-Wet)	33.541	16.771	7.454
30	27.386	13.693	6.086
40	23.717	11.859	5.270
50	21.213	10.607	4.714
60	19.365	9.682	4.303
70	17.928	8.964	3.984
80 (Water)	16.771	8.385	3.727
90	15.811	7.906	3.514

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ที่คำนวณได้จากสมการที่ (17) ตามความถี่ที่ใช้ในการจำลองผลการทดสอบ คือ 200 400 และ 900 MHz สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3 พบได้ว่าที่ความถี่ 900 MHz ณ ระดับน้ำใต้ดินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 20 มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 7.45 ซม. และที่เหนือระดับน้ำใต้ดินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 7 มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 12.6 ซม. ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความลึกของผลการสำรวจและขนาดของวัตถุที่สามารถตรวจพบได้ คือ คลื่นความถี่ต่ำกว่าสามารถให้ผลการสำรวจที่ลึกกว่าและมีการลดทอนของสัญญาณต่ำกว่าคลื่นความถี่สูง จากผลการจำลองคลื่นพบว่าผลจากแรงดึงผิวของน้ำทำให้เกิดการลดการสะท้อนของคลื่นลง โดยสังเกตได้จากยอดคลื่นสะท้อนบนบริเวณผิวรอยต่อของระดับน้ำลดลง ทำให้ผลการสำรวจมีความไม่ชัดเจน ไม่สามารถระบุตำแหน่ง

ของระดับผิวน้ำใต้ดินได้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องพึงระวังและพิจารณาเสมอเมื่อทำการสำรวจด้วย GPR ในพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ตื้น หรือในพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวอ่อนโดยเฉพาะพื้นที่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จะทำให้ไม่สามารถตรวจพบหรือตรวจพบวัตถุใต้ดินได้ยาก

References

- [1] Carl, L., Pannir, K., Kenji, Y., Steve, A., and Prasad, G. (2003). Design and Field Experiments of a Ground-Penetrating Radar for Mars Exploration. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 108, Issue E4, pp. 15-1 to 15-12. DOI: 10.1029/2003JE002113
- [2] Liu, L. B., Qian, R. Y., Li, J., Sun, M. G., and Ge, S. C. (2016). GPR Detection of Subsurface Voids and Its Validation Based on Similarity Principle. In **16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)**. Hong Kong, 2016, pp. 1-4
- [3] Gary, K. (1998). **Effect of Soil Moisture on Radar Detection of Simulant Mines**. Fact Sheet. Access (25 July 2018). Available (<http://uxoinfo.com/blogcfc/client/enclosures/CRREL26.pdf>)
- [4] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content Measurement in Coaxial Transmission Line. **Water Resources Research**. Vol. 16, Issue 3, pp. 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574
- [5] Giao P. H., Vichalai, C., and Hien, D. H. (2007). A Study on Geotechnical and Geophysical Properties of Styrofoam Material for Construction of a Concrete Pavement Model, Proc. **Intl' Symp. Hanoi Geoengineering 2007**, November 2007, Hanoi, Vietnam, pp. 11-17
- [6] Von Hippel AR (ed). (1954). **Dielectric Materials and Applications**. MIT Press, Cambridge MA, USA
- [7] Davis, J. L., Annan, A. P. (1989). Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysics Prospecting Journal**. Vol. 37, Issue 5, pp. 531-551. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x
- [8] Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974). Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 79, Issue 11, pp. 1699-1708. DOI: 10.1029/JB079i011p01699
- [9] Arthur R. von Hippel. (1954). **Dielectrics and Waves**. MIT Press, Cambridge MA, USA. p. 537
- [10] Kirsch, R. (2006). **Ground Penetration Radar (GPR)**. In *Groundwater Geophysics : A Tool for Hydrology*. Second Edition, Springer. p. 232
- [11] Baker-Jarvis, J., Janezic, M. D., and DeGroot, D. C. (2010). High-Frequency Dielectric Measurements, Part 24 in a Series of Tutorials on Instrumentation and Measurement. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. pp. 24-31
- [12] Yaw, K. C. (2012). **Measurement of Dielectric Material Properties Application Note**. Rhode and Shawrtz Technical Publication

- [13] ASTM D4748-10. (2015). **Standard Test Method for Determining Thickness of Bound Pavement Layers using Short-Pulse Radar**. Annual Book of ASTM Standards 2002, Section 04: Construction Soil and Rock (I). American Society for Testing and Materials. Vol. 04.08.
- [14] Asian Institute of Technology (2009). **An Investigation of Shallow Groundwater Conditions in the CTB Layer at the Suvarnabhumi International Airport**. Final report. School of Engineering and Technology, Bangkok, Thailand.
- [15] Geoscanner, A. B. (2006). **GPRSim.net**. Access (27 July 2018). Available (www.geoscanners.com)
- [16] Antonis, G. (2006). **GprMaxV2.0**. Access (27 July 2018). Available (www.gprmax.org)
- [17] Shang, J. Q., Umana, J. A., Bartlett, F. M., and Rossiter, J. R. (1999). Measurement of Complex Permittivity of Asphalt Pavement Materials. **Journal of Transportation Engineering**. Vol. 125, Issue 4, pp. 347-356
- [18] Gomes, A. M. (2003). Permeability of Concrete: A Study Intended for the “in situ” Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques. In **Proceeding of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)**. September 16-19, in Berlin, Germany
- [19] Brama, M. D. and Khaled, S. (2014). **Capillary Force in the Soil**. In Principles of Geotechnical Engineering. eight edition. USA

การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูง Analysis and Design for High Speed Hematocrit Centrifuge Machine

อภิสิทธิ์ ทวีอภิรดีรัตน์¹ ศิริพงษ์ ปะวะโก¹ อัษฎายุทธ รอดพ่าย¹ และจิระพล ศรีเสริฐผล^{1*}
Apisit Taweepiradeerattana¹ Siripong Pawako¹ Autsadayut Rodpai¹ and
Jiraphon Srisertpol^{1*}

Received: May 15, 2019; Revised: September 16, 2019; Accepted: September 26, 2019

บทคัดย่อ

เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือด โดยอาศัยมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบระหว่าง 10,000 - 14,000 รอบต่อนาที สร้างแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ให้กับตัวอย่างเลือดแล้วนำตัวอย่างนั้นไปประมาณหาค่าเปอร์เซ็นต์เม็ดเลือดแดงอัดแน่นเพื่อใช้วิเคราะห์ผลทางการแพทย์ ปัจจุบันเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงให้มีประสิทธิภาพสูงเป็นการเพิ่มความสามารถผู้ผลิตภายในประเทศให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศและเป็นไปตามมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข บทความนี้ได้เสนอผลการวิเคราะห์หลักการงานและการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบ โดยออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน สร้างเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้งใช้ถ่วงสมดุลจากหมุนที่บรรจุหลอดเลือดทดสอบ เพื่อลดขนาดการสั่นเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนที่ผลิตใช้ และการวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้ฉนวนการสั่นสะเทือนที่ลดแรงส่งผ่านการสั่นจากโรเตอร์สู่ตัวเครื่อง ซึ่งทำให้เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบมีประสิทธิภาพในการทำงานเทียบเท่าผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศได้

คำสำคัญ : เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง; แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์; การออกแบบระบบควบคุม; การถ่วงสมดุลแนวตั้ง; ฉนวนการสั่นสะเทือน

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author E - mail Address: jiraphon@sut.ac.th

Abstract

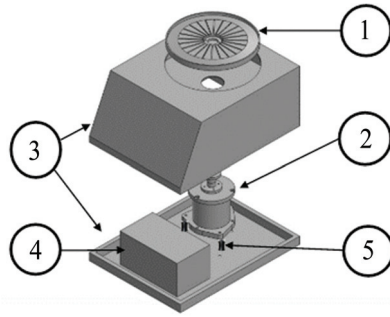
Hematocrit Centrifuge Machine (HCM) is a tool used for separating red blood cells from blood. By using a motor that rotates at a speed between 10,000 and 14,000 rpm, it generates a relative centrifugal force (RCF) for the blood sample. Prior to medical analysis process, the blood samples were estimated percent of red blood cells. Currently, most of HCM's products imported from other countries are expensive. Therefore, creating knowledge and increasing efficiency of high speed HCM that meets the standards of the Ministry of Public Health can help domestic manufacturers compete with international companies. This paper present the analysis of working principle and the design of HCM prototype, with brushless direct current motor speed control system for controlling the speed of work with stable condition. The Vertical Balancing Device (VBD) is used to balance the disk, which packs up the micro-hematocrit tube test, it can reduce vibration from its unbalance. Moreover, the analysis for accurate vibration isolators can reduce the vibration's force transmissibility from disk rotor to body-chamber. This allows the HCM prototype to have the same working efficiency as imported products.

Keywords: Hematocrit Centrifuge Machine; Relative Centrifugal Force (RCF); Control System Design; Vertical Balancing; Vibration Isolator

บทนำ

เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง (Hematocrit Centrifuge Machine: HCM) คือเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ที่เกิดจากการหมุนรอบจุดหมุน (Center of Rotation) ในการเร่งการตกตะกอนของเม็ดเลือดแดง [1] - [2] เพื่อแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาและเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในเลือด แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปริมาณของเซลล์เม็ดเลือดแดงในเลือด เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์เม็ดเลือดแดงอัดแน่นที่ใช้วิเคราะห์ผลทางการแพทย์เบื้องต้น [2] - [3] ดังนั้นเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงจึงเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นอย่างมากทั้งในทางการแพทย์และวิทยาศาสตร์องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย

1. จานหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Disk)
2. มอเตอร์
3. ตัวเครื่อง
4. ระบบควบคุมและแสดงผลการทำงาน
5. ฉนวนการสั่นสะเทือน



รูปที่ 1 (ก) เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง (ข) องค์ประกอบหลักของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง
รูปที่ 1 เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงและองค์ประกอบแบบแยกส่วน

ปัจจุบันเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงส่วนมากที่ใช้ภายในประเทศนั้นนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงประมาณเครื่องละ 30,000 - 90,000 บาท ส่วนเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่สามารถผลิตใช้ได้ภายในประเทศนั้นก็ยังมีประสิทธิภาพในการแข่งขันพอเพียงกับเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศได้ [2]

เพื่อสร้างกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงให้กับผู้ผลิตภายในประเทศให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศและเป็นไปตามรายละเอียดและคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงที่แต่ละโรงพยาบาลได้ประกาศเป็นหลักเกณฑ์ที่เทียบเคียงการจัดซื้อของกระทรวงสาธารณสุข บทความนี้ได้เสนอผลกรวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงเครื่องต้นแบบ โดยออกแบบจานหมุนเหวี่ยงพร้อมระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Direct Current Motor: BLDC motor) สำหรับเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนานั้น ผู้ผลิตต้องการให้จานหมุนเหวี่ยงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 165 mm ดังนั้นความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่จะมีแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ (Relative Centrifugal Force: RCF) ที่พอเพียงต่อการแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาและเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในเลือดได้จะต้องสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำที่ $12,000 \text{ rpm} \pm 5\%$ เพื่อทำให้เกิดการแยกตัวของเลือดอย่างสมบูรณ์ภายในเวลาที่กำหนดตามได้ออกแบบเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้ง (Vertical Balancing Device: VBD) เพื่อใช้ในการถ่วงสมดุล (Balancing) ให้แผ่นจานหมุนเหวี่ยงมีการเสียสมดุล (Unbalance) น้อยที่สุดเป็นการลดปัญหาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนเหวี่ยง การวิเคราะห์และเลือกจนวนการสั่นเพื่อลดแรงส่งผ่านการสั่นจากโรเตอร์สู่ตัวเครื่อง

การออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง โดยการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบใช้งานของมอเตอร์ให้มีแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ วัสดุที่ใช้สร้างจานหมุนเหวี่ยง น้ำหนักของจานหมุนเหวี่ยง กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถหมุนจานหมุนได้หรือขนาดของมอเตอร์ที่เหมาะสม และในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง คือการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด การวิเคราะห์และเลือกจนวนการสั่นสะเทือนสำหรับลดแรงสั่นสะเทือนที่ส่งจากโรเตอร์จานหมุนเหวี่ยงมาสู่ตัวเครื่อง และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการออกแบบเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้งสำหรับถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง ซึ่งเป็นการลดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนเหวี่ยง [4] - [5]

หลักการวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง

หลักการสำคัญที่ทำให้เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงสามารถแยกเม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือดนั้นคือ แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ที่เกิดจากการหมุนของจานหมุนเหวี่ยงที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงและความเร็วรอบจากมอเตอร์จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องที่ต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก เพื่อให้เครื่องสามารถสร้าง RCF ที่มีขนาดอย่างน้อย 1,000 G และกระทำเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 5 นาที เป็นไปตามหลักการ ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกเม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือดได้อย่างสมบูรณ์ [1] - [2], [6] และสามารถนำตัวอย่างเลือดไปวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ในการออกแบบขนาด วัสดุของจานหมุนเหวี่ยง ความเร็วรอบการทำงานของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงจะใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงของบริษัทสุรนารีแพทยภัณฑ์ จำกัด

จานหมุนเหวี่ยง คือแผ่นจานสำหรับบรรจุเลือดทดสอบใน Capillary Tube ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ϕ 1.5 mm ยาว 75 mm ในจำนวน 24 หลอด โดยมีทิศทางการวางหลอดทดลองอยู่ในแนวรัศมีของจานหมุนเหวี่ยง ขนาดของจานหมุนจะขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดทดลอง และเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบต่ำสุดที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากขนาดของจานหมุนเหวี่ยงและความเร็วรอบของมอเตอร์ แปรผันตรงกับ RCF หรือเรียกอีกชื่อว่า แรงจี (G-Force) โดยค่า RCF คือความเร่งหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนเทียบเป็นจำนวนเท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลก (ความเร่งโน้มถ่วงของโลกที่ระดับน้ำทะเลมีขนาดเท่ากับ 9.80665 m/s^2) ซึ่งจากสมการที่ (1) พบว่าขนาดของจานหมุนเหวี่ยงแปรผกผันกับความเร็วรอบที่ใช้ งาน เช่น หากเครื่องทำงานที่ความเร็วรอบสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงของเครื่องจะมีขนาดเล็ก เป็นต้น สมการแรงหนีศูนย์กลาง [3], [6] - [7]

$$RCF_{(g)} = r_{(mm)} \times N_{(rpm)}^2 \times 1.1182 \times 10^{-6} \quad (1)$$

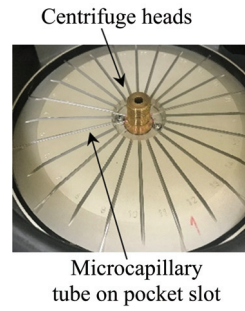
สามารถหาขนาดรัศมีต่ำสุดของจานหมุนเหวี่ยง (r_{\min} : มิลลิเมตร, mm) ได้จาก

$$r_{(\min)} = \frac{RCF}{N_{rpm}^2 \times 1.1182439 \times 10^{-6}} \quad \text{โดย } RCF = 1,000 \text{ G, ความเร็วรอบการทำงาน } N = 12,000 \text{ rpm}$$

ซึ่งจะได้ $r_{\min} = 6.21 \text{ mm}$ เมื่อรวมกับขนาดของหลอดทดลองที่มีขนาด 75 mm จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนไม่น้อยกว่า 162 mm และเพื่อให้มีระยะเผื่อสำหรับยึดจับหลอดทดลองและขอบวงนอกรองรับปลายหลอดทดลอง จะออกแบบจานหมุนเหวี่ยงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยง 175 mm โดยวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม 6063 และเคลือบอบโนโคซ์ ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทานและไม่ทำปฏิกิริยากับเลือดไม่เป็นสนิมและความสวยงาม ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) งานหมุนเหวี่ยง



(ข) การติดตั้งงานหมุนเหวี่ยงกับมอเตอร์ และการวางหลอดทดสอบ

รูปที่ 2 ลักษณะงานหมุนเหวี่ยง การติดตั้งกับมอเตอร์ และการวางหลอดทดสอบ

เพื่อให้งานหมุนเหวี่ยงสามารถสร้าง RCF ได้คงที่ตลอดการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่หมุนงานหมุนเหวี่ยงให้สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่คงที่หรือมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ ของความเร็วรอบการทำงาน มอเตอร์ที่ใช้กับเครื่องปั่นเมล็ดเลือดแดงได้เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยมีบอร์ดขับเคลื่อนทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กขับเคลื่อนแกนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ในส่วนนี้ต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยอาศัย Hall-Effect Sensor ที่มีอยู่ในมอเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ความเร็วรอบของมอเตอร์ [4], [8] - [9] เพื่อให้มอเตอร์สามารถรักษาความเร็วรอบการทำงานที่ 12,000 rpm ให้คงที่ตลอดการทำงาน จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ โดยการใช้การควบคุมแบบวงปิด และตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller)

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ในการปั่นเมล็ดเลือดแดงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และสร้างความน่าเชื่อถือของเครื่องปั่นเมล็ดเลือดแดง ซึ่งสามารถแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor [5], [8]- [9]
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับ BLDC-motor [10] - [13]

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor จะใช้แรงดันไฟฟ้า (v) กระแสตรงเป็น Input และความเร็วรอบ (ω) เป็น Output เราสามารถประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของ BLDC-motor ดังแสดงในสมการที่ (2)

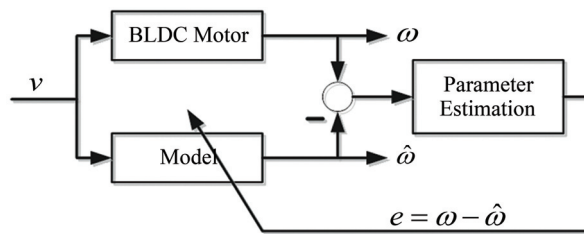
$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR + BL)s + (BR + K_t K_b)} \quad (2)$$

นิยามของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 1 ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor ใช้เครื่องมือParameter Estimation Toolbox ในโปรแกรม MATLAB ในการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการตอบสนองข้อมูลจากระบบจริงกับแบบจำลอง เมื่อความเร็วรอบอ้างอิง $\hat{\omega}$ คือความเร็วรอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความต่างของความเร็วรอบจากข้อมูลทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3(ก) และค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ของ BLDC-motor ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ BLDC-motor และตัวควบคุมแบบพีไอดี

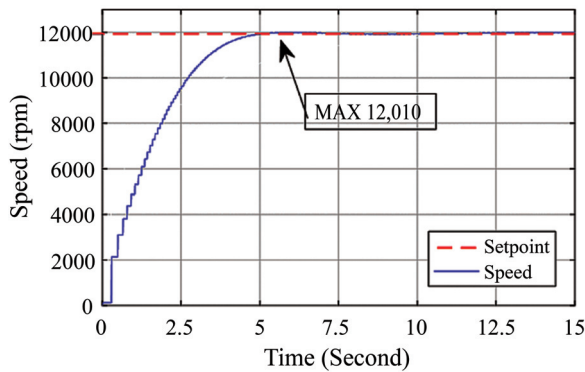
คำอธิบาย	พารามิเตอร์	ค่า	
BLDC motor			
โมเมนต์ความเฉื่อย	J	4.37	Kg.m ²
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	B	4.88	Nm.s/rad
ค่าความต้านทาน	R	28.94	Ω
ค่าการเหนี่ยวนำ	L	27.17	mH
แรงเคลื่อนไฟฟ้าทากลับ	K_b	0.1×10^{-3}	V/1000 rpm
ค่าคงที่ของแรงบิด	K_t	0.912	kNm/A
PID Controller			
ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน	K_p	0.0100	-
ค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล	K_i	0.0045	sec ⁻¹
ค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์	K_d	0.0010	sec

ใช้เครื่องมือ PID Tuner ใน MATLAB/Simulink® ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี [5] ใช้การตอบสนองแบบขั้นบันได (Step Input) โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ ความเร็วรอบการทำงานที่ 12,000 รอบต่อนาที Maximum Overshoot ไม่เกิน 5 % Settling Time ไม่เกิน 5 วินาทีที่ 2 % error และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว (Steady-State Error) ไม่เกิน 3 % ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อนำค่าไปใช้สามารถควบคุมความเร็วรอบให้มีผลการตอบสนองจริงที่เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



(ก) แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ BLDC-motor

รูปที่ 3 แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์และผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor



(ข) ผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอคือรูปที่ 3 แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์และผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor (ต่อ)

เครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง

ในกระบวนการผลิตจานหมุนเหวี่ยงสำหรับเครื่องปั่นแม่เหล็กเสถียรจำเป็นต้องผลิตให้มีความสมดุลในการหมุนเหวี่ยงให้มีขนาดการสั่นที่น้อยที่สุด ดังนั้นเราจำเป็นต้องสร้างเครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงก่อนนำไปติดตั้งในเครื่องปั่นแม่เหล็กเสถียรความเร็วสูง การถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงจำเป็นที่จะต้องทราบสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันแบบคลื่นฮาร์โมนิก [14] ดังแสดงในสมการที่ (3) โดย A คือแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

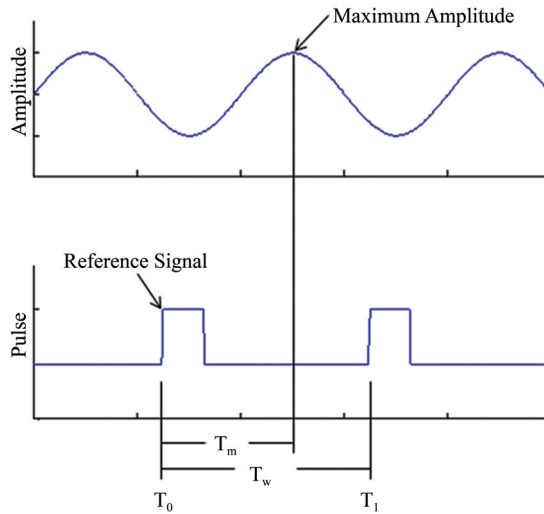
$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \tag{3}$$

เราสามารถวัดขนาดการสั่นได้โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง 3-แกน (ADXL-335) และตำแหน่งมุมเฟสของแรงหนีศูนย์กลางนั้น โดย Hall-Effect Sensor ในการวัดสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณความเร่ง เพื่อหามุมเฟสของการสั่นสูงสุด (ϕ) ดังสมการที่ (4)

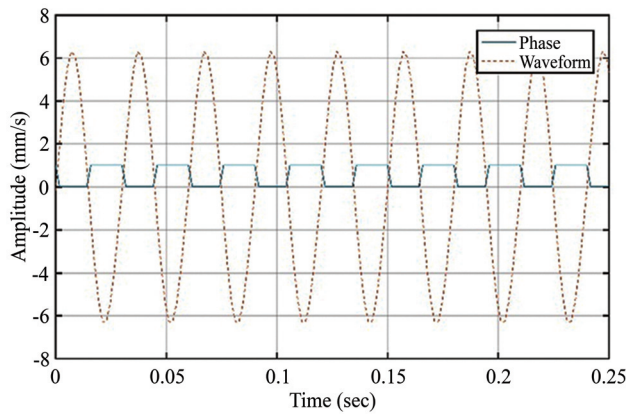
$$\phi = \frac{(T_m - T_0) \times 360}{T_w} \tag{4}$$

โดย

- T_m คือ เวลาที่เกิดการสั่นสูงสุด
- T_0 คือ เวลาเริ่มต้นของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect
- T_1 คือ เวลาสิ้นสุดของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect
- T_w คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect หรือ $T_w = T_1 - T_0$ แสดงรูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดมุมเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) และสัญญาณที่วัดได้จริงดังแสดงในรูปที่ 4(ข)



(ก) การเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดมุมเฟส



(ข) สัญญาณที่วัดได้จริง

รูปที่ 4 รูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดเฟส และสัญญาณ Hall-Effect

หลักการการแก้ไขการเสียสมดุลแบบระนาบเดียว (Single-Plane Balancing) โดยใช้หลักการคำนวณเวกเตอร์บนพิกัดโพลาร์ (Polar Coordinate) เป็นพื้นฐาน [4], [15] แสดงขั้นตอนการดำเนินการใน (i) - (iv) และแผนภูมิรูปที่ 5

(i) ขั้นตอนแรกให้ทำการหมุนจานหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบคงที่เพื่อการวัดค่าแอมพลิจูดเริ่มต้น A_0 , มุมเฟสเริ่มต้น ϕ_0 และทิศทางให้ในพิกัดโพลาร์ การคำนวณมุมเฟส เป็นการวัดจากตำแหน่งอ้างอิงเป็นสัญลักษณ์ที่ทำไว้บนโรเตอร์ และนับมุมในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนของโรเตอร์

(ii) ติดตั้งมวลทดสอบ (Trial Mass, M_T) ที่มุมทดสอบ θ_T บนจานหมุนเหวี่ยง และวัดค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสอีกครั้งโดยกำหนดในเทอมของ A_1 และ ϕ_1 ตามลำดับ

(iii) แปลงค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสใน (i) และ (ii) ให้อยู่ในพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) และการคำนวณค่าแอมพลิจูดสุทธิ A_T ระหว่าง A_0 และ A_1 สามารถเขียนได้สมการที่ (5) คือ

$$A_T = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2} \tag{5}$$

เมื่อ $A_x = A_1 \cos \phi_1 - A_0 \cos \phi_0$ และ $A_y = A_1 \sin \phi_1 - A_0 \sin \phi_0$

(iv) คำนวณหามุมเฟสสุทธิ ϕ_T จากสมการในตารางที่ 2 และ $A^\dagger = A_y / A_x$

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณหาค่ามุมเฟสสุทธิใน Phase Quadrant

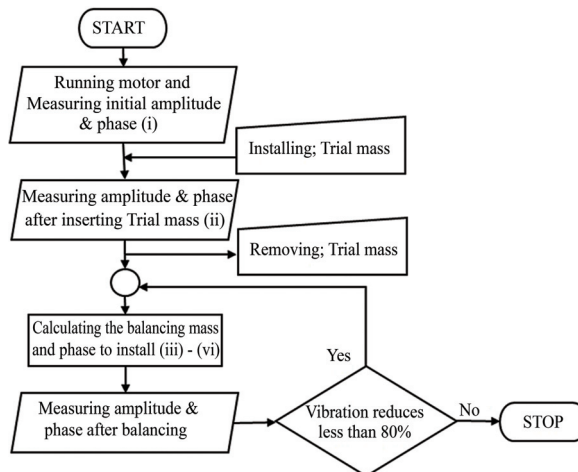
เงื่อนไข	สูตรมุมเฟสสุทธิ
$A_y > 0$ and $A_x > 0$	$\phi_T = \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y > 0$ and $A_x < 0$	$\phi_T = 180^\circ - \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y < 0$ and $A_x < 0$	$\phi_T = 180^\circ + \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y < 0$ and $A_x > 0$	$\phi_T = 360^\circ - \tan^{-1}(A^\dagger)$

(v) คำนวณขนาดของมวลเสียสมดุล M_B ดังสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) - (7)

$$M_B = \frac{A_0}{A_T} M_T \tag{6}$$

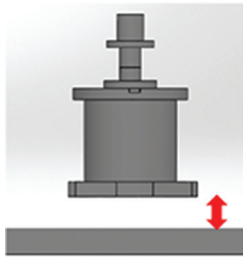
(vi) หาค่าแห่งติดตั้ง θ_B

$$\theta_B = \theta_T + \phi_T - \phi_0 \left\{ \begin{array}{l} \phi_B = \phi_0 + 180^\circ \quad ; \quad 0^\circ \leq \phi_0 < 179^\circ \\ \phi_B = \phi_0 - 180^\circ \quad ; \quad 180^\circ \leq \phi_0 < 359^\circ \end{array} \right\} \tag{7}$$

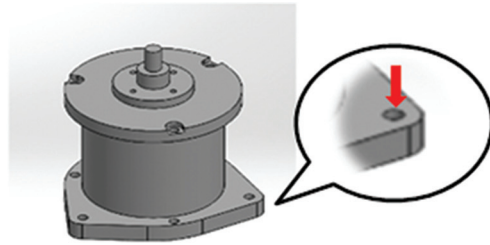


รูปที่ 5 ฟังงานโปรแกรมการตรวจวัดและถ่วงสมดุลของเครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง

หลักการวิเคราะห์และการเลือกใช้ฉนวนการสั่นสะเทือน



(ก) ระยะห่างระหว่างมอเตอร์กับฐานเครื่อง



(ข) รูปร่างยึดของมอเตอร์

รูปที่ 6 ระยะห่างระหว่างมอเตอร์กับฐานเครื่อง และบริเวณรูยึดของมอเตอร์

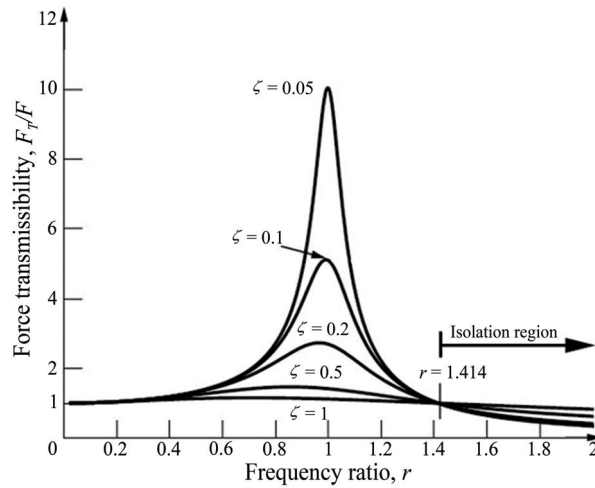
ตัวเครื่อง จะประกอบด้วย ส่วนฐานที่รองรับมอเตอร์ และมีกล่องปิด เพื่อช่วยป้องกันอันตรายจากการปั่นเหวี่ยงในขณะที่เครื่องกำลังทำงาน ซึ่งขนาดพื้นที่ของภายในตัวเครื่องจะเป็นตัวช่วยกำหนดขนาดของฉนวนการสั่นที่เป็นตัวกลางระหว่างมอเตอร์กับตัวเครื่อง โดยความสูงของฉนวนการสั่นต้องไม่เกิน 24 mm กว้าง 70 mm ยาว 70 mm และขนาดรูเจาะสำหรับยึดฐานของมอเตอร์ไม่เกิน 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 6

ฉนวนการสั่นสะเทือน (Vibration Isolators) คืออุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดการสั่นสู่พื้นหรือที่ที่ไม่ต้องการให้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น [15] ในที่นี้คือการส่งถ่ายการสั่นจาก BLDC-motor สู่อุปกรณ์ ซึ่งสมการความสามารถการส่งผ่านแรง (Force Transmissibility) ของการสั่นสะเทือน คือ

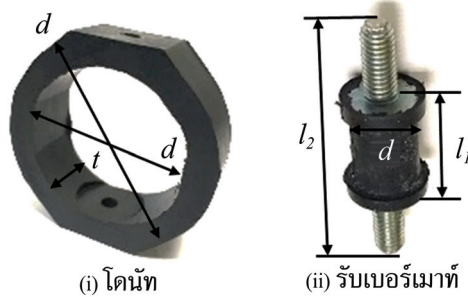
$$\frac{F_T}{F} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta\omega)^2}} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) เราสามารถคำนวณหาค่าความแข็งของฉนวนการสั่น (k) ที่ทำให้แรงส่งผ่านการสั่นลดลง จากรูปที่ 7(ก) จะสรุปได้ว่าต้องออกแบบค่าความแข็งของฉนวนที่ทำให้ระบบมีความถี่ธรรมชาติที่ทำให้อัตราส่วนความถี่ไม่ต่ำกว่า 1.414 จึงสามารถคำนวณค่าความแข็งของฉนวนการสั่นที่ต้องมีขนาดไม่เกิน 492.16 N/mm เมื่อพิจารณามอเตอร์มีจุดจับยึดอยู่ 3 ตำแหน่ง ดังนั้นจะมีฉนวนการสั่นทั้งหมด 3 ตัวที่ต่อขนานกัน และค่าความแข็งเมื่อรวมกันแล้วต้องไม่เกินค่าที่คำนวณได้หรือฉนวนแต่ละตัวจะได้มีค่าความแข็งไม่เกิน 164.05 N/mm

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปัจจัยเรื่องขนาด จุดจับยึด ค่าความแข็ง และการรับน้ำหนักได้เกิน 2.5 กิโลกรัม สามารถเลือกฉนวนการสั่นที่มีในท้องตลาดดังนี้ คือ ฉนวนการสั่นแบบรีบบอร์เมท และแบบโค่นัทที่ใช้งานอยู่ก่อน โดยแสดงรายละเอียดของฉนวนการสั่น ในรูปที่ 7(ข) และตารางที่ 3



(ก) กราฟการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ r



(ข) ลักษณะของฉนวนการสั่น

รูปที่ 7 กราฟการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ และลักษณะฉนวนการสั่นสะเทือน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของฉนวนการสั่นสะเทือน

ประเภทฉนวนการสั่นสะเทือน	แบบ	ขนาด (mm)	ค่าความแข็ง (N/mm)
โคนัท รูปที่ 7(ข)(i)	A	$d_i = 70.0, d_o = 93.0, t = 30.0$	N/A
รับเบอร์เม้าท์ รูปที่ 7(ข)(ii)	B	$d = 10.0, l_1 = 15.5, l_2 = 39.0$	25
	C	$d = 12.0, l_1 = 15.0, l_2 = 44.0$	44
	D	$d = 12.0, l_1 = 15.0, l_2 = 44.0$	74
	E	$d = 13.5, l_1 = 11.0, l_2 = 28.0$	130

เมื่อได้ฉนวนการสั่นที่ต้องการแล้ว ต่อไปเป็นการทดสอบใช้จริงกับเครื่องเพื่อหาฉนวนการสั่นที่สามารถลดขนาดแอมพลิจูดแรงสั่นสะเทือนที่ส่งจากจานหมุนเหวี่ยงสู่ตัวเครื่องได้ตามเงื่อนไขมาตรฐานสากล ISO 10816-1 [8] ดังนี้

- ขณะทำงานที่ความเร็วรอบคงตัว 12,000 rpm มีขนาดการสั่นไม่เกิน 2.80 mm/sec
- ขณะหยุดจ่ายไฟฟ้า (ตั้งแต่ 12,000 rpm ถึงเครื่องหยุดหมุน) ที่ขนาดการสั่นสูงสุดไม่เกิน 7.10 mm/sec

อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการวิจัยทดสอบ

1. เครื่อง HCM สำหรับทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย
 - มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านรุ่น F72-201105-220 ขนาด 300 Watt, 220 - 240 VDC พร้อมชุดบอร์ดขับเคลื่อน BLMD-8TC39-1P
 - จานหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Disk) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 175 mm น้ำหนัก 420 g ผลิตจากวัสดุอะลูมิเนียม 6063 จำนวน 2 จาน พร้อมฝาปิด
 - ฉนวนการสั่นขนาด (A) ดั้งเดิม, (B) 25 N/mm, (C) 44 N/mm, (D) 74 N/mm และ (E) 130 N/mm อย่างละ 3 ตัว
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานและแสดงผล พร้อมโปรแกรม MATLAB/Simulink® สำหรับช่วยในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และแสดงผล
3. โปรแกรม Arduino พร้อมบอร์ด UNO-R3 สำหรับใช้เป็น Microcontroller และ 3-axis Accelerometer Module (ADXL335) จำนวน 1 ตัว เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเร่งแบบ 3 แกน ในเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้ง
4. เซนเซอร์ Accelerometer 3-axis ขนาด 50 G จำนวน 2 ตัว พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วง
5. เครื่องมือประมวลผลและวิเคราะห์ Dewesoft Miniature พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วง



รูปที่ 8 อุปกรณ์ในการทดสอบ

ผลการทดสอบ

การทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้ง เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการและขั้นตอนการถ่วงสมดุลข้างต้นสามารถใช้ได้จริง โดยกำหนดการทดสอบจริงโดยการถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง จำนวน 2 แผ่นคือ Disk I กับ Disk II และถ่วงสมดุลโดยเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งมวลทดสอบไปจำนวน 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งมวลทดสอบในกรณีทดสอบ Case I, II, III ตามลำดับ

Cases	Disk I		Disk II	
	M_T (grams)	θ_T (degree)	M_T (grams)	θ_T (degree)
Case I	0.53	0	0.53	0
Case II	0.79	0	0.71	170
Case III	0.21	120	0.35	300

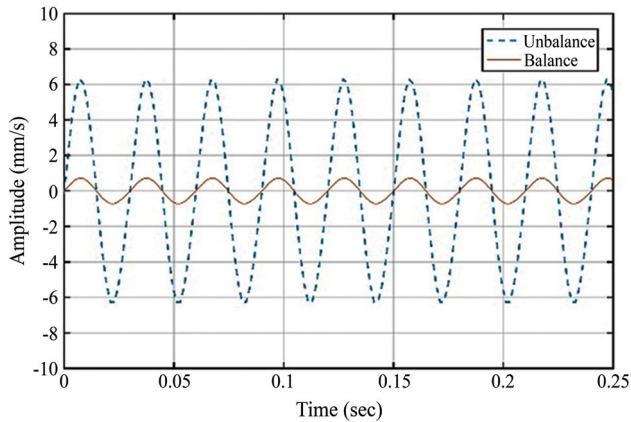
จากการทดสอบการถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงทั้ง 2 แผ่น แต่ละแผ่นมี 3 กรณี โดยเริ่มต้น Disk I มีค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ 6.40 mm/sec และ Disk II มีขนาดการสั่น 7.40 mm/sec ซึ่งทั้ง 3 กรณี การติดตั้งมวลทดสอบในจานหมุนแต่ละแผ่น จะให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันเนื่องจากมีมวลเสียสมดุลอยู่ในตำแหน่งเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการถ่วงสมดุล

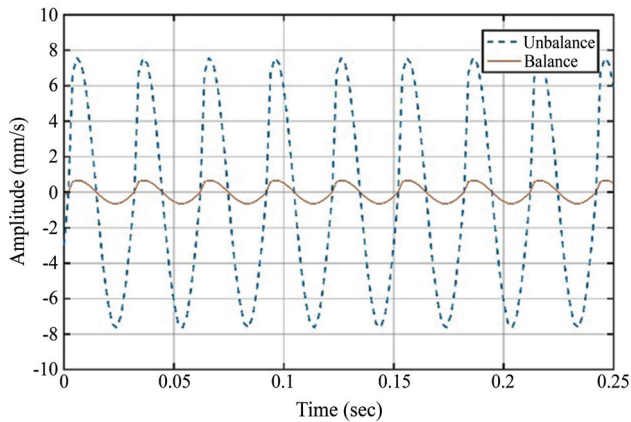
	A_0 (mm/sec)	ϕ_0 (°)	Trial in Case						Balancing Parameters		Results	
			A_1 (mm/sec)			ϕ_1 (°)			M_B (g)	θ_B (°)	A_B (mm/sec)	% Reduce
			I	II	III	I	II	III				
Disk I	6.40	255	9.10	14.70	4.80	315	334	186	0.42	77	0.70	89.06
Disk II	7.60	261	11.01	14.20	12.56	311	200	272	0.48	87	0.65	91.45

(°); degree, (g); grams

ผลลัพธ์จากการถ่วงสมดุลให้จานหมุนเหวี่ยงคือ ขนาดของมวลเสียสมดุล 0.42 กรัมที่มุม 77° สำหรับ Disk I และ 0.48 กรัม ที่มุม 87° สำหรับ Disk II ผลการทดสอบค่าขนาดการสั่นหลังจากถ่วงสมดุล ซึ่งสามารถลดขนาดการสั่นได้เกิน 80 % จากเดิมทั้ง 2 จานหมุนเหวี่ยง แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดการสั่นของจานหมุนเหวี่ยงทั้ง 2 ทั้งก่อนถ่วงสมดุล (เส้นประ) หลังถ่วงสมดุล (เส้นทึบ) ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) สัญญาณการสั่นสะเทือนก่อน - หลังถ่วงสมดุลของ Disk I



(ข) สัญญาณการสั่นสะเทือนก่อน - หลังถ่วงสมดุลของ Disk II

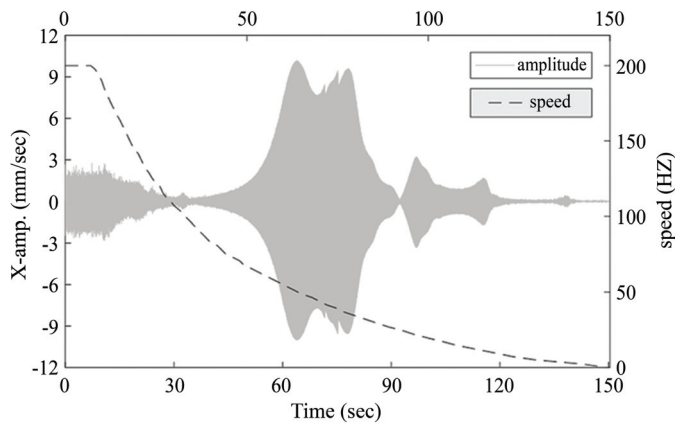
รูปที่ 9 สัญญาณการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบก่อน - หลังการถ่วงสมดุล Disk I และ Disk II

การทดสอบฉนวนการสั่นสะเทือน

ในการทดสอบเพื่อเลือกฉนวนการสั่น ถูกแบ่งตามช่วงการทำงานจริงของเครื่อง HCM ดังนี้

1. วัดค่าการสั่นสะเทือนขณะเครื่องทำงานด้วยความเร็วคงที่ที่ 12,000 rpm
2. วัดค่าการสั่นสะเทือนขณะเครื่องเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ในช่วงเสริ์การทำงานจาก 12,000 rpm ถึงหยุดนิ่ง (Speed-Down) หรือที่ความเร็วรอบ 200 - 0 Hz

และใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง 3-แกน ติดตั้งไว้ที่มอเตอร์ 1 ตำแหน่ง และที่ฐานเครื่องอีก 1 ตำแหน่ง โดยจัดทิศทางของเซนเซอร์ให้ทิศทางของแกน-x แกน-y แกน-z มีทิศเดียวกัน เพื่อสามารถเปรียบเทียบสัญญาณในแต่ละแกนร่วมกันได้ รูปที่ 10 เป็นกราฟข้อมูล 1 ในการทดสอบทั้งหมด 20 ครั้ง โดยทดสอบกับฉนวนการสั่นชนิดละ 4 ครั้ง จาก 5 ชนิด



รูปที่ 10 ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือน และความเร็วรอบตั้งแต่ 200 - 0 Hz

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบจนวนสั่นของเครื่องปั้นเม็คเล็คคองที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

Freq.	Isolators types										Axis
	Max Amp. at motor (mm/sec)					Max Amp. at chamber (mm/sec)					
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
12,000 rpm	1.340	0.840	1.740	1.160	0.284	0.171	0.081	0.130	0.149	0.069	x
	1.410	2.480	1.770	1.140	0.265	0.153	0.272	0.110	0.058	0.004	y
	2.970	3.710	3.860	0.971	0.822	2.210	0.759	0.822	0.291	0.048	z
Resonance 3,300 rpm	0.074	0.293	1.160	0.137	0.105	0.346	0.549	1.080	0.589	0.127	x
	0.050	0.603	1.050	0.139	0.089	0.222	0.350	0.844	0.070	0.124	y
	0.422	0.716	1.950	0.094	0.142	0.018	0.041	0.090	0.018	0.036	z

จากผลการทดสอบตารางที่ 6 พบว่าขนาดการสั่นเมื่อติดตั้งจนวนการสั่นแบบต่าง ๆ ทำให้ขนาดการสั่นที่ส่งจากมอเตอร์สู่ตัวเครื่องมีขนาดลดลง และจนวนการสั่นที่ทำให้การสั่นมีขนาดน้อยที่สุดทั้งขณะทำงานที่ 12,000 rpm และขณะผ่านความถี่ธรรมชาติหรือช่วงการสั่นพ้องคือ จนวนการสั่น E ซึ่งมีขนาดการสั่นขณะทำงานที่ 12,000 rpm ในแกน x y และ z ตามลำดับ ที่มอดอร์ 0.284 0.265 และ 0.822 mm/sec ซึ่งมีขนาดการสั่นน้อยกว่าจนวนการสั่นชนิดอื่นทั้งหมด ขนาดการสั่นที่ตัวเครื่อง 0.069 0.004 และ 0.048 mm/sec ก็มีขนาดการสั่นที่น้อยกว่าการสั่นจากจนวนการสั่นชนิดอื่น ขนาดการสั่นพ้องที่มอดอร์ 0.105 0.089 และ 0.142 mm/sec พบว่าในแกน x และ y มีขนาดการสั่นน้อยที่สุด แต่ที่แกน z มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A B และ C แต่มากกว่า D ส่วนขนาดการสั่นพ้องที่ตัวเครื่อง 0.127 0.124 และ 0.036 mm/sec ที่แกน x มีขนาดการสั่นน้อยที่สุด แต่ที่แกน y มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A B และ C แต่มากกว่า D ที่แกน z มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A และ B แต่มากกว่า C และ D ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากลักษณะการทำงานของเครื่องที่ทำงานที่ความเร็วรอบทำงานนานอย่างน้อย 5 นาที กับขณะที่เกิดการสั่นพ้องที่เกิดขึ้นเพียงชั่วขณะ สามารถกล่าวได้ว่าจนวนการสั่นที่ช่วยลดการสั่นสะเทือนได้มากที่สุดคือ จนวน E ที่มีค่าความแข็ง 130 N/mm

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบนี้สามารถสร้างแรงหนีศูนย์กลางมากกว่า 1,000 G ที่ความเร็วรอบการทำงานตั้งแต่ 10,000 - 13,000 rpm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานหมุนเหวี่ยงมีขนาด 175 mm ระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านควบคุมแบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า $\pm 3\%$ ของความเร็วรอบที่ต้องการควบคุม และ Settling Time น้อยกว่า 5 วินาทีที่ 2% error สร้างเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้งที่อาศัยการจัดการสัญญาณระหว่างสัญญาณ Hall-Effect กับขนาดการสั่น ซึ่งสามารถถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงเพื่อลดขนาดการสั่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำ จนวนการสั่นสะท้อนแบบ E ที่มีขนาด 130 N/mm นั้นสามารถลดขนาดการสั่นที่ส่งผ่านจากมอเตอร์มาสู่ตัวเครื่องได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่ผลิตโดยผู้ประกอบการคนไทยมีคุณภาพเทียบเคียงผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บริษัท สุรนารีแพทยภัณฑ์ จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัด อาร์เอพี เอ็นเตอร์ไพรส์แอนด์เซอร์วิสเซส ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ข้อมูลความรู้ อุปกรณ์เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

References

- [1] Areejitranusorn, C. (1991). **Scientific Instruments**. Khonk Kaen. Klang Nana Vithaya Printing (in Thai)
- [2] Dujdao, B., Noppadol, P., Anothai, S., and Natthaphat, R. (2016). Performance Evaluation of Microhematocrit Centrifuge in the Primary Care Units in Phitsanulok Province. **Bulletin of the Department of Medical Sciences**. Vol. 58, No. 4, pp.221-228 (in Thai)
- [3] Tassaneya, C., Wilairat, N., Suwalee, I., and Tulaya, U. (2013). Study of Clinical Chemistry Parameter in Plasma Separated by Various Relative Centrifugal Forces. In **Proceeding of First Annual Academic Conference of Golden Jubilee Medical Center**. Mahidol University. pp. 235-247 (in Thai)
- [4] Srisertpol, J. (2013). **Mechanical Vibration 2nd edition**. Nakhon Ratchasima: School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology
- [5] Taweepiradeerattana, A., Pawako, S., Rodpai, A., Numanoy, N., and Srisertpol, J. (2018). Analytical Design the Vertical Balancing Device for Hematocrit Centrifuge Machine. **Journal of Physics Conference Series**. pp. 1-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1074/1/012064

- [6] Gitte, W. (2004). **Hematocrit-a Review of Different Analytical Method**. Access (10 July 2019). Available (<https://acutecaretesting.org/en/articles/hematocrit--a-review-of-different-analytical-methods>)
- [7] Max, M. S., Albert, B. S., and Eleanor, D. H. (1954). An Improved Micro Hematocrit Method. **American Journal of Clinical Pathology**. Vol. 24, Issue 9, pp. 1016-1024. DOI: 10.1093/ajcp/24.9.1016
- [8] Pawin, J. and Jiraphon, S. (2013). Speed Estimation of 3-Phase BLDC Motor Using Genetic Algorithm. **International Journal of Engineering Science and Innovation Technology**. Vol. 2, Issue 1, pp. 254-263
- [9] Prasad, G., Venkateswara Reddy M., P. V. N. Prasad, and G. Tulasi Ram Das. (2012). Speed Control of Brushless DC Motor with DSP Controller using MATLAB. **International Journal of Engineering Research and Applications**. Vol. 2, Issue 3, pp. 2120-2125
- [10] Pawako, S., Taweepiradeerattana, A., Odngam, S., and Srisertpol, J. (2017). Speed Control System Design of the Brushless DC Motor for Hematocrit Centrifuge Machine. In **Proceeding of National Conference “2017 Innovation and Technology”**. Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus. (in Thai)
- [11] Åström, K. J. and Hägglund, T. (2006). **Advanced PID Control**. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society
- [12] Manjita, S., Srivastava, M. C., and Smriti, B. (2009). **Control System - MATLAB and Simulink Tutorial**. 7 West Patel Nagar, New Delhi: Tata McGraw-Hill
- [13] Manjusha, P. (2014). Modelling and Simulation of DC Drive using PI and PID Controller. **International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronic, Instrumentation and Control Engineering**. Vol. 2, Issue 12, pp. 2263-2266
- [14] Guilherme, K. Y., Cesar da Costa and João Sinohara da S. S. (2016). A Smart Experimental Setup for Vibration Measurement and Imbalance Fault Detection in Rotating Machinery. **Case Study in Mechanical System and Signal Processing**. Vol. 4, pp. 8 -18. DOI: 10.1016/j.csmssp.2016.07.001
- [15] ISO 10816-1. (1995). **Mechanical vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts - Part 1**. General guidelines (Switzerland: ISO)

การเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่โดยการ
ทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น
**Increase of Cooling Capacity of Strawberry Canopy by
Evaporative Cooling Together with Air Flow Controlling
Under Culture Bench and Cool Water Tube**

พานวิษฐ์ พุทธรักษา¹ และสุลักษณ์ มงคล^{1*}
Panuwit Puttaraksa¹ and Sulaksana Mongkon^{1*}

Received: May 27, 2019; Revised: September 27, 2019; Accepted: October 4, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิทรงพุ่มของพืชในโรงเรือนสตรอว์เบอร์รี่ที่มีการใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น โรงเรือนกว้าง 6 m ยาว 24 m สูง 4.8 m หลังคาคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีนและผนังคลุมด้วยตาข่ายกันแมลง ผนังทิศเหนือติดแผ่นระเหยน้ำมีพื้นที่ 14.04 m² ภายในโรงเรือนมีรางปลูกกว้าง 0.3 m ยาว 21 m และสูง 1 m ใต้รางปลูกติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 50 W และติดตั้งพลาสติกครอบรางปลูกและเว้นช่องเปิดกว้าง 0.10 m ท่อน้ำเย็นทำจากอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm ยาว 21 m จำนวน 1 กลับ ติดตั้งบนรางปลูกระหว่างทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ จากการศึกษาพบว่า การบังคับทิศทางอากาศสามารถลดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มได้สูงสุด 5.5 °C เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการบังคับทิศทางอากาศ และพบว่าการใช้ท่อน้ำเย็นเพื่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มนั้นไม่มีผล จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การเลือกใช้พัดลมที่มีความเร็วอากาศที่มากขึ้นร่วมกับการเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศร่วมกันจะสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้ประมาณ 4 - 5 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น 66.12 %

คำสำคัญ : การทำความเย็นแบบระเหย; สตรอว์เบอร์รี่; การบังคับทิศทางอากาศ; ท่อน้ำเย็น

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

¹ School of Renewable Energy, Maejo University

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

Abstract

This research aims to study the increase of cooling capacity for the nurture of canopy temperature in strawberry greenhouse that used evaporative cooling systems together with air flow controlling under the culture bench and cool water tube. The greenhouse had 6 m of width, 24 m of length and 4.8 m of height. The roof was covered by polyethylene plastic and insect screen net. On the north wall was installed the cooling pad of 14.04 m² area. Inside greenhouse had the culture bench that was 0.3 m of width, 21 m of length and 1 m of height. The 50 W of ventilation fans were install every the culture benches. The cool water tube made from aluminum with a diameter of 1.27 cm, length of 21 m and used one return coil between the strawberry bush. The results showed that the air flow controlling could decrease the air temperature around the plant canopy to a maximum of 5.5 °C when compared with non-air flow controlling, and the use of cool water tube could not effect of cooling. For the mathematical model study, it was found that using the faster velocity fan together with the opening width increasing of air flow controlling could reduce the strawberry canopy temperature about 4 - 5 °C and the coefficient of performance increased by 66.12 %.

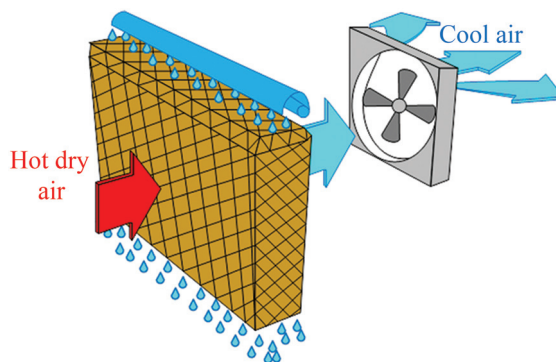
Keywords: Evaporative Cooling; Strawberry; Air Flow Controlling; Cool Water Tube

บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System) แบบใช้พัดลมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำเป็นการทำความเย็นที่อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศโดยอาศัยแผ่นระเหยน้ำที่เป็นวัสดุเปียกชุ่มด้วยน้ำเป็นตัวกลาง ดังรูปที่ 1 เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากอากาศที่ไหลผ่านแผ่นระเหยน้ำและมีความเท่ากับความร้อนแฝง (Latent Heat) การกลายเป็นไอน้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำปะปนไปในอากาศ ทำให้ได้อากาศที่มีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นไปใช้งานหรืออากาศเย็นและชื้นนั่นเอง อากาศเย็นที่ได้สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงและมีความเหมาะสมกับการใช้งานระบบในสภาพอากาศเขตร้อน ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในภาคเกษตรกรรม เช่น โรงเรือนปลูกพืช และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น การทำความเย็นแบบระเหยแบบใช้พัดลมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำจะมีการใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอหรือการใช้เครื่องปรับอากาศแบบทั่วไป จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance: COP) สูงกว่าเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอทั่วไปประมาณ 7 - 10 เท่า [1] - [2]

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมีอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น Waewsak, J. et al. [3] ได้นำระบบทำความเย็นแบบระเหยขนาด 9 m² ไปใช้กับโรงเพาะเห็ดฟางพบว่า อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเฉลี่ย 28.9 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75 - 95 % ทำให้มีความเหมาะสมต่อการเพาะเห็ด

Mehmet, A. D. and Hasan, H. S. [4] ได้ศึกษาการทำความเย็นโดยใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยเพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนปลูกมะเขือเทศขนาด 36 m² ภายใต้สภาพอากาศชื้นและแห้งพบว่า สามารถลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้ตั้งแต่ 3 - 12 °C และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้ 10 - 38 % ทำให้สามารถเพาะปลูกพืชได้ดี Romantchik, E. et al. [5] ได้ศึกษาการใช้พลังงานในระบบทำความเย็นแบบระเหยในโรงเรือนปลูกพืชที่มีขนาดพื้นที่ 300 m² ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 30 °C พบว่า ระบบทำความเย็นแบบระเหยสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ถึง 19.2 °C และสามารถใช้ไฟฟ้าโดยตรงจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหย เช่น Hasan, O. Z. et al. [6] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหยในโรงเรือนปลูกมะเขือเทศพบว่า ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหยเท่ากับ 80 % ทำให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ประมาณ 10 - 12 °C Poolkrajang, A. and Premjai, N. [7] ทำการสร้างและศึกษาประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบระเหยชนิดโดยตรงและโดยอ้อมพบว่า ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบโดยตรงรวมโดยอ้อมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่ากับ 76.11 % และมีค่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 25.88 °C



รูปที่ 1 หลักการทำงานของระบบ Fan-pad

จากข้อดีของระบบทำความเย็นแบบระเหยที่กล่าวมา ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยมาใช้ในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ โดยติดตั้งแผ่นระเหยน้ำร่วมกับการใช้พัดลมระบายอากาศได้รางปลูกที่มีอยู่เดิม ซึ่งจากการใช้งานพบว่า อากาศเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบระเหยจะถูกพัดลมดูดให้ไหลอยู่เฉพาะบริเวณใต้รางปลูกไม่สัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่เท่าที่ควร จึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมอากาศเย็นที่ไหลอยู่ใต้รางปลูกให้สัมผัสกับทรงพุ่มต้นสตรอว์เบอร์รี่ให้มากขึ้น โดยต้องให้ได้ตามเงื่อนไขสภาพอากาศที่สตรอว์เบอร์รี่ต้องการคือ อุณหภูมิอากาศในตอนกลางวันต่ำกว่า 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 70 - 75 % ดังนั้นในการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงระบบทำความเย็นในโรงเรือนโดยเพิ่มการบังคับทิศทางอากาศให้สัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้มากที่สุด และใช้ท่อน้ำเย็นบริเวณรางปลูกเพื่อเสริมสมรรถนะการทำความเย็นให้แก่ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ และได้ทำการศึกษาวารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นเพื่อหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมรรถนะการทำความเย็น

ในการศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบระเหยแบ่งเป็นการวิเคราะห์ 2 ตัวแปร ได้แก่ ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย (η_{ECS}) ขึ้นอยู่กับสถานะของอากาศที่ใกล้สภาวะอิ่มตัว พิจารณาผลของอุณหภูมิจากการระเหยของน้ำเมื่อมีอากาศไหลผ่านแผ่นระเหยน้ำได้จากสมการที่ (1) [8]

$$\eta_{ECS} = \frac{T_{db,i} - T_{db,o}}{T_{db,i} - T_{wb,i}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$T_{db,i}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าระบบ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{db,o}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังออกจากระบบ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{wb,i}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนเข้าระบบ ($^{\circ}\text{C}$)

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance: COP) เป็นค่าบ่งบอกถึง ความสามารถในการทำความเย็นต่อการใช้พลังงานรวมของระบบทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [7], [9]

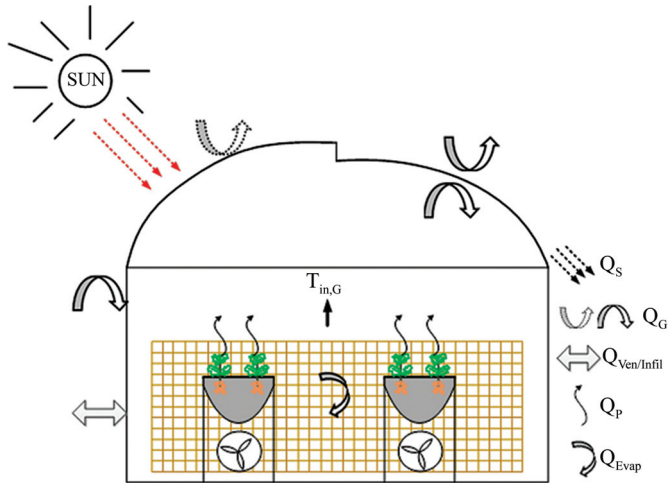
$$COP_{ECS} = \frac{Q_{evap}}{W_{net}} = \frac{\dot{m}_a (h_o - h_i)}{W_{net}} \quad (2)$$

โดยที่

Q_{evap}	คือ ความร้อนจากแผ่นระเหยน้ำ (W)
W_{net}	คือ กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ป้อนให้แก่ระบบ (W)
\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
h_i	คือ เอนทัลปีของอากาศก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
h_o	คือ เอนทัลปีของอากาศหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)

สมดุลพลังงานในโรงเรือน

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เกิดขึ้น ในโรงเรือนที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหย จะอาศัยหลักการทำสมดุลพลังงาน (Energy Balance Method) ที่เกี่ยวข้องกับโรงเรือนดังรูปที่ 2 และสามารถเขียนเป็นสมดุลพลังงานดังสมการที่ (3) สำหรับ ความร้อนส่วนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโรงเรือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) - (9)



รูปที่ 2 สมดุลพลังงานในโรงเรือน

$$\rho_{in,G} V_G C_{p,in,G} \frac{dT_{in,G}}{dt} = Q_S + Q_G + Q_{Ven/Infil} + Q_{Plant} + Q_{Evap} \quad (3)$$

โดยที่

- $\rho_{in,G}$ คือ ความหนาแน่นอากาศในโรงเรือน (kg/m^3)
- V_G คือ ปริมาตรโรงเรือน (m^3)
- $C_{p,in,G}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศในโรงเรือน ($J/kg \cdot K$)
- $T_{in,G}$ คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ($^{\circ}C$)
- Q_S คือ ความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ (W)
- Q_G คือ ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังและหลังคาโรงเรือนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ (W)
- $Q_{Ven/Infil}$ คือ ความร้อนจากการระบายอากาศ (W)
- Q_{Plant} คือ ความร้อนจากการคายน้ำของพืช (W)
- Q_{Evap} คือ ความร้อนจากการทำความเย็นแบบระเหย (W)

ความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ (Q_S) เกิดจากความเข้มรังสีอาทิตย์จะกระทบบริเวณผนังและหลังคาโรงเรือน ทำให้ความร้อนสะสมในบริเวณดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [10]

$$Q_S = \tau (\sum (I_{T,w} A_w) + \sum I_{T,r} A_r) \quad (4)$$

โดยที่

- A_w คือ พื้นที่ผนังของโรงเรือน (m^2)
- A_r คือ พื้นที่หลังคาของโรงเรือน (m^2)

$I_{T,w}$	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังโรงเรือนแต่ละด้าน (W/m^2)
$I_{T,r}$	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคาโรงเรือนแต่ละด้าน (W/m^2)
τ	คือ Transmissivity

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังและหลังคาโรงเรือนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ (Q_G) หาได้จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient: U) เนื่องจากหลังคาโรงเรือนที่ใช้ในการวิจัยคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน ผนังส่วนใหญ่คลุมด้วยตาข่ายกันแมลง ทำให้อากาศภายในและภายนอกโรงเรือนเกิดการถ่ายเทความร้อนตลอดเวลา การทำสมดุลพลังงานของผนังแต่ละด้านนั้นจึงเป็นไปได้ยาก อีกทั้งโรงเรือนใช้พลาสติกคลุมเพียงแค่หลังคา ผนังส่วนใหญ่คลุมด้วยตาข่ายกันแมลงจึงไม่เกิดการแผ่รังสีระหว่างหลังคากับผนัง ความร้อนจากการถ่ายเทผ่านโรงเรือนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$Q_G = U_{G,Avg} A_G (T_{in,G} - T_{o,G}) \quad (5)$$

โดยที่

Q_G	คือ ความร้อนจากผนังและหลังคาโรงเรือน (W)
$U_{G,Avg}$	คือ ค่า U เฉลี่ยของโรงเรือนที่ใช้ทดสอบ ($W/m^2 \cdot K$)
A_G	คือ พื้นที่ผนังและหลังคาโรงเรือนทั้งหมด (m^2)
$T_{o,G}$	คือ อุณหภูมิอากาศนอกโรงเรือน ($^{\circ}C$)

ความร้อนจากการระบายอากาศ ($Q_{Ven/Infil}$) เกิดจากช่องตาข่ายของผนังโรงเรือนสามารถช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากโรงเรือนได้ ขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ โดยที่ N มีหน่วยเป็น (s^{-1}) ในโรงเรือนตามจำนวนเท่าของปริมาตรของห้อง (Air Change Per Hour) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) [11]

$$Q_{Ven/Infil} = 0.5NC_{p,a}\rho_a(T_{o,G} - T_{in,G}) \quad (6)$$

ความร้อนจากการคายน้ำของพืช (Q_p) เกิดจากพืชที่ปลูกในโรงเรือนจะมีการหายใจและการระเหยน้ำของใบพืชสู่บรรยากาศในโรงเรือน ในการศึกษาตั้งสมมติฐานว่า การหายใจของพืชมีค่าเท่ากันและไม่มี การแบ่งตัวเป็นชั้น และกำหนดให้สมบัติทางความร้อนของพืชเท่ากับสมบัติทางความร้อนของน้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) [12]

$$Q_p = \frac{M_T \left(h_{w25} + C_{p,w} \frac{(T_{in,G} + T_p)}{2} \right)}{2A_p} \quad (7)$$

$$M_T = \frac{2A_p \rho_p (\omega_p - \omega_{in,G})}{R_p} \quad (8)$$

โดยที่

M_T	คือ อัตราการถ่ายเทความชื้น (kg/s)
h_{w25}	คือ เอนทัลปีของน้ำที่ 25 °C (J/kg)
$C_{p,w}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของพืชที่ความดันคงที่ (J/kg·K)
T_p	คือ อุณหภูมิของพืช (K)
A_p	คือ พื้นที่ปลูกพืช (m ²)
ρ_p	คือ ความหนาแน่นของพืช (kg/m ³)
ω_p	คือ อัตราส่วนความชื้นอิมตัวของอากาศที่อุณหภูมิพืช (kg _w /kg _{da})
$\omega_{in,G}$	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโรงเรือน (kg _w /kg _{da})
R_p	คือ ความต้านทานการคายน้ำของพืช (s/m)

สำหรับความร้อนจากระบบทำความเย็นแบบระเหย (Q_{Evap}) มีหน่วยเป็น (W) เกิดจากผลรวมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอากาศ สามารถหาได้จากสมการที่ (9) [13] - [14]

$$Q_{Evap} = \dot{m}_a (h_{da,o} + \omega_o h_{fg,o}) - \dot{m}_a (h_{da,i} + \omega_i h_{fg,i}) - \dot{m}_a (\omega_o - \omega_i) h_w \quad (9)$$

โดยที่

\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s)
\dot{m}_w	คือ อัตราการไหลของน้ำที่แผ่นระเหยน้ำ (kg _w /s)
$h_{da,i}$	คือ เอนทัลปีอากาศแห้งก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{da,o}$	คือ เอนทัลปีอากาศแห้งหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{fg,i}$	คือ เอนทัลปีอากาศชื้นก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{fg,o}$	คือ เอนทัลปีอากาศชื้นหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
h_w	คือ เอนทัลปีของน้ำที่แผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
ω_i	คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศที่เข้าระบบ (kg _w /kg _{da})
ω_o	คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศที่ออกระบบ (kg _w /kg _{da})

จากสมการพลังงานในสมการที่ (3) สามารถจัดพจน์ใหม่เพื่อหาอุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ณ เวลาใด ๆ ในรูปของสมการเชิงตัวเลขแบบสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ได้ดังสมการที่ (10) และแทนค่าความร้อนต่าง ๆ จะสามารถทำนายอุณหภูมิอากาศ ณ เวลาถัดไปได้

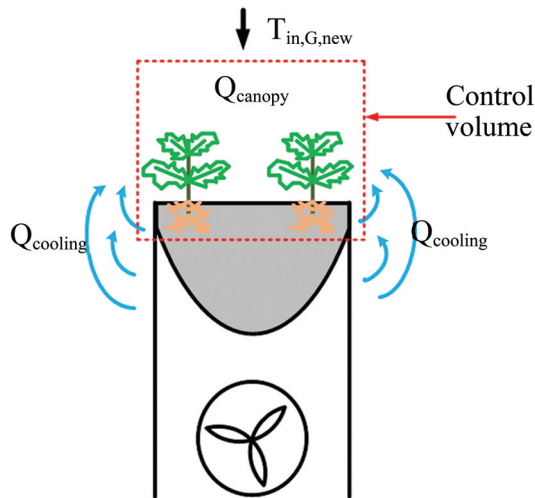
$$T_{in,G}^{t+\Delta t} = T_{in,G}^t + \frac{Q_S + Q_G + Q_{Ven/Infil} + Q_{Plant} + Q_{Evap}}{\rho_{in,G} V_G C_{p,in,G}} \Delta t \quad (10)$$

โดยที่

$T_{in,G}^t$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่เวลาเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{in,G}^{t+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่เวลาถัดไป ($^{\circ}\text{C}$)
Δt	คือ เวลา (s)

สมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

สำหรับการทำสมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่อากาศในโรงเรือนจะถ่ายเทความร้อนให้แก่ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ โดยตั้งสมมติฐานว่า อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากแบบจำลอง ($T_{in,G,new}$) เท่ากับอุณหภูมิอากาศเหนือทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ และคิดการระบายอากาศกรณีที่ทรงพุ่มได้รับความเย็นจากระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

จากรูปที่ 3 สามารถเขียนสมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้ดังสมการที่ (11) - (14)

$$\rho_{a,c} V_{c,b} C_{p,c} \frac{dT_c}{dt} = Q_{Cooling} + Q_{Cooling,tube} \quad (11)$$

$$Q_{Cooling} = \dot{m}_{o,vent} C_{p,a} (T_{o,vent} - T_{in,G,new}) \quad (12)$$

$$Q_{Cooling,tube} = h_r A_{tube} (T_{tube} - T_{in,G,new}) \quad (13)$$

$$T_{canopy}^{t+\Delta t} = T_{canopy}^t + \left[\frac{(Q_{Cooling} + Q_{Cooling,tube}) \Delta t}{\rho_{a,c} c_{p,a} V_{c,b}} \right] \quad (14)$$

โดยที่

A_{tub}	คือ พื้นที่ผิวท่อน้ำเย็น (m^2)
$C_{p,a}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี ($J/kg \cdot K$)
h_r	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของท่อน้ำเย็น ($W/m^2 \cdot K$)
$\dot{m}_{o,vent}$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ (kg/s)
$T_{o,vent}$	คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ($^{\circ}C$)
T_{tube}	คือ อุณหภูมิอากาศผิวท่อน้ำเย็น ($^{\circ}C$)
$T_{canopy}^{t+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีที่เวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}C$)
T_{canopy}^t	คือ อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีที่เวลาเริ่มต้น ($^{\circ}C$)
$T_{o,vent}$	คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ($^{\circ}C$)
$T_{in,G,new}$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากแบบจำลอง ($^{\circ}C$)
$V_{c,b}$	คือ ปริมาตรบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี (m^3)
$Q_{Cooling,tube}$	คือ ความสามารถในการทำความเย็นของระบบท่อน้ำเย็น (W)
$\rho_{a,c}$	คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้งบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี (kg/m^3)

สมดุลความชื้นของอากาศ

การวิเคราะห์สมดุลความชื้นสามารถหาได้จากการทำสมดุลมวลและสมดุลมวลอากาศชื้น พิจารณาได้จากกระบวนการผสมอากาศที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ มวลอากาศเดิมที่อยู่บริเวณทำการศึกษากับมวลอากาศที่ออกจากระบบ ผสมกันเป็นมวลอากาศใหม่ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15) - (17) [15]

สมดุลมวล

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_{new} \tag{5}$$

สมดุลมวลอากาศชื้น

$$\dot{m}_1 \omega_1 + \dot{m}_2 \omega_2 = \dot{m}_{new} \omega_{new} \tag{6}$$

สมการสมดุลความชื้น

$$RH_{new} = \frac{\omega_{new} P_{atm}}{(0.622 + \omega_{new}) P_{vs,T(simulation)}} \tag{7}$$

โดยที่

\dot{m}_1	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ออกจากระบบ (kg/s)
\dot{m}_2	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่อยู่บริเวณทำการศึกษาคือ (kg/s)

\dot{m}_{new}	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศใหม่ที่ผสมระหว่างที่ออกจากระบบ กับที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg/s)
P_{atm}	คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)
$P_{vs,T(simulation)}$	คือ ความดันไออิ่มตัว (kPa)
ω_1	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากระบบ (kg _w /kg _{da})
ω_2	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg _w /kg _{da})
ω_{new}	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ผสมระหว่างที่ออกจากระบบกับ ที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg _w /kg _{da})

วิธีดำเนินการวิจัย

โรงเรือนและระบบทำความเย็น

การศึกษาระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและร่วมกับการใช้ท่อน้ำเย็นบริเวณรางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ได้ทำการทดสอบ ณ โรงเรือนของคณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ เป็นโรงเรือนหลังคาโค้งคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน พรางคลุมด้วยตาข่ายกันแมลง กว้าง 6 m ยาว 24 m สูง 4.8 m มีช่องระบายอากาศด้านบนหลังคากว้าง 0.3 m ภายในโรงเรือนมีรางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ขนาดกว้าง 0.3 m ยาว 21 m และสูง 1 m จำนวน 5 ราง ด้านล่างของแต่ละรางปลูกติดตั้งพัดลมระบายอากาศชนิด Axial Fan ขนาด 50 W และติดตั้งระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System, ECS) ประกอบด้วย แผ่นระเหยน้ำชนิดเซลลูโลส พื้นที่หน้าตัด 14.04 m² ปั้มน้ำขนาด 373 W และถังน้ำขนาด 540 Liter ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) สำหรับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่นั้นได้ติดตั้งพลาสติกครอบรางปลูก หรือเรียกว่า Skirt Plastic (SP) โดยเว้นช่องว่างขนาด 0.10 m ให้อากาศใต้รางปลูกไหลขึ้นมาสัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ และใช้ท่อน้ำเย็น (Cooling Tube, CT) ติดตั้งภายในรางปลูกบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ ดังรูปที่ 4(ค) และ 4(ง) ท่อน้ำเย็นทำจากท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm ยาว 21 m วางไว้บนรางปลูกจำนวน 1 กลับ ใช้ปั้มน้ำขนาด 373 W สูบน้ำจากถังน้ำขนาด 70 Liter ซึ่งเป็นน้ำเย็นที่ได้จากระบบทำความเย็นแบบระเหยผ่านท่ออะลูมิเนียม



(ก) ระบบทำความเย็นแบบระเหย



(ข) พัดลมระบายอากาศ

รูปที่ 4 ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบระเหย



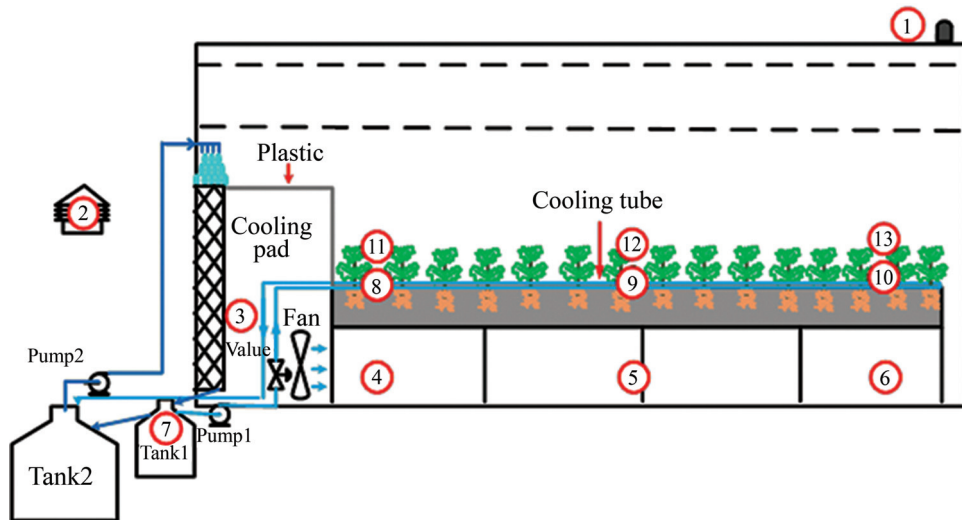
(ค) การบังคับทิศทางอากาศ



(ง) ท่อน้ำเย็น

รูปที่ 4 ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบระเหย (ต่อ)

การทำงานของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 5 เริ่มจากปั้มน้ำตัวที่ 2 สูบน้ำจากถังที่ 2 ปล่ยผ่านแผ่นระเหยน้ำจนเปียกชุ่ม พัดลมระบายอากาศใต้รางปลูกดูอากาศแวดล้อมบริเวณภายนอกโรงเรือนที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำผ่านแผ่นระเหยน้ำ ได้อากาศเย็นและชื้นสะสมอยู่บริเวณห้องกักเก็บอากาศหน้าแผ่นระเหยน้ำไหลก่อนไหลเข้าสู่ระบบบังคับทิศทางอากาศ สำหรับน้ำที่ผ่านแผ่นระเหยน้ำแล้วจะมีอุณหภูมิลดลงจึงปล่อยลงสู่ถังน้ำที่ 1 และใช้ปั้มน้ำจากถังที่ 1 ไปหมุนเวียนในท่ออะลูมิเนียมที่ติดตั้งไว้บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ตลอดความยาวรางปลูก เมื่อน้ำไหลจนครบรอบรางปลูกแล้วจะไหลเวียนกลับลงถังน้ำที่ 2



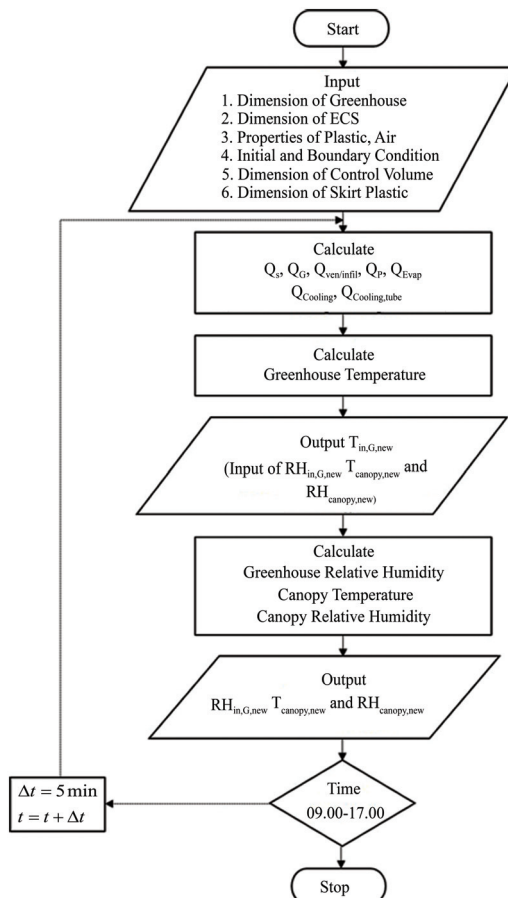
รูปที่ 5 หลักการทำงานของระบบทำความเย็น

สำหรับกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กรณีทดสอบกับรางปลูก 3 ราง ได้แก่ กรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ (ECS+SP) กรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT) และกรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS) ในการเก็บข้อมูลทำการวัดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์บริเวณตำแหน่งสูงสุดของหลังคาโรงเรือน (จุดที่ 1) โดยใช้ Pyranometer (ยี่ห้อ Apogee, Resolution $\pm 1 \text{ W/m}^2$)

ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดที่ 2) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (จุดที่ 3) และอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณใต้รางปลูกที่ระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ 2 m, 12 m, และ 22 m สูงจากพื้นโรงเรือน 0.3 m (จุดที่ 4-6) โดยใช้ Temp & RH Data Logger (ยี่ห้อ TENMARS, Resolution ± 0.1 °C and ± 0.1 %RH) วัดอุณหภูมิผิวท่อและน้ำในถังที่ 1 (จุดที่ 7 - 10) วัดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตอร์วเบอร์รี่ (จุดที่ 11 - 13) โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล (Type K) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล TSUS/Ez Data Logger ทำการวัดความเร็วอากาศ (จุดที่ 3 - 6) ใช้ Hot-Wire Anemometer (ยี่ห้อ TENMARS, Resolution ± 0.1 m/s) ทำการบันทึกข้อมูลการทดลองทุก ๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 09.00 - 17.00 น.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2013 วิธีการคำนวณใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสลับเนื่อง (Finite Difference Method) แบบวิธีชัดแจ้ง (Explicit Method) และกำหนดสมมติฐานว่าเป็นกระบวนการอยู่ในสภาวะกึ่งคงที่ (Quasi-Steady State) เพื่อทำนายอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนและอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตอร์วเบอร์รี่ในรูปที่ 6



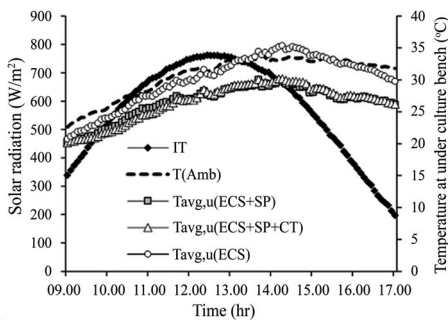
รูปที่ 6 แผนผังการคำนวณของแบบจำลองคณิตศาสตร์

ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มด้วยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและค่าคงที่ต่าง ๆ การคำนวณภาระความร้อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโรงเรือน การคำนวณหาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่ม ค่าอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่คำนวณได้จากแบบจำลองจะใช้เป็นตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทรงพุ่ม โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเท่ากับอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มเริ่มต้นของการคำนวณ ณ เวลาถัดไป สำหรับการคำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มใช้หลักการของกระบวนการผสมอากาศระหว่างมวลอากาศที่ออกจากช่องอากาศของระบบบังคับทิศทางอากาศกับมวลอากาศเดิมที่อยู่บริเวณทรงพุ่มที่รวมกันเป็นมวลอากาศใหม่บริเวณทรงพุ่ม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำการคำนวณทุก ๆ 5 นาที ตั้งแต่ 09.00 - 17.00 น.

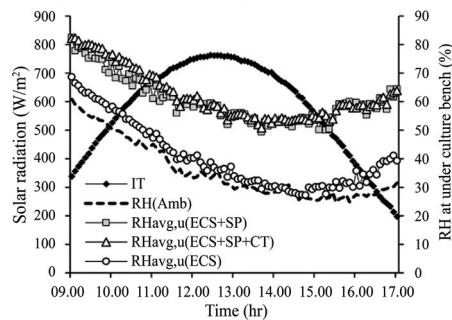
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ศักยภาพการทำความเย็นของระบบทำความเย็น

จากการทดสอบระบบทำความเย็นแบบระเหยที่ใช้ร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็นในแต่ละกรณีภายในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ ทำการทดสอบวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2561 ซึ่งเป็นวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์แปรผันตั้งแต่ 197.2 - 762.3 W/m² ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมแปรผันตั้งแต่ 22.6 - 33.9 °C และ 24.80 - 60.8 % ตามลำดับ



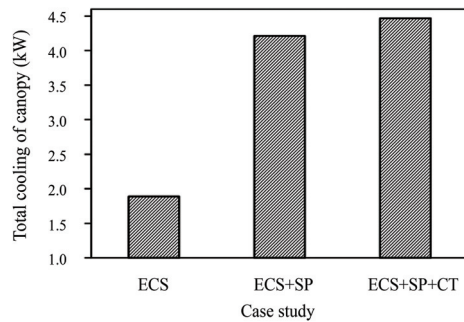
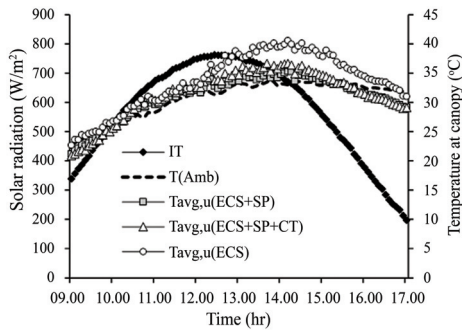
(ก) อุณหภูมิอากาศ



(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงอากาศบริเวณใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ในกรณีต่าง ๆ

ในรูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ของทั้ง 3 กรณี พบว่า อุณหภูมิอากาศในทุก ๆ กรณีรวมทั้งอากาศแวดล้อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแปรผกผันกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยกรณี ECS+SP และ ECS+SP+CT มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศใต้รางปลูกเฉลี่ยตลอดความยาวรางใกล้เคียงกันมีค่าตั้งแต่ 20.1 - 30.2 °C และ 50.0 - 82.4 % ตามลำดับ ขณะที่กรณี ECS มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแปรผันระหว่าง 20.7 - 35.4 °C และ 27.2 - 68.6 % ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษพบว่า การบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกของกรณีการใช้ ECS+SP และ ECS+SP+CT สามารถเพิ่มความเร็วกวอากาศใต้รางปลูกได้ จึงทำให้พาอากาศที่ผลิตจากระบบทำความเย็นแบบระเหยได้เร็วกว่ากรณีไม่มีการบังคับทิศทางอากาศ (ECS) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วกวอากาศตลอดความยาวรางที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.25 m/s



(ก) อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ (ข) ความสามารถในการทำความเย็น
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่และความสามารถในการทำความเย็น
ของระบบในกรณีต่าง ๆ

ในรูปที่ 8(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ของกรณีต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอากาศของทั้ง 3 กรณี มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเหมือนกับอากาศใต้รางปลูก แต่จะมีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากแนวการเคลื่อนตัวของอากาศเย็นจากแผ่นระเหยน้ำส่วนใหญ่อยู่ในแนวระนาบ ใต้รางปลูกมากกว่าทรงพุ่ม และเมื่อวิเคราะห์ที่อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มของทั้ง 3 กรณี พบว่าในช่วงเวลา 09.00 - 12.10 น. บริเวณทรงพุ่มของกรณี ECS+SP และใช้ ECS+SP+CT ได้รับค่ารังสีอาทิตย์มากกว่า กรณีการใช้ ECS ที่รางปลูกถูกบังเงาจากโครงสร้างโรงเรือน จึงทำให้อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่ม ทุกกรณีในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน และในช่วงเวลา 12.10 - 17.00 น. อุณหภูมิอากาศบริเวณ ทรงพุ่มของกรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีค่าต่ำกว่ากรณี ECS ตั้งแต่ 1.1 - 5.5 °C เนื่องจากช่วงบ่ายบริเวณทรงพุ่มของทั้ง 3 กรณีได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีความเร็วอากาศบริเวณทรงพุ่มสูงกว่าจึงทำให้ได้รับอากาศเย็น จากแผ่นระเหยน้ำได้เร็วกว่ากรณีการใช้ ECS สำหรับการใช้น้ำเย็นเพื่อเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น บริเวณทรงพุ่ม ผลการศึกษาพบว่า แทบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอากาศบริเวณทรงพุ่ม ซึ่งสามารถ อธิบายได้จากค่าความสามารถในการทำความเย็น (Cooling Capacity) ของระบบทำความเย็นตลอดทั้งวัน ในแต่ละกรณีดังรูปที่ 8(ข) พบว่า กรณี ECS กรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีค่าความสามารถ ในการทำความเย็นเท่ากับ 1.89 4.21 และ 4.47 kW ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่ากรณีที่มีการใช้ระบบทำความเย็น แบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS) ค่าความสามารถในการทำความเย็นมีค่าต่ำสุด และเมื่อนำกรณีการบังคับ ทิศทางอากาศ (ECS+SP) มาเปรียบเทียบกับกรณีการบังคับทิศทางอากาศเสริมท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT) พบว่า มีผลต่างกันน้อยมากโดยมีค่าผลต่างเท่ากับ 0.26 kW หรือคิดเป็น 5.81 % ดังนั้นความเย็นที่แผ่ออกมา จากท่อน้ำเย็นอาจไม่สามารถลดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มได้ และศักยภาพการทำความเย็นส่วนใหญ่ มาจากการใช้ระบบบังคับทิศทางอากาศ ข้อสังเกตที่ได้จากการศึกษาพบว่า หากต้องการใช้น้ำเย็น เพื่อช่วยเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นให้มากขึ้นควรมีการเปลี่ยนตำแหน่งการวางจากที่ติดตั้งระหว่าง ทรงพุ่มในรางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ เปลี่ยนมาติดตั้งไว้บริเวณทรงพุ่มด้านข้างรางปลูกเนื่องจากอากาศของ ระบบบังคับทิศทางอากาศด้วย Skirt Plastic จะไหลออกมาสัมผัสกับท่อน้ำเย็นทำให้อุณหภูมิอากาศมีค่า ลดลงก่อนที่จะสัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

Case Study	$COP_{cooling}$
แบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS)	4.48
แบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ (ECS+SP)	9.96
แบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT)	7.17

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ หรือค่า $COP_{cooling}$ ของทั้ง 3 กรณี ดังตารางที่ 1 พบว่า ค่า $COP_{cooling}$ จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำความเย็นของระบบและพลังงานสุทธิที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยกรณี ECS+SP มีค่า $COP_{cooling}$ สูงสุดลำดับต่อมาได้แก่ กรณี ECS+SP+CT และกรณี ECS ตามลำดับ แม้ว่ากรณี ECS+SP กับกรณี ECS+SP+CT มีค่าความสามารถในการทำความเย็นใกล้เคียงกัน แต่ค่า $COP_{cooling}$ มีค่าต่างกัน 2.8 เนื่องจากกรณีการใช้ ECS+SP+CT มีการใช้ปั๊มน้ำสำหรับหมุนเวียนในท่อน้ำเย็นทำให้ต้องใช้พลังงานในการขับปั๊มจึงมีค่าพลังงานสุทธิที่ใช้ในระบบมากกว่ากรณี ECS+SP

ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้เลือกผลการทดลองในวันที่ 4 มีนาคม 2561 ซึ่งเป็นวันที่มีสภาพอากาศทั่วไปท้องฟ้าโปร่ง มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อาทิตย์แปรผันตั้งแต่ 210.85 - 833.9 W/m² อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมีค่าตั้งแต่ 25 - 35.4 °C และ 18.3 - 51 % ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

Item	Relative Error	RMSE
อุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ($T_{in,G}$)	1.69 %	0.71
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน ($RH_{in,G}$)	2.84 %	1.11
อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ (T_{canopy})	4.06 %	1.58
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ (RH_{canopy})	6.14 %	2.89

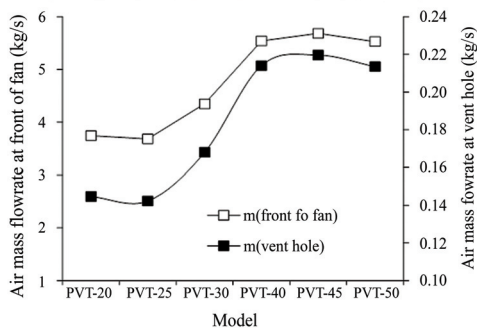
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน โดยใช้ผลจากการทำนายเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 1.69 % และ 2.84 % ตามลำดับ สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ พบว่าค่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.06 % และ 6.14 % ตามลำดับ ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าอุณหภูมิอากาศเนื่องจากใช้ค่าอุณหภูมิอากาศที่ได้จากการทำนายอากาศในโรงเรือนเป็นตัวแปรเริ่มต้นในการคำนวณสมมูลพลังงานบริเวณทรงพุ่ม สำหรับการวิเคราะห์ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ พบว่าหากค่า RMSE ที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

มีความถูกต้องและแม่นยำ [16] ซึ่งค่าจากการทำนายอุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ($T_{in,G}$) มีความคลาดเคลื่อนน้อยสุด สำหรับค่า RMSE ของความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน ($RH_{in,G}$) อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่ม ($T_{canopy,b}$) และความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่ม ($RH_{canopy,b}$) มีค่า RMSE สูงกว่า เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวใช้ค่าอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากการทำนาย ($T_{in,G}$) เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอยู่แล้วทำให้ข้อมูลแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเพิ่มขึ้นได้

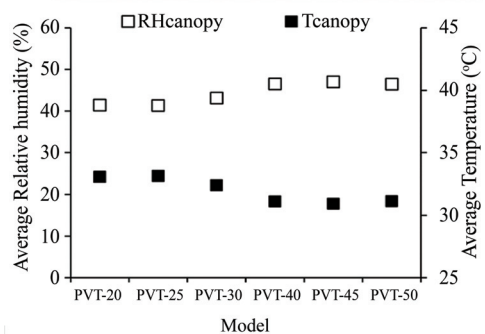
การศึกษาพารามิเตอร์เพื่อหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ทำให้ทราบว่า ศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่ม ได้แก่ ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ และความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ได้เลือกใช้พัดลมระบายอากาศที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและเป็นชนิดเดียวกันกับใช้ในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ โดยเลือกพัดลมระบายอากาศรุ่นท่อ PVT ชนิด Axial Fan [17] ทั้งหมด 6 รุ่น ได้แก่ PVT-20 PVT-25 PVT-30 PVT-40 PVT-45 และ PVT-50 ซึ่งพัดลมระบายอากาศแต่ละรุ่นให้ความเร็วอากาศบริเวณหน้าพัดลมเท่ากับ 11.14 10.96 12.94 16.49 16.92 และ 16.45 m/s ตามลำดับ และส่งผลให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศบริเวณช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศค่าแตกต่างกันด้วย

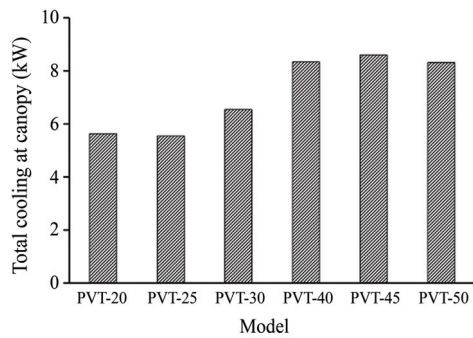


(ก) อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ
ของพัดลมแต่ละรุ่น



(ข) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย
บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

รูปที่ 9 ผลการศึกษาความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ

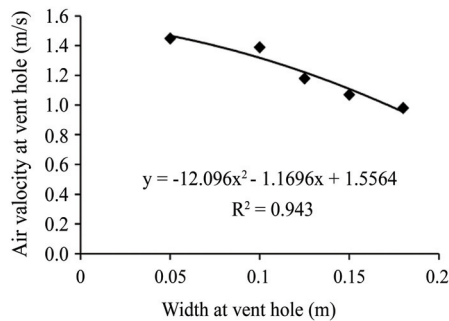


(ค) ผลรวมค่าความสามารถในการทำความเย็นต่อวัน

รูปที่ 9 ผลการศึกษาความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ (ต่อ)

จากรูปที่ 9 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการเลือกใช้พัดลมระบายอากาศทั้ง 6 รุ่น พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดแปรผันตามกับความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9(ก) และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีดังรูปที่ 9(ข) พบว่า อุณหภูมิอากาศมีค่าลดลงและความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้สูงสุด 3 °C และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงสุด 8 % เมื่อเลือกใช้พัดลมรุ่น PVT-40 PVT-45 และ PVT-50 เนื่องจากพัดลมดังกล่าวมีความเร็วอากาศที่สูงที่สุดทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ออกจากช่องเปิดที่สูงกว่ารุ่นอื่น ๆ ทำให้อากาศที่อยู่บริเวณใต้รางปลูกสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มได้ อีกทั้งค่าความสามารถในการทำความเย็นที่ระบบทำได้ต่อหนึ่งวันมีค่ามากกว่าการใช้พัดลมรุ่นอื่น ๆ ประมาณ 8.2 - 8.5 kW อย่างไรก็ตามควรเลือกใช้พัดลมระบายอากาศรุ่น PVT-40 เนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับพัดลมเดิมที่ใช้ในโรงเรือนทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยกว่ารุ่น PVT-45 และ PVT-50

สำหรับการศึกษาความกว้างของช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศซึ่งเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี เนื่องจากหากช่องเปิดมีความกว้างเพิ่มขึ้น อากาศใต้รางปลูกสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษารับรู้ความกว้างช่องเปิดให้มีขนาด 0.05 0.075 0.1 0.125 0.15 0.175 และ 0.2 m ตามลำดับ แต่จากการทดสอบพบว่า เมื่อความกว้างของช่องเปิดมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดมีค่าเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นจึงทำการหาความเร็วของอากาศที่ความกว้างของช่องเปิดขนาดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10

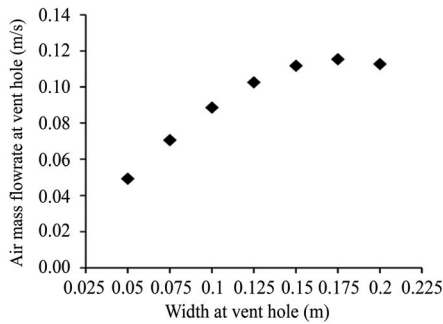


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ

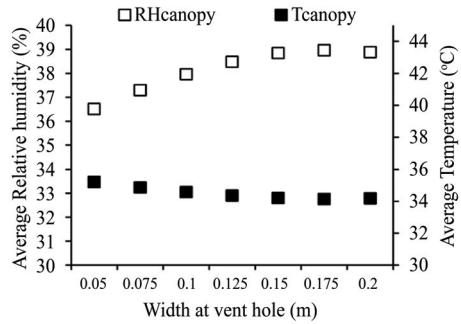
จากรูปที่ 10 พบว่า ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดแปรผกผันกับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศกับความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิด ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายความเร็วอากาศที่ช่องเปิดขนาดอื่น ๆ ได้ ดังสมการที่ (18)

$$v_{o,vent} = -12.09w_{o,vent}^2 - 1.1696w_{o,vent} + 1.5564 \quad (18)$$

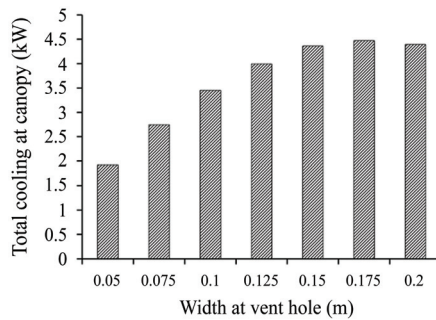
ในการศึกษาศักยภาพของระบบบังคับทิศทางอากาศในกรณีการปรับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศได้กำหนดให้ใช้พัดลมอากาศตัวเดิมที่ติดตั้งไว้ได้รางปลูกสตรอว์เบอร์รีมีความเร็วอากาศหน้าพัดลม 7.3 m/s และเลือกระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ 12 m ที่เป็นจุดกำหนดขอบเขตของระบบเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี และกำหนดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศที่ออกจากช่องเปิด จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่ช่องเปิดกว้าง 0.175 m ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (18) ดังรูปที่ 11(ก) และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีดังรูปที่ 11(ข) พบว่า อุณหภูมิอากาศมีค่าลดลงและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งและเริ่มลดลงดังรูปที่ 11(ค) จากการวิเคราะห์สาเหตุพบว่า ถึงแม้จะให้ความกว้างช่องเปิดเพิ่มขึ้นอากาศเย็นจากได้รางปลูกที่ผลิตจากระบบทำความเย็นแบบระเหยสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มได้มาก แต่หากมากเกินไปจนเกินค่าที่เหมาะสม ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดจะมีค่าลดลงจนทำให้ผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นมีค่าลดลง ดังนั้นในการเลือกพิจารณาความกว้างช่องเปิดที่เหมาะสม ควรพิจารณาจากผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นที่ทำได้ในแต่ละกรณี ซึ่งพบว่าความกว้างขนาดช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศเท่ากับ 0.175 m ให้ผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 4.47 kW



(ก) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

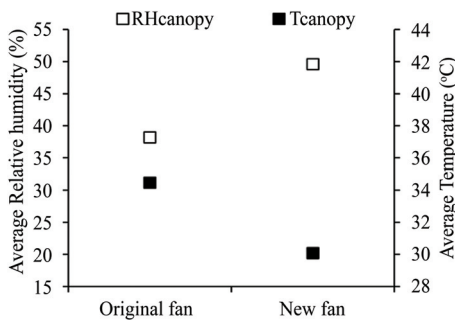


(ข) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

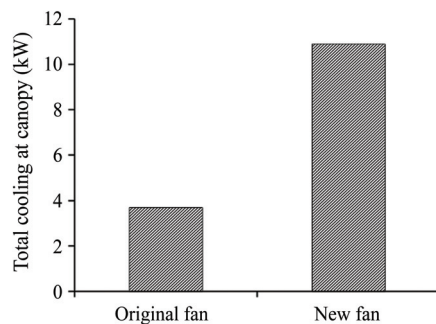


(ค) ความสามารถในการทำความเย็น

รูปที่ 11 ผลการศึกษาการปรับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่



(ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์

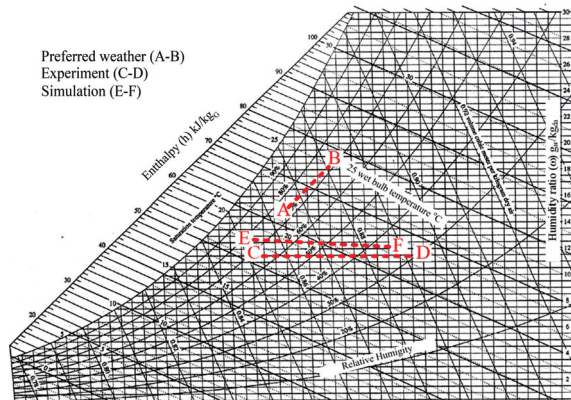


(ข) ความสามารถในการทำความเย็น

รูปที่ 12 ผลของการเปรียบเทียบศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมและเงื่อนไขเดิม

จากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบบังคับทิศทางอากาศโดยการปรับความเร็วอากาศที่ออกจากช่องเปิดและความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศพบว่า ทั้ง 2 ตัวแปรส่งผลต่อศักยภาพการทำความเย็นของอากาศบริเวณทรงพุ่ม ดังนั้นจึงนำพารามิเตอร์ความเร็วอากาศที่ออกจากช่องเปิดและความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศที่มีความเหมาะสมมาศึกษาโดยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์อีกครั้ง โดยเลือกใช้พัดลมระบายอากาศรุ่น PVT-40 (New Fan) และปรับความกว้างช่องเปิดเป็น 0.175 m เปรียบเทียบกับพัดลมระบายอากาศเดิม (Original Fan) และขนาดช่องเปิดที่ 0.10 m ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 12(ก) และ 12(ข) จากการศึกษาพบว่า จะทำให้อัตราการระบายอากาศบริเวณทรงพุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้เฉลี่ยประมาณ 4.39 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 11.4 % และค่าความสามารถในการทำความเย็นเพิ่มขึ้น 7.2 kW หรือเพิ่มขึ้น 66.12 % เมื่อเทียบกับเงื่อนไขของความเร็วกว้างช่องเปิดเดิม



รูปที่ 13 แผนภูมิไซโครเมตริกของสภาพอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ที่ได้จากการศึกษา

จากรูปที่ 13 แสดงแผนภูมิไซโครเมตริกของสภาพอากาศบริเวณทรงพุ่มที่สตรอว์เบอร์รี่ที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาพอากาศที่ต้นสตรอว์เบอร์รี่ต้องการ โดยในตอนกลางวัน สตรอว์เบอร์รี่ต้องการอุณหภูมิอากาศ 25 - 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 70 - 75 % (เส้น A - B) สำหรับสภาวะอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่จากการทดสอบใช้งานระบบความเย็นจริงพบว่า อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แปรผันระหว่าง 22.8 - 37.3 °C และ 30.67 - 68.43 % (เส้น C - D) สำหรับผลอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่จากการศึกษาแนวทางการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า มีค่า 21.23 - 35.38 °C และ 33.2 - 77.89 % (เส้น E - F) และมีค่าต่ำกว่าการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามทั้ง 2 กรณียังไม่สามารถควบคุมสภาพอากาศได้ตามที่สตรอว์เบอร์รี่ต้องการโดยเฉพาะในช่วงเที่ยงเป็นต้นไปโดยอุณหภูมิอากาศสูงกว่าประมาณ 5 - 7 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำกว่าที่ต้องการประมาณ 20 - 40 % ในช่วงเช้าของวันระบบทำความเย็นที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาซึ่งสามารถควบคุมสภาวะอากาศให้ใกล้เคียงกับความต้องการของต้นสตรอว์เบอร์รี่ได้เนื่องจากภาระโหลดความร้อนในโรงเรือนยังไม่สูงมากนัก

บทสรุป

จากการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่โดยใช้การทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น พบว่าการใช้การทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศมีอิทธิพลต่อการทำความเย็นของทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่เป็นหลัก ในขณะที่การใช้ท่อน้ำเย็นบริเวณ

ทรงพุ่มไม่สามารถช่วยลดอุณหภูมิอากาศได้ ดังนั้นการหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นของระบบ จึงมุ่งเน้นพิจารณาของการเพิ่มความเร็วอากาศได้รางปลูกและเพิ่มขนาดของความกว้างช่องเปิดของระบบ บังคับทิศทางอากาศซึ่งได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนาย จากการศึกษาพบว่า แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ และพบว่า การเพิ่มความเร็วกว้างช่องเปิดของระบบ บังคับทิศทางอากาศ เลือกใช้พดลมที่มีความเร็วอากาศที่มากขึ้นร่วมกับการเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบ บังคับทิศทางอากาศ ร่วมกันจะสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้เฉลี่ยประมาณ 4.39 °C และสามารถเพิ่มความเย็น ให้ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้มากขึ้นมากกว่า 66.12 % อย่างไรก็ตามโรงเรือนที่ใช้ในงานวิจัยยังมีความจำเป็น ที่ต้องใช้ระบบทำความเย็นอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การใช้สเปรย์หมอก หรือการใช้ตาข่ายพรางแสงเพื่อช่วย ลดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องเข้าสู่โรงเรือนในช่วงเวลาที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงเกินไป สำหรับแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปปรับใช้กับโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยในการปลูก พืชชนิดอื่นได้เช่นกัน โดยอาจใช้ทำนายค่าอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนและ บริเวณทรงพุ่มให้เหมาะสมต่อพืชชนิดนั้น ๆ ก่อนที่จะเลือกไปใช้งานจริง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง กับระบบให้มีความเหมาะสมและทำให้สภาวะอากาศในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มอยู่ในเกณฑ์ที่พืช สามารถเจริญเติบโตได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561 ขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพ บัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา นาเทเวศน์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์สถานที่วิจัยมา ณ โอกาสนี้

References

- [1] Laknizi, A., Mahdaoui, M., Ben Abdellah, A., Anoune, K., Bakhouya, M., and Ezbakhe, H. (2019). Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. **Case Studies in Thermal Engineering**. Vol. 13, pp. 100362. DOI: 10.1016/j.csite.2018.11.013
- [2] Xu, J., Li, Y., Wang, R. Z., Liu, W., and Zhou, P. (2015). Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. **Applied Energy**. Vol. 138, Issue C, pp. 291-301. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.061
- [3] Waewsak, J., Kaew-on, J., Kongruang, C., Katathirakol, S., and Nutongkaew, P. (2016). **Increasing Productivity and Input Energy Relationship with Mushroom Yield and Economic Analysis of Evaporative and Mist Cooling Greenhouse together with Automatic Solar Ventilation Systems**. Thaksin University. (in Thai)

- [4] Mehmet, A. D. and Hasan, H. S. (2015). Performance Analysis of a Greenhouse Fan-pad Cooling System: Gradients of Horizontal Temperature and Relative Humidity. **Journal of Agricultural Sciences**. Vol. 21, pp. 132-143
- [5] Romantchik, E., Rios, E., Sanchez, E., Lopez, I., and Sanchez, J. R. (2017). Determination of Energy to be Supplied by Photovoltaic Systems for Fan-pad Systems in Cooling Process of Greenhouses. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 114, pp. 1161-1168. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011
- [6] Hasan, O. Z., Atilgan, A., Buyuktas, K., and Alagoz, T. (2009). The Efficiency of Fan-pad Cooling System in Greenhouse and Building up of Internal Greenhouse Temperature Map. **African Journal of Biotechnology**. Vol. 8, No. 20, pp. 5436-5444. DOI: 10.4314/ajb.v8i20.65986
- [7] Poolkrajang, A. and Premjai, N. (2010). **Efficiency Evaluation of the Direct and Indirect Evaporative Cooling System**. Technical Education Faculty, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in thai)
- [8] Abbouda, S. K. and Almuhan, E. A. (2012). Improvement of Evaporative Cooling System Efficiency in Greenhouses. **International Journal of Latest Trends in Agriculture & Food Sciences**. Vol. 2, No. 2, pp. 83-89
- [9] Salah, H. A., Hassan, E. G., Hassan, F., Mohamed, E., and Samy, E. (2017). Analytical Investigation of Different Operational Scenarios of a Novel Greenhouse Combined with Solar Stills. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 122, pp. 297-310. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.022
- [10] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1980). **Solar Engineering of Thermal Processes**. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison
- [11] Desmarais, G., Ratti, C., and Raghavan, G. S. V. (1999). Heat Transfer Modelling of Screenhouses. **Solar Energy**. Vol. 65, Issue 5, pp. 271-284. DOI: 10.1016/S0038-092X(99)00002-X
- [12] Gupta, M. J. and Chandra, P. (2002). Effect of Greenhouse Design Parameters on Conservation of Energy for Greenhouse Environmental Control. **Energy**. Vol. 27, pp. 777-794
- [13] ASHRAE. (2009). **ASHRAE 2009 Handbook Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- [14] Funghthnakul, M. (2012). **Reduction of Temperature in Building by Evaporative Cooling**. Master Degree of Engineering, Master of Engineering (Energy Engineer) Chiang Mai University. (in Thai)
- [15] Akaratiwa, S. and Wongcharee, K. (2011). **Thermodynamics: an Engineering Approach**. Bangkok: McGraw-Hill Education Thailand. (in Thai)
- [16] Kaewwijit, T., Kerdprasop, N., and Kerdprasop, K. (2016). The Improvement of Support Vector Regression to Forecast Time Series. **Journal of Science & Technology Mahasarakham University**. Vol. 36, Issue 4, pp. 452-458. (in Thai)
- [17] Yushi Group Co., Ltd. (2019). **Ventilation Fan**. Access (15 May 2019). Available (<https://www.yushi.co.th/product-category/ventilationfan>)

การหมักย่อยเศษก้านและใบไม้รวมร่วมกับเศษอาหารในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบถังหมักเดี่ยวและแบบสองถัง

Anaerobic Digestion of Mixed Leaf and Petiole Waste and Food Waste in Single and Two Anaerobic Reactors

กมลีนประทุม ปัญญาปิง^{1*} จุฑามาศ มณีสว่าง¹ และนัฐญา บุญศิริ¹

Klinpratoom Panyaping^{1*} Jutamas Maneesawang¹ and Nuttaya Boonsiri¹

Received: June 1, 2019; Revised: September 24, 2019; Accepted: September 24, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ได้จากการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก และเศษอาหารซึ่งผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ดัดตั้งจากฟาร์มสุกร โดยใช้ถังหมักแบบถังเดี่ยวและสองถังรวม 4 ชุด ทำการทดลองชุดละ 2 ซ้ำ ใช้อัตราส่วนวัสดุหมัก คือ เศษก้านและใบไม้รวมและเศษอาหาร 3 : 2 และอัตราส่วนของเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ 0.2 ผลการศึกษาพบว่าชุดทดลองแบบถังเดี่ยวและสองถังมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.43 - 8.03 และ 6.01 - 7.59 ตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 - 35 °C การหมักร่วมแบบสองถังให้ก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงสุด 144.5 ลิตร และ 104 ลิตร ตามลำดับ การหมักเดี่ยวแบบถังเดี่ยวซึ่งเป็นชุดควบคุมที่หมักเฉพาะเศษอาหารให้ก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนน้อยที่สุด 120.75 และ 14 ลิตร ตามลำดับ ใช้เวลาเก็บกักที่เท่ากันนาน 22 วัน การหมักร่วมแบบสองถังในสภาวะที่เป็นกลางให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักร่วมแบบถังเดี่ยวอย่างมาก และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มากที่สุดในรูปของแข็งรวม ของแข็งระเหย และซีไอดีร้อยละ 75 78 และ 82 ตามลำดับ สรุปได้ว่าการหมักร่วมแบบสองถังโดยการปรับสภาพความเป็นกลางมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักร่วมแบบถังเดี่ยว จึงมีข้อเสนอแนะให้มีการศึกษาและพัฒนาการหมักร่วมแบบสองถัง ในสภาวะเป็นกลางร่วมกับการใช้ปัจจัยอื่น ๆ รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ที่เป็นของแข็ง

คำสำคัญ : เศษก้านและใบไม้รวม; เศษอาหาร; การหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน; ถังหมักเดี่ยว; ถังหมักแบบสองถัง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Chiang Mai

* Corresponding Author E - mail Address: klin41@hotmail.com, klinpratoomp@yahoo.com

Abstract

The purpose of this study was to determine biogas and methane yield, including the organic removal efficiency obtained from anaerobic digestion of mixed leaf: mango, lychee, and tree and food waste mixed with the inoculum from swine farm. Four sets of experiment using single and two anaerobic reactors were performed. Each experiment was two replicates. The ratio of mixed leaf and food waste 3 : 2, the ratio of waste and inoculum 0.2 were used. The result showed that the pH values of single and two anaerobic reactors were in the range of 6.43 - 8.03, and 6.01 - 7.59, respectively. The temperatures were in the range of 25 - 35 °C. Co-digestion in two anaerobic reactors provided the highest biogas and methane yield 144.5 L, and 104 L, respectively. Single digestion in single reactor, that was control set using only food waste in digestion, provided the lowest biogas and methane yield 120.75 L, and 14 L, respectively. The hydraulic retention time was the same in 22 days. Co-digestion in two anaerobic reactors under the neutral condition provided much more biogas and methane yield than that of the single anaerobic reactor. Besides, co-digestion in two anaerobic reactors under the neutral condition provided the highest organic removal efficiency in terms of total solids, volatile solids, and COD were 75 %, 78 %, and 82 %, respectively. In conclusion, co-digestion under neutral condition in two anaerobic reactors had the effect on biogas and methane generation more than that in the single anaerobic reactor. It is recommended to study and develop co-digestion in two anaerobic reactors using other factors, including the application for biogas production from solid organic waste.

Keywords: Mixed Leaf; Food Waste; Anaerobic Digestion; Single Anaerobic Reactor, Two Anaerobic Reactors

บทนำ

จากปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาเศษขยะใบไม้ต่าง ๆ ในที่โล่งภายหลังการเก็บเกี่ยวและตัดแต่งต้นไม้ โดยเฉพาะในเขตภาคเหนือมีการเผาปลูกลม่วง ลินจี่ และลำไยเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัญหาดังกล่าวยังขาดการจัดการที่ดี ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง จึงมีแนวคิดในการใช้ประโยชน์สิ่งเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร เพื่อช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยการนำเศษเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้มได้

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการหมักของสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย เช่น จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน หรือ เมทาโนเจน และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด มาช่วยย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน กระบวนการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ต่าง ๆ ทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิต

ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลง ตามลำดับชั้นต่าง ๆ ของการหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrogenesis) อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) อะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis) และเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) จนได้ผลผลิตคือก๊าซมีเทน [1] - [2]

จากการศึกษาที่ผ่านมา [3] - [6] พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน เป็นการแยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะช่วยให้เชื้อจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนมีการเจริญเติบโตที่เหมาะสม และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น และพบว่าการแยกถังปฏิกิริยาสามารถปรับคุณสมบัติของเหลวหรือวัตถุดิบที่เข้าระบบให้มีความเหมาะสมกับการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบถังเดียวและสองถัง โดยการปรับสภาวะการทำงานของถังทั้งสองแบบให้มีความเป็นกลาง แตกต่างจากการหมักแบบสองขั้นตอนซึ่งไม่มีการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และแยกถังหมักในการปรับสภาพของวัสดุหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ก่อนนำไปขยายผลในการศึกษาและใช้งานต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนของสิ่งเศษเหลือทิ้งจำพวกเศษก้านและใบไม้ ได้แก่ มะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องถิ่น เศษอาหารที่เหลือจากการบริโภคและเชื้อจุลินทรีย์หรือซีรัมจากฟาร์มของเกษตรกร ซึ่งใช้เป็นเชื้อตั้งต้นโดยใช้ถังหมักขนาด 20 ลิตร และอัตราส่วนของเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ 0.2 [7] โดยทำการป้อนอาหารเข้าระบบ 4 ครั้ง และทำการปรับสภาพให้มีความเป็นกลาง เพื่อให้ทราบผลผลิตก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทน รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ได้จากการหมักย่อยของถังหมักทั้งสองแบบ สำหรับการพัฒนาเป็นแหล่งผลิตพลังงานสะอาดที่ช่วยลดปัญหาหมอกควัน และมลพิษสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

ตัวอย่างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยอุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ดังนี้

- 1) เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น จากฟาร์มสุกรดอนแก้ว ตำบลดอนแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่
- 2) เศษอาหารจากตลาดเทพมงคล วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- 3) เศษก้านและเศษใบไม้ ได้แก่ มะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก ที่อัตราส่วน สด : แห้ง 3 : 1 ซึ่งได้จากการศึกษา [8]
- 4) ถังหมักก๊าซชีวภาพ 20 ลิตร จำนวน 12 ใบ
- 5) ถังเก็บแก๊สขนาด 10 ลิตร จำนวน 12 ถัง
- 6) เครื่องปั่นย่อยใบไม้และกิ่งไม้แบบหมุนสับ
- 7) เครื่องปั่นอาหาร จำนวน 1 เครื่อง

รายละเอียดชุดทดลองการหมักย่อยแบบถังเดียวและสองถัง

ชุดทดลองการหมักย่อยแบบถังเดียวและสองถัง ประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ในการหมักดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดชุดทดลองการหมักย่อยแบบถังเดี่ยวและสองถัง

ชุดที่	รายละเอียดชุดทดลอง	จำนวนชุดทดลอง
1. SR	เศษก้านและใบไม้รวม 600 กรัม + เศษอาหาร 400 กรัม + เชื้อจุลินทรีย์ 10 ลิตร	2
2. CSR	เศษอาหาร 400 กรัม + เชื้อจุลินทรีย์ 10 ลิตร	2
3. TR	SR1 : เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 5 ลิตร SR2 : เศษก้านใบไม้รวม 600 กรัม + เศษอาหาร 400 กรัม + เชื้อจุลินทรีย์ 5 ลิตร	2
4. CTR	CSR1 : เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 5 ลิตร CSR2 : เศษอาหาร 400 กรัม + เชื้อจุลินทรีย์ 5 ลิตร	2

หมายเหตุ : การหมักแบบสองถังประกอบด้วยชุดถังหมักเดี่ยว จำนวน 2 ชุด
 SR ชุดถังหมักแบบถังหมักเดี่ยว (Single Reactor)
 CSR ชุดควบคุมแบบถังหมักเดี่ยว (Control Single Reactor)
 TR ชุดถังหมักแบบสองถัง (Two Reactors) ประกอบด้วย ชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 1 (SR1) และชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 2 (SR2)
 CTR ชุดควบคุมแบบสองถังหมัก (Control Two Reactors) ประกอบด้วย ชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 1 (CSR1) และชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 2 (CSR2)

การเตรียมระบบหมักและทำการเดินระบบหมัก

ประกอบด้วยชุดทดลองถังหมักก๊าซชีวภาพแบบถังเดี่ยวและแบบสองถัง ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1 - 2)

1) ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพแบบถังหมักเดี่ยว (Single Reactor: SR) (รูปที่ 1)

ก. วิเคราะห์หาค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) ของแข็งระเหย (Volatile Solids: VS) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายในรูปของซีโอดี (COD) ของวัสดุหมัก และ pH ของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการหมัก และตรวจวัดอุณหภูมิ

ข. นำเศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร ที่อัตราส่วน 3 : 2 กวนผสมให้เข้ากันกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นจำนวน 10 ลิตร แล้วใส่ลงในถังหมักก๊าซแบบถังเดี่ยว

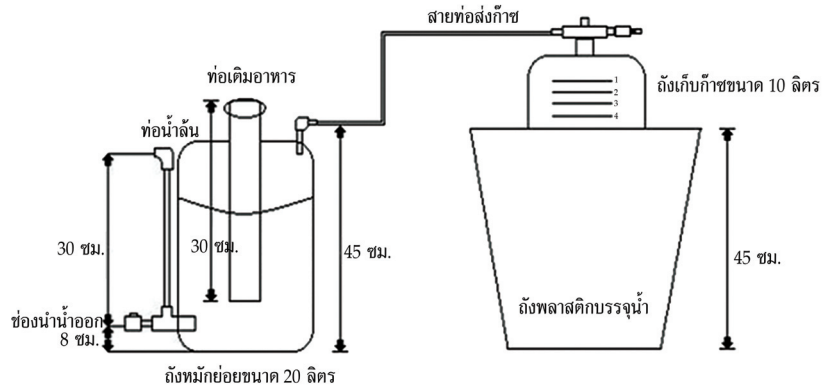
ค. เก็บน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่า TS, VS, pH, COD, และอุณหภูมิก่อนเข้าระบบ และทำการปิดฝาถังหมัก

ง. ตรวจวัดปริมาณก๊าซ pH และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทุกวัน

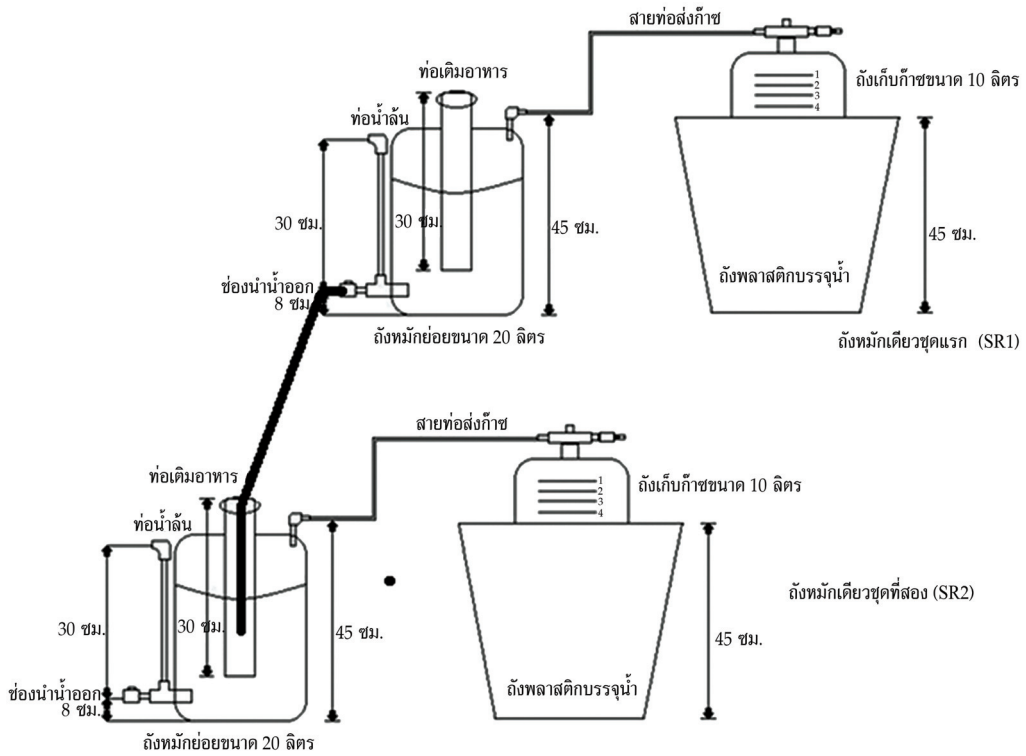
จ. ทำการป้อนอาหาร คือ เศษอาหาร โดยใช้กรวยปากปิดเสียบต่อเข้ากับท่อเติมอาหาร เมื่อปริมาณก๊าซเริ่มคงที่ กล่าวคือ ไม่มีปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีก จึงทำการป้อนเศษอาหารทุก ๆ 3 วัน จำนวนทั้งหมดรวม 4 ครั้ง และทำการกวนผสมแต่ละครั้งนาน 15 นาที ซึ่งเป็นการกวนเข้าในถังหมักทุกครั้งที่มีการป้อนเศษอาหาร

ฉ. วัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก่อนการป้อนเศษอาหารครั้งที่ 1 - 4 และวันสิ้นสุดการเดินระบบ

ช. ตรวจวัดปริมาณ TS, VS, pH, COD, และอุณหภูมิ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ



รูปที่ 1 ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพแบบถังหมักเดียว



รูปที่ 2 ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองถัง

2) ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพแบบถังหมักสองถัง (Two Reactors: TR) (รูปที่ 2)

ก. วิเคราะห์หาค่า TS, VS, COD, และ pH ของตัวอย่างวัสดุที่ใช้หมัก เช่นเดียวกับชุดถังหมักแบบถังเดียว

ข. นำเศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ที่อัตราส่วนและจำนวนเท่ากับกับชุดถังหมักแบบถังเดียวมาผสมให้เข้ากัน แล้วใส่ลงในถังหมักก๊าซแบบถังเดียว ซึ่งเป็นถังหมักชุดแรก

ค. เก็บน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่า TS, VS, COD, pH, และอุณหภูมิก่อนเข้าระบบ และทำการปิดฝาถังหมัก

ง. ตรวจวัดปริมาณก๊าซ pH และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทุกวัน

จ. วัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ก่อนทำการถ่ายเทวัสดุหมักจากถังหมักก๊าซแบบถังเดี่ยว ซึ่งเป็นถังหมักชุดแรกไปยังถังหมักก๊าซแบบถังเดี่ยวอีกชุดหนึ่ง ซึ่งเป็นถังหมักแบบถังเดี่ยวชุดที่สอง

ฉ. ทำการถ่ายเทวัสดุหมักจากถังหมักก๊าซแบบถังเดี่ยวชุดแรก โดยใช้ท่อสายยางเสียบต่อจากก๊อกที่อยู่ด้านล่างของถังหมักชุดแรก ไปยังก๊อกที่อยู่ด้านล่างของถังหมักชุดที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 2

ช. ทำการป้อนเศษอาหารและทำการกวนผสม หลังจากทำการถ่ายถังหมักแล้ว 2 วัน โดยใช้วิธีเดียวกับแบบถังเดี่ยวรวม 4 ครั้ง

ซ. วัดองค์ประกอบก๊าซ ก่อนการป้อนเศษอาหารครั้งที่ 1 - 4 รวมทั้งวันสิ้นสุดการเดินระบบ

ฅ. ตรวจวัดปริมาณ TS, VS, pH, COD, และอุณหภูมิ เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ

พารามิเตอร์และการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญจากผลการทดลอง

ประกอบด้วยค่า TS, VS, COD, และ pH ของวัสดุหมักทุกชนิด วัสดุหมักก่อนและหลังการเดินระบบ และค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids: MLVSS) ของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นรวมทั้งค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของเศษก้านและใบไม้รวมและเศษอาหารตามวิธีมาตรฐาน [9] และทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนในหน่วยลิตร โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่คำนวณได้มาจากค่าร้อยละของมีเทนที่วัดได้โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี (Model 7890, Agilent, USA) และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งวัดค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ และคำนวณหาค่าร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ TS, VS, และ COD ตลอดจนคำนวณหาความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ได้

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลของลักษณะทางเคมีของวัสดุหมักที่ใช้ในการหมักย่อย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ใช้ในการหมักย่อยสลายเศษก้านใบไม้กับเศษอาหาร โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมักย่อยที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี				
	TS (mg/l)	VS (mg/l)	COD (mg/l)	MLVSS (mg/l)	pH
เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น	40,033±3,970.41	21,308±3,535.53	56,695±992.07	21,600±141.42	8.06±0.01
เศษอาหาร	168,763±922.77	148,218±1,488.46	264,000±26,870.06	-	5.72±0.01
เศษก้านและใบไม้รวม	60,280±509.12	47,260±2,124.86	61,689±2,976.92	-	5.99±0.00

โดยพบว่าเศษอาหารมีค่า TS, VS, และปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีมากกว่าเศษก้านและใบไม้รวม และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น และยังมีค่าความเป็นกรดมากที่สุด เนื่องจากเศษอาหารมีสารอินทรีย์สูงกว่าเชื้อจุลินทรีย์และเศษก้านและใบไม้รวม สอดคล้องกับผลการศึกษา [4] ส่วนเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก ร่วมกับเศษอาหาร มีค่าผลการวิเคราะห์ C/N 25.18 ซึ่งแตกต่างจากค่า C/N ของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และไทร (47.35) [10] และ 30.90 ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนดังกล่าวจัดว่ามีความเหมาะสมในการหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน [11]

2. ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของวัสดุหมักย่อยก่อนเริ่มเดินระบบ

ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของวัสดุหมักย่อยก่อนเริ่มเดินระบบ มีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของวัสดุหมักย่อยก่อนเริ่มเดินระบบ

ชุดทดลอง	TS เซ้าระบบ (mg/l)	VS เซ้าระบบ (mg/l)	COD (mg/l)	VS/TS	pH	
					SR1	SR2
1. SR	103,693±9,804.04	80,975±1,725.34	93,676.6±3,230.98	0.78	7.42±0.06	-
2. CSR	87,290±2,545.58	65,165±424.26	85,108.8±807.80	0.75	7.22±0.04	-
3. TR	115,780±14,757.32	89,288±11,395.03	95,961.6±4,846.79	0.77	7.28±0.01	7.40±0.04
4. CTR	83,940±2,927.42	59,948±173.24	81,110.4±1,615.60	0.71	7.42±0.06	7.30±0.01

หมายเหตุ	SR	ชุดถังหมักแบบถังหมักเดียว (Single Reactor)
	CSR	ชุดควบคุมแบบถังหมักเดียว (Control Single Reactor)
	TR	ชุดถังหมักแบบสองถัง (Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดียวชุดที่ 1 (SR1) และชุดถังหมักเดียวชุดที่ 2 (SR2)
	CTR	ชุดควบคุมแบบสองถังหมัก (Control Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดียวชุดที่ 1 (CSR1) และชุดถังหมักเดียวชุดที่ 2 (CSR2)

จากตารางที่ 3 ก่อนเริ่มเดินระบบค่า pH ของวัสดุหมักพบว่ามีค่าความเป็นกรด จึงมีการปรับค่า pH โดยการเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) ให้มีความเป็นกลาง ซึ่งจะช่วยให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น ค่า TS, VS, และค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ก่อนเริ่มเดินระบบของชุดทดลองทั้งหมด มีค่าสูงถึงสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของ VS/TS ระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมทั้งสองแบบ พบว่าชุดทดลองทั้งหมดมีค่าอัตราส่วน VS/TS อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน (0.71 - 0.78) เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าการกวนผสมของวัสดุแบบกวนช้ามีผลต่อการหมักย่อยได้ลดลง แต่การกวนผสมให้เข้ากันก่อนการเดินระบบหมักมีส่วนช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น

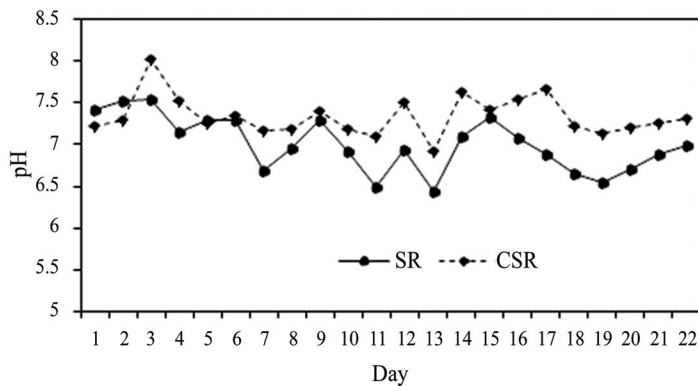
3. ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อย

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยสลายของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก ร่วมกับเศษอาหาร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH) ของชุดถังหมักย่อยแบบถังเดี่ยว (SR)

ค่า pH เฉลี่ยของชุดถังหมักย่อยแบบถังเดี่ยว ได้แก่ ชุดทดลอง SR ซึ่งเป็นการหมักร่วมของเศษก้านและใบไม้รวมร่วมกับเศษอาหาร พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH อยู่ระหว่าง 6.43 - 7.55 ส่วนชุดทดลอง CSR ซึ่งเป็นการหมักย่อยเศษอาหารเพียงอย่างเดียวมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.92 - 8.33 ซึ่งเป็นผลจากการปรับ pH ของระบบหมัก รวมทั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในระบบที่อุณหภูมิระหว่าง 25 - 35 °C ซึ่งจัดเป็นจุลินทรีย์แบบ Mesophilic [9] แสดงว่ามีการหมักย่อยเกิดขึ้นภายในระบบหมักของชุดทดลอง SR ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรียชนิด Mesophilic ที่มีการทำงานอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 25 - 40 °C [9]

การเปลี่ยนแปลงของค่า pH มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นผลจากการปรับค่า pH ให้มีความเป็นกลาง

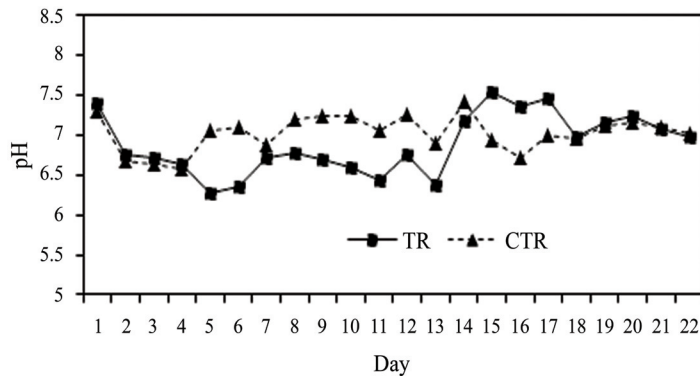


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า pH เฉลี่ยของชุดการหมักย่อยแบบถังเดี่ยว

พบว่าค่า pH ในชุดทดลอง CSR มีค่าสูงกว่าถัง SR เล็กน้อย เนื่องจากการหมักย่อยเศษอาหารเพียงอย่างเดียว จึงทำให้มีสภาวะความเป็นกรดที่มากกว่า

3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เฉลี่ยของชุดถังหมักย่อยแบบสองถัง (TR)

ค่า pH เฉลี่ยของชุดถังหมักย่อยแบบสองถัง ได้แก่ ชุดทดลอง TR ซึ่งเป็นการหมักร่วมของเศษก้านและใบไม้รวมร่วมกับเศษอาหาร ประกอบด้วย ชุดถังหมัก SR1 ที่มีการถ่ายถังหมักในวันที่ 4 จากถังหมักชุดแรกมายังชุดที่สอง SR2 และชุดทดลอง CTR ซึ่งเป็นชุดควบคุมที่มีเฉพาะเศษอาหารหมักประกอบด้วย CTR1 และ CTR2 ทั้ง 2 ชุด เพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ในสภาวะที่มีการปรับค่า pH ให้มีความเป็นกลางนั้น พบว่ามีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.79 - 7.24 และ 6.27 - 7.54 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 และมีการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบหมักของชุดทดลอง TR ที่อุณหภูมิระหว่าง 25 - 35 °C เช่นเดียวกับชุดทดลอง SR เนื่องจากทำการทดลองในถังหมักในเวลาเดียวกันและภายในห้องที่มีสภาวะของอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงอุณหภูมิปกติของประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตร้อน



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่า pH เฉลี่ยของชุดการหมักย่อยแบบสองถังหมัก

จากรูปที่ 4 พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในถังหมักแบบสองถังค่อนข้างดีกว่าการหมักแบบถังเดียว ค่าการเปลี่ยนแปลง pH ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการปรับ pH ให้มีความเป็นกลางอยู่เสมอ จึงทำให้มีสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อย อย่างไรก็ตาม การหมักย่อยที่ดีต้องพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นผลจากการใช้อัตราส่วนของวัสดุหมักและอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้

4. ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของวัสดุหมักย่อยเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ

ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของวัสดุหมักย่อยเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ พบว่ามีระยะเวลาเก็บกักนาน 22 วัน เป็นผลจากค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณคงที่ กล่าวคือเป็นค่าที่ไม่เพิ่มขึ้นและลดลงต่ำกว่าค่าที่ลดลงน้อยที่สุดที่เข้าใกล้ศูนย์ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ของวัสดุเหลือทิ้งผสมเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ

ชุดทดลอง	TS เข้าระบบ(mg/l)	VS เข้าระบบ (mg/l)	COD (mg/l)	VS/TS	pH
1. SR	32,205±1,640.49	23,365±4,094.15	31,194.80±484.79	0.72	6.99±0.07
2. CSR	34,913±128.69	25,823±357.09	33,124.80±2,201.65	0.74	7.31±0.03
3. TR	26,063±3,814.84	16,585±2,644.58	24,681.60±3,878.34	0.63	6.97±0.04
4. CTR	21,025±8,612.56	13,528±7,300.88	18,511.20±6,787.09	0.64	7.02±0.08

หมายเหตุ SR ชุดถังหมักแบบถังหมักเดียว (Single Reactor)
 CSR ชุดควบคุมแบบถังหมักเดียว (Control Single Reactor)
 TR ชุดถังหมักแบบสองถัง (Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดียวชุดที่ 1 (SR1) และชุดถังหมักเดียวชุดที่ 2 (SR2)
 CTR ชุดควบคุมแบบสองถังหมัก (Control Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดียวชุดที่ 1 (CSR1) และชุดถังหมักเดียวชุดที่ 2 (CSR2)

จากตารางที่ 4 เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบพบว่าค่า TS, VS, COD, VS/TS, และ pH มีค่าลดลง โดยเฉพาะค่า VS/TS ของถังหมักแบบสองถังมีค่าลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสารอินทรีย์ก่อนและหลังเดินระบบ พบว่าการหมักร่วมแบบถังเดี่ยว (SR) หลังเดินระบบลดลงเป็น 1.08 เท่าของสารอินทรีย์ก่อนเดินระบบ

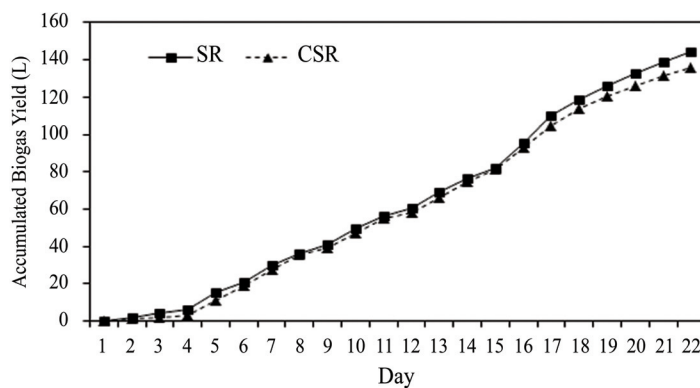
ส่วนชุดควบคุมซึ่งเป็นการหมักเดี่ยว (CSR) หลังเดินระบบลดลงเป็น 1.01 เท่าของสารอินทรีย์ก่อนเดินระบบ ส่วนการหมักร่วมแบบสองถัง (TR) หลังเดินระบบลดลงเป็น 1.22 เท่าของสารอินทรีย์ก่อนเดินระบบ ส่วนชุดควบคุมซึ่งเป็นการหมักเดี่ยวแบบสองถัง หลังเดินระบบ (CTR) ลดลงเป็น 1.11 เท่าของสารอินทรีย์ก่อนเดินระบบ กล่าวได้ว่า การหมักร่วมแบบสองถังสามารถลดค่าพารามิเตอร์ของสารอินทรีย์ได้มากที่สุด เนื่องจากการแยกถังหมักช่วยปรับสภาพของจุลินทรีย์และวัสดุหมักให้มีความพร้อมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังหมักชุดที่สองได้มากขึ้น [10] จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสารอินทรีย์โดยเฉพาะ VS/TS มีค่าลดลง

5. ผลของผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักย่อยสลาย

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักย่อยสลายของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก และเศษอาหารในถังหมักแบบถังเดี่ยวและสองถัง ดังแสดงในรูปที่ 5 - 6

5.1 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากการหมักแบบถังเดี่ยว (SR)

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยที่เกิดจากการหมักแบบถังเดี่ยว (SR) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลอง SR และชุดควบคุม CSR พบว่าชุดทดลอง SR ซึ่งเป็นการหมักร่วมของเศษก้านและใบไม้รวมร่วมกับเศษอาหาร ให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากกว่าชุดทดลอง CSR ซึ่งเป็นการหมักย่อยเศษอาหารเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5

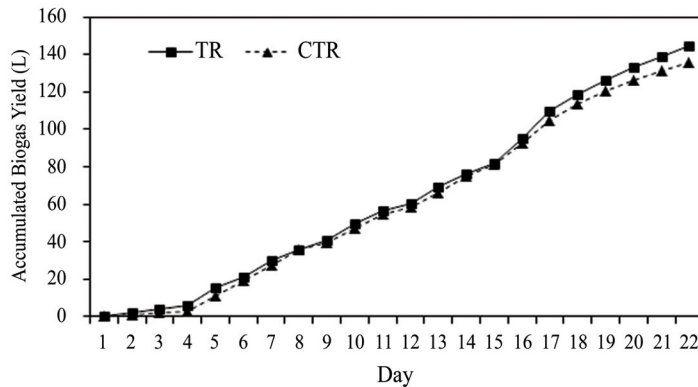


รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยแบบถังเดี่ยว

จากรูปที่ 5 พบว่าชุดทดลองถังหมักแบบถังเดี่ยว SR และ CSR มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยชุด SR และ CSR ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจำนวน 139.5 ลิตร และ 120.75 ลิตร ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาหมักหรือเก็บกักนานเท่ากัน 22 วัน

5.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากการหมักแบบสองถัง (TR)

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยที่เกิดจากการหมักแบบสองถัง (TR) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างชุดทดลอง TR (144.5 ลิตร) และชุดควบคุม CTR (135.7.5 ลิตร) พบว่าให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมไม่ต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 6

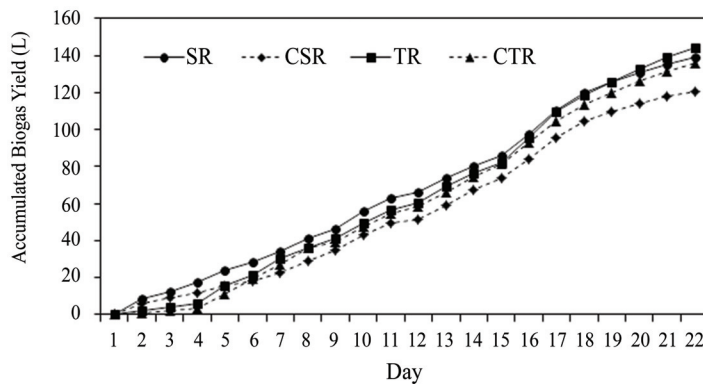


รูปที่ 6 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยแบบสอง

โดยชุดทดลอง TR และ CTR ภายหลังจากการถ่ายถังในวันที่ 4 แล้ว พบว่ามีปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นในวันที่ 5 และลดลงในวันที่ 6 จึงทำการป้อนเศษอาหารในวันที่ 6 เพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและทำงานได้ดี และมีการป้อนเศษอาหารอีก ในวันที่ 9 12 และ 15 ตามลำดับ จนสิ้นสุดการเดินระบบในวันที่ 22 ของการทดลอง เนื่องจากปริมาณก๊าซมีค่าคงที่ คือ ไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงต่ำกว่าค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้น

5.3 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากการหมักย่อยแบบถังเดียวและสองถัง (SR และ TR)

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเกิดจากการหมักย่อยแบบถังเดียวและสองถังดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ปริมาณก๊าซสะสมเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยสลายในทุกชุดการทดลอง

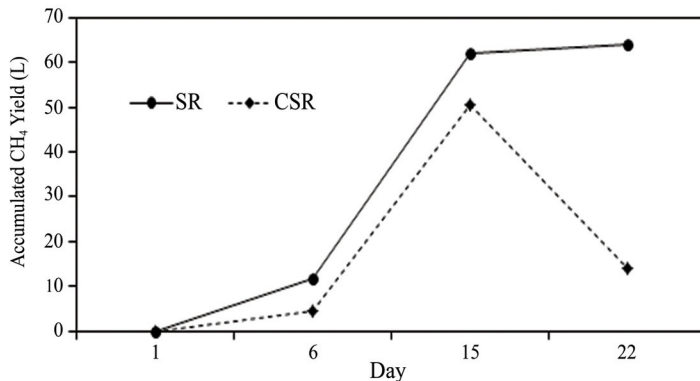
โดยพบว่าการหมักร่วมระหว่างเศษก้านและใบไม้ของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก และเศษอาหาร ในชุดทดลองแบบสองถัง TR ให้ปริมาณก๊าซสะสมเฉลี่ยสูงสุด (144.5 ลิตร) รองลงมาเป็นการหมักร่วมแบบถังเดี่ยว SR (139.25 ลิตร) และการหมักเดี่ยวแบบสองถัง CTR (135.75 ลิตร) ส่วนการหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียวในชุดทดลองแบบถังเดี่ยว CSR ให้ปริมาณก๊าซเฉลี่ยน้อยที่สุด (120.75 ลิตร) ใช้ระยะเวลาเก็บกักนาน 22 วันเท่ากัน และมีค่าแตกต่างจากชุดทดลองแบบถังเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

6. ผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบถังเดี่ยวและแบบสองถัง

ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบถังเดี่ยวและแบบสองถัง มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 8 - 9

6.1 ผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบถังเดี่ยว (SR)

พบว่าชุดทดลองแบบถังเดี่ยว (SR) มีค่าก๊าซมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 34.9 - 72.50 และชุดควบคุมแบบถังเดี่ยว (CSR) มีค่าก๊าซมีเทนอยู่ระหว่าง 11.70 - 72.00 เมื่อคิดเป็นปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ยจากค่าร้อยละดังกล่าว จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ทำให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบถังเดี่ยวดังรูปที่ 8

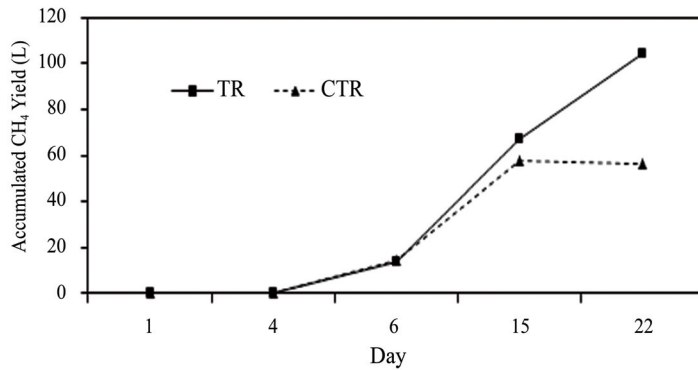


รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดถังหมักแบบถังเดี่ยว

พบว่าชุดทดลอง SR ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (63 ลิตร หรือ 1.09 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของของแข็งระเหย (VS_{removed}) มากกว่าชุดทดลอง CSR ซึ่งมีการหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียว (14 ลิตร หรือ คิดเป็น 0.36 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม VS_{removed}) ใช้ระยะเวลาเก็บกักที่เท่ากันนาน 22 วัน

6.2 ผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบสองถัง (TR)

พบว่าชุดทดลองแบบสองถัง (TR) มีค่าก๊าซมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 1.9 - 85.6 และชุดควบคุมแบบสองถัง (CTR) มีค่าก๊าซมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 0.3 - 75.4 เมื่อคิดเป็นปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ยจากค่าร้อยละดังกล่าวจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ ทำให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดถังหมักแบบสองถัง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดถังหมักแบบสองถัง

โดยพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของถังหมักแบบสองถังที่มีการหมักร่วมระหว่างเศษก้านและใบไม้ของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก และเศษอาหาร ในชุด TR ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (104 ลิตร คิดเป็น 1.43 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมของของแข็งระเหย ($VS_{removed}$) มากกว่าแบบสองถังในชุด CTR ซึ่งมีเศษอาหารอย่างเดียว (57 ลิตร หรือคิดเป็น 1.22 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม $VS_{removed}$) และการหมักร่วมแบบสองถังยังให้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุด แตกต่างแบบถังเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

7. ผลของชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดถังหมักแบบถังเดียวและแบบสองถัง

พบว่าชุดทดลองแบบสองถัง (TR) มีค่าชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพสูงที่สุดในวันที่ 15 ภายหลังจากการป้อนเศษอาหารลงในระบบหมัก จำนวน 3 ครั้ง (วันที่ 15) และเป็นวันที่ทำการป้อนเศษอาหารครั้งที่ 4 ซึ่งเป็นครั้งสุดท้ายก่อนสิ้นสุดการเดินระบบหมัก (วันที่ 22) มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดถังหมักแบบถังเดียวและแบบสองถัง

ชนิดของก๊าซ	ชุดทดลองและวันที่ทำการวัดชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ											
	SR			CSR			TR			CTR		
	วันที่ 6	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 6	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 6	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 6	วันที่ 15	วันที่ 22
CH ₄ : %	41.95	72.50	45.90	28.50	68.55	11.75	65.60	82.00	72.45	70.85	74.85	52.00
CO ₂ : %	52.55	21.00	37.25	66.00	21.00	31.25	29.00	14.00	22.00	24.65	22.15	37.00
O ₂ : %	5.50	3.50	3.00	5.50	5.00	4.00	5.40	4.00	3.00	4.50	3.00	2.50
H ₂ S : ppm	109.00	48.00	7.50	70.00	79.50	2.00	54.50	63.00	8.00	5.00	67.00	8.00
อื่น ๆ : %	0.00	3.00	13.85	0.00	5.45	53.00	0.00	0.00	2.55	0.00	0.00	8.50

หมายเหตุ : อื่น ๆ หมายถึง ก๊าซแอมโมเนีย และไอน้ำ เป็นต้น

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่วัดได้ของชุดถังหมักแบบสองถัง มีค่าร้อยละของก๊าซมีเทนสูงกว่าแบบถังเดี่ยว สอดคล้องกับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น และมีค่าร้อยละของก๊าซอื่น ๆ ของชุดถังหมักแบบสองถังน้อยกว่าแบบถังเดี่ยว สอดคล้องกับผลการศึกษา [8] เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ แม้ในถังหมักแบบสองถังมีค่าร้อยละของก๊าซมีเทนสูงกว่าแบบถังเดี่ยว แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพไม่ได้มีค่าที่เพิ่มขึ้น ยังคงมีค่าลดลงและคงที่ กล่าวได้ว่าค่าร้อยละของก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นกับชนิดของถังหมัก สภาวะที่ใช้ในการหมักคือความเป็นกลาง และยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน ได้แก่ การกวน ระยะเวลา และจำนวนครั้งของการป้อนเศษอาหารที่มีผลต่อระยะเวลาที่เก็บในถังหมัก เป็นต้น ซึ่งมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้ [10]

8. ผลของประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในถังหมักแบบถังเดี่ยวและสองถัง การย่อยสลายของสารอินทรีย์ในถังหมักแบบถังเดี่ยวและสองถังมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการย่อยสลายเศษวัสดุเหลือทิ้งผสมในระหว่างเดินระบบ

ชุดทดลอง	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งรวม TS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหย VS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD (%)
1. SR	69 %	71 %	67 %
2. CSR	60 %	60 %	61 %
3. TR	78 %	82 %	75 %
4. CTR	75 %	77 %	77 %

หมายเหตุ	SR	ชุดถังหมักแบบถังหมักเดี่ยว (Single Reactor)
	CSR	ชุดควบคุมแบบถังหมักเดี่ยว (Control Single Reactor)
	TR	ชุดถังหมักแบบสองถัง (Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 1 (SR1) และชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 2 (SR2)
	CTR	ชุดควบคุมแบบสองถังหมัก (Control Two Reactors) ประกอบด้วยชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 1 (CSR1) และชุดถังหมักเดี่ยวชุดที่ 2 (CSR2)

จากตารางที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของชุดถังหมักแบบสองถังทั้งที่มีการหมักร่วมและหมักเดี่ยว (TR และ CTR) มีค่าร้อยละ 75 - 82 ซึ่งการหมักย่อยแบบสองถังมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่าการหมักแบบถังเดี่ยว เนื่องจากจุลินทรีย์ทำงานได้ดีกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษา [4] ที่พบว่าประสิทธิภาพการหมักย่อยสารอินทรีย์แบบสองชั้นตอนมีค่าสูงอยู่ระหว่างร้อยละ 83 - 84

9. ผลพลอยได้อื่น ๆ และการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เมื่อสิ้นสุดการหมักย่อยของถังหมักแบบถังเดี่ยวและสองถัง พบว่ามีผลพลอยได้อื่น ๆ ได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพที่มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี [4] กล่าวคือ มีค่าปริมาณไนโตรเจน (N) ร้อยละ 0.33 - 0.35

ฟอสฟอรัส (P) ร้อยละ 0.20 - 0.25 และโพแทสเซียม (K) ร้อยละ 0.09 - 0.13 รวมทั้งได้กากตะกอนที่เหลือจากปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำหรับใช้เป็นหัวเชื้อในการหมักทำปุ๋ยอินทรีย์อีกด้วย กากตะกอนดังกล่าวในชุดทดลองหมักแบบสองถังคงเหลือร้อยละ 17 - 20 และในชุดทดลองหมักแบบถังเดียวคงเหลือร้อยละ 30 - 35 เมื่อนำไปใช้งานในระดับครัวเรือนขนาด 200 ลิตร ในชุมชนต้นธง จังหวัดลำพูน โดยใช้ถังหมักแบบถังเดียวที่มีใบพัดกวนผสมซึ่งอยู่ในถัง พบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้งานในการหุงต้มได้จริง [12]

สรุปผลและการอภิปรายผล

การหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และสั๊ก และเศษอาหารที่อัตราส่วน 3 : 2 และอัตราส่วนของเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ 0.2 ในถังหมักแบบถังเดียวและสองถังในสภาวะเป็นกลาง เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียชนิด Mesophilic ที่อุณหภูมิ 25 - 35 °C ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนขึ้นจากวัสดุหมักและจากการป้อนเศษอาหารจำนวน 4 ครั้ง ใช้ระยะเวลาถังเก็บนาน 22 วัน ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีผลทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดี การหมักย่อยนี้จัดเป็นการหมักย่อยของเศษอาหาร และเศษก้านและใบไม้รวมที่ต่างชนิดกันกับการศึกษาครั้งก่อน [10] และค่าผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่ามากกว่าการหมักร่วมที่อัตราส่วนเดียวกันของเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ลิ้นจี่ และไทร โดยไม่มีการป้อนอาหาร (136.2 ลิตร ในระยะเวลา 15 วัน) ซึ่งใช้วิธีการหมักย่อยแบบสองขั้นตอน [4] ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากชุดทดลองแบบสองถังที่ใช้วิธีการหมักย่อยในสภาวะที่เป็นกลางทั้งแบบถังเดียวและสองถัง สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ดี และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ สูง (ร้อยละ 75 - 82) และการหมักร่วมแบบสองถังให้ปริมาณก๊าซมีเทนได้สูงสุด 104 ลิตร หรือคิดเป็น 1.43 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม $VS_{removed}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียและสาหร่ายขนาดเล็กแบบถังเดียว (0.33 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม $VS_{removed}$) ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา [12] การหมักแบบถังเดียว ให้ปริมาณก๊าซมีเทนน้อยที่สุด 14 ลิตร หรือคิดเป็น 0.36 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม $VS_{removed}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียและสาหร่ายขนาดเล็ก (0.33 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม $VS_{removed}$) เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุหมักและอัตราส่วนของเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ดี ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีข้อเสนอแนะว่า ควรนำการหมักร่วมแบบสองถังในสภาวะความเป็นกลางไปพัฒนาและขยายผลในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้งานในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็ง [13]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เจ้าของฟาร์มสุกร และร้านอาหารภายในจังหวัดเชียงใหม่ รวมทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่

References

- [1] Speece, R. E. (1996). **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters**. Archae Press, USA
- [2] Department of Industrial Work. (2002). **The Step on Organic Digestion in Anaerobic Wastewater Treatment**. Association of Thai Environmental Engineering, Bangkok
- [3] Jitphupakdee, J. (2009). **Two Stage Biogas Production**. Access (20 November 2015). Available (<http://www.bioproduct.kmutnb.ac.th>)
- [4] Panyaping, K., Kantiya, S., Nanta, S., Jitmettatham, S., and Siripataranukul, A. (2016). Two Stage Anaerobic Digestion of Mixed Waste for Biogas Generation. **The 3rd Conference on Research and Creative Innovations: CRCI - 2016**. eds. Chiang Mai
- [5] Panyaping, K., Kantiya, S., Pramoonjukko, P., and Boonyoung, S. (2017). Single and Two Stages Anaerobic Digestion of Mixed Waste. **The 4th Conference on Research and Creative Innovations: CRCI - 2016**. eds. Chiang Mai. pp. 33-38
- [6] Bouallagui, H. (2004). **Two Stage Biogas Production**. Access (20 November 2015). Available (<http://www.bioproduct.kmutnb.ac.th>)
- [7] Metcalf & Eddy Inc. (2008). **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**. 4th ed., McGraw-Hill Book Company, USA
- [8] Panyaping, K., Sutinan, N., Tananchai, P., and Muangkhanjai, U. (2012). Anaerobic Digestion Development of Leaves and Petioles of Longan Waste Residues to Generate Biogas and by Products. **KKU Research Journal**. Vol. 17, No. 4, pp. 543-555
- [9] APHA, AWWA, and WPCF. (2005). **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed. Washington DC, USA
- [10] Panyaping, K. and Moontee, P. (2018). Potential of Biogas Production from Mixed Leaf and Food Waste in Anaerobic Reactors. **Journal of Material Cycles & Waste Management**. Vol. 20, Issue 2, pp. 723-737
- [11] Siriananpiboon, S. (2007). **Anaerobic Biological Wastewater Treatment**. 1st ed. Bangkok: Top Publisher
- [12] Panyaping, K., Khiewwijit, R., and Wongpankamol, P. (2019). Technology Transfer on Organic Waste Transformation in Local Community of Lamphun. In **Proceedings of the 1st ICRU International Conference: Sustainable Community Development**. eds. Chiang Mai. pp. 7-14
- [13] Panyaping, K., Khiewwijit, R., and Wongpankamol, P. (2018). Enhanced Biogas Production Potential of Microalgae and Swine Wastewater using Co-digestion and Alkaline Pretreatment. **Water Science & Technology**. Vol. 78, Issue 1, pp. 98-102. DOI: 10.2166/wst.2018.077

การประยุกต์ใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างกับปัญหาการจัดเส้นทางรถ
โดยมีข้อจำกัดด้านกรอบเวลาและความต้องการที่หลากหลาย

Differential Evolution Optimization Applied to the Vehicle Routing with Time Windows and Multiple Demands

พรรัตน์ ธำรงวุฒิ¹, จุติพงษ์ จำรัส^{1*}, ณัฐสุพร ชินสุวรรณ¹, ศุภนิดา จิตจักร¹ และศิริรินทร์ บุญสุชาติ¹
Pornrat Thumrongvut¹, Thitipong Jamrus^{1*}, Nutsuporn Chinsuwan¹, Suphanida Jitjakr¹
and Sirin Boonsuchat¹

Received: July 13, 2019; Revised: September 9, 2019; Accepted: September 9, 2019

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดเส้นทางรถภายใต้ข้อจำกัดด้านกรอบเวลาจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณค่าตอบและสอดคล้องกับสภาพปัญหาที่แท้จริงที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การจัดเส้นทางรถให้มีความคุ้มค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ ต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงและต้นทุนค่าเสียโอกาสที่เกิดจากการใช้ยานพาหนะไม่เต็มประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขของกรอบเวลาที่กำหนดและความต้องการของลูกค้าที่ไม่เท่ากัน กระบวนการแก้ปัญหาเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นตัวแทนของกรณีศึกษา และทำการทดสอบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป LINGO จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาแบบเมตาฮีริสติกส์ที่สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว ผลการวิจัยสรุปได้ว่าวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างให้ค่าของต้นทุนโดยรวมสูงกว่าค่าตอบจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็ว โดยค่าตอบที่ได้มีความใกล้เคียงค่าตอบที่ดีที่สุด จากผลการคำนวณพบว่าการใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างได้ค่าตอบที่ให้ต้นทุนโดยรวมสูงกว่าประมาณ 0.8 % แต่สามารถประหยัดเวลาได้ถึง 12 %

คำสำคัญ : การจัดเส้นทางรถขนส่ง; เมตาฮีริสติกส์; วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง; กรอบเวลาแบบเคร่งครัด

¹ กลุ่มวิจัยการพัฒนาระบบสารสนเทศเชิงระบบสำหรับอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹ Research Unit on System Modeling for Industry, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding Author E - mail Address: thitja@kku.ac.th

Abstract

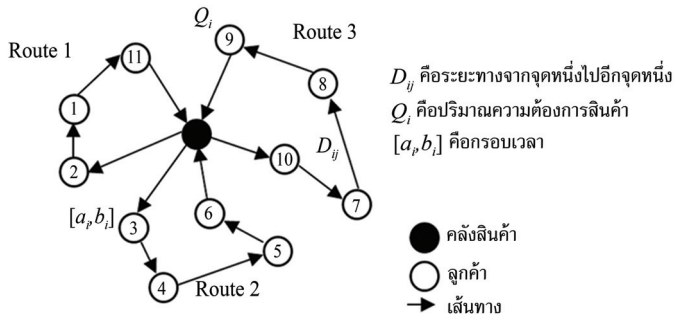
Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW) is classified as a non-polynomial hard problem (NP-Hard Problem), that is difficult to be solved and according to real-world regularities on the various industries. The objective of this research is to minimize the total cost, where the total cost includes fuel costs and idle utilization costs of a vehicle under the hard time windows and multiple demands of customer conditions. The process of solving the case study is as following: firstly, to formulate the mathematical model to represent the case study and then using the LINGO optimization software. After that comparing obtained result to the Differential Evolution (DE), which is metaheuristic algorithms can effectively solve problems and can using with a large number of parameters. From the results, the DE algorithm given higher total cost than that of the mathematical model, however computational time speedy with the solutions that are nearly optimal solutions. The computational result showed that the DE can find 0.8 % higher total cost than that of LINGO but use 12 % less computational time.

Keywords: Vehicle Routing Problem; Metaheuristic; Differential Evolution; Hard Time Windows

บทนำ

ปัญหาการขนส่ง (Transportation Routing Problem) เป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญในด้านการจัดการห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่มีการขนย้ายสิ่งของจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งหรือทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกระจายสินค้าหรือข้อมูลจากผู้ผลิตไปสู่ผู้บริโภค ซึ่งเกิดขึ้นในทุกอุตสาหกรรมโดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านต้นทุนการขนส่ง เวลาที่ใช้ และคุณภาพของสินค้า [1] ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยอยู่ในอันดับที่ 32 จาก 160 ประเทศทั่วโลก [2] จากการประเมินดัชนีวัดประสิทธิภาพระบบโลจิสติกส์ระหว่างประเทศ (International Logistics Performance Index: LPI) ประกอบด้วยสามส่วนคือ ต้นทุนค่าขนส่งสินค้า (Transportation Cost) ต้นทุนการเก็บสินค้าคงคลัง (Inventory Holding Cost) และต้นทุนการบริหารจัดการ (Logistics Administration Cost) ด้วยสัดส่วนต้นทุนที่สูงเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนั้นต้นทุนค่าขนส่งสินค้าจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาและหาแนวทางในการลดต้นทุนดังกล่าวให้ได้ต่ำที่สุด ซึ่งการวางแผนจัดเส้นทางรถขนส่งให้มีประสิทธิภาพเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนและเพิ่มผลกำไรให้แก่องค์กรนั้น ๆ ได้ และในภาคอุตสาหกรรมล้วนเล็งเห็นถึงความสำคัญ ทำให้มีการหาแนวทางแก้ปัญหาด้วยวิธีต่าง ๆ ตามเงื่อนไขของลักษณะปัญหาที่แตกต่างกันไป เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งแบบมีการขนส่งกลับมายังคลังเดิม (Vehicle Routing Problem with Backhauls: VRPB) ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งแบบมีการรับและส่งสินค้า (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery: VRPPD) เป็นต้น เนื่องจากปัญหาการจัดเส้นทางรถเดินทางมีหลากหลายรูปแบบลักษณะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของปัญหานั้น ๆ ทำให้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง

และมิงงานวิจัยจำนวนมากที่แนะนำให้เสนอโดยมีเป้าหมายแตกต่างกัน เช่น การทำต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุด [3] - [5] การหาเส้นทางขนส่งที่สั้นที่สุด [6] - [8] การหาจำนวนรถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่งให้มีจำนวนน้อยที่สุด [8] ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบมีข้อจำกัดด้านกรอบเวลาในการรับส่ง (Vehicle Routing Problem with Time Windows: VRPTW) แสดงดังรูปที่ 1 โดยลูกค้าแต่ละรายมีความต้องการสินค้า Q_i ที่ไม่เท่ากัน (Multiple Demands) ขนส่งสินค้าจากคลังสินค้า (Depot) ด้วยรถบรรทุกที่มีความจุรถจำกัด (Loading Capacity) ไปยังลูกค้ารายต่าง ๆ ที่อยู่คนละตำแหน่งด้วยระยะทาง D_{ij} เมื่อแล้วเสร็จจึงกลับมาที่คลังสินค้าด้วยกรอบเวลาที่กำหนดระหว่าง $[a_i, b_i]$



รูปที่ 1 ลักษณะของปัญหาการจัดเส้นทางรถแบบมีกรอบเวลา [9]

ปัญหา VRPTW เป็นปัญหาที่สอดคล้องกับสภาพปัญหาที่แท้จริงในปัจจุบันที่เกิดขึ้นในองค์กรหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ กล่าวคือเมื่อมีการจัดเส้นทางขนส่งโดยพาหนะขนส่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเรือ รถ หรือเครื่องบิน เงื่อนไขบังคับที่สำคัญสำหรับการแก้ไขปัญหาคือเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีนั้นคือกรอบเวลาในการขนส่งที่จำกัด [10] หากมีการวางแผนเส้นทางไม่ถูกต้อง อาจทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือและภาพลักษณ์ขององค์กรเสียหาย เช่น ร้านค้าปลีกย่อยแห่งหนึ่งต้องการสินค้าเพื่อนำไปวางจำหน่ายโดยกำหนดช่วงเวลาในการรับสินค้าจากพาหนะที่จะทำการขนส่ง หากว่าพาหนะดังกล่าวมาก่อนกรอบเวลาที่กำหนดทำให้ต้องมีการรอคอยและเกิดการเสียโอกาส และหากมีการขนส่งหลังกรอบเวลาที่กำหนด อาจทำให้ลูกค้าไม่มีสินค้าในการจำหน่าย ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะนำมาสู่ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อไป ปัญหา VRTW ถูกนำเสนอด้วยนักวิจัยหลายท่าน เช่น [11] ศึกษาวิธีการจัดเส้นทางรถด้วยข้อจำกัดด้านเวลาไม่เคร่งครัด (Soft Time Window) และข้อจำกัดด้านเวลาแบบเคร่งครัด (Hard Time Window) ด้วยวิธีการปรับปรุงคำตอบแบบวนซ้ำ (Iterative Route Construction and Improvement Algorithm) ต่อมา [12] ใช้วิธีฮิวริสติกส์แบบการแทรก (Insertion Heuristic) สำหรับการจัดเส้นทางรถเที่ยวเดียวและใช้วิธีฮิวริสติกส์แบบละโมภ (Greedy Heuristic) สำหรับการจัดเส้นทางรถหลายเที่ยว ภายใต้เงื่อนไขที่มีกรอบเวลากำหนดการรับส่งสินค้า ต่อมา [13] ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบมีข้อจำกัดด้านปริมาณความจุของพาหนะโดยมีกรอบเวลาในการรับส่งสินค้า (Capacitated Close Vehicle Routing Problem with Time Windows) เพื่อหาต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุดด้วยวิธีการ BRGKA (Biased Random Key Genetic Algorithm) ร่วมกับวิธีการหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ (Local Search) พบว่าวิธีการเหล่านี้สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมตรงตามวัตถุประสงค์ได้ และล่าสุด [14] นำเสนอการจัดเส้นทางของรถบรรทุกน้ำมันแบบไปและกลับโดยมีจุดเริ่มต้น

หลายจุดและมีข้อจำกัดด้านเวลาในการขนส่งด้วยวิธีขยายและจำกัดเขต (Branch and Bound) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ได้กับปัญหาจริง สำหรับปัญหา VRPTW จัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard Problem) ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณหาผลเฉลย ในบางครั้งเวลาในการให้บริการลูกค้าหรือเวลาในการเดินทางขนส่งอาจส่งผลต่อเส้นทางที่ได้จากการแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการหาค่าตอบจะขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา จึงมีการนำวิธีการแก้ปัญหาแบบเมตาฮีริสติกส์ (Metaheuristic) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดหรือผลเฉลยที่ใกล้เคียงที่สุด (Near-Optimal Solution) ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม [1]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ การจัดเส้นทางขนส่งให้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ ต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงและต้นทุนค่าเสียโอกาสที่เกิดจากการใช้ยานพาหนะไม่เต็มประสิทธิภาพ (Utilization) โดยใช้วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ซึ่งถูกคิดค้นโดย [15] เป็นการหาค่าคำตอบแบบสโตแคสติก (Stochastic) โดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population Based Search) ในแต่ละรุ่นพัฒนาคำตอบจากรุ่นสู่รุ่น มีหลักการสืบค้นคำตอบในปริภูมิการค้นหา (Search Space) ที่เป็นการสุ่มหาค่าตอบแบบครอบคลุม มีแนวคิดสมมุติฐานเชิงพันธุกรรมเช่นเดียวกันกับวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญคือ GA ต้องแปลงตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables) ให้เป็นรหัสเลขฐานสอง (Binary Code) แต่ DE ใช้ค่าจริง (Floating Point Real Number) ในการคำนวณทำให้มีข้อได้เปรียบที่โดดเด่นคือ มีความรวดเร็วและประสิทธิภาพสูง (Robustness) ในการค้นหาค่าตอบ เนื่องจากโครงสร้างของระเบียบวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีความยืดหยุ่น (Generalizations) ย่างต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา ไม่ว่าจะเป็นการแก้ปัญหาในเรื่องการขนส่งน้ำมันดิบที่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือขนาดของช่องรับน้ำมันดิบที่มีความจุจำกัดและแหล่งต่าง ๆ ของน้ำมันดิบที่ไม่สามารถนำมาบรรจรร่วมกันได้ [16] หรือแม้กระทั่งในอุตสาหกรรมการเลี้ยงไก่ไข่ [17] ที่มีความยุ่งยากในการจัดสรรไก่ลงฟาร์ม หรือการขนส่งไก่จากฟาร์มไก่อุ่นไปยังโรงเรือนไก่ไข่ หลังจากนั้น [18] ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางรถบรรทุกที่มีกรอบเวลาของแต่ละจุดบริการเข้ามาเกี่ยวข้อง กล่าวคือรถบรรทุกจะเดินทางไปยังแต่ละจุดต้องภายในเวลาที่กำหนดเท่านั้น โดยปัญหาดังกล่าวสามารถหาค่าตอบได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ หากขนาดของปัญหานั้นมีขนาดเล็ก แต่ในความเป็นจริงปัญหาดังกล่าวนี้ไม่สามารถหาค่าตอบได้จากสมการคณิตศาสตร์เนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลนานและหน่วยความจำของสำเร็จรูปที่ใช้ไม่เพียงพอกับความซับซ้อนของปัญหาจึงมีการนำวิธีเมตาฮีริสติกส์มาแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางรถบรรทุกที่มีกรอบเวลาแบบเคร่งครัดเป็นตัวกำหนด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำ DE ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งของเมตาฮีริสติกส์มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าตอบที่ใกล้เคียงค่าตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็วในการแก้ปัญหา

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. วิเคราะห์ลักษณะของปัญหา (Problem Statement)

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละราย โดยมีเงื่อนไขของกรอบเวลาการรับส่งของลูกค้าและความจุของรถบรรทุก และมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้มีต้นทุน

โดยรวมในการขนส่งต่ำที่สุด มีเงื่อนไขดังนี้

เงื่อนไขด้านลูกค้า: ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการจากพาหนะเพียง 1 คันเท่านั้น

เงื่อนไขด้านพาหนะ: ทุกเส้นทางการขนส่งสินค้าจะต้องเริ่มต้นและย้อนกลับมาที่คลังสินค้า

เงื่อนไขด้านปริมาณความจุของพาหนะ: ปริมาณสินค้าที่จุในพาหนะในเวลาใด ๆ จะต้องไม่เกินปริมาณความจุสูงสุดที่สามารถจุได้สำหรับพาหนะนั้น ๆ

เงื่อนไขด้านกรอบเวลา: ลูกค้าแต่ละรายจะต้องได้รับบริการภายในกรอบเวลาที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งหมายความว่า ยานพาหนะจะไม่อนุญาตให้บริการลูกค้าก่อนหรือหลังเวลาที่กำหนด (Hard Time Window)

2. กำหนดตัวแปรรับเข้า (Input)

2.1 กำหนดให้รถบรรทุกแต่ละคันสามารถบรรจุสินค้าได้ 300 หน่วยต่อคัน

2.2 กำหนดให้ต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งเท่ากับ 160 บาทต่อชั่วโมง

2.3 กำหนดให้ต้นทุนค่าเสียโอกาสที่เกิดจากบรรทุกสินค้าไม่เต็มประสิทธิภาพเท่ากับ 40 บาทต่อหน่วย

2.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างลูกค้าแต่ละรายแสดงดังตารางที่ 1

2.5 กำหนดให้มีลูกค้าจำนวน 5 ราย ความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละรายเท่ากับ 90 200 100 125 และ 100 หน่วย มีกรอบเวลาการขนส่งเท่ากับ [7,37] [8,75] [10,43] [3,45] [8,41] ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ระยะเวลาการเดินทาง (ชั่วโมง)

จาก/ไปยัง	ลูกค้ารายที่ 1	ลูกค้ารายที่ 2	ลูกค้ารายที่ 3	ลูกค้ารายที่ 4	ลูกค้ารายที่ 5
ลูกค้ารายที่ 1	0	5	6	6	7
ลูกค้ารายที่ 2	3	0	5	6	8
ลูกค้ารายที่ 3	2	3	0	7	6
ลูกค้ารายที่ 4	5	5	7	0	8
ลูกค้ารายที่ 5	8	8	6	9	0

ตารางที่ 2 ปริมาณความต้องการและกรอบเวลาของลูกค้า

รายการ	ลูกค้ารายที่ 1	ลูกค้ารายที่ 2	ลูกค้ารายที่ 3	ลูกค้ารายที่ 4	ลูกค้ารายที่ 5
ความต้องการ (หน่วย)	90	200	100	125	100
เวลาเริ่มต้น (ชั่วโมง)	7	8	10	3	8
เวลาสิ้นสุด (ชั่วโมง)	37	75	43	45	41

3. สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models)

ดัชนี (Indices)

i, j ลูกค้า ; $i, j = 1, 2, 3, \dots, N$

k ยานพาหนะ ; $k = 1, 2, 3, \dots, V$

ตัวแปรที่ทราบค่า (Parameters)

t_{ik} เวลาการเริ่มให้บริการลูกค้า i โดยพาหนะที่ k ; $\forall i \in N, \forall k \in V$

$[t_{ia}, t_{ib}]$ กรอบเวลาของลูกค้า i ; $\forall i \in N$

D_i ความต้องการสินค้าของลูกค้า i ; $\forall i \in N$

Q_k กำลังในการขนส่งของยานพาหนะ k ; $\forall k \in V$

T ค่าคงที่สำหรับข้อจำกัดของกรอบเวลา ; $\rightarrow +\infty$

μ_1 ค่าเสียโอกาสจากการบรรทุกสินค้าไม่เต็มยานพาหนะเท่ากับ 40 บาทต่อหน่วย

μ_2 ค่าเชื้อเพลิงในการขนส่งเท่ากับ 160 บาทต่อชั่วโมง

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$x_{ijk} = 1$ เมื่อมีการเดินทางจากลูกค้า i ไปยัง ลูกค้า j ด้วยยานพาหนะ k
; $\forall i, j \in N, \forall k \in V, i \neq j, i \neq n+1, j \neq 0$
 $= 0$ อื่น ๆ

สมการเป้าหมาย (Objective Function)

$$\text{Min}Z = \mu_1 \left(Q_k V - \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^N D_i x_{ijk} \right) + \left(\mu_2 \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^V \text{Dist}_{ij} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

เงื่อนไข (Constraints)

$$\sum_k \sum_{j=0}^N x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_i x_{iak} - \sum_j x_{ajk} = 0, \quad \forall a \in N, \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_i x_{i,n+1,k} = 1, \quad \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_i D_i \sum_j x_{ijk} \leq Q_k, \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$t_{ik} + \text{Dist}_{ij} - T(1 - x_{ijk}) \leq t_{jk}, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V, T \rightarrow \infty \quad (7)$$

$$t_{ai} \leq t_{ik} \leq t_{bi} \quad , \forall i \in N, \forall k \in V \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad , \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (9)$$

$$t_{ij} \geq 0 \quad , \forall i \in N, \forall k \in V \quad (10)$$

สมการที่ (1) เป็นสมการเป้าหมายในการหาต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุดในการขนส่งสินค้าที่ประกอบด้วย ค่าเชื้อเพลิงและค่าเสียโอกาสที่เกิดจากการใช้ยานพาหนะไม่เต็มประสิทธิภาพ ในขณะที่เงื่อนไขข้อจำกัดตามสมการที่ (2) แสดงถึงแต่ละจุดจะมีการส่งสินค้าเพียงครั้งเดียว สมการที่ (3) - (5) แสดงการจัดเส้นทางของยานพาหนะว่าแต่ละคันจะถูกจัดตารางการขนส่งโดยเริ่มต้นที่คลังสินค้าและกลับมายังคลังสินค้าเมื่อสิ้นสุดการให้บริการลูกค้า และมีการให้บริการลูกค้าหลังจากมาถึงแล้ว และเดินทางไปยังลูกค้ารายต่อไป สมการที่ (6) แสดงถึงปริมาณความต้องการของลูกค้าแต่ละรายจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ สมการที่ (7) เพื่อทำให้มั่นใจว่าตารางเวลาในการให้บริการสามารถเป็นไปได้ สมการที่ (8) แสดงให้เห็นว่าลูกค้าแต่ละรายจะต้องได้รับบริการภายในกรอบเวลา และตัวแปรตัดสินใจจะถูกแทนด้วย สมการที่ (9) และสมการที่ (10) [19]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกทำการทดสอบด้วยปัญหาขนาดเล็กและใช้การแทนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม LINGO Version 13 หลังจากนั้นคำตอบจะถูกทำการตรวจสอบ เพื่อดูว่าสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถให้คำตอบที่ถูกต้องตรงกับเงื่อนไขที่กำหนด และให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องตรงตามสมการเป้าหมายหรือไม่

4. การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE)

4.1 การเข้ารหัส (Encoding)

กระบวนการเข้ารหัสเป็นการออกแบบเวกเตอร์เริ่มต้นโดยเริ่มจากการสุ่มคำตอบเริ่มต้นของประชากรมีค่าระหว่าง [0,1] อยู่ในรูปของเวกเตอร์ $1*N$ โดยที่ N คือจำนวนลูกค้าที่ต้องการสินค้า ยกตัวอย่างเวกเตอร์ที่ 1 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเข้ารหัส

ลำดับการให้บริการ	1	2	3	4	5
เวกเตอร์ 1	0.3376	0.7833	0.1211	0.3498	0.6805

4.2 การถอดรหัส (Decoding)

กระบวนการถอดรหัสเป็นการแปลตำแหน่งเวกเตอร์ให้เป็นคำตอบ โดยใช้หลักการ Rank Of Value (ROV) คือการจัดเรียงลำดับค่าจากน้อยไปมาก และจัดลำดับการเดินทางการให้บริการให้สอดคล้องกับลำดับที่เรียงไว้ตามแต่ละเวกเตอร์ จากตัวอย่างเวกเตอร์ที่ 1 ในตารางที่ 3 เมื่อทำการ ROV จะได้เส้นทางให้บริการคือ 3-1-4-5-2 ตามลำดับ

4.3 การประเมินคำตอบ (Fitness Evaluation)

ผลลัพธ์จากระบวนการถอดรหัสจะได้ลำดับการเคลื่อนที่ของรถที่เข้าไปบริการลูกค้าในแต่ละราย ดังนั้นในส่วนปัญหาการจัดสรรจำนวนรถจึงได้พัฒนาวิธีการหาผลเฉลยเบื้องต้น (Constructive Heuristic) เพื่อหาคำตอบเบื้องต้น (Initial Solution) ในการจัดสรรจำนวนรถที่น้อยที่สุดที่สามารถให้บริการลูกค้าได้ครบทุกรายมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.3.1 กำหนดตัวแปร

$Dist_{ij}$	=	ระยะเวลาการเดินทางจาก ลูกค้าที่ i ไป j
T_a	=	เวลาเริ่มต้นที่ลูกค้าจะได้รับบริการ
T_b	=	เวลาสิ้นสุดที่ลูกค้าจะได้รับบริการ
Q_k	=	ความจุของรถคันที่ k (เริ่มต้น = 0)
$Noservice$	=	ลูกค้าที่ไม่ได้รับบริการ
$Time_k$	=	เวลาทั้งหมดที่รถคันที่ k ให้บริการทั้งหมด (เริ่มต้น = 0)
D_i	=	ความต้องการของลูกค้าลำดับที่ i
$Route_k$	=	เซตของลำดับเส้นทางรถให้บริการของรถคันที่ k

4.3.2 วิธีการหาผลเฉลยเบื้องต้น (รูปที่ 2)

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณารถทีละคัน

- กรณีที่ให้บริการลูกค้ารายแรก

หาก $Dist_{ij} \geq T_a$ ให้ทำการปล่อยรถคันที่ k เพื่อบริการลูกค้าลำดับที่ i ไปยังลูกค้าลำดับที่ j เมื่อให้เสร็จสิ้นการให้บริการลูกค้าทำการอัปเดต $Q_k = Q_k + D_i$ อัปเดตค่า $Time_k = Time_k + Dist_{ij}$ และอัปเดตใส่ลำดับการเดินทางในเซตของ $Route_k$

หาก $Dist_{ij} < T_a$ ให้ปล่อยลูกค้าลำดับที่ i ใส้ในเซตของ $Noservice$

- กรณีที่ให้บริการลูกค้ารายต่อไป

พิจารณา ถ้า $Time_k + Dist_{ij} \geq T_a$ และ $Time_k + Dist_{ij} \leq T_b$ และ $Q_k + D_i \leq 300$ ให้ปล่อยรถคันที่ k ต่อไปเพื่อบริการลูกค้าลำดับที่ i เมื่อให้บริการลูกค้าเสร็จแล้วทำการอัปเดต $Q_k = Q_k + D_i$ และอัปเดตค่า $Time_k = Time_k + Dist_{ij}$ และอัปเดตใส่ลำดับการเดินทางลงในเซตของ $Route_k$

ถ้าหากไม่ตรงกับเงื่อนไขดังกล่าวไว้ให้ปล่อยลูกค้าลำดับที่ i ใส้ในเซตของ $Noservice$

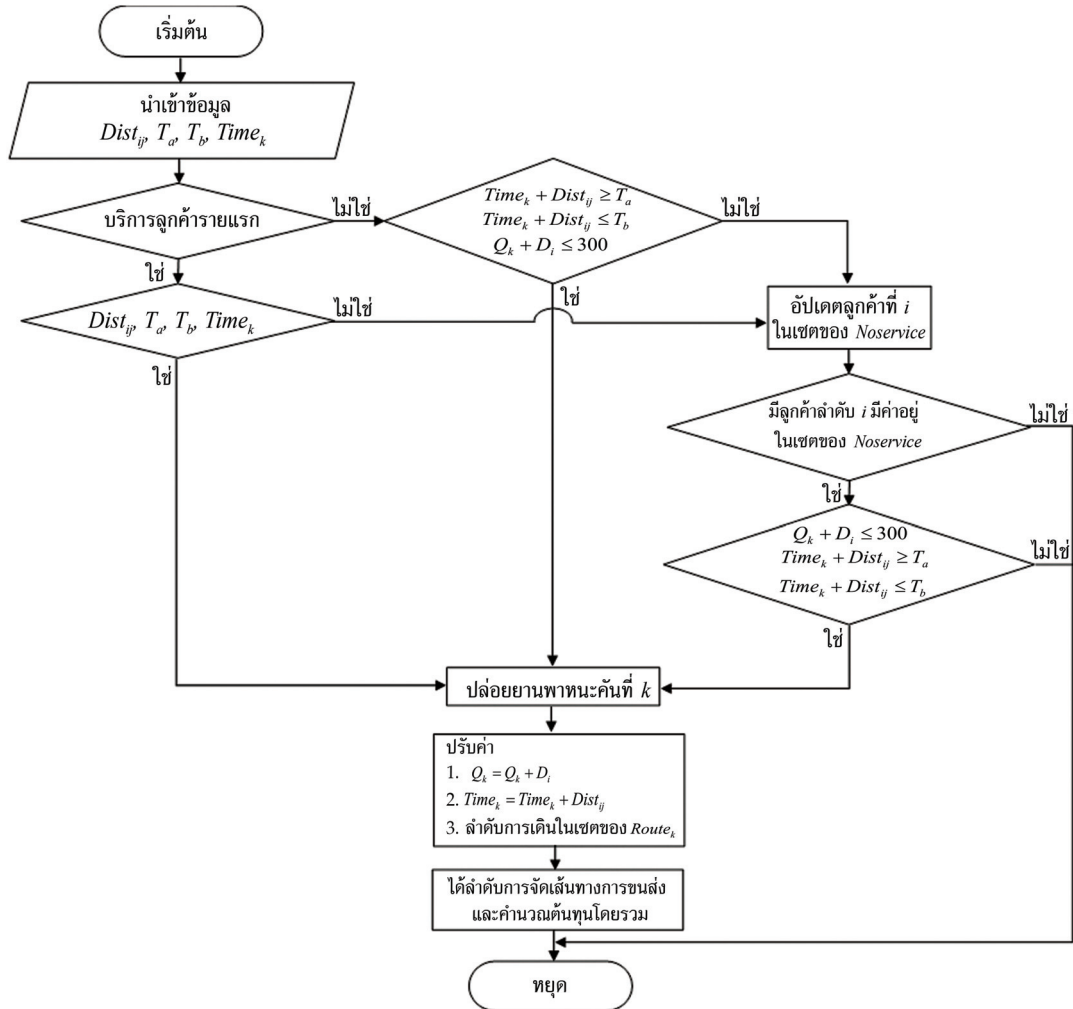
ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาเซตของ $Noservice$

ถ้าหากยังมีลูกค้าลำดับ i มีค่าอยู่ในเซตของ $Noservice$ ให้ปล่อยรถคันใหม่เข้าไปบริการลูกค้าลำดับที่ i ก่อนการให้บริการจะทำการพิจารณาเงื่อนไขก่อนว่าถ้า $Q_k + D_i \leq 300$ และ $Time_k + Dist_{ij} \geq T_a$ และ $Time_k + Dist_{ij} \leq T_b$ ถึงจะปล่อยให้ลูกค้าลำดับที่ i ได้รับบริการจากรถคันที่ k เมื่อให้บริการลูกค้าเสร็จแล้วทำการอัปเดต $Q_k = Q_k + D_i$ และอัปเดตค่า $Time_k = Time_k + Dist_{ij}$ และอัปเดตใส่ลำดับการเดินทางลงในเซตของ $Route_k$

ถ้าหากไม่มีค่าใด ๆ อยู่ในเซตของ $Noservice$ ให้ทำการหยุดการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณต้นทุนโดยรวมทั้งหมดดังสมการที่ (11)

$$Total\ Cost = \mu_1 \left(Q_k V - \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N \sum_{k=1}^V D_i x_{ijk} \right) + \mu_2 \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^V Dist_{ij} x_{ijk} \quad (11)$$



รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนวิธีการหาผลเฉลยเบื้องต้น

4.4 วิธีการปรับปรุงผลเฉลย

กระบวนการปรับปรุงผลเฉลยของปัญหาในงานวิจัยนี้ประยุกต์จากวิธีวิวัฒนาการผลต่าง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.4.1 การปรับเปลี่ยนค่าในพิกัด (Mutation Operation)

การปรับเปลี่ยนค่าในพิกัดหรือการกลายพันธุ์ดังสมการที่ (12) เป็นการพัฒนาคำตอบโดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนค่าในพิกัดที่ได้จากการหาผลต่างของเวกเตอร์ที่สุ่มมา 2 เวกเตอร์ของประชากร

และนำผลต่างนี้ไปคูณกับปัจจัยขยายผลต่าง (Mutation Factor: F) มีค่าระหว่าง $[0,2]$ แล้วนำไปบวกกับเวกเตอร์ที่สุ่มมาอีกเวกเตอร์หนึ่ง

$$V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F(X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \tag{12}$$

โดยที่

$V_{i,G+1}$ คือ มิวแทนต์เป้าหมาย
 $X_{r_1,G}, X_{r_2,G}, X_{r_3,G}$ คือ เวกเตอร์สุ่ม (Random Vector) ที่ทำการเลือกมา 3 เวกเตอร์

4.4.2 การแลกเปลี่ยนค่าในพิกัด (Recombination Operation)

การแลกเปลี่ยนค่าในพิกัดเป็นการแลกเปลี่ยนค่าเพื่อสร้างไตรอัลเวกเตอร์ โดยทำการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่สุ่มระหว่าง $[0,1]$ กับค่าอัตราแลกเปลี่ยนตำแหน่งพิกัด (CR) หากน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า CR เวกเตอร์นั้นจะมีค่าเป็นมิวแทนต์เวกเตอร์ แต่หากมีค่ามากกว่าค่า CR เวกเตอร์นั้นจะมีค่าเท่ากับเวกเตอร์เป้าหมายดังสมการที่ (13)

$$U_{ji,G+1} = \begin{cases} V_{ji,G+1} & \text{if } (randb(j) \leq CR) \text{ or } j = rnbr(i) \\ X_{ji,G} & \text{if } (randb(j) > CR) \text{ or } j \neq rnbr(i) \end{cases} \tag{13}$$

โดยที่

$U_{ji,G+1}$ คือ ไตรอัลเวกเตอร์ (Trial Vector)
 $V_{ji,G+1}$ คือ มิวแทนต์เวกเตอร์ (Mutant Vector)
 $X_{ji,G}$ คือ เวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector)
 $rnbr(i)$ คือ ค่าดัชนีจากการสุ่มเลือกมีค่าระหว่าง $[0,D]$;
 D คือ ขนาดของเวกเตอร์
 $randb(j)$ คือ ตัวเลขสุ่มมีค่าระหว่าง $[0,1]; j = 1,2,\dots,D$
 CR คือ อัตราแลกเปลี่ยนตำแหน่งพิกัดมีค่าระหว่าง $[0,1]$

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

Parameters	Value
จำนวนประชากร (Population Number: NP)	5
จำนวนรอบในการวนซ้ำ (Maximum Iterations: T)	100
ปัจจัยขยายผลต่าง (Mutation Factor: F)	2
อัตราแลกเปลี่ยน (Crossover Constant: CR)	0.8

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การจัดเส้นทางการเดินทางโดยมีข้อจำกัดด้านกรอบเวลาและมีความต้องการของลูกค้าที่แตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไข คือลูกค้าแต่ละรายจะได้รับการบริการจากพาหนะเพียงหนึ่งคันเท่านั้นด้วยความจุของรถบรรทุกเท่ากับ 300 หน่วยต่อคัน ออกเริ่มต้นการให้บริการและย้อนกลับมาเมื่อเสร็จสิ้นที่คลังสินค้า ใช้ความเร็วเฉลี่ยในการขนส่งเท่ากับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 160 บาทต่อชั่วโมง และต้นทุนการเสียโอกาสที่เกิดจากการใช้พาหนะไม่เต็มประสิทธิภาพเท่ากับ 40 บาทต่อหน่วย ซึ่งเมื่อนำข้อมูลปัญหาของงานวิจัยมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดสอบเพื่อหาคำตอบด้วยโปรแกรม LINGO Version 13 จะได้ต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 42,280 บาท ใช้รถบรรทุกทั้งหมด 3 คัน ในการขนส่งไปยังลูกค้าทั้งหมดด้วยลำดับการเดินทางดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลำดับการเดินทางของรถบรรทุกจากการประมวลผลของโปรแกรม LINGO

รถบรรทุก	ลำดับการเดินทาง	ระยะเวลาการขนส่ง (ชั่วโมง)
1	0-5-3-0	20
2	0-2-1-0	16
3	0-4-0	7

ในส่วนของกระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างนั้นจะทำการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB Version R2017a ซึ่งมีขั้นตอนที่สำคัญคือการเข้ารหัส (Encoding) และการถอดรหัส (Decoding) ที่ต้องเหมาะสมและมีความสัมพันธ์กับปัญหา เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่าได้รวดเร็ว และนำไปสู่ผลเฉลยที่ต้องการ ในตารางที่ 6 เป็นการยกตัวอย่างของขั้นตอนการคัดเลือก (Selection) หลังจากที่มีการแลกเปลี่ยนค่าในพิกัด (Recombination Operation) และประเมินคำตอบ (Fitness Evaluation) เพื่อหาเวกเตอร์เป้าหมายในการคำนวณรอบถัดไปหรือการเลือกประชากรสำหรับการดำเนินการในรอบต่อไป โดยเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าคำตอบของสมการเป้าหมาย (Objective Value) หรือค่าฟิตเนส (Fitness Value) ของโครอสมการกับเวกเตอร์เป้าหมาย ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการหาค่าที่ต่ำที่สุด (Minimization) จะเห็นว่าเวกเตอร์ที่ 1 และเวกเตอร์ที่ 2 เลือกเวกเตอร์เป้าหมายสำหรับการคำนวณรอบถัดไป เนื่องจากให้ค่าคำตอบของสมการเป้าหมายมีค่าต่ำกว่าโครอสมการ เช่นเดียวกันกับเวกเตอร์ที่ 3 - 5 จะเลือกโครอสมการไปเป็นเวกเตอร์เป้าหมายรอบถัดไป

เมื่อทำการประมวลผลจำนวน 10 รอบการคำนวณ โดยในแต่ละรอบมีการวนซ้ำ 100 รอบ จะได้ผลการคำนวณจากค่าเฉลี่ยคำตอบเท่ากับ 42,636 บาท ซึ่งเป็นค่าของต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณเฉลี่ย 286 วินาที ด้วยลำดับการเดินทางเช่นเดียวกันกับผลลัพธ์ที่ได้จากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ หากเปรียบเทียบผลลัพธ์จะเห็นว่าค่าของต้นทุนโดยรวมจากการประมวลผลด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมีค่ามากกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 6 การคัดเลือก (Selection)

vector	Target Vector					Objective Value (บาท)	Trial Vector					Objective Value (บาท)
	ลูกค่า						ลูกค่า					
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	0.6393	0.9862	0.1888	0.3748	0.0481	42,280	1.3038	0.9862	-0.4706	0.9409	0.7434	43,560
2	0.4852	0.305	0.5728	0.2612	0.4552	43,400	0.9088	1.9100	0.5728	0.2612	2.3447	43,400
3	0.7353	0.9257	0.6039	0.5441	0.7709	43,720	0.7353	1.1074	-0.6414	0.0363	-1.3976	42,280
4	0.355	0.1282	0.726	0.1764	0.0619	43,720	0.6485	1.5564	0.7260	1.4622	1.5581	43,080
5	0.1484	0.3151	0.3269	0.8964	0.9265	44,200	0.6633	1.4906	-0.0421	0.4036	-0.7523	42,280

สรุป

การจัดเส้นทางการเดินทางโดยมีข้อจำกัดด้านกรอบเวลาและความต้องการที่หลากหลายของปัญหาในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาแบบเมตะฮีริสติกส์แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าวิธีการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความซับซ้อนและไม่มีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งาน อีกทั้งใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน จึงมีการนำวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมาประยุกต์สำหรับปัญหาดังกล่าว จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างสามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็มีความรวดเร็ว โดยคำตอบที่ได้มีความใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งต้นทุนโดยรวมสูงกว่าประมาณ 0.8 % แต่สามารถประหยัดเวลาได้ถึง 12 % อย่างไรก็ตามควรมีการคิดค้นวิธีที่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการนำจุดเด่นของวิธีการอื่น ๆ มาร่วมพัฒนากับวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการแก้ไขปัญหาคต่อไป

References

- [1] Sethanan, K. (2015). **Metaheuristics and Applications for Industry**. Khon Kaen, Thailand: Klangnanawittaya Publishers. (in Thai)
- [2] Office of the National Economic and Social Development Board. (2018). **International Logistics Performance Index (LPI) 2018**. Access (2 June 2019). Available (https://www.nesdb.go.th/ewt_dl_link.php?nid=8143&filename=index) (in Thai)
- [3] López-Sánchez, A. D., Hernández-Díaz, A. G., Vigo, D., Caballero, R., and Molina, J. (2014). A Multi-Start Algorithm for a Balanced Real-World Open Vehicle Routing Problem. **European Journal of Operational Research**. Vol. 238, Issue 1, pp. 104-113. DOI: 10.1016/J.EJOR.2014.04.008
- [4] Wen, L. and Eglese, R. (2015). Minimum Cost VRP with Time-Dependent Speed Data and Congestion Charge. **Computers & Operations Research**. Vol. 56, pp. 41-50. DOI: 10.1016/j.cor.2014.10.007

- [5] Boonmee, A., Sethanan, K., Arnonkijpanich, B., and Theerakulpisut, S. (2015). Minimizing the Total Cost of Hen Allocation to Poultry Farms using Hybrid Growing Neural Gas Approach. **Computers and Electronics in Agriculture**. Vol. 110, pp. 27-35. DOI: 10.1016/J.COMPAG.2014.10.006
- [6] Sommut, N. and Sintusoaw, S. (2009). GRASP Heuristic for Vehicle Routing Problem. **RMUTI Journal**. Vol. 2, No. 1, pp. 3-13
- [7] Sethanan, K. and Neungmacha, W. (2016). Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Mechanical Harvester Route Planning of Sugarcane Field Operations. **European Journal of Operational Research**. Vol. 252, Issue 3, pp. 969-984. DOI: 10.1016/J.EJOR.2016.01.043
- [8] Pichpibul, T. (2015). **Improving Vehicle Routing Decision for Travel Agency in Chonburi, Thailand**. pp. 251-258. In: Gen, M., Kim, K., Huang, X., Hiroshi, Y. (eds) Industrial Engineering, Management Science and Applications 2015. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 349, Springer, Berlin, Heidelberg
- [9] Lopes Silva, M. A., de Souza, S. R., Freitas Souza, M. J., and Bazzan, A. L. C. (2019). A Reinforcement Learning-Based Multi-Agent Framework Applied for Solving Routing and Scheduling Problems. **Expert Systems with Applications**. Vol. 131, pp. 148-171. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.04.056
- [10] Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. **European Journal of Operational Research**. Vol. 35, Issue 2, pp. 254-265. DOI: 10.1287/opre.35.2.254
- [11] Figliozzi, M. A. (2010). The Impacts of Congestion on Commercial Vehicle Tour Characteristics and Costs. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. Vol. 46, Issue4, pp. 496-506. DOI: 10.1016/j.tre.2009.04.005
- [12] Karoonsoontawong, A. (2015). Efficient Insertion Heuristics for Multitrip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Shift Time Limits. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Vol. 2477, Issue 1, pp. 27-39. DOI: 10.3141/2477-04
- [13] Prasetyo, H., Alfatsani, M. A., and Fauza, G. (2018). Solving Capacitated Closed Vehicle Routing Problem with Time Windows (CCVRPTW) using BRKGA with local search. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 352, DOI: 10.1088/1757-899x/352/1/012014
- [14] Wang, B., Liang, Y., Yuan, Meng, Zhang, H., and Liao, Qi. (2019). A Metaheuristic Method for the Multireturn-to-Depot Petrol Truck Routing Problem with Time Windows. **Petroleum Science**. Vol. 16, pp. 701-712. DOI: 10.1007/s12182-019-0316-8
- [15] Storn, R. and Price, K. (1997). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**. Vol. 11, pp. 341-359. DOI: 10.1023/A:1008202821328
- [16] Sethanan, K. and Pitakaso, R. (2016). Differential Evolution Algorithms for Scheduling Raw Milk Transportation. **Computers and Electronics in Agriculture**. Vol. 121, pp. 245-259. DOI: 1016/j.compag.2015.12.021

- [17] Dechampai, D., Tanwanichkul, L., Sethanan, K., and Pitakaso, R. (2017). A Differential Evolution Algorithm for the Capacitated VRP with Flexibility of Mixing Pickup and Delivery Services and the Maximum Duration of a Route in Poultry Industry. **Journal of Intelligent Manufacturing**. Vol. 28, pp. 1357-1376. DOI: 10.1007/s10845-015-1055-3
- [18] Wang, B., Liang, Y., Yuan, M., Zhang, H., and Liao, Q. (2019). A Metaheuristic Method for the Multi return-to-Depot Petrol Truck Routing Problem with Time Windows. **Petroleum Science**. Vol. 16, pp. 701-712. DOI: 10.1007/s12182-019-0316-8
- [19] Dhoruri, A., Sari, E. R. and Lestari, D. (2013). Solving Capacitated Vehicle Routing Problems with Time Windows by Goal Programming Approach. In **Proceeding of IndoMS International Conference on Mathematics and Its Applications**. pp. 155-162

การวางแผนเพาะปลูกและจัดจำหน่ายพืชผลทางการเกษตรระยะสั้น ด้วยตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มรายได้ของเกษตรกร: กรณีศึกษาเกษตรกรอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

Cultivation and Agricultural Products Distribution Short-term Planning with Mathematical Schedule Model to Increase Farmers' Revenue: A Case Study of the Farmers in Kao Kho District, Phetchabun Province

นรินทร์ รัตนวัย¹ และนราธิป สุพัฒน์ธนานนท์^{2*}
Narat Rattanawai¹ and Naratip Supattananon^{2*}

Received: September 2, 2019; Revised: October 24, 2019; Accepted: October 24, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนเพาะปลูกและการจัดจำหน่ายสินค้าทางการเกษตร เพื่อให้เกษตรกรมีรายได้มากขึ้น โดยพิจารณาด้วยรูปแบบปัญหาการมอบหมายงาน ซึ่งเกษตรกรแต่ละคนมีพื้นที่และต้นทุนสำหรับการเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรในแต่ละฤดูกาลอย่างจำกัด อีกทั้งยังมีทางเลือกในการจำหน่ายสินค้าให้กับผู้รับซื้อจำนวน 3 แห่ง ได้แก่ ตลาดกลางแห่งประเทศไทย สหกรณ์ และพ่อค้าคนกลาง จากการศึกษาวิจัยพบว่า ตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถวางแผนการเพาะปลูกและการจัดจำหน่ายให้กับเกษตรกรในเขตพื้นที่กรณีศึกษาจำนวน 12 คน ได้อย่างเหมาะสม ด้วยการตัดสินใจให้เกษตรกรเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ และส่งไปขายยังตลาดกลางแห่งประเทศไทย ซึ่งทำให้เกษตรกรดังกล่าวมีรายได้รวมมากขึ้นร้อยละ 25.67 หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 609,685 บาทต่อฤดูกาล

คำสำคัญ : การมอบหมายงาน; การวางแผนเพาะปลูก; ตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์

¹ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

² วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

² College of Logistics and Supply Chain, Sripatum Khonkaen University, Khonkaen

* Corresponding Author E - mail Address: ballnaratip007@gmail.com

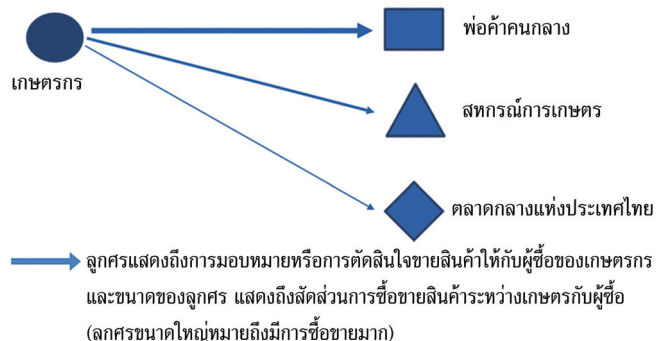
Abstract

This research aims to present the mathematical schedule model for cultivation and agricultural products distribution planning, to increase farmers' revenue by considered from assignment problem pattern. Each farmer has different area size and limit capital for agricultural cultivation in each season. Moreover, there are three options for products distribution to buyers, which are Central Market of Thailand, agricultural cooperative, and middleman. It has been found from the research that the presented mathematical schedule model could used for cultivation and agricultural products distribution planning to the 12 case study area farmers in appropriate level. The consideration was to let the farmers' cultivated different agricultural products and sold them to the Central Market of Thailand. The result was that the farmers' revenue had increased 25.67 %, or 609,685 baht per season.

Keywords: Assignment Problem; Planting Planning; Mathematical Model

บทนำ

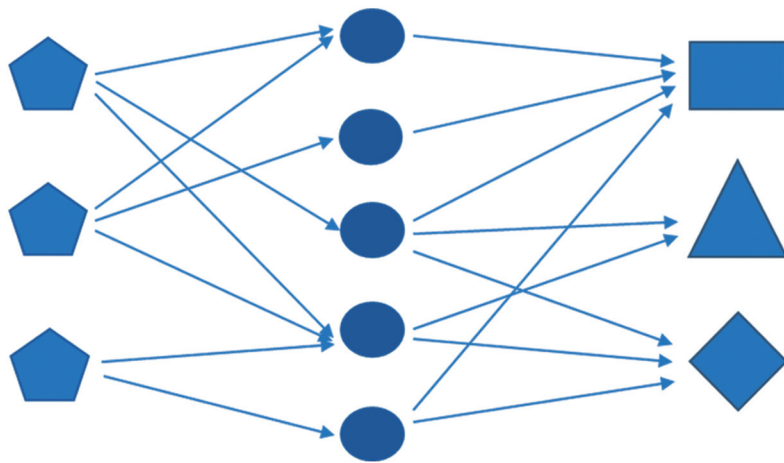
เกษตรกรเป็นอาชีพหลักของคนไทย [1] - [2] เป็นผลให้ภาครัฐเข้ามามีส่วนร่วมในการกำกับดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างต่อเนื่อง เพื่อลดปัญหาราคาสินค้าทางการเกษตรตกต่ำและปัญหาการถูกเอาเปรียบจากพ่อค้าคนกลาง เกษตรกรส่วนใหญ่ของประเทศไม่สามารถกำหนดราคาขายสินค้าทางการเกษตรของตนเองได้ [3] - [5] อีกทั้งยังช่วยหาวิธีเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร [6] เนื่องจากราคารับซื้อสินค้าทางการเกษตรของตลาดกลางแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันอย่างมาก [3] ทำให้เกษตรกรต้องตัดสินใจเกี่ยวกับการเลือกส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจุดรับซื้อต่าง ๆ โดยคำนึงถึงผลกำไรที่คาดว่าจะได้รับต่อการส่งสินค้าไปขายหนึ่งรอบ จากการสำรวจและสัมภาษณ์เกษตรกรในเขตพื้นที่เขาค้อจังหวัดเพชรบูรณ์พบว่า เกษตรกรมีทางเลือกสำหรับการตัดสินใจขายสินค้าทางการเกษตร 3 ทางเลือก ได้แก่ ขายให้กับพ่อค้าคนกลางที่เดินทางมารับซื้อที่สวน นำสินค้าไปขายให้กับสหกรณ์ และนำสินค้าไปขายให้กับตลาดกลางแห่งประเทศไทยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ทางเลือกสำหรับการตัดสินใจขายสินค้าทางการเกษตรของเกษตรกร

จากรูปที่ 1 พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ขายสินค้าทางการเกษตรให้กับพ่อค้าคนกลางหรือสหกรณ์ เนื่องจากมีความเข้าใจว่าสินค้าที่ตนผลิตมีปริมาณน้อยและถ้าส่งไปขายยังตลาดกลางแห่งประเทศไทย จะได้กำไรน้อยกว่าการขายด้วยทางเลือกดังกล่าว อีกทั้งเกษตรกรยังต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าขนส่งสินค้าด้วยตนเอง จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงศึกษาวิธีการที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถตัดสินใจได้ว่า เกษตรกรควรขายสินค้าให้กับจตุรัสซ้อสินค้าใด มากไปกว่านี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการมอบหมายให้เกษตรกรเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรแต่ละชนิดในปริมาณที่เหมาะสมตามทรัพยากรที่มีอยู่ (เงินทุน พื้นที่ เวลา และแรงงาน) การดำเนินการดังกล่าวสามารถพิจารณาในรูปแบบเดียวกันกับการมอบหมายคนงานให้กับเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรม [7] อย่างไรก็ตามการวางแผนการผลิตและจำหน่ายด้วยรูปแบบปัญหาการมอบหมายงานจะทำให้เกษตรกรมีรายได้หรือกำไรมากขึ้น [8]

การแก้ปัญหาด้วยการมอบหมายงานถูกประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิต [9] อุตสาหกรรมขนส่ง [9] - [10] และอุตสาหกรรมเกษตร [8], [11] - [13] เพื่อเพิ่มรายได้หรือผลกำไรให้กับองค์กรและผู้ประกอบการ โดยนักวิจัยจะพิจารณารูปแบบปัญหาดังกล่าวร่วมกับการสร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าการแก้ไขปัญหา การส่งผลิต การขนส่ง และการวางแผนเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรด้วยการมอบหมายงานสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] - [13] ผู้วิจัยพิจารณาด้วยรูปแบบปัญหาการมอบหมายงานดังรูปที่ 2



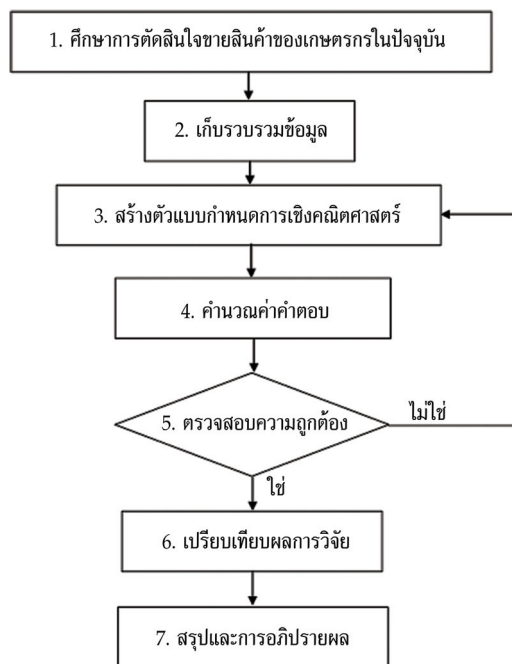
รูปที่ 2 รูปแบบปัญหาการมอบหมายงาน

จากรูปที่ 2 สามารถอธิบายตามขั้นตอนการมอบหมายงาน คือ ผลผลิตทางการเกษตรหรือสินค้าถูกมอบหมายให้เกษตรกรเพาะปลูกตามข้อจำกัดที่เกษตรกรแต่ละคนมีอยู่ หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตเสร็จจึงพิจารณามอบหมายให้กับผู้ซื้อสินค้าทางการเกษตรต่าง ๆ ได้แก่ ตลาดกลางแห่งประเทศไทย สหกรณ์ และพ่อค้าคนกลาง โดยคำนึงถึงรายได้รวมทั้งสูงที่สุด

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันปัญหาการวางแผนเพาะปลูกและจัดจำหน่ายสินค้าทางการเกษตรถูกแก้ไขโดยแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การวางแผนเพาะปลูก เพื่อให้มีปริมาณการผลิตหรือผลผลิตสูงสุด [14] และ 2) การวางแผนจำหน่ายสินค้า ด้วยการเลือกจุดรับซื้อที่ทำให้ระยะทางการขนส่งต่ำที่สุด เพื่อลดต้นทุนค่าขนส่งสินค้า หรือการเลือกจุดรับซื้อที่ทำให้ผลประโยชน์ประกอบการหรือกำไรเพิ่มขึ้น [15] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น จึงทำให้คำตอบที่ดีที่สุดอาจถูกปิดกั้นด้วยการตัดสินใจก่อนหน้า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงรวมปัญหาทั้ง 2 ส่วน และนำเสนอวิธีการแก้ไขโดยสร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนเพาะปลูกและจัดจำหน่ายสินค้าทางการเกษตร เพื่อให้เกษตรกรมีรายได้มากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้มีขั้นตอนหรือวิธีดำเนินการวิจัย เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ในการเพิ่มรายได้ให้เกษตรกร ด้วยวิธีการมอบหมายงาน ซึ่งเริ่มต้นจากการศึกษาการตัดสินใจขายสินค้าหรือเลือกผู้ซื้อสินค้าของเกษตรกร เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง สร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ ไปจนถึงการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้ โดยในกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้ใช้การเปรียบเทียบคำตอบกับเงื่อนไขของการดำเนินงาน ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขจะต้องกลับไปแก้ไขในขั้นตอนของการสร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ก่อน จนกระทั่งคำตอบที่ได้มีความถูกต้องจึงจะพิจารณาเปรียบเทียบค่าผลการศึกษานี้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนหรือวิธีดำเนินการวิจัย

เก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้เป็นสำหรับการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

- ข้อมูลราคารับซื้อสินค้าทางการเกษตรของผู้รับซื้อทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ ราคารับซื้อที่ตลาดกลางแห่งประเทศไทย ราคารับซื้อที่สหกรณ์การเกษตร และราคารับซื้อของพ่อค้าคนกลาง ซึ่งแต่ละฤดูกาลผู้รับซื้อจะตั้งราคารับซื้อต่างกัน แม้สินค้านั้นจะเป็นสินค้าชนิดเดียวกัน [3] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงศึกษาและเก็บข้อมูลราคารับซื้อสินค้าตัวอย่าง 3 ชนิด ที่เป็นสินค้าที่ใช้เวลาในการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมในการเพาะปลูกมากที่สุด 3 ลำดับแรกในพื้นที่ภาคเหนือ โดยแบ่งราคาสินค้าออกเป็น 3 ระดับ คือ ราคารับซื้อสินค้าสูงสุด ราคารับซื้อสินค้าต่ำสุด และราคารับซื้อสินค้าปกติหรือเฉลี่ยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

ชนิด สินค้าที่	ราคาสินค้าทางการเกษตร (บาท)					
	สูงสุด : ต่ำสุด			สภาวะปกติ		
	ตลาดกลาง	สหกรณ์	พ่อค้าคนกลาง	ตลาดกลาง	สหกรณ์	พ่อค้าคนกลาง
1	90 : 72	40 : 14	28 : 10	80	20	15
2	20 : 10	12 : 3	5 : 2	13	5	3
3	32 : 18	20 : 9	12 : 3	24	12	5

- ข้อมูลเงินลงทุนและขนาดพื้นที่ทำกินที่เกษตรกรตัวอย่างมี โดยเกษตรกรตัวอย่างถูกกำหนดด้วยวิธีการสุ่มเลือกแบบค้ำบังถึงการกระจายตำแหน่งทั่วทั้งบริเวณที่ทำการเกษตรของตำบลหนองแม่นา อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ และครอบคลุมเกษตรกรทุกระดับจำนวน 12 คน จากเกษตรกรที่เพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรระยะสั้นจำนวน 227 คน ซึ่งแบ่งจากขนาดการครอบครองที่ดินทำกินตั้งแต่ 3 - 12 ไร่ (ไม่มีการพิจารณาเกษตรกรที่เป็นนายทุนขนาดกลางหรือใหญ่ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีความต้องการช่วยเหลือเกษตรกรให้มีรายได้ที่มากที่สุด) ข้อมูลเงินลงทุนและขนาดพื้นที่ทำกินที่เกษตรกรตัวอย่างมีสามารถแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงินลงทุนและขนาดพื้นที่ทำกินของเกษตรกรตัวอย่าง

เกษตรกร ตัวอย่างที่	เงินลงทุนที่มี (บาท)	ขนาดพื้นที่ทำกิน (ไร่ : ตารางเมตร)	เกษตรกร ตัวอย่างที่	เงินลงทุนที่มี (บาท)	ขนาดพื้นที่ทำกิน (ไร่ : ตารางเมตร)
1	21,000	3 : 4,800	7	43,000	6 : 9,600
2	24,000	3 : 4,800	8	43,000	6 : 9,600
3	26,000	3 : 4,800	9	43,000	6 : 9,600
4	38,000	6 : 9,600	10	43,000	12 : 19,200
5	39,000	6 : 9,600	11	43,000	12 : 19,200
6	39,000	6 : 9,600	12	43,000	12 : 19,200

- ข้อมูลต้นทุนค่าขนส่งสินค้าทางการเกษตรไปยังผู้รับซื้อต่าง ๆ จะพิจารณาจากต้นทุนค่าเผาผลาญพลังงานเชื้อเพลิงเท่านั้น เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้รถขนส่งสินค้าด้วยตนเองจึงไม่คิดต้นทุนค่าจ้างพนักงานขับรถและโหลสินค้า ซึ่งงานวิจัยนี้เกษตรกรใช้รถปิกอัพที่มีอัตราการเผาผลาญพลังงานเชื้อเพลิงเท่ากับ 11 กิโลเมตรต่อลิตร และค่าน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทดีเซลมีราคาเท่ากับ 26.09 บาทต่อลิตร ในการขนส่งสินค้า ดังนั้น ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าจากตำแหน่งที่ตั้งของเกษตรกรไปยังผู้รับซื้อเท่ากับค่าเผาผลาญพลังงานเชื้อเพลิง 2.37 บาทต่อกิโลเมตร คูณกับระยะทางระหว่างเกษตรกรกับผู้รับซื้อ (หน่วยเป็นกิโลเมตร) อย่างไรก็ตามในกรณีที่เกษตรกรขายสินค้าให้กับพ่อค้าคนกลาง จะไม่คิดต้นทุนค่าขนส่งสินค้า (ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าเท่ากับ 0 บาท) เนื่องจากพ่อค้าคนกลางจะเดินทางมารับสินค้าด้วยตนเองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าทางการเกษตรไปยังผู้รับซื้อ

เกษตรกร ตัวอย่าง	ผู้รับซื้อ			เกษตรกร ตัวอย่าง	ผู้รับซื้อ		
	ตลาดกลาง (บาท)	สหกรณ์ (บาท)	พ่อค้าคนกลาง (บาท)		ตลาดกลาง (บาท)	สหกรณ์ (บาท)	พ่อค้าคนกลาง (บาท)
1	829.50	94.80	0	7	805.80	151.68	0
2	817.65	106.65	0	8	810.54	144.57	0
3	836.61	101.91	0	9	820.02	177.75	0
4	853.20	92.43	0	10	865.05	173.01	0
5	869.79	142.20	0	11	857.94	168.27	0
6	888.75	146.94	0	12	848.46	182.49	0

- ข้อมูลต้นทุนค่าเพาะปลูกหรือค่าผลิตและปริมาณการใช้พื้นที่เพาะปลูกต่อกิโลกรัมของสินค้าแต่ละชนิด ผู้วิจัยสำรวจและสัมภาษณ์จากเกษตรกรตัวอย่างแล้วใช้ค่าต้นทุนที่สูงที่สุด เพราะจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้มีแนวโน้มที่ดี ในกรณีที่ใช้ค่าต่ำสุดหรือค่าเฉลี่ยในการพิจารณา ถ้าผลิตผลทางการเกษตรต่ำกว่าค่าคาดหวังจะทำให้เกษตรกรสูญเสียรายได้และไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ ดังนั้น ข้อมูลต้นทุนค่าเพาะปลูกและปริมาณการใช้พื้นที่เพาะปลูกสินค้าแต่ละชนิดสามารถแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ต้นทุนค่าเพาะปลูกและปริมาณการใช้พื้นที่เพาะปลูกสินค้า

ชนิดสินค้า	ต้นทุนค่าเพาะปลูก (บาทต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการใช้พื้นที่เพาะปลูก (ตารางเมตรต่อกิโลกรัม)
1	10.3	0.533
2	0.6	0.750
3	1.5	0.150

สร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์

ตัวแปร:

I	คือ จำนวนเกษตรกร
J	คือ จำนวนจุดรับซื้อสินค้าทางการเกษตร
P	คือ จำนวนชนิดของสินค้าทางการเกษตร
i	คือ เกษตรกร เมื่อ $i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$
j	คือ จุดรับซื้อสินค้าทางการเกษตร เมื่อ $j \in \{1, 2, 3, \dots, J\}$
p	คือ ชนิดสินค้าทางการเกษตร เมื่อ $p \in \{1, 2, 3, \dots, P\}$

พารามิเตอร์:

$PRICE_{j,p}$	คือ ราคาของสินค้าทางการเกษตร p ที่จุดรับซื้อ j เสนอซื้อ (บาทต่อกิโลกรัม)
$NETWORKCOST_{i,p}$	คือ ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าระหว่างเกษตรกร i ไปยังจุดรับซื้อ j (บาทต่อกิโลกรัม)
$PROCOST_p$	คือ ต้นทุนค่าเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตร p (บาทต่อกิโลกรัม)
$AREA_i$	คือ พื้นที่เพาะปลูกที่เกษตรกร i มีอยู่ (ตารางเมตร)
$USEAREA_p$	คือ พื้นที่เพาะปลูกที่สินค้าทางการเกษตร p ต้องการ (ตารางเมตรต่อกิโลกรัม)
$FARCOST_i$	คือ เงินลงทุนที่เกษตรกร i มีอยู่ (บาท)
$MAXLOAD$	คือ ความสามารถในการขนส่งสูงสุดต่อเที่ยว ; $MAXLOAD = 4,000$ กิโลกรัม [16]
M	คือ Big Number; $M = 9,999$ หรือมากกว่าค่า $VOLUME_{i,j,p}$ ที่สามารถเป็นไปได้ [17] - [19]

ตัวแปรตัดสินใจ: เป็นตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจมอบหมายการเพาะปลูกให้กับเกษตรกรแต่ละคนและมอบหมายให้ส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจุดรับซื้อสินค้าต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรตัดสินใจมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$X_{i,j}$	คือ เกษตรกร i ตัดสินใจส่งสินค้าทางการเกษตรไปยังจุดรับซื้อ j ซึ่งเป็นตัวแปรแบบไบนารี กล่าวคือ $X_{i,j}$ เท่ากับ 1 เมื่อเกษตรกร i ตัดสินใจขนส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจุดรับซื้อ j หรือ $X_{i,j}$ เท่ากับ 0 เมื่อเกษตรกร i ตัดสินใจไม่ส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจุดรับซื้อ j
$VOLUME2_{i,p}$	คือ ตัวแปรตัดสินใจด้านปริมาณการเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตร p ของเกษตรกร i (กิโลกรัม)
$VOLUME_{i,j,p}$	คือ ตัวแปรตัดสินใจด้านปริมาณการส่งสินค้าทางการเกษตร p ที่เกษตรกร i เพาะปลูกไปขายยังจุดรับซื้อ j (กิโลกรัม)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: เป็นเป้าหมายของการดำเนินการของตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาถึงค่าตอบแทนที่เกษตรกรจะได้รับจากการลงทุนเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรที่มากที่สุด [11] - [13] ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} MAX = & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I VOLUME_{i,j,p} \cdot PRICE_{j,p} - \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I VOLUME2_{i,p} \cdot PROCOST_p \\ & - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I X_{i,j} \cdot NETWORKCOST_{i,j} \end{aligned} \quad (1)$$

ข้อจำกัดหรือเงื่อนไข: คือสมการที่กำหนดค่าคำตอบของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไปได้ สามารถเรียกอีกนัยหนึ่งว่าขอบเขตของค่าคำตอบ ซึ่งสมการเงื่อนไขมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\sum_{p=1}^P VOLUME2_{i,p} \cdot USEAREA_p \leq AREA_i \quad \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^P VOLUME2_{i,p} \cdot PROCOST_p + \sum_{j=1}^J X_{i,j} \cdot NETWORKCOST_{i,j} \leq FARCOST_i \quad \forall_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I VOLUME_{i,j,p} \leq MAXLOAD \quad \forall_{j,p} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J VOLUME_{i,j,p} = VOLUME2_{i,p} \quad \forall_{i,p} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J VOLUME_{i,j,p} \cdot PRICE_{j,p} \geq 3 \cdot \left(\sum_{p=1}^P VOLUME2_{i,p} \cdot PROCOST_p \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^J X_{i,j} \cdot NETWORKCOST_{i,j} \right) \end{aligned} \quad \forall_i \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P VOLUME_{i,j,p} \leq X_{i,j} \cdot M \quad \forall_{i,j} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{i,j} \leq 1 \quad \forall_i \quad (8)$$

สมการที่ (2) หมายถึง เกษตรกรสามารถใช้พื้นที่เพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรทุกชนิดรวมกันได้ไม่เกินพื้นที่ที่มีอยู่

สมการที่ (3) หมายถึง การเพาะปลูกแต่ละรอบจะต้องใช้เงินลงทุนรวมกับค่าขนส่งได้ไม่เกินเงินทุนที่เกษตรกรแต่ละคนมีอยู่

สมการที่ (4) หมายถึง เกษตรกรสามารถส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจุดรับซื้อได้ไม่เกินความสามารถในการขนส่งสูงสุดต่อเที่ยว

สมการที่ (5) หมายถึง เกษตรกรที่เพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรทุกคนต้องส่งสินค้าทั้งหมดไปขายยังจุดรับซื้อใดจุดรับซื้อหนึ่ง

สมการที่ (6) เป็นสมการที่ยืนยันว่าเกษตรกรแต่ละรายจะมีรายได้มากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของการลงทุนในแต่ละรอบ

สมการที่ (7) เป็นสมการที่ยืนยันว่าเกษตรกรที่ส่งสินค้าไปขายยังจตุรัสชื่อต่าง ๆ ต้องได้รับการพิจารณาต้นทุนค่าขนส่งสินค้าไปยังจตุรัสชื่อนั้น

สมการที่ (8) หมายถึง เกษตรกรแต่ละคนส่งสินค้าทางการเกษตรไปขายยังจตุรัสชื่อใดจตุรัสชื่อหนึ่ง (ตลาดกลางหรือสหกรณ์) ได้ไม่เกินฤดูกาลละ 1 เที้ยวเท่านั้น เนื่องจากเกษตรกรทุกคนจะส่งสินค้าไปขายยังจตุรัสชื่อต่าง ๆ ฤดูกาลละ 1 เที้ยว และสินค้าที่เหลือเกษตรกรดังกล่าวจะตัดสินใจขายให้กับพ่อค้าคนกลาง ($j = 3$)

ผลการวิจัย

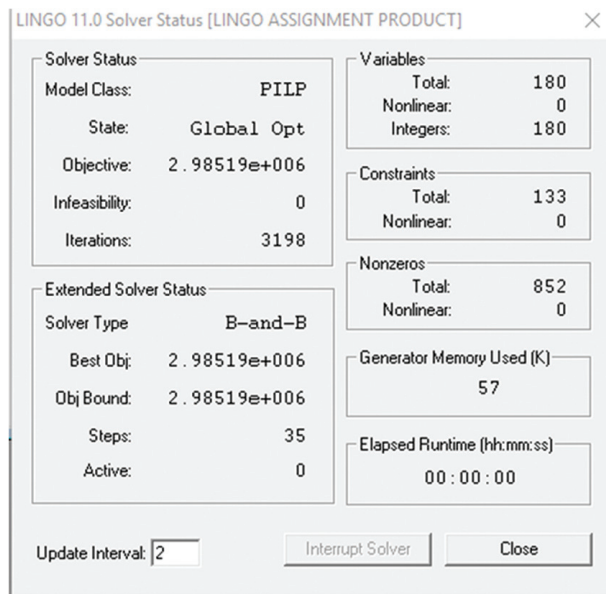
จากการศึกษาข้อมูลข้างต้นพบว่า เกษตรกรมีการวางแผนเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรแบบเชิงเดียว นั่นคือในแต่ละฤดูกาลเกษตรกรแต่ละคนจะปลูกสินค้าชนิดเดียวเท่านั้น และจะขายสินค้าให้กับพ่อค้าคนกลางหรือสหกรณ์เท่านั้น ซึ่งเกษตรกรคนที่ 1 - 6 จะเพาะปลูกสินค้าชนิดที่ 1 และขายให้กับพ่อค้าคนกลาง ส่วนเกษตรกรคนที่ 7 - 12 จะเพาะปลูกสินค้าชนิดที่ 2 และ 3 ในสัดส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง และส่งไปขายยังสหกรณ์ ทำให้มีรายได้รวมประมาณ 2,375,500 บาทต่อฤดูกาล ผู้วิจัยจึงศึกษาและดำเนินการตามวิธีดำเนินการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยสร้างตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์และหาผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo บนเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น Lenovo B4400 หน่วยประมวลผล Intel Core i3-4000M CPU 2.39 GHz หน่วยความจำ 8 GB ซึ่งค่าคำตอบของโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo แสดงดังตารางที่ 5 และรูปที่ 4

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์สำหรับการวางแผนเพาะปลูกของเกษตรกรแต่ละคนที่ได้จากโปรแกรม Lingo

เกษตรกรที่	จำนวนที่ต้องเพาะปลูกสินค้าที่ (กิโลกรัม)			ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกสินค้าที่ (ตารางเมตร)			ตัดสินใจขายให้กับตลาดกลาง (กิโลกรัม)	รายได้ (บาท)
	1	2	3	1	2	3		
1	1,610.0	0	0	858.1	0	0	1,610.0	165,162.5
	0	0	2,390.0	0	0	358.5	2,390.0	
2	1,952.0	0	0	1,040.4	0	0	1,952.0	181,316.8
	0	0	2,048.0	0	0	307.2	2,048.0	
3	2,178.0	0	0	1,160.9	0	0	2,178.0	191,924.6
	0	4	0	0	3.0	0	4.0	
	0	0	1,818.0	0	0	272.7	1,818.0	
4	3,539.0	0	0	1,886.3	0	0	3,539.0	256,187.6
	0	0	461.0	0	0	69.2	461.0	
5	3,651.0	0	0	1,946.0	0	0	3,651.0	261,457.4
	0	0	349.0	0	0	52.4	349.0	

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์สำหรับการวางแผนเพาะปลูกของเกษตรกรแต่ละคนที่ได้จากโปรแกรม Lingo (ต่อ)

เกษตรกร ที่	จำนวนที่ต้องเพาะปลูก สินค้าที่ (กิโลกรัม)			ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูก สินค้าที่ (ตารางเมตร)			ตัดล้นใจ ขายให้กับ ตลาดกลาง (กิโลกรัม)	รายได้ (บาท)
	1	2	3	1	2	3		
6	3,649.0	0	0	1,944.9	0	0	3,649.0	261,344.1
	0	0	351.0	0	0	52.7	351.0	
7	4,000.0	0	0	2,132.0	0	0	4,000.0	277,994.2
8	4,000.0	0	0	2,132.0	0	0	4,000.0	277,989.5
9	4,000.0	0	0	2,132.0	0	0	4,000.0	277,980.0
10	4,000.0	0	0	2,132.0	0	0	4,000.0	277,935.0
11	4,000.0	0	0	2,132.0	0	0	4,000.0	277,942.1
12	4,000.0	0	0	2,132.50	0	0	4,000.0	277,951.5
							รวม	2,985,185.0



รูปที่ 4 ผลลัพธ์จากโปรแกรม Lingo

จากตารางที่ 5 พบว่า เมื่อราคารับซื้อสินค้าทางการเกษตรอยู่ในสภาวะปกติเกษตรกรควรส่งผลผลิตไปขายยังตลาดกลางแห่งประเทศไทย เพราะจะทำให้เกษตรกรมีรายได้รวมมากที่สุดเท่ากับ 2,985,185 บาท ทั้งนี้ เพื่อยืนยันความเหมาะสมและความถูกต้องของการตัดสินใจดังกล่าว ผู้วิจัยจะพิจารณาเพิ่มเติมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของราคารับซื้อผลผลิตทางการเกษตรของผู้รับซื้อแต่ละราย โดยออกแบบการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงราคารับซื้อสินค้าทางการเกษตรเป็น 2 ระดับ คือ ราคารับซื้อต่ำสุดและสูงสุด แล้วหาค่าคำตอบ ซึ่งผลลัพธ์มีค่าเท่ากับ 2,616,051 และ 3,450,339 บาท ตามลำดับ

แต่เกษตรกรยังคงตัดสินใจส่งผลผลิตทางการเกษตรทั้งหมดไปขายที่ตลาดกลางแห่งประเทศไทย เพราะทำให้มีรายได้สูงที่สุด จากรูปที่ 4 แสดงว่าค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา เนื่องจากค่าคำตอบอยู่ในรูปของ Global Optimum

สรุปผลและการอภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่า เกษตรกรคนที่ 1 และ 2 ควรเลือกเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรชนิดที่ 1 และ 3 ในสัดส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง เกษตรกรคนที่ 3 - 6 ควรเลือกเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรชนิดที่ 1 และ 3 เช่นเดียวกัน แต่เพาะปลูกในสัดส่วนประมาณ 10 ต่อ 1 และเกษตรกรคนที่ 7 - 12 ควรเลือกเพาะปลูกสินค้าทางการเกษตรชนิดที่ 1 เท่านั้น ทั้งนี้สินค้าทางการเกษตรของเกษตรกรทุกคนจะต้องส่งไปขายยังตลาดกลางแห่งประเทศไทย เพื่อให้เกษตรกรมีรายได้มากที่สุดตามวัตถุประสงค์ ไม่ว่าจะมารับซื้อสินค้าทางการเกษตรจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ้าเกษตรกรวางแผนการเพาะปลูกและจัดจำหน่ายตามแผนของงานวิจัยนี้ เกษตรกรจะมีรายได้รวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.67 หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 609,685 บาท ต่อฤดูกาล ทั้งนี้เนื่องจากตลาดกลางแห่งประเทศไทยมีราคาซื้อสินค้าทางการเกษตรสูงที่สุด เพราะได้รับการสนับสนุนและกวาดขันจากรัฐบาลอย่างต่อเนื่อง สรุปว่า ตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสำหรับปัญหาการวางแผนเพาะปลูกและจัดจำหน่ายสินค้าทางการเกษตร ด้วยรูปแบบปัญหาการมอบหมายงานจึงมีความถูกต้องและทำให้เกษตรกรมีรายได้มากขึ้น

References

- [1] Kananit, S., Prapatigul, P., and Wongsamun, C. (2017). Farmers' Needs for Agricultural Development from Wathong Subdistrict Administrative Organization Phuwiang District, Khon Kaen Province. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 45, SUPPL. 1, pp. 1515-1521
- [2] Thippo, W. (2018). Logistics and Supply Chain Management of Shallot to Enhance and Increasing Efficiency for Groups of Farmer in Sisaket Province. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University**. Vol. 8, No. 1, pp. 99-111
- [3] Phonsing, R. (2009). 2 Agricultural Product Market Center: Thailand's largest. **Kasikorn Newspaper**. Vol. 82, No. 3, pp. 51-75
- [4] Supsongsuk, V. (2016). **Journal of Cooperative**. Bangkok: Cooperative Promotion Department Publishers
- [5] Tanangsnakool, C. and Sutthinarakorn, W. (2016). Solutions to a Career Stability of Rubber Plantation's Farmers. **Kasetsart Educational Review**. Vol. 31, No. 1, pp. 57-62
- [6] Nuppenau, E. A. (2019). Eco-System Services in Agrarian Value Chains: Value Detection of Bio-Diversity as Public Good Provision, Problems, and Institutional Issues. **Sustainability**. Vol. 11, No. 1, pp. 1-20

- [7] Aalaei, A., Kayvanfar, V., and Davoudpour, H. (2019). Integrating Multi-Dynamic Virtual Cellular Manufacturing Systems into Multi-Market Allocation and Production Planning. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture**. Vol. 233, Issue 2, pp. 643-664. DOI: 10.1177/0954405417731465
- [8] You, P. S. and Hsieh, Y. C. (2018). A Study of Production and Harvesting Planning for the Chicken Industry. **Agricultural Economics-Zemedelska Ekonomika**. Vol. 64, No. 7, pp. 316-327. DOI: 10.17221/255/2016-AGRICECON
- [9] Vahdani, B., Niaki, S. T. A., and Aslanzade, S. (2017). Production-Inventory-Routing Coordination with Capacity and Time Window Constraints for Perishable Products: Heuristic and Metaheuristic Algorithms. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 161, pp. 598-618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.113
- [10] Rafael, A. M. and Laurence, A. W. (2012). MIP Formulations and Heuristics for Two-Level Production-Transportation Problems. **Computers & Operations Research**. Vol. 39, No. 11, pp. 2776-2786. DOI: 10.1016/j.cor.2012.02.011
- [11] You, P. S. and Hsieh, Y. C. (2018). A Study of Production and Harvesting Planning for the Chicken Industry. **Agric. Econ. - Czech**. Vol. 64, No. 7, pp. 316-327. DOI: 10.17221/255/2016-AGRICECON
- [12] Praseeratasang, N., Pitakaso, R., Sethanan, K., Kosacka-Olejnisk, M., Kaewman, S., and Theeraviriya, C. (2019). Adaptive Large Neighborhood Search to Solve Multi-Level Scheduling and Assignment Problems in Broiler Farms. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**. Vol. 5, Issue 3, p. 37. DOI: 10.3390/joitmc5030037
- [13] Praseeratasang, N., Pitakaso, R., Sethanan, K., Kaewman, S., and Golinska-Dawson, P. (2019). Adaptive Large Neighborhood Search for a Production Planning Problem Arising in Pig Farming. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**. Vol. 5, Issue 2, p. 26. DOI: 10.3390/joitmc5020026
- [14] Sethanan, K. and Neungmatcha, W. (2016). Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Mechanical Harvester Route Planning of Sugarcane Field Operations. **European Journal of Operational Research**. Vol. 252, Issue 3, pp. 969-984. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.01.043
- [15] Ketsripongse, U., Pitakaso, R., Sethanan, K., and Srivarapongse, T. (2018). An Improved Differential Evolution Algorithm for Crop Planning in the Northeastern Region of Thailand. **Mathematical and Computational Applications**. Vol. 23, No. 3, DOI: 10.3390/mca23030040
- [16] Office of Commercial Affairs Phetchabun. (2019). **Phetchabun Central Fruit and Vegetable Market (Santisuk Market)**. Phetchabun: Office of Commercial Affairs Phetchabun
- [17] Chokanat, P., Pitakaso, P., and Sethanan, K. (2019). Methodology to Solve a Special Case of the Vehicle Routing Problem: A Case Study in the Raw Milk Transportation System. **AgriEngineering 2019**. Vol. 1, Issue 1, pp. 75-93. DOI: 10.3390/agriengineering1010006

- [18] Arkararungraingkul, R., Supattananon, N., Pitakaso, R., and Supattananon, P. (2019). Transportation Problem Solving for Various Trucks Size using Mixed Integer Programming Model: A Case Study of Beverage Distribution Firm. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University**. Vol. 9, No. 1, pp. 69-82
- [19] Arkararungruangku, R., Supattananon, N., and Pimpatchim, A. (2019). The Mixed Integer Programming Model for Outbound Truck Arrangement A Case Study of Beverage Distribution Firm. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University**. Vol. 9, No. 1, pp. 41-54

อิทธิพลของการบ่มแข็งสองครั้งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

Influence of Double Artificial Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Semi Solid Aluminium Alloy 2024

สิริพร ขันทองคำ¹ สมศักดิ์ คิวดำรงพงศ์^{1*} และธวัชชัย ปูลูกผล²

Siriporn Khantongkum¹ Somsak Siwadamrongpong^{1*} and Thawatchai Plookphon²

Received: May 1, 2019; Revised: September 17, 2019; Accepted: September 26, 2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลของการบ่มแข็งแบบหนึ่งครั้งและสองครั้งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C นาน 4 ชั่วโมง ตามด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิต้อง และในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งจะบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ และศึกษาผลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง รวมถึงศึกษาผลที่มีต่อสมบัติทางกลด้วยการทดสอบค่าความแข็งแรงรีดเคเวลล์ และทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงสูงสุดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มแข็งนั้นประกอบด้วยเฟสยูเทคติกที่มีการกระจายตัวตามขอบเกรนของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นเกรนก้อนกลม และในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เวลาในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงและค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 82.7 HRB และ 395.3 MPa ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันการบ่มแข็งสองครั้งที่เงื่อนไขการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงและค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 108 HRB และ 415.70 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าสมบัติทางกล ทั้งค่าความแข็งแรงและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมาเปรียบเทียบกับระหว่างการบ่มแข็งหนึ่งครั้งกับการบ่มแข็งสองครั้งพบว่า การบ่มแข็งสองครั้งให้ค่าสมบัติทางกลที่ดีกว่าและใช้เวลาในการบ่มแข็งน้อยกว่า

คำสำคัญ : การบ่มแข็ง; อะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง; อะลูมิเนียมเกรด 2024; เฟสยูเทคติก; เฟสแอลฟาอะลูมิเนียม

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

¹ School of Engineering, Suranaree University of Technology

² Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla

* Corresponding Author E - mail Address: somsaksi@sut.ac.th

Abstract

The purpose of this research was to study the influence of one step artificial aging and two step aging on microstructure and mechanical properties of semi-solid aluminium alloy 2024. The samples were taken in solution heat treatment at 505 °C for 4 hours followed by quenching in the water at room temperature. The one step aging was carried out at 190 °C for 6, 9, 12, 15 and 18 hours, respectively. While, two step aging were initially aged at 110 °C for 8 h (first aging step) and then aged at 170 °C for 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 and 4 hours (second aging step), respectively. The microstructure of the samples was examined using the optical microscopy (OM). Hardness test (Rockwell scale B) and ultimate tensile strength were to evaluate mechanical properties. The results showed that at after artificial aging process the microstructure of semi-solid aluminium alloy 2024 consist of eutectic phase which distributed at the grain boundary of globular alpha-aluminium grain (α -Al). The one step aging at 190 °C for 15 hours provided both maximum hardness and ultimate tensile strength of 82.7 HRB and 395.3 MPa, respectively. As the same time, two step aging at initially on aged at 110 °C for 8 hours and then aged at 170 °C for 1 hour yielded both maximum hardness and ultimate tensile strength of 108 HRB and 415.70 MPa, respectively. It was obvious that both hardness and ultimate tensile strength of two step aging were higher than that of one step aging with and lesser time for artificial aging.

Keywords: Artificial Aging; Semi-Solid Aluminium Alloy; Aluminium Alloy 2024; Eutectic Phase; Alpha-Aluminium

บทนำ

เนื่องจากความต้องการในการใช้ผลิตภัณฑ์โลหะผสมอะลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อการใช้งานของอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร โครงสร้างทางวิศวกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ หรือแม้แต่ชิ้นส่วนอากาศยาน โลหะผสมอะลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน เช่น มีน้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ยึดตัวได้ง่าย มีความเหนียวสูง ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ง่ายต่อการขึ้นรูป และที่สำคัญคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของการออกแบบเพื่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอากาศยาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เคยถูกผลิตจากโลหะในกลุ่มเหล็กซึ่งมีน้ำหนักมากกำลังถูกพิจารณาเปลี่ยนเป็นผลิตจากโลหะผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ โลหะผสมอะลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดที่ถูกนำไปใช้

งานในหลายอุตสาหกรรมมากเป็นอันดับต้น ๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้น [1] อีกทั้งสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การทุบขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) เป็นต้น เพื่อสามารถนำไปใช้ในสภาวะงานที่ต้องการและงานที่เหมาะสม และที่สำคัญ อะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน [2] จึงทำให้มีความต้องการในการใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก และในขณะเดียวกันเมื่อมีการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จะส่งผลให้สามารถนำไปใช้ในสภาวะงานที่ต้องการและงานที่เหมาะสมได้มากขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียม

การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เป็นที่นิยมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลคือ กรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน Solution Treat, Quenching และ Artificial Aging แต่ทั้งนี้ในขั้นตอนของการบ่มแข็ง (Artificial Aging) มักใช้เวลานานในการบ่มแข็งเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนคือ Wrought Aluminium โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เกรด 2024-T6 มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและการเปรียบเทียบกระบวนการทางความร้อนด้วยการศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการที่มีการบ่มแข็งหนึ่งครั้งและมากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น [3] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนอากาศยาน เกรด 2024 โดยกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 โดยสภาวะที่ให้ค่าสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือ อบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C นาน 1 ชั่วโมง บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C นาน 12 ชั่วโมง [4] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 2024 ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง พบว่าสภาวะอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 480 °C นาน 14 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175 °C นาน 36 ชั่วโมง มีความแข็งแรงสูงสุดที่ 77.7 HRB [5] ได้บ่มแข็งโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม โดยใช้การบ่มแข็งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70 และ 135 °C ที่เวลาต่างกัน ซึ่งจะนำโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7020 มาอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 475 °C นาน 24 ชั่วโมง และชุบเย็นใน 3 ตัวกลาง ได้แก่ น้ำแข็ง น้ำเย็น และอากาศ จากนั้นบ่มแข็งตามธรรมชาติเป็นเวลา 84 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าการชุบเย็นในน้ำเย็นจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังการบ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.82 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงครากเท่ากับ 362.32 MPa และเฟสพรีซิพิตที่มีขนาดเล็ก ส่วนการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีปริมาณสัดส่วนของเฟสพรีซิพิตที่สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 392.78 MPa และชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังคงความเหนียวไว้ เฟสพรีซิพิตที่มีความหนาแน่นสูงทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันต่ำและความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการบ่มแข็งสองขั้นตอนมีค่ามากกว่าการบ่มครั้งเดียว และในปี ค.ศ. 2007 [6] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็ง 3 ครั้งของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยในการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง โดยครั้งที่หนึ่งบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ช่วงเวลาระหว่าง 10 นาทีถึง 8 ชั่วโมง และการบ่มแข็งครั้งที่สองบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 °C โดยใช้เวลานาน 7 วัน จากนั้นบ่มแข็งครั้งที่สามเพื่อให้เกิดเฟส S (Al_2CuMg)

(Laths) โดยใช้อุณหภูมิเกี่ยวกับการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่ง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 153 HV ภายหลังจากการบ่มแข็งครั้งที่สาม ปี ค.ศ. 2009 [7] ได้ทำการเปรียบเทียบการบ่มแข็งสองขั้นตอน (Double Aging) กับ Thermo Mechanical ของโลหะผสมอะลูมิเนียมอัดขึ้นรูปเกรด 7075 ขนาด $5.08 \times 0.635 \text{ cm}^2$ โดยการนำชิ้นงานทุกชิ้นมาอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ $490 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และชุบเย็นในน้ำ สำหรับการบ่มแข็งสองขั้นตอนจะบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ $121 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 - 420 นาที และชุบเย็นในน้ำ จากนั้นบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ $177 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่เวลาต่าง ๆ กัน สำหรับ Thermo Mechanical จะบ่มแข็งสองขั้นตอนและรีดให้เปลี่ยนรูปที่ 5 25 และ 50 % ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ $121 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การเพิ่มเวลาการบ่มแข็งช่วงแรกเป็น 55 นาที จะได้ค่าความแข็งสูงสุด 191 HV ส่วนอิทธิพลของ Thermo Mechanical จะมีความแข็งแรงดึงมากกว่าการบ่มครั้งเดียวหรือการบ่มสองขั้นตอนเนื่องมาจากการรีดเย็น อย่างไรก็ตามถึงแม้การบ่มแข็งสองขั้นตอนจะมีความแข็งที่จุดครากและความทนแรงดึงต่ำกว่า แต่ให้ค่าความเหนียวสูงสุด ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 [8] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม 2219 สำหรับการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียวเริ่มจากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ $540 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชุบเย็นในน้ำ รวมถึงการให้เย็นตัวในอากาศและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับสภาวะที่มีการบ่มแข็งสองครั้งนั้นมีการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน โดยการเย็นตัวในอากาศตามด้วยการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ $80 - 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงเวลา 16 - 120 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งครั้งที่สองอุณหภูมิ $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยการเย็นตัวในอากาศให้สมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วย ค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ซึ่งทั้งหมดได้สรุปว่าการบ่มแข็งมากกว่าหนึ่งครั้งส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น

ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีนักวิจัยท่านใดศึกษาถึงอิทธิพลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 อีกทั้งอะลูมิเนียมหล่อเกรด 2024 มีสมบัติทางกลที่ดีและมีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมถึงสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ อีกทั้งอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเมื่อนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมหล่อแบบดั้งเดิม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญในการศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

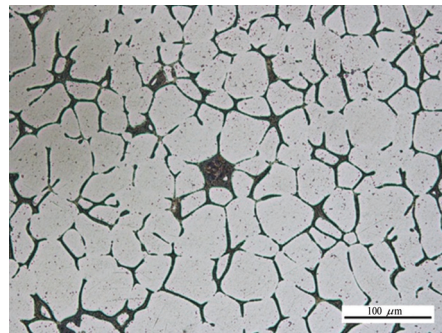
งานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 จากตารางพบว่ามีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลักและแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมรองลงมา ธาตุเหล่านี้จะช่วยให้อะลูมิเนียมเกรดดังกล่าว มีความแข็งแรงสูง (High Strength) โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ใช้ในการทดลองผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid; GISS) เทคนิคดังกล่าวเป็นกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting เทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS นั้น จะหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และรออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงถึง $648 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นใช้แก๊สไนโตรเจน

ผ่านแท่งกราไฟต์พูน ซึ่งใช้ความดันแก๊ส 4 บาร์ และอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตร/นาที เพื่อสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่เป็นเกรนแบบก้อนกลมที่เกิดจากการนิวคลีเอชันหรือเกิดการแตกหักของเดนไดรต์เนื่องจากกระแสไหลวนของน้ำโลหะ แล้วจึงนำสเลอรี่กึ่งของแข็งที่มีอุณหภูมิ 639 °C เทลงสู่แม่พิมพ์ โดยมีอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 270 °C แล้วอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 80 MPa ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค GISS มีขนาด 100 x 100 x 20 mm³ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และโครงสร้างเกรนก้อนกลมที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS แสดงดังรูปที่ 1(ข)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 (wt%)

ส่วนผสม	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
ปริมาณ	5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.04	Bal.

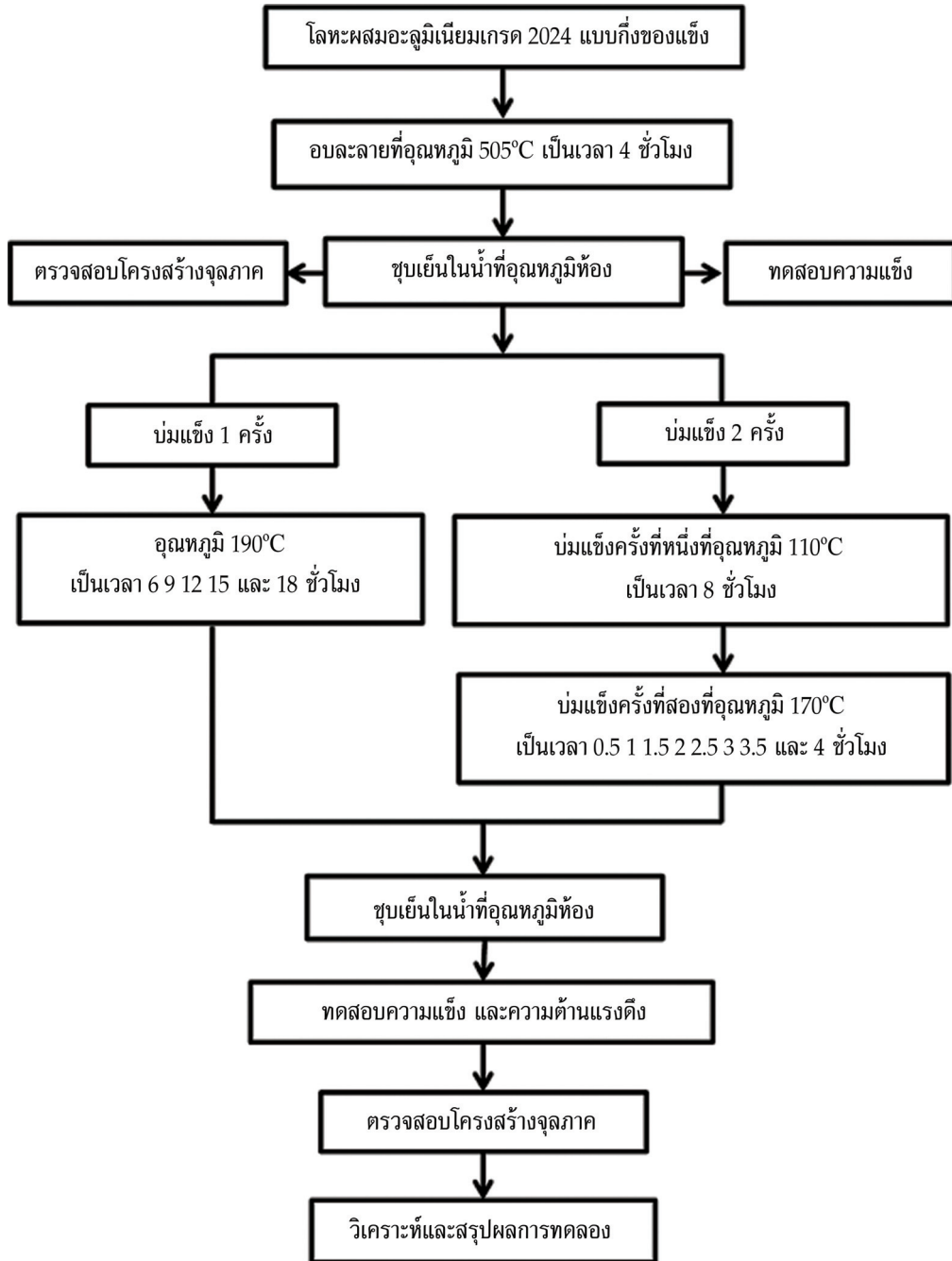
โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS นั้นมีขนาด 100 x 100 x 20 (mm)³ จะถูกตัดขอบของชิ้นงานออกด้านละ 5 mm เนื่องจากการเย็นตัวที่ขอบนั้นมีการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ จากนั้นนำมาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวอนให้มีความหนา 15 x 22 x 20 (mm)³ โดยที่ชิ้นงาน 1 ชิ้นภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 24 ชิ้น เพื่อนำไปเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง



(ก) ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป
 (ข) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม
 รูปที่ 1 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค GISS

ชิ้นตัวอย่างจะถูกปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การอบละลายเฟส (Solution Heat Treatment) การชุบเย็น (Quenching) และการบ่มแข็ง (Aging) โดยชิ้นตัวอย่างจะถูกอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำชิ้นงานออกจากเตาเผาเพื่อชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและชุบเย็นในน้ำไปบ่มแข็ง โดยในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งนั้นจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง สำหรับการบ่มแข็งสองครั้งนั้น จะบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิในการบ่มแข็ง 170 °C เป็นเวลานาน 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการอบละลายเฟสและบ่มแข็งแล้ว นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทราย

เพื่อปรับผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลบี และขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงเพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด แสดงดังรูปที่ 2

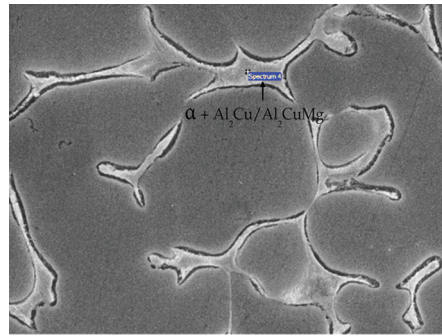
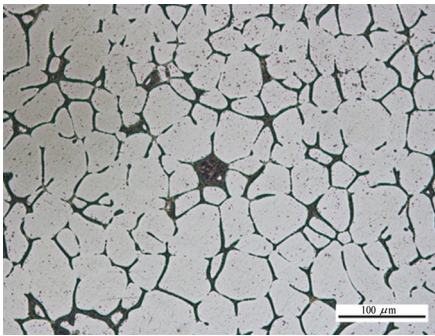


รูปที่ 2 แผนลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

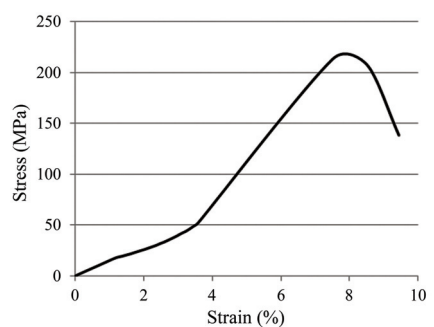
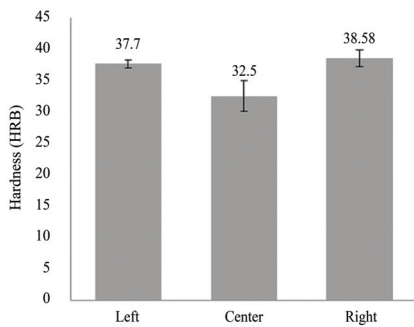
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Squeeze Casting) จากรูปที่ 3(ก) แสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Squeeze Casting) โดยพบว่าชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งมีลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Globular Structure) โดยมีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) อยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัย [9] - [11] โดยที่ในขั้นตอนของการหลอมอะลูมิเนียมนั้น จะเกิดนิวเคลียสของเฟส Al- α ขึ้นในอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำให้เฟส Al- α โตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของเหลวจะแข็งตัวและฟอร์มเป็นเฟสยูเทคติก ซึ่งจากการศึกษาอะลูมิเนียมหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งเกรด 2024 พบว่าเฟสยูเทคติกประกอบไปด้วย $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



(ก) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อขึ้นรูป
(ข) เฟสยูเทคติก $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานสภาวะหล่อขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบก้อนกลม

สมบัติทางกลของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูปในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานจำนวน 6 จุด พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานหล่ออัดและบริเวณขอบด้านซ้าย-ขวา มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยคือ 36.26 HRB ในขณะที่ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูปมีค่าเป็น 213.61 MPa และ 9.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

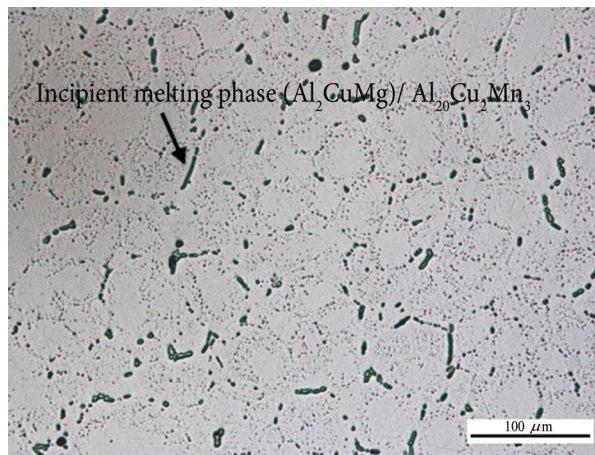


(ก) ความแข็งในบริเวณขอบซ้าย-ขวา และตรงกลาง

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

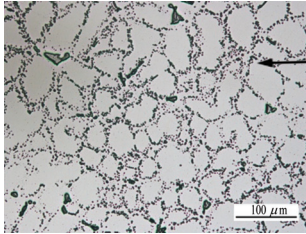
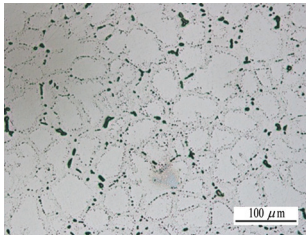
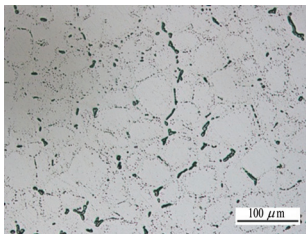
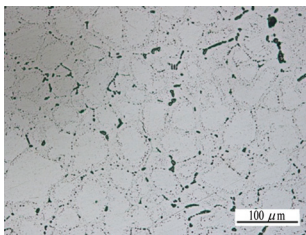
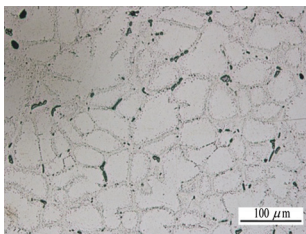
รูปที่ 4 ค่าสมบัติทางกลของชิ้นงานสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้งนั้น พบว่าโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการอบละลายเฟสและเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส Al- α (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติกของทองแดง คือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็ก ๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส Al- α การเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของเฟสยูเทคติก หลังจากการอบละลายเฟสแสดงให้เห็นว่ามีการแพร่ของอะตอมทองแดงออกจากเฟสยูเทคติกและละลายเข้าสู่เมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

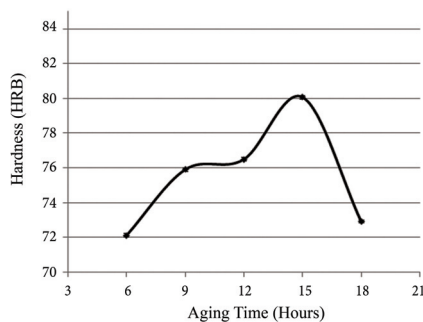
ตารางที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและการบ่มแข็งที่อุณหภูมิคงที่ เวลาแตกต่างกัน

เวลาในการบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)
6	 <p>Precipitate</p>
9	
12	
15	
18	

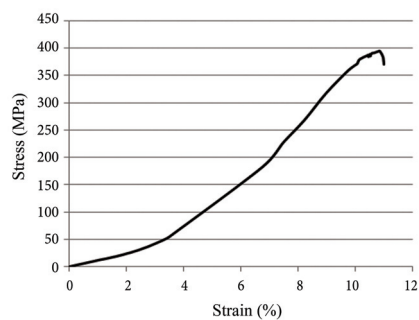
เมื่อนำชิ้นงานภายหลังการอบละลายเฟสไปทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิการบ่มแข็งที่คงที่ ในขณะที่เวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นนั้น ความหนาแน่นของพรีซิพิเตต (Precipitate) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จนถึงจุดที่ทำให้เกิดความแข็งสูงสุด จากนั้นพบว่าความแข็งของชิ้นงานจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่พบ คือ พรีซิพิเตต (Precipitate) มีขนาดโตขึ้นและความหนาแน่นลดลง เพื่อที่จะลดพลังงานอินเตอร์เฟสของระบบลง [12] ดังแสดงในตารางที่ 2

สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง

จากรูปที่ 6(ก) เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกันที่ด้วยเวลาแตกต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่เวลานานกว่าจะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่เวลาน้อยกว่า แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งมากขึ้นจนกระทั่งเลยจุดที่มีความแข็งสูงสุด (Optimum Aging) แล้ว ค่าความแข็งของชิ้นงานจะมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนของพรีซิพิเตตที่เกิดขึ้นลดจำนวนลง เนื่องจากเฟส θ' มี % Al_2Cu มากกว่าเฟส θ ทำให้ Al_2Cu แพร่จาก θ' ไปยัง θ ทำให้ % Al_2Cu ของเฟส θ' ลดลง ส่งผลให้เฟส θ' มีขนาดเล็กลง แต่ในขณะเดียวกันเฟส θ ก็จะโตขึ้นแต่มีจำนวนน้อยลง ในขณะที่ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความต้านแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) เท่ากับ 395.3 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 10.84 % แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและบ่มแข็งที่เวลานานกว่าจะให้ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่า เกิดจากเวลาในการบ่มแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสัมพันธ์กับผลของค่าความแข็งแรง



(ก) ค่าความแข็งของชิ้นงาน



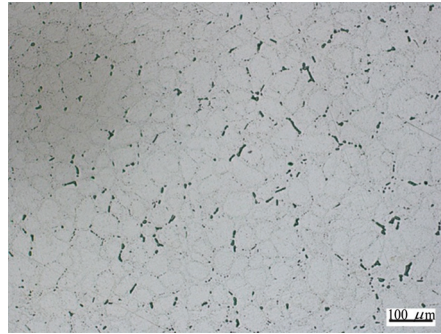
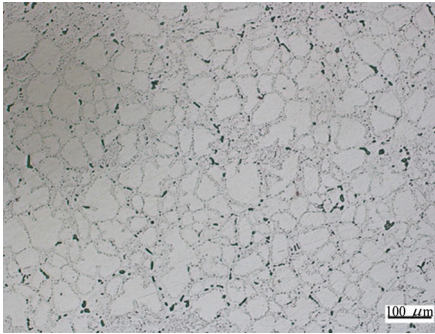
(ข) ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน

รูปที่ 6 ค่าการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและการบ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 190 °C ที่เวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งสองครั้ง

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยมีการบ่มแข็งสองครั้ง โดยหลังจากการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่ง 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเฟสยูเทคติกของทองแดงมีการละลายและแพร่ไปยังเฟสเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม ส่งผลให้เฟสยูเทคติกจะมีขนาดเล็กลงและมีการกระจายอย่างทั่วถึงในบริเวณของขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 7(ก) และเมื่อนำไปบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าเฟสยูเทคติกมีลักษณะที่เล็กละเอียดขึ้นมากกว่าการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียวดังแสดงในรูปที่ 7(ข) จากภาพโครงสร้างจุลภาค สามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคขนาดใหญ่ (สีดำเข้ม) ตามขอบเกรนคือ อนุภาค

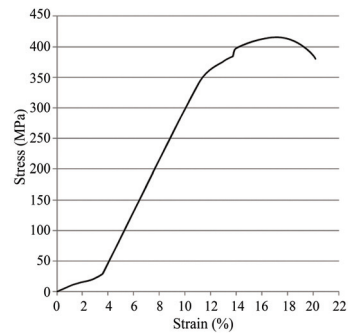
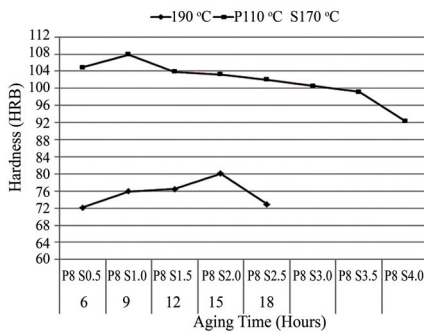
ของ T เฟส ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) เป็นเฟสที่ไม่สามารถละลายได้ในขั้นตอนของการอบละลายเฟส ซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส ในขณะที่อุณหภูมิขนาดเล็กคือ เฟส θ' (Al_2CuMg)



(ก) ครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 8 ชั่วโมง (ข) ครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เวลา 1 ชั่วโมง รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่ง และครั้งที่สอง

สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งสองครั้ง

ผลของกระบวนการทางความร้อนที่มีการบ่มแข็งสองครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มแข็งหนึ่งครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งหนึ่งครั้งจะให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 82.7 HRB ที่อุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็ง 190 °C นาน 15 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งนั้นให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 108 HRB โดยบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 8 ชั่วโมง (P110 °C P8) และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C นาน 1 ชั่วโมง (S170 °C S1.0) และเมื่อเวลาในการบ่มแข็งครั้งที่สองเพิ่มขึ้นค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครั้งที่สองก็จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ในขณะที่ค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครั้งที่สองลดลงนั้นเมื่อดูจากกราฟค่าความแข็งก็พบว่า ค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครั้งที่สองก็ยังคงสูงกว่าค่าความแข็งสูงสุดของการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง เนื่องจากว่าการบ่มแข็งหนึ่งครั้งเป็นการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเฟสพรีซิพิตเฟสแรก (GP Zone) ทำให้พรีซิพิตเจ็พโซนไม่เกิดหรือเกิดขึ้นน้อย ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเฟสพรีซิพิตเฟสแรกในเฟสถัดไปเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามกันการบ่มแข็งสองครั้ง โดยที่มีการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เกิดเฟสพรีซิพิตเฟสแรกคือ เฟสเจ็พโซน (GP-Zone) [9] และเมื่อมีการเย็นตัวที่อุณหภูมิต้องเฟสพรีซิพิตเฟสดังกล่าวก็ยังคงกระจายอยู่ในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ และพร้อมที่จะเปลี่ยนเป็นเฟสพรีซิพิตเฟสต่อไปเมื่อได้รับพลังงาน ซึ่งเมื่อมีการบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือที่อุณหภูมิ 170 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสพรีซิพิตเฟสจากเฟสเจ็พโซนไปเป็นเฟส θ' [10] เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นและทำให้เฟส θ' สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นเฟส θ' ได้มากจึงส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้งนั้นสูงกว่าการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียว และเวลาโดยรวมในการบ่มแข็งสองครั้งนั้นใช้เวลาที่สั้นกว่า และเมื่อเวลาในการบ่มแข็งครั้งที่สองเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความแข็งก็จะลดลงเนื่องจากมีการเปลี่ยนเฟสพรีซิพิตเฟสจาก θ' ไปเป็นเฟส θ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่ปริมาณของเฟสพรีซิพิตเฟสดังกล่าวมีปริมาณน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงดังกล่าว



(ก) ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้ง
เปรียบเทียบกับที่บ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 190 °C

(ข) ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน

รูปที่ 8 ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้งที่อุณหภูมิ 110 °C และ 170 °C

สรุปผลการดำเนินงาน

โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยมีการบ่มแข็งเพียงหนึ่งครั้งและสองครั้งนั้น มีลักษณะเกรนเป็นแบบก้อนกลมกระจายสม่ำเสมอ โดยเกรนลักษณะดังกล่าว ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น รวมถึงจำนวนครั้งในการบ่มแข็งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกล

ผลจากการบ่มแข็งของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยที่การบ่มแข็งหนึ่งครั้งให้ค่าความแข็งสูงสุดที่การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดที่ 82.7 HRB และ 395.3 MPa ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งโดยการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดที่ 108 HRB และ 415.70 MPa ตามลำดับ และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยที่การบ่มแข็งสองครั้งจะให้ค่ามากกว่าการบ่มแข็งหนึ่งครั้งคือ 20.19 และ 10.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการวิจัยดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการบ่มแข็งสองครั้งให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการบ่มแข็งเพียงหนึ่งครั้ง และเวลาโดยรวมในการบ่มแข็งสองครั้งนั้นใช้เวลาในการบ่มแข็งสั้นกว่า หากมีการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะเป็นประโยชน์ในแง่ของได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ สามารถลดเวลาและลดพลังงานได้อีกด้วย

References

[1] Iron and Steel Institute of Thailand. (2014). **Survey Status of Industry for Non-Ferrous Metals**. Bangkok: Iron and Steel Institute of Thailand (in Thai)

- [2] Wijit, P. (1999). **Melting and Heat Treatment of Aluminium Technology Casting**. National Metal and Materials Technology Center (in Thai)
- [3] Reis, D., Couto, A., Domingues, N., Hirschmann, A., Zepka, S., and Moura, C. (2012). Effect of Artificial Aging on the Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy 2024. **Defect and Diffusion Forum**. Vol. 326-328, pp. 193-198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.193
- [4] Siriwan, P., Sirikul, W., Thawatchai, P., and Jessada, W. (2011). Microstructure Evolution During Solution Heat Treatment of Semisolid Cast 2024 Aluminum Alloy. **Advanced Materials Research**. Vol. 339, pp. 714-717. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.339.714
- [5] Chemingui, M., Khitouni, M., Jozwiak, K., Mesmacque, G., and Kolsi, A. (2010). Characterization of the Mechanical Properties Changes in an Al-Zn-Mg Alloy After a Two-Step Ageing Treatment at 70° and 135 °C. **Journal of Material and Design**. Vol. 31, Issue 6, pp. 3134-3139. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.033
- [6] Gao, N., Starink, M., Kamp, N., and Sinclair, I. (2007). Application of Uniform Design in Optimization of Three Stage Ageing of Al-Cu-Mg Alloys. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, pp. 4398-4405. DOI: 10.1007/s10853-006-0659-6
- [7] Emani, S., Benedyk, J., Nash, J., and Chan, D. (2009). Double Aging and Thermo Mechanical Heat Treatment of AA7075 Aluminum Alloy Extrusion. **Journal of Materials Science**. Vol. 44, pp. 6384-6391. DOI:10.1007/s10853-009-3879-8
- [8] Elgallad, E., Zhang, Z., and Chen, X. (2015). Effect of Two-Step Aging on the Mechanical Properties of AA2219 Dc Cast Alloy. **Materials Science and Engineering**. Vol. 625, pp. 213-220. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.002
- [9] Jessada, W. (2011). **Technology of Semi-Solid**. National Metal and Materials Technology Center, Thai Foundry Association. pp. 48-53 (in Thai)
- [10] Romadorn, B., Rangsinee, C., and Jessada, W. (2009). Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing for A356 Aluminum Alloy. **The 7th PSU Education Conference “Higher Education for All: Surviving in Times of Change**. Prince of Songkla University. pp. 549-554 (in Thai)
- [11] Siriporn, K., Sirikul, W., Thawatchai, P., and Jessada, W. (2009). Influence of Heat Treatment Processing Parameters on the Hardness and the Microstructure of Semi-Solid Aluminum Alloy A356. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol. 18, No. 2, pp. 93-97
- [12] Sirikul, W. (2000). **Physical Metallurgy**. Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (in Thai)

โรคติดเชื้อแบคทีเรียในกบนาและความไวต่อยาปฏิชีวนะ Bacterial Infection in Common Lowland Frog (*Hoplobatrachus rugulosus*) and Antibiotic Susceptibility

ปณรัตน์ ผาดี^{1*} และไกรจักร แก้วพรหม²
Panarat Phadee^{1*} and Kraijak Keawprom²

Received: June 30, 2019; Revised: October 1, 2019; Accepted: December 18, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของเชื้อแบคทีเรีย ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโรคและแนวทางในการป้องกันรักษาโรคกบนา โดยทำการศึกษากบนา จำนวน 232 ตัว ที่ติดเชื้อแบคทีเรียในพื้นที่อำเภอนาดูน จังหวัดมหาสารคาม ระหว่างเดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน 2559 พบเชื้อแบคทีเรีย 8 สกุล สกุลที่พบมากที่สุด คือ *Aeromonas* spp. รองลงมาคือ *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Lactobacillus* spp. และ *Serratia* spp. ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากบ่อเลี้ยงกบ พบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิ ค่าความกระด้าง และค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของกบ ส่วนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าแอมโมเนียรวม และค่าไนไตรต์มีค่าอยู่ในช่วงที่อาจเป็นอันตรายต่อกบ ความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียชนิดเด่น 2 สกุล คือ *Aeromonas* และ *Staphylococcus* พบว่าสามารถทำให้กบทั้ง 3 ระยะเกิดโรคได้ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้น 10^5 cfu/mL โดยพบอัตราการป่วยที่ 40.00 - 76.67 % และอัตราการตายที่ 26.67 - 60.00 % ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 10^6 และ 10^7 cfu/mL จะมีผลทำให้อัตราการป่วยและตายสูงขึ้น โดยพบว่าเชื้อ *Aeromonas* spp. จะทำให้กบทั้ง 3 ระยะ คือ ลูกอ๊อด ลูกกบ และกบเนื้อแสดงอาการติดเชื้อ อัตราการป่วยและตายสูงกว่า *Staphylococcus* spp. ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบป่วยสกุล *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Lactobacillus* spp., *Streptococcus* spp., *Rhodococcus* spp. และ *Serratia* spp. จำนวน 30 สายพันธุ์ต่อยาปฏิชีวนะ 20 ชนิด พบว่ายาปฏิชีวนะที่มีผลยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมากที่สุด คือ

¹ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

¹ Faculty of Technology, Mahasarakham University

² Faculty of Agricultural Technology, Rajbhat Maha Sarakham University

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

Oxytetracycline รองลงมาคือ Norfloxacin, Tetracycline, Enrofloxacin และ Gentamycin ตามลำดับ ส่วนยาที่ให้ผลในการดื้อยามากที่สุด คือ Ampicillin, Penicillin G, Sulphamethoxazole, Nitrofurantoin และ Amoxicillin ตามลำดับ

คำสำคัญ : โรคกบ; โรคติดเชื้อแบคทีเรีย; คุณภาพน้ำ; ความสามารถในการก่อโรค; ความไวต่อยาปฏิชีวนะ

Abstract

This study aimed to investigate the distribution of pathogenic bacteria in 232 common lowland frog diseases, some factors affecting the disease and guidelines for bacterial disease prevention and treatment of frog in Nadoon District, Maha Sarakham Province, during August to November, 2016. Totally 8 genera including *Aeromonas* spp., the most dominantly, followed by *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Lactobacillus* and *Serratia* spp., respectively. Water quality analysis showed pH, temperature, hardness and alkalinity were suitable for frogs, but the low dissolved oxygen, high total ammonia-N (NH₃-N) and nitrite (NO₂⁻) may damage to frogs. Pathogenicity test of 2 dominant genera, *Aeromonas* and *Staphylococcus*, found that both genera could affected to 3 stages of frog; tadpole, young frog and adult frog. A bath challenge at 10⁵ cfu/mL could induce morbidity and mortality in the range of 40.00 - 76.67 % and 26.67 - 60.00 %, respectively. At the concentration 10⁶ and 10⁷ cfu/mL found higher disease induction and death. Moreover, *Aeromonas* showed higher virulence than *Staphylococcus* but faster symptom development and mortality in all stages. Antibiotic susceptibility test of 8 genera including *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Lactobacillus* spp., *Streptococcus* spp., *Rhodococcus* spp. and *Serratia* spp., 30 isolates, on 20 antibiotics found that oxytetracycline showed highest sensitivity, followed by Norfloxacin, Tetracycline, Enrofloxacin and Gentamycin, respectively. While Ampicillin, Penicillin G, Sulphamethoxazole, Nitrofurantoin and Amoxicillin found highest resistant.

Keywords: Frog Diseases; Bacterial Infection; Water Quality; Pathogenicity Test; Antibiotic Susceptibility

บทนำ

กบนา (*Hoplobatrachus rugulosus*) เป็นสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำที่นิยมเลี้ยงมากในปัจจุบัน โดยพบมีการเพาะเลี้ยงทั่วทุกภาคของประเทศไทย ในช่วงที่ผ่านมาในจังหวัดมหาสารคามได้มีการเลี้ยงกบนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถือเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สร้างอาชีพและรายได้ให้กับเกษตรกรเป็นอย่างมาก ทั้งการเลี้ยงเพื่อจำหน่ายลูกออดลูกกบ และกบเนื้อ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงที่สั้น การเจริญเติบโตเร็ว ใช้น้ำและพื้นที่ในการเลี้ยงน้อย

สามารถเลี้ยงได้ทั้งในบ่อดิน บ่อซีเมนต์ กระชังหรืออื่น ๆ ใช้ต้นทุนในการเลี้ยงต่ำ รวมทั้งราคาจำหน่ายค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสัตว์น้ำจืดชนิดอื่น [1] - [3] ประกอบกับบ่อในธรรมชาติมีจำนวนลดลงเป็นอย่างมาก แต่ความต้องการบริโภคบนานี้เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ อีกทั้งตลาดต่างประเทศก็เปิดกว้างมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศในแถบเอเชีย ได้แก่ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มาเลเซีย ชองกง จีน และสิงคโปร์ เป็นต้น [4] อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า ปัจจุบันเกษตรกรผู้เลี้ยงกบนั้นมีทั้งที่ประสบความสำเร็จและไม่ประสบความสำเร็จ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเกษตรกรยังขาดความรู้และความเข้าใจอย่างถูกต้องเกี่ยวกับวิธีเพาะเลี้ยงและการจัดการฟาร์มที่ดี [5] โดยเฉพาะการจัดการด้านโรค ซึ่งมักก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างต่อเนื่องในการเลี้ยงกบทุกระยะ โรคในกบมักพบสาเหตุมาจากเชื้อโรคสำคัญ ได้แก่ ปรสิตร แบคทีเรีย เชื้อรา หรือไวรัส โดยเฉพาะโรคที่เกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรียพบทำให้กบป่วยและตายเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากสภาพแวดล้อม การที่เลี้ยงกบหนาแน่นเกินไป ทำให้มีของเสียสะสมในบ่อเลี้ยง ความต้านทานโรคของกบลดลง รวมทั้งกบมักกินกันหรือทำร้ายกันเอง เมื่อกบเกิดบาดแผลจะทำให้กบรับเชื้อและแพร่กระจายไปทั่วร่างกายอย่างรวดเร็ว ทำให้กบป่วยและตายในระยะเวลาอันสั้น [3], [6] โดยทั่วไปโรคติดเชื้อแบคทีเรียในกบมักเกิดจากแบคทีเรียฉวยโอกาส (Opportunistic Bacteria) และมักพบในกรณีที่สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม ซึ่งแบคทีเรียที่มีรายงานว่าพบในกบ ได้แก่ *Aeromonas*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus* และ *Bacillus* เป็นต้น [1], [7] การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิด และการแพร่กระจายของแบคทีเรียในกบระยะต่าง ๆ ผลของคุณภาพน้ำต่อการเกิดโรค ความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรีย ตลอดจนแนวทางการป้องกันรักษาโรคติดเชื้อแบคทีเรียในกบในท้องปฏิบัติกร เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันและรักษาโรคในฟาร์มเกษตรกรต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่าง

ทำการศึกษาสภาพการเลี้ยงและรูปแบบการจัดการฟาร์มเลี้ยงกบในพื้นที่อำเภอนาคู จังหวัดมหาสารคาม จำนวน 4 ฟาร์ม ทำการเก็บตัวอย่างเดือนละ 1 ครั้ง เป็นระยะเวลา 4 เดือน ระหว่างเดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน 2559 โดยเก็บตัวอย่างกบที่แสดงอาการป่วย 3 ระยะ คือ ลูกอ๊อด (ระยะที่มีหาง) ลูกกบ (หลังจากหางหลุดจนถึงอายุ 45 วัน) และกบเนื้อ (ขนาดที่จำหน่ายเพื่อบริโภคในท้องตลาด) ระยะละ 10 10 และ 3 - 5 ตัวต่อเดือนต่อฟาร์ม ตามลำดับ โดยทำการศึกษาลักษณะอาการกบป่วยภายในฟาร์ม สังเกตอาการ พร้อมบันทึกการเปลี่ยนแปลงและลักษณะอาการป่วยที่เกิดขึ้นในแต่ละฟาร์ม แล้วนำมาแยกเชื้อแบคทีเรียภายในท้องปฏิบัติกร

2. การศึกษาชนิดและการแพร่กระจายของแบคทีเรียในกบ

นำตัวอย่างกบป่วยทั้ง 3 ระยะ มาสังเกตลักษณะอาการภายนอกของกบ แล้วทำการตรวจหาสิ่งผิดปกติตามผิวหนังด้วยวิธี Wet Mount และแยกเชื้อแบคทีเรียจากแผลและผิวหนัง โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA), Brain Heart Infusion Agar (BHIA) และ Ogawa Media (OM) เป็นต้น และแยกเชื้อแบคทีเรียจากอวัยวะภายในของกบ เช่น ตับ ไต ม้าม รวมทั้งลำไส้ โดยก่อนแยกเชื้อแบคทีเรียทำให้กบหมดความรู้สึกโดยการแช่กบลงในน้ำแข็ง แล้วทำการผ่าตัดเปิดช่องท้อง และสังเกตลักษณะอาการของอวัยวะภายใน แยกเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ (Aseptic Technique)

เพาะเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ (Pure Culture) จากนั้นนำมาจำแนกชนิดของแบคทีเรียจากลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและชีวเคมี [8] - [10] และใช้ API 20 NE และ API 20 STREP (Bio Mérieux) ตามคู่มือจากบริษัทผู้ผลิต เป็นต้น แล้วจึงทำการเก็บรักษาเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้เพื่อทำการศึกษาคต่อไป

3. การศึกษาคุณภาพน้ำระหว่างเก็บตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) แอมโมเนีย (Ammonia) ไนไตรต์ (Nitrite) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และวัดอุณหภูมิ (Temperature) ด้วย Thermometer โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำฟาร์มละ 3 จุด ลึกจากผิวน้ำ 15 เซนติเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบของคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการเกิดโรคในกบ [11]

4. การศึกษาความสามารถในการก่อโรคของแบคทีเรียต่อกบ 3 ระยะ

ทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียชนิดที่พบในกบป่วยมากที่สุด 2 สกุล คือ *Staphylococcus* spp. และ *Aeromonas* spp. สกุลละ 2 สายพันธุ์ต่อกบ 3 ระยะ เพื่อศึกษาว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สกุล เป็นสาเหตุที่แท้จริงในการก่อให้เกิดโรคในกบหรือไม่ ตามวิธีของ [12] โดยนำลูกอ๊อดน้ำหนัก 0.8 - 1.2 กรัม ลูกกบน้ำหนัก 2.0 - 2.5 กรัม และกบเนื้อน้ำหนัก 60 - 75 กรัม นำมาพักไว้ในถังพลาสติกในท้องปฏิบัติการเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ให้อาหารวันละ 2 ครั้ง (เช้า - เย็น) จากนั้นดำเนินการทดลองในกะละมังบรรจุน้ำ 3 และ 1.5 ลิตร และตู้กระจกขนาด 24 นิ้ว ที่บรรจุน้ำ 10 ลิตร พร้อมวัสดุเกาะสำหรับทดลองในกบระยะลูกอ๊อด ลูกกบ และกบเนื้อ ตามลำดับ โดยนำกบระยะต่าง ๆ มาใส่ในภาชนะทดลองจำนวน 20 10 และ 5 ตัว ตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับลูกอ๊อดและลูกกบทำการทดลองโดยวิธีการแช่เชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น $0 \cdot 10^5$ 10^6 และ 10^7 cfu/mL ส่วนกบเนื้อทดลองด้วยวิธีการฉีดเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้นเดียวกันเข้าที่กล้ามเนื้อโคนขา [3] โดยกลุ่มควบคุมทำการแช่และฉีดด้วยน้ำเกลือ 0.85 % ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C มีการให้อาหารวันละ 2 ครั้ง (เช้า - เย็น) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 14 วัน ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรดด่าง แอมโมเนีย ไนไตรต์ ความเป็นด่าง และวัดอุณหภูมิทุก ๆ 3 วัน สังเกตอาการของกบและความผิดปกติที่เกิดขึ้น และบันทึกผลการทดลอง หากพบกบป่วยและตาย ทำการแยกเชื้อทุก ๆ 3 วัน ตามวิธีการแยกกบป่วยจากธรรมชาติ เพื่อเปรียบเทียบกับเชื้อที่แยกได้ครั้งแรก และจำแนกชนิดเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้อีกครั้ง

5. การทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียต่อยาปฏิชีวนะ

ทำการทดสอบความไวของยาด้วยวิธี Standard Disc Diffusion Method ตามวิธีของบริษัทผู้ผลิต เตรียมเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบป่วยจากการศึกษาคครั้งนี้จำนวน 8 สกุล ได้แก่ *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Lactobacillus* spp. และ *Serratia* spp. จำนวน 5 5 5 4 3 3 3 และ 2 สายพันธุ์ (Strains) ตามลำดับ รวม 30 สายพันธุ์ โดยนำเชื้อมาเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA นำไปบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการป้ายเชื้อจากโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อมาละลายลงในน้ำเกลือ 0.85 % ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ McFarland No.1 (3×10^8 cfu/mL) พร้อมกับนับจำนวนแบคทีเรียโดยวิธี Total Plate Count ใช้ Cotton Bud ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว จุ่มสารละลายเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมไว้ และป้ายลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Muller Hinton Agar (MHA) ให้ทั่วหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ และวางแผ่นยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ 20 ชนิด (ตารางที่ 1) ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อจานละ 4 ชนิด โดยทำจำนวน 3 ซ้ำ บ่มให้เชื้อเจริญที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา

24 ชั่วโมง บันทึกขนาดของ Clear Zone โดยใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร และเทียบความไวต่อยาปฏิชีวนะตามวิธีการของ [8], [13] และบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบนาจำนวน 30 สายพันธุ์ ต่อยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ

ยาปฏิชีวนะ	Sensitivity (%)		
	S	I	R
Ampicillin (AMP30)	4.55	0	95.46
Amoxicillin (Amx10)	18.18	22.73	59.09
Ciprofloxacin (CIP5)	50	9.09	40.91
Chloramphenicol (C30)	50	4.55	45.45
Enrofloxacin (ENR 5)	59.09	22.73	18.18
Gentamycin (CN10)	59.09	18.18	22.73
Kanamycin (K30)	54.55	9.09	36.36
Nalidixic acid (NA30)	40.91	18.18	40.91
Neomycin (N30)	22.73	31.82	45.46
Nitrofurantoin (F300)	27.27	4.55	68.18
Norfloxacin (NOR10)	63.64	9.09	27.27
Novobiocin (NV5)	45.46	18.18	36.36
Oxytetracycline (OT30)	81.82	4.55	13.64
Oxolinic acid (OA2)	50	4.55	45.46
Penicillin G (P10)	9.09	9.09	81.82
Polymycin (PB300)	27.27	22.73	50
Tetracycline (TE30)	63.64	9.09	27.27
Streptomycin (S10)	36.36	9.09	54.55
Sulphamethoxazole (RL25)	0	27.27	72.73
Trimethoprim (W5)	40.91	13.64	45.45

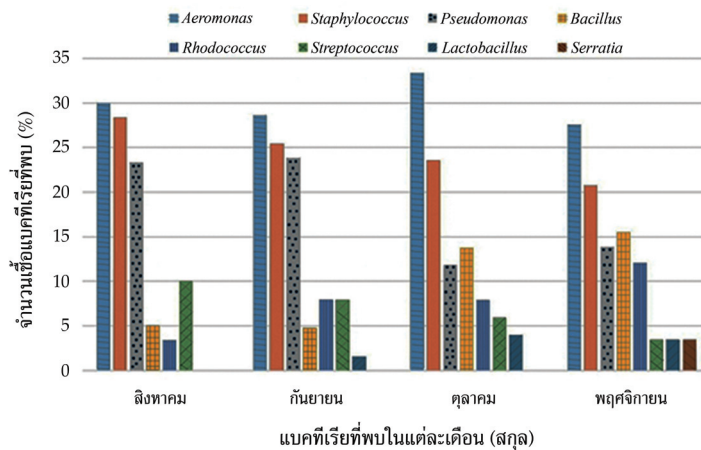
หมายเหตุ: S = Sensitive I = Intermediate และ R = Resistance

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาชนิดและการแพร่กระจายของแบคทีเรียในกบนา

จากการศึกษาชนิดและการแพร่กระจายของเชื้อแบคทีเรียในกบนาจากฟาร์มเลี้ยงกบจำนวน 4 ฟาร์ม จากอำเภอนาดูน จังหวัดมหาสารคาม ระหว่างเดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน 2559 ในกบ 3 ระยะ ได้แก่ ลูกอ๊อด ลูกกบ และกบเนื้อ ระยะเวลา 80 80 และ 72 ตัว ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 232 ตัว โดยลูกอ๊อดและลูกกบสามารถเก็บตัวอย่างได้เฉพาะเดือนสิงหาคมและกันยายน ส่วนเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน เกษตรกรไม่สามารถเพาะพันธุ์กบได้ จึงไม่มีตัวอย่างสำหรับศึกษา มีเพียงกบเนื้อที่สามารถเก็บตัวอย่างได้ทั้ง

4 เดือน เมื่อนำกบป่วยทั้ง 3 ระยะมาศึกษาลักษณะอาการป่วยพบว่า ระยะลูกอ๊อดมีอาการเชื่องซึม ไม่กินอาหาร แยกฝูง หงายท้อง สีลำตัวซีด ตกเลือด ครีบหรือรยางค์กร่อน หรือท้องบวม เป็นต้น ระยะลูกกบ จะไม่กินอาหาร เชื่องซึม แยกฝูง สีลำตัวซีด มีแผลตามลำตัว หรือตกเลือด และดับซีด เป็นต้น ส่วนกบเนื้อหรือกบโตเต็มวัยพบอาการผอม เชื่องซึม มีการตกเลือดตามลำตัว มีแผลที่ปากและเท้า ตาเป็นฝ้าขาว ตาโปน อวัยวะภายในพบดับซีดหรือมีสีดำ มีน้ำในช่องท้องหรือลำไส้ ลำไส้บวมหรือไม่มีอาหาร มีก้อนสีขาว (Nodule) กระจายตามตับและม้าม ผลการตรวจหาเชื้อแบคทีเรีย พบว่ากบทุกระยะทุกตัวอย่าง (100 %) สามารถตรวจพบเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งในตับ ไต ม้าม และลำไส้ โดยพบเชื้อแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* spp. มีจำนวนมากที่สุด รองลงมาคือ *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Lactobacillus* spp. และ *Serratia* spp. คิดเป็น 29.74 24.41 18.69 9.48 7.76 6.90 2.16 และ 0.86 % ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ [1] ที่รายงานว่า พบแบคทีเรีย 7 ชนิด ได้แก่ *Flavobacterium* spp., *Staphylococcus* spp., *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp., *Micrococcus* spp., *Weeksella* sp. และ *Vibrio* spp. ในกบนาจากฟาร์มกบในพื้นที่ภาคใต้ และ [14] รายงานว่า พบแบคทีเรีย *Aeromonas* spp., *Pseudomonas* sp., *Serratia* sp., *Citrobacter* sp., *Proteus* sp., *Diplococcus* sp. และ *Flexibacter columnaris* ในกบเลี้ยงทั้ง 3 ฤดูกาล อีกทั้ง [15] กล่าวว่า พบแบคทีเรีย *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Flavobacterium*, *Rhodococcus* และ *Brevundimona* ในกบ Cascades ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ระหว่างเดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน พบเชื้อแบคทีเรีย 6 7 7 และ 8 สกุล ตามลำดับ โดยพบเชื้อแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* ปริมาณใกล้เคียงกันทั้ง 4 เดือน และเชื้อแบคทีเรียสกุล *Staphylococcus*, *Pseudomonas* และ *Streptococcus* พบมากในช่วงเดือนสิงหาคมและกันยายน ส่วนเชื้อแบคทีเรียสกุล *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Lactobacillus* และ *Serratia* จะพบมากช่วงเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน (รูปที่ 1) จะเห็นว่า การแพร่กระจายของแบคทีเรียในกบนาจะแตกต่างกันตามฤดูกาล ซึ่ง [14] รายงานว่า พบเชื้อแบคทีเรียในกบนา มากที่สุดในฤดูฝน รองลงมาเป็นฤดูร้อนและฤดูหนาว ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp. และ *Serratia* spp. ที่บริเวณตับ ไต และม้าม ส่วนบริเวณลำไส้จะพบ *Staphylococcus* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp. และ *Lactobacillus* spp. ตามลำดับ โดยพบกบบางตัวมีการติดเชื้อแบคทีเรียมากกว่า 1 ชนิด ส่วนขนาดและระยะของกบไม่มีผลต่อชนิดของแบคทีเรียที่พบในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้ยังพบว่ากบตัวอย่างมีการติดเชื้อร่วมกับปรสิตในลำไส้ถึง 98.56 % โดยแยกเป็น *Opalina* sp., *Balantidium* sp., กลุ่มโรติเฟอร์ และ *Opalina* sp. ร่วมกับ *Balantidium* sp. 16.10 5.85 4.88 และ 73.65 % ตามลำดับ สอดคล้องกับ [16] ที่ศึกษาปรสิตในทางเดินอาหารของกบนา (*Rana tigerina*) พบปรสิตจำนวนมากที่ลำไส้เล็กส่วนท้ายและไส้ตรง 4 ชนิด ได้แก่ *Nyctotherus cordiformis*, *O. obtrigonoidea*, *O. hylaxena* และ *B. duodeni* เช่นเดียวกันกับ [17] ที่พบว่า กบนา มีการติดเชื้อปรสิตในลำไส้ 2 สกุล คือ *Opalina* และ *Balantidium* และ [1] ที่พบการติดเชื้อปรสิตในกบนาจากฟาร์มเลี้ยงในพื้นที่ภาคใต้ คือ *Opalina* sp., *Protoopalina* sp. และ *Balantidium* sp. ร่วมกับการติดเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 1 การแพร่กระจายของแบคทีเรียที่พบในกบนาในอำเภอนาคู จังหวัดมหาสารคาม

2. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกบ

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในการเลี้ยงกบทั้ง 4 ฟาร์ม พบว่าทุกฟาร์มมีการใช้น้ำประปาที่สูบจากใต้ดินไม่มีการใช้คลอรีน เกษตรกรไม่ปรับสภาพน้ำก่อนนำมาใช้ น้ำในบ่ออนุบาลลูกออดส่วนใหญ่มีสีเขียวเข้มจากแพลงก์ตอนเนื่องจากการให้อาหารจำนวนมาก ใช้เวลาเลี้ยง 17 - 20 วัน ระยะเวลาไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ส่วนบ่อเลี้ยงลูกกบที่เลี้ยงต่อจากลูกออดใช้เวลาเลี้ยง 7 - 10 วัน มีการเลี้ยงแบบหนาแน่นให้อาหารจนเหลือทำให้น้ำเสียเร็ว มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 2 - 3 วัน ส่วนบ่อเลี้ยงกบเนื้อน้ำจะคุณภาพต่ำมากที่สุด ส่วนใหญ่มีกลิ่นเหม็นคาว จะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเมื่อเกิดการเน่าเสีย โดยจะเปลี่ยนถ่ายน้ำร้อยละ 60 - 100 % และระหว่างเก็บตัวอย่างกบป่วยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกบทั้ง 3 ระยะเวลาของแต่ละฟาร์มมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ค่าแอมโมเนียรวม ค่าไนโตรด ค่าความกระด้าง และค่าความเป็นด่างมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.50 - 8.50 27.68 - 32.45 °C 1.58 - 3.65 mg/L 5.38 - 6.63 mg/L 0.10 - 0.38 mg/L 50.67 - 170.33 mg/L และ 49.36 - 142.88 mg/L ตามลำดับ จะเห็นว่าคุณภาพน้ำอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ยกเว้นค่า DO มีค่าค่อนข้างต่ำ ใกล้เคียงกับรายงานของ [1] ที่รายงานว่า ฟาร์มเลี้ยงกบในพื้นที่ภาคใต้มีค่า DO ระหว่าง 1.20 - 4.30 mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ควรมี DO สูงกว่า 3.00 mg/L [18] ส่วนค่าแอมโมเนียรวม (NH₃ - N) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่นเดียวกับ [14] ที่รายงานว่า ในบ่อเลี้ยงกบส่วนใหญ่จะมีค่าแอมโมเนียอยู่ในช่วง 2.4 - 4.5 mg/L ในขณะที่ [1] พบว่า แอมโมเนียในบ่อเลี้ยงกบในพื้นที่ภาคใต้มีค่าระหว่าง 0.06 - 0.132 mg/L ซึ่งค่าที่ความเหมาะสมควรต่ำกว่า 0.02 mg/L [19] ส่วนปริมาณไนโตรดตรวจพบ 2 ฟาร์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานของ [1] ที่พบว่า บ่อเลี้ยงกบในพื้นที่ภาคใต้มีค่า 0.20 - 0.50 mg/L แต่ค่าความเข้มข้นของไนโตรดที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำควรต่ำกว่า 0.017 mg/L [18] จะเห็นว่า คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกบเนื้อจะค่อนข้างต่ำกว่าระยะอื่น ๆ ทั้งนี้พบว่าในบ่อเลี้ยงจะมีสีน้ำตาลดำและส่งกลิ่นเหม็น หากไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นระยะเวลานานจะมีการสะสมทั้งสิ่งขับถ่าย อาหารเหลือ และเมือกที่ขับออกมาจากตัวกบ รวมทั้งการสะสมของเชื้อโรคในบ่อเลี้ยงกบเมื่อคุณภาพน้ำไม่ดี จะทำให้กบเครียดและอ่อนแอ จึงเกิดการติดเชื้อง่ายขึ้น

3. ผลการศึกษาความสามารถในการก่อโรคของแบคทีเรียต่อกบ

การศึกษาความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียชนิดเด่น 2 สกุล ที่แยกได้จากกบป่วย คือ *Aeromonas* และ *Staphylococcus* สกุลละ 2 สายพันธุ์ ทดลองในกบ 3 ระยะ ที่ความเข้มข้น 0 10^5 10^6 และ 10^7 cfu/mL โดยวิธีการแช่ในลูกอ๊อดและลูกกบ และวิธีการฉีดเข้าบริเวณโคนขาหลัง ในกบเนื้อ สังเกตอาการเป็นเวลา 14 วัน เพื่อศึกษาความสามารถของแบคทีเรีย ว่าเป็นสาเหตุที่แท้จริง ที่ทำให้กบเกิดโรคหรือไม่ รวมทั้งเป็นการศึกษาพัฒนาการของการเกิดโรค เพื่อนำไปสู่การวางแผน การป้องกันรักษาโรคต่อไป [12], [20] ผลการทดลองพบว่า อัตราการติดเชื้อแบคทีเรียที่ระดับ ความเข้มข้นสูงจะติดเชื้อได้รุนแรงและรวดเร็วกว่าความเข้มข้นต่ำ และเชื้อแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* ทำให้กบมีการติดเชื้อมากกว่า *Staphylococcus* ที่ระดับความเข้มข้นของเชื้อและระยะเวลาเท่ากัน (ตารางที่ 2) โดยกบที่ได้รับเชื้อ *Aeromonas* ที่ระดับความเข้มข้น 10^5 cfu/mL จะแสดงอาการป่วยในวันที่ 3 และเริ่มตายในวันที่ 4 ในระยะลูกอ๊อดและลูกกบ ส่วนกบเนื้อจะพบแสดงอาการป่วยในวันที่ 2 ที่ระดับ ความเข้มข้น 10^6 cfu/mL พบกบแสดงอาการป่วยและเริ่มตายในวันที่ 2 ในระยะลูกอ๊อดและลูกกบ ส่วนกบเนื้อจะพบแสดงอาการป่วยในวันที่ 4 และตายในวันที่ 5 ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 10^7 cfu/mL พบกบแสดงอาการป่วยและเริ่มตายในวันที่ 2 ในระยะลูกอ๊อดและลูกกบ ส่วนกบเนื้อจะพบกบแสดงอาการป่วย ในวันที่ 3 เริ่มตายในวันที่ 5 จะเห็นว่าหลังจากกบแต่ละระยะได้รับเชื้อแบคทีเรียในทุกความเข้มข้นจะพบ อัตราการป่วยสูงกว่าอัตราการตาย (ตารางที่ 2) และพบว่ากบทั้ง 3 ระยะ จะหยุดการตายภายใน 7 - 8 7-9 และ 10 - 12 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นกบบางส่วนจะคงอาการป่วยและบางส่วนจะหายป่วยภายใน 10 - 14 วัน ซึ่งอาการป่วยของกบระยะลูกอ๊อดจะแสดงอาการเซื่องซึมไม่กินอาหาร ว่ายน้ำผิดปกติ ตกเลือดตามลำตัว มีแผลที่ขา ระยะลูกกบจะแสดงอาการเซื่องซึม ไม่กินอาหาร ว่ายน้ำผิดปกติ ตกเลือด ตามลำตัว มีแผลที่ขาและลำตัว ท้องบวม และตกเลือดบริเวณตับ และระยะกบเนื้อจะแสดงอาการเซื่องซึม มีแผลที่ขา ตับซีดและตกเลือด ม้ามมีจุดสีขาว เป็นต้น

ส่วนความสามารถในการก่อโรคของ *Staphylococcus* ที่ระดับความเข้มข้น 10^5 cfu/mL พบกบแสดงอาการป่วยในวันที่ 4 และเริ่มตายในวันที่ 5 ที่ระดับความเข้มข้น 10^6 cfu/mL พบกบแสดง อาการป่วยในวันที่ 2 และเริ่มตายในวันที่ 3 ในระยะลูกอ๊อดและลูกกบ ส่วนกบเนื้อจะพบแสดงอาการป่วย ในวันที่ 4 และตายในวันที่ 6 และที่ระดับความเข้มข้น 10^7 cfu/mL พบกบแสดงอาการป่วยและเริ่มตาย ในวันที่ 2 ในระยะลูกอ๊อดและลูกกบ ส่วนกบเนื้อจะพบแสดงอาการป่วยในวันที่ 3 และเริ่มตายในวันที่ 5 (ตารางที่ 2) จะเห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียสูงกว่าจะส่งผลให้กบทุกระยะเกิดการติดเชื้อ ได้รวดเร็วและรุนแรงกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ และพบว่ากบทั้ง 3 ระยะจะหยุดการตายภายในระยะเวลา 5 - 7 8 - 9 และ 7 - 10 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นกบบางส่วนจะคงอาการป่วยและบางส่วนจะหายป่วยได้ ภายใน 12 - 14 วัน ซึ่งกบระยะลูกอ๊อดจะแสดงอาการเซื่องซึม ไม่กินอาหาร ว่ายน้ำผิดปกติ ท้องบวม ตับซีด ระยะลูกกบจะมีอาการเซื่องซึม ไม่กินอาหาร ว่ายน้ำผิดปกติ ตับซีด หากอาการหนักตับจะมีสีดำ ส่วนกบเนื้อจะแสดงอาการเซื่องซึม ไม่กินอาหาร ตับมีสีดำ ม้ามมีจุดขาว ท้องบวม และลำไส้บวม สอดคล้องกับ [21] รายงานว่า กบนา (*Rana tigerina* Cantor) ที่ติดเชื้อ *Aeromonas* sp. จะพบอาการ เซื่องซึม ไม่ตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้น บริเวณท้องและขามีสีแดง ท้องบวม ตับมีการตกเลือด เลือดคั่ง ในหลอดเลือด ม้ามอักเสบ พร้อมทั้งมีเลือดคั่งและของเหลวระหว่างมดกกล้ามเนื้อ นอกจากนี้ [22] ได้ศึกษา ความรุนแรงของการก่อโรคนกบนาที่มีสาเหตุมาจากเชื้อ *Aeromonas* sp., *A. hydrophila* และ *A. sobria*

โดยวิธีการแช่เชื้อความเข้มข้น 1×10^5 cfu/mL พบว่าเชื้อ *Aeromonas* sp. มีความรุนแรงมากที่สุด และการแช่เชื้อ *Aeromonas* sp. เข้มข้น 1×10^4 cfu/mL ที่ 96 ชั่วโมง พบว่า ตับ ม้าม ไต หัวใจ เกิดการตกลือด หัวใจ กระเพาะและลำไส้มีการอักเสบ และมีเลือดคั่งบริเวณกล้ามเนื้อขาและหน้าท้อง ส่วน [23] รายงานว่าเชื้อ *A. hydrophila* ที่ความเข้มข้น 2×10^7 cfu/mL ไม่สามารถทำให้กบคันไม้สีน้ำตาล (*Litoria ewingii*) เกิดโรคได้ด้วยวิธีการแช่ ส่วน [24] กล่าวว่า การแช่กบ (*Rana rugulosa*) ด้วยเชื้อ *Aeromonas* spp. ที่ความเข้มข้น 10^6 cfu/mL ใช้เวลา 6 วัน จึงทำให้กบแสดงอาการของโรคได้ ในขณะที่การทำให้เกิดโรคโดยการฉีดจะใช้เวลาเพียง 24 ชั่วโมงที่ความเข้มข้นเดียวกัน และที่ความเข้มข้น 10^8 cfu/mL จะสามารถก่อให้เกิดโรคได้รวดเร็วและรุนแรงกว่าที่ความเข้มข้น 10^6 และ 10^7 cfu/mL อย่างไรก็ตามสาเหตุการเกิดโรคในกบ นอกจากชนิดและปริมาณของเชื้อแบคทีเรียแล้วยังสัมพันธ์กับความหนาแน่นในการเลี้ยงและสภาพแวดล้อมที่จะมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของกบอีกด้วย [23], [25] - [26]

ตารางที่ 2 ความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* และ *Staphylococcus* ต่อกบในระยะต่าง ๆ

ระยะของกบ/เชื้อแบคทีเรีย	รหัสสายพันธุ์แบคทีเรีย	ความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรีย (%)							
		Control		10^5 cfu/mL		10^6 cfu/mL		10^7 cfu/mL	
		ป่วย	ตาย	ป่วย	ตาย	ป่วย	ตาย	ป่วย	ตาย
ลูกอ๊อด									
<i>Aeromonas</i>	MSUBF59009	0	0	66.67	46.67	83.33	63.33	100	86.67
	MSUBF59111	0	0	63.33	46.67	76.67	60.00	100	83.33
<i>Staphylococcus</i>	MSUBF59007	0	0	53.33	40.00	63.33	46.67	80	66.67
	MSUBF59098	0	0	50.00	40.00	60.00	43.33	83.33	70.00
ลูกกบ									
<i>Aeromonas</i>	MSUBF59009	0	0	76.67	60.00	96.67	73.33	100	86.67
	MSUBF59111	0	0	70.00	56.67	86.67	70.00	100	80.00
<i>Staphylococcus</i>	MSUBF59007	0	0	40.0	26.67	60.00	36.67	63.33	40.00
	MSUBF59098	0	0	43.33	30.00	60.00	37.33	66.67	43.33
กบเนื้อ									
<i>Aeromonas</i>	MSUBF59009	0	0	20.00	0	46.67	13.33	93.33	26.67
	MSUBF59111	0	0	13.33	6.67	33.33	6.67	80.00	20.00
<i>Staphylococcus</i>	MSUBF59007	0	0	20.00	0	33.33	6.67	60.0	13.33
	MSUBF59098	0	0	13.33	6.67	40.00	13.33	46.66	20.00

4. ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียต่อยาปฏิชีวนะ

ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบป่วย จำนวน 8 สกุล ได้แก่ *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Lactobacillus* spp., *Streptococcus* spp., *Rhodococcus* spp. และ *Serratia* spp. จำนวน 30 สายพันธุ์ต่อยาปฏิชีวนะ 20 ชนิด

พบว่ายาปฏิชีวนะที่มีผลต่อแบคทีเรียมากที่สุดคือ Oxytetracycline มากที่สุด รองลงมาคือ Norfloxacin, Tetracycline, Enrofloxacin และ Gentamycin มีค่าความไว 81.82 63.64 63.64 59.09 และ 59.09 % ตามลำดับ (ตารางที่ 1) จะเห็นว่าแบคทีเรียที่ทดสอบมีทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ โดย *Aeromonas*, *Pseudomonas* และ *Serratia* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ ส่วน *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus* และ *Rhodococcus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ทำให้แบคทีเรียตอบสนองต่อยาแตกต่างกันไป ส่วนยาที่มีผลทำให้แบคทีเรียดื้อยา (Resistant) มากที่สุดคือ Ampicillin รองลงมาคือ Penicillin G, Sulphamethoxazole, Nitrofurantoin, Amoxycillin และ Streptomycin มีค่าการดื้อยาที่ 95.46 81.82 72.73 68.18 59.09 และ 54.55 % ตามลำดับ (ตารางที่ 1) เมื่อพิจารณาจากเชื้อแบคทีเรียแต่ละสกุล พบว่ามีความไวและการดื้อต่อยาแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่ายาที่ให้ผลการยับยั้งเชื้อได้ดีคืออยู่ในกลุ่ม Tetracyclines เช่น Oxytetracycline และ Tet-racycline ยาในกลุ่ม Quinolones เช่น Ciprofloxacin, Enrofloxacin และ Norfloxacin และกลุ่ม Aminoglycosides เช่น Gentamicin และ Kanamycin รวมทั้งยาในกลุ่ม Chloramphenicols ส่วนยาที่ให้ผลในการดื้อยาส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม Penicillins ได้แก่ Amoxicillin, Ampicillin และ Penicillin ยาในกลุ่ม Sulfonamides เช่น Sulfamethoxazole/Trimethoprim ยาในกลุ่ม Nitrofurantoin และยาในกลุ่ม Aminoglycosides เช่น Streptomycin ซึ่งคล้ายคลึงกับรายงานของ [2] ที่รายงานว่า เชื้อแบคทีเรีย *A. hydrophila* ที่แยกได้จากกบนาจากจังหวัดสกลนคร มีความไวต่อยา Chloramphenicol, Ciprofloxacin, Oxytetracycline, Sulfamethoxazole/Trimethoprim, Nitrofurantoin, Enrofloxacin, Gentamicin, Kanamycin, Norfloxacin, Tetracycline และ Streptomycin ที่ 94.12 98.04 41.18 98.04 100.00 96.08 98.04 92.16 96.08 39.22 และ 92.16 % ตามลำดับ แต่รายงานว่า Tetracycline และ Oxytetracycline ให้ผลการรักษาที่ไม่คงที่และมีความแปรผันในการรักษาค่อนข้างสูง ส่วนยาที่มีผลทำให้ *A. hydrophila* เกิดการดื้อยา คือ Amoxicillin, Ampicillin, Erythromycin และ Penicillin G มีอัตราการดื้อยาที่ 100 100 96.08 และ 100 % ตามลำดับ ส่วน [1] รายงานว่า เชื้อแบคทีเรียแยกได้จากกบนาในพื้นที่ภาคใต้ ได้แก่ *Flavobacterium*, *Staphylococcus*, *Aeromonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Weeksella* และ *Vibrio* มีความไวต่อยา Chloramphenicol และ *Bacillus* มีความไวต่อยา Gentamicin และ Oxolinic Acid โดยไม่พบการดื้อยาของเชื้อทั้ง 8 สกุล และ [27] ทำการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียสกุล *Aeromonas* spp., *Edwardsiella* spp., *Flavobacterium* spp. และ *Vibrio* spp. จากลำไส้กบบูลฟร็อก (*Rana catesbeiana*) จำนวน 40 สายพันธุ์ ต่อยาปฏิชีวนะ 21 ชนิด พบว่า เชื้อแบคทีเรียมีความไวต่อยา 57.30 % และดื้อต่อยา 35.40 % โดยพบว่าเชื้อแบคทีเรียกว่า 70 % มีความไวต่อยา Furazolidone และ Chloramphenicol ซึ่งเชื้อ *Aeromonas* spp. มีความไวต่อยา Flumequine และ Oxolinic acid มากที่สุด ซึ่งในการศึกษาค้างนี้พบว่า ยาที่ให้ผลดีในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 8 สกุล ที่กรมประมงอนุญาตให้ใช้ คือ Oxytetracycline และ Enrofloxacin ยาที่ให้ผลปานกลาง คือ Oxolinic acid ส่วนยาที่ไม่ให้ผลในการยับยั้งเชื้อ คือ Amoxicillin และ Sulfamethoxazole ส่วนยาชนิดอื่น ๆ ที่อนุญาตให้ใช้แต่ไม่ได้ทดสอบ คือ Sarafloxacin, Toltrazuril และ Sulfamonomethoxine sodium [28]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบนาต่อยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ

ยาปฏิชีวนะ	เปอร์เซ็นต์ความไว (S) และการดื้อยา (R) ของแบคทีเรีย (%)																	
	<i>Aeromonas</i>		<i>Staphylococcus</i>		<i>Pseudomonas</i>		<i>Bacillus</i>		<i>Lactobacillus</i>		<i>Streptococcus</i>		<i>Rhodococcus</i>		<i>Serratia</i>			
	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R		
AMP30	0	100	0	100	0	100	0	100	33.3	66.7	0	100	0	100	0	100		
Amx10	0	80	0	100	20	60	25	25	0	100	0	100	100	0	0	100		
CIP5	40	40	0	80	80	20	75	50	100	0	66.7	33.3	66.7	33.3	50	0		
C30	60	20	0	100	20	80	75	0	66.7	0	33.3	33.3	100	0	0	100		
ENR5	60	0	0	80	80	0	75	0	100	0	100	0	66.7	0	50	0		
CN10	20	60	60	0	80	20	100	25	33.3	0	33.3	33.3	66.7	0	100	0		
K30	40	40	60	20	80	20	80	0	100	0	33.3	66.7	66.7	33.3	100	0		
NA30	40	40	0	100	100	0	0	25	0	0	100	0	0	100	100	0		
N30	40	40	0	20	20	60	100	75	0	100	33.3	33.3	0	66.7	0	0		
F300	40	40	0	100	0	100	100	0	0	50	0	100	50	50	0	100		
NOR10	20	40	0	100	100	0	0	0	100	0	100	0	100	0	50	0		
NV5	40	20	0	80	100	0	80	50	33.3	33.3	66.7	33.3	66.7	0	0	50		
OT30	100	0	60	40	80	0	25	0	100	0	66.7	33.3	66.7	33.3	0	100		
OA2	60	40	0	80	100	0	0	50	33.3	66.7	66.7	66.7	0	66.7	100	0		
P10	0	100	0	100	0	80	0	100	0	100	0	66.7	100	0	0	100		
PB300	0	80	80	20	0	100	50	50	100	0	0	100	33.3	33.3	0	0		
TE30	100	0	0	100	80	0	75	25	0	66.7	100	0	66.7	0	0	100		
S10	40	40	0	100	20	80	0	0	100	0	33.3	33.3	66.7	0	0	50		
RL25	0	60	0	40	0	80	0	100	0	66.7	33.3	33.3	0	100	0	100		
W5	40	40	0	100	100	0	0	50	33.3	100	66.7	0	0	66.7	100	100		

หมายเหตุ: S = Sensitive และ R = Resistance

สรุปผลการวิจัย

การแพร่กระจายของแบคทีเรียก่อโรคนกบนาในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม พบเชื้อแบคทีเรีย 8 สกุล ได้แก่ *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Rhodococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Lactobacillus* spp. และ *Serratia* spp. ซึ่งสามารถพบการติดเชื้อในกบตัวอย่างทุกตัวและมีการแพร่กระจายตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิ ค่าความกระด้าง และค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของกบ ส่วนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าแอมโมเนียรวม และค่าไนโตรค้อยู่ในช่วงที่อาจเป็นอันตรายต่อกบ ความสามารถในการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียชนิดเด่น คือ *Aeromonas* spp. และ *Staphylococcus* spp. พบว่า แบคทีเรียทั้ง 2 สกุล สามารถทำให้กบทั้ง 3 ระยะ เกิดโรคได้ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้น 10^5 cfu/mL ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 10^6 และ 10^7 cfu/mL จะมีผลทำให้อัตราการป่วยและตายสูงขึ้น ผลการทดสอบความไวของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากกบป่วย 8 สกุล ได้แก่ *Aeromonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Rhodococcus* และ *Serratia* spp. ต่อยาปฏิชีวนะ 20 ชนิด พบว่ายาปฏิชีวนะที่มีผลต่อแบคทีเรียมากที่สุดคือ Oxytetracycline รองลงมา คือ Norfloxacin, Tetracycline, Enrofloxacin และ Gentamycin ตามลำดับ ส่วนยาที่ให้ผลในการดีดยามากที่สุดคือ Ampicillin, Penicillin G, Sulphamethoxazole, Nitrofurantoin และ Amoxicillin ตามลำดับ ดังนั้นในการป้องกันรักษาติดเชื้อแบคทีเรียในกบสามารถเลือกใช้ยาปฏิชีวนะที่มีความไวต่อเชื้อด้วยวิธีการฉีดหรือผสมอาหาร และสิ่งสำคัญที่สุดคือ การจัดการฟาร์มให้ถูกสุขลักษณะและจัดการคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงกบให้สะอาดและเหมาะสม ตลอดจนการฆ่าเชื้อโรคนกบในบ่อเป็นระยะ ๆ จะช่วยลดการเกิดโรคนกบได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงกบ นิสิตสาขาวิชาประมงในการเก็บข้อมูลวิจัย และคณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่อนุเคราะห์สถานที่ และสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการให้ทุนสนับสนุนงบประมาณสำหรับวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี

References

- [1] Sririkanonda, S. (2009). Diseases of Cultured Frog (*Rana tigerina*) in Southern Part of Thailand. **Princess of Princess of Naradhiwas University Journal**. Vol. 1, No. 3, pp. 102-117
- [2] Arungamol, S., Jitjak, T., Patchanee, N., and Jensiriwong, S. (2017). The Testing of Antibiotic Sensitivity from Isolated *Aeromonas hydrophila* from Infected Lowland Frog (*Hoplobatrachus rugulosus*) in Sakon Nakhon province. **Prawarun Agricultural Journal**. Vol. 14, No. 2, pp. 238-246

- [3] Phadee, P., Thaiso, K., and Jullawong, P. (2018). **Report of the Science and Technology Village Project “Frog raising village”**. Office of the Permanent Secretary for Science and Technology, Ministry of Science and Technology, Bangkok
- [4] Department of Fisheries. (2015). **Freshwater Aquaculture Production Survey 2013**. Bangkok: Fishery Statistics Analysis and Research Group, Information and Communication Technology Center, Ministry of Agriculture and Cooperatives
- [5] Srisaad, A. (2011). **How to raise frogs guide**. (1st ed). Bangkok: Naka intermedia co., Ltd.
- [6] Kanchanakarn, S. (1993). Diseases in Adult Frogs. **Journal of Aquaculture Diseases News**. Vol. 3, No. 2, pp. 9-11
- [7] Glorioso, J. C., Amborski, R. L., Amborsky, G. F., and Culley, D. D. (1974). Microbiological Studies on Septicemic Bullfrogs (*Rana catesbeiana*). **American Journal of Veterinary Research**. Vol. 35, No. 9, pp. 1241-1245
- [8] MacFaddin, J. F. (1980). **Biochemical Tests for Identification of Medical Bacteria**. 2nd edition. Maryland: Williams and Wilkins
- [9] Austin, D. A. and Austin, B. (1999). **Bacterial Fish Pathogens: Diseases of Farmed and Wild Fish**. 3rd Edition. Chichester: Springer Praxis Publishing
- [10] Buller, N. B. (2004). **Bacteria from Fish and Other Aquatic Animals: A Practical Identification Manual**. Oxford: CAB International Publishers
- [11] APHA, AWWA and WPCF. (1998). **Standard Method for Examination of Water and Wastewater**. 20th Edition. Washington DC: American Public Health Association
- [12] Evans, A. S. (1976). Causation and Disease: the Henle-Koch Postulates Revisited. **The Yale Journal of Biology and Medicine**. Vol. 49, No. 2, pp. 175-195
- [13] Whitman, K. (2004). **Finfish and Shellfish Bacteriology Manual: Techniques and Procedures**. Iowa: Iowa State Press, Blackwell Publishing Company
- [14] Singthonhchai, V. (1997). **Study on the Diseases of Cultured Frog (*Ranatigrina Cantor*)**. Master of Science (Fisheries Science), Faculty of Fishery, Kasetsart University
- [15] Roth, T., Foley, J., Worth, J., Piovio-Scott, J., Pope, K., and Lawler, S. (2013). Bacterial Flora on Cascades Frogs in the Klamath Mountain of California. **Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases**. Vol. 36, pp. 591-598
- [16] Rasmidatt, A., Wattanasirmit, K., and Pariyanonth, P. (1989). Protozoa Content in the Farm-frog (*Rana tigerina*), Rearing in the Mud and Cement Ponds. In **Proceedings of the 27th Kasetsart University Annual Conference: Science, Agro-Industry, Engineering**. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives. pp. 239-245
- [17] Chat Mongkolkul, M., Pariyanonth, P., and Satetasit, J. (2007). **Parasites of *Hoplobatrachus rugulosus* in Areas of Plant Genetics Conservation Project Under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Mahachakri Sirindhon**. Bangkok: National Research Council of Thailand

- [18] Lohalakeanadech, D. (1998). **Fisheries Water Quality Guide**. Trang: Rajamangala Institute of Technology Srivijaya Trang Campus
- [19] Jiwyam, W. (2001). **Introduction to Water Quality and Water Quality Analysis in Aquaculture Ponds**. Bangkok: Chulalongkorn University Press
- [20] Phadee, P. (2009). **Diseases and Diseases Diagnosis of Fish**. Bangkok: Odeon Store Publishing Company
- [21] Siyapong, B. (1995). **Study on Pathogenesis of Bacterial Disease in Frog, *Rana tigerina* Cantor**. Master of Science (Fisheries Science), Faculty of Fishery, Kasetsart University
- [22] Somsiri, T., Chinabut, S., Phanwichien, K., Soontornvit, S., and Damrongphol, Y. (1998). Virulence of *Aeromonas* spp. Isolated from Red Leg Disease Frog. In **Proceedings of the 36th Kasetsart University Annual Conference**. Bangkok: Kasetsart University. pp. 1-10
- [23] Schadich, E. and Cole, A. L. J. (2010). Pathogenicity of *Aeromonas hydrophila*, *Klebsiella pneumoniae*, and *Proteus mirabilis* to Brown Tree Frogs (*Litoria ewingii*). **Comparative Medicine**. Vol. 60, No. 2, pp. 114-117
- [24] Pearson, M. D. (1998). **Motile *Aeromonas* Septicaemia of Farmed *Rana* spp.** Ph.D. thesis, Stirling, UK: University of Stirling
- [25] Janda, J. M. (1991). Recent Advances in the Study of the Taxonomy, Pathogenicity, and Infectious Syndromes Associated with the genus *Aeromonas*. **Clinical Microbiology Reviews**. Vol. 4, No. 4, pp. 397-410. DOI: 10.1128/cmr.4.4.397
- [26] Woodhams, D. C., Ardipradja, K., Alford, R. A., Marantelli, G., Reinert, L. K., and Rollins-Smith, L. A. (2007). Resistance to Chytridiomycosis Varies Among Amphibian Species and is Correlated with Skin Peptide Defenses. **Animal Conservation**. Vol. 10, pp. 409-417
- [27] Lee, S. W., Najiah, M., Wendy, W., Nadirah, M., and Faizah, S. H. (2008). Occurrence of Heavy Metals and Antibiotic Resistance in Bacteria from Internal Organs of American Bullfrog (*Rana catesbeiana*) Raised in Malaysia. **Journal of Venomous Animals and Toxins Including Tropical Diseases**. Vol. 15, No. 2, pp. 353-358. DOI: 10.1590/S1678-91992009000200016
- [28] Food and Drug Administration. (2019). Ministry of Public Health Announcement In accordance with the Food Act BE 2522 (No. 303) BE 2550 Regarding Food Containing Animal Residues. In **The Food Act BE 2522, with the Ministerial Regulations and Notifications of the Ministry of Public Health (Revised version, 2019)**. Bangkok: Food and Drug Administration, Ministry of Public Health. pp. 418-433

กระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนก
ความคิดเห็นของลูกค้า

Feature Selection Method for Improving Customer Reviews Classification

ธีรยุทธ คุณสุข^{1*} และจारी ทองคำ¹

Teerayut Khunsuk^{1*} and Jaree Thongkam¹

Received: May 8, 2019; Revised: October 7, 2019; Accepted: October 7, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาเทคนิคคัดเลือกคุณลักษณะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าเกี่ยวกับร้านอาหาร ข้อมูลถูกเก็บรวบรวมจากเว็บไซต์ wongnai.com จำนวนทั้งหมด 4,487 ข้อความ คณะผู้วิจัยได้นำเอาเทคนิค 3 เทคนิคในการคัดเลือกคุณลักษณะของข้อความ คือ Chi-Square, Information Gain และ Information Gain Ratio ในการวัดประสิทธิภาพของเทคนิคคัดเลือกคุณลักษณะ เทคนิค Naive Bayes เทคนิค Support Vector Machine เทคนิค K-Nearest Neighbor และ C4.5 มาใช้ในการจำแนก ยิ่งไปกว่านั้น 10-fold Cross Validation ได้ถูกนำมาใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็น ชุดข้อมูลเรียนรู้ และวัดค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ และค่าความระลึกลับ จากการทดลองพบว่า เทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain ร่วมกับเทคนิค Naive Bayes ให้ผลที่ดีที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น โดยให้ค่าความถูกต้อง 89.08 % ค่าความแม่นยำ 89.12 % และค่าความระลึกลับ 89.10 %

คำสำคัญ: การคัดเลือกคุณลักษณะ; การจำแนกความคิดเห็น; เหมืองความคิดเห็น

¹ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Informatics, Mahasarakham University

* Corresponding Author E - mail Address: teerayut041995@gmail.com

Abstract

This research proposes improvement of search for feature selection techniques to increase the efficiency of customer feedback classification about restaurants, Information is collected from the website wongnai.com, a total of 4,487 messages. The research team adopted 3 techniques for selecting text features: Chi-Square, Information Gain and Information Gain Ratio to measure the effectiveness of feature selection techniques and applied Naive Bayes, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbor and C4.5 for classification. Moreover, the 10-fold Cross Validation has been used to divide the data into a learning set and measure accuracy (Accuracy), precision (Precision) and recall (Recall). From the experiment found that Information Gain feature selection technique cooperate with the Naive Bayes technique provides the best results in the classification of comments by the accuracy is 89.08 %, the precision is 89.12 % and the recall is 89.10 %.

Keywords: Feature Selection; Text Classification; Opinion Mining

บทนำ

ปัจจุบันมีข้อความแสดงความคิดเห็นของผู้น้อยอย่างมากมายบนอินเทอร์เน็ตซึ่งเป็นที่ยอมรับสำหรับผู้ชื่นชอบใช้งาน ทั้งจากเว็บไซต์ บล็อก และเครือข่ายสังคมออนไลน์ที่อนุญาตให้คนสามารถเข้ามาแสดงความคิดเห็น และยังมีการให้คำคะแนนของสินค้าและการบริการด้วย ความคิดเห็นเหล่านี้ช่วยเปิดพื้นที่ใหม่ให้กับธุรกิจต่าง ๆ และตลาดออนไลน์ ความคิดเห็นจากเว็บไซต์ที่ลูกค้าได้มีการพูดถึงสินค้าหรือการบริการที่ได้รับในแง่มุมต่าง ๆ ย่อมมีความเป็นจริงของความจริงหรือไม่พอใจในสินค้าหรือการบริการ [1] ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อความเหล่านี้จะช่วยให้เห็นทัศนคติ และความคิดเห็นที่แท้จริงของลูกค้า มีผลทำให้ลูกค้าเลือกใช้หรือไม่ใช้สินค้าและการบริการได้ แต่ข้อมูลข้อความแสดงความคิดเห็นบนอินเทอร์เน็ตมีปริมาณมากขึ้น และมีความหลากหลายทำให้ยากต่อการค้นหาและการจัดหมวดหมู่เอกสาร จึงได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการในการจำแนกความคิดเห็น [2] ที่มีจำนวนมากให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

เหมืองความคิดเห็น (Opinion Mining) [3] เป็นกระบวนการวิเคราะห์ความคิดเห็นที่ผู้บริโภคนำเสนอในรูปแบบของข้อความ ซึ่งพบได้บนเครือข่ายสังคมออนไลน์ เพื่อให้ทราบถึงความพึงพอใจในเชิงบวกหรือเชิงลบ การจัดการข้อความที่ซับซ้อนด้วยความคิดเห็นนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่สำคัญหลายประเภท ตัวอย่างเช่น การจำแนกความคิดเห็นของผู้วิจารณ์เกี่ยวกับสินค้าโดยแบ่งประเภทบทวิจารณ์สินค้าออนไลน์ หรือการติดตามการเปลี่ยนแปลงทัศนคติของประชาชนเกี่ยวกับเรื่องการเมือง แต่ปัญหาหนึ่งในการทำเหมืองความคิดเห็นจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีจำนวนมากและความซับซ้อน โดยส่วนใหญ่กระบวนการทำเหมืองความคิดเห็นนั้นจะมีข้อมูลที่ประกอบไปด้วย คุณลักษณะที่ไม่ตรงประเด็น และมีมิติของข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้การทำเหมืองความคิดเห็นต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์มากขึ้น ถ้าข้อมูลมีมิติ หรือตัวแปรมากจะทำให้ข้อมูลเกิดการกระจาย และอาจไม่มีความสัมพันธ์กับมิติอื่น [4]

ดังนั้นการคัดเลือกคุณลักษณะของข้อมูลโดยการทำให้อัตราส่วนข้อมูลเดิมมีขนาดลดลงและสูญเสียคุณลักษณะสำคัญของข้อมูลน้อยที่สุด จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว และยังสามารถช่วยให้การจำแนกข้อมูลได้แม่นยำมากขึ้น

ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเอาเทคนิคและกระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจำแนกความคิดเห็น เช่น [5] ได้ใช้วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะเป็นวิธีที่สำคัญสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาค่าความถูกต้องของการจัดกลุ่ม โดยเทคนิคในการคัดเลือกคุณลักษณะที่ใช้ได้แก่ Information Gain, Information Gain Ratio และ Chi-Square และหลังจากนั้นจึงวัดประสิทธิภาพของการจำแนกข้อความด้วยเทคนิค K-Nearest Neighbor, Naive Bayes และ Support Vector Machine ซึ่งพบว่า Information Gain ใช้ในการคัดเลือกคุณลักษณะได้ดีที่สุดในการจำแนกข้อความประมวลผลได้เร็วและใช้ทรัพยากรน้อย ส่วนงานวิจัยของ [6] ได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะของการทำเหมืองข้อความเพื่อจำแนกข้อความ โดยใช้เทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะ คือ Information Gain, Gain Ratio และ Chi-Square ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีการคัดเลือกคุณลักษณะด้วยเทคนิค Chi-Square โดยใช้การจำแนกประเภทแบบ Support Vector Machine ให้ผลการวัดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เช่นเดียวกันกับงานของ [7] ที่ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Information Gain, Gain Ratio และ Chi-Square โดยได้ใช้เทคนิค Support Vector Machine ในการจำแนกประเภทข้อความ ผลการทดลองพบว่าเทคนิค Chi-Square ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

ในส่วนของงานวิจัยในการจำแนกข้อความก็ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเอาเทคนิคการทำเหมืองความคิดเห็นมาใช้ในการจำแนกข้อความ เช่น [8] ได้นำเสนอวิธีการจำแนกความคิดเห็นโดยการวิเคราะห์ความคิดเห็นภาษาไทยเกี่ยวกับการรีวิวสินค้าออนไลน์ ด้านการบริการห้องพักโรงแรม โดยใช้เทคนิคเหมืองข้อความวิเคราะห์ความคิดเห็นภาษาไทย และสร้างแบบจำลองด้วยอัลกอริทึม 4 วิธี ได้แก่ เทคนิค Support Vector Machine เทคนิค Decision Tree เทคนิค Naive Bayes และเทคนิค K-Nearest Neighbor เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวิเคราะห์ความคิดเห็นภาษาไทย ผลการทดลองพบว่าเทคนิค Support Vector Machine ให้ประสิทธิภาพในการจำแนกที่ดีที่สุด มีค่าความถูกต้อง 83.38 % แต่ [9] ได้นำเสนอการจำแนกความคิดเห็นของคนไทยเกี่ยวกับสินค้าออนไลน์โดยใช้การทำเหมืองข้อความ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาเทคนิคการจำแนกจาก 5 เทคนิคที่มีประสิทธิภาพ คือ เทคนิค Naive Bayes เทคนิค Support Vector Machine เทคนิค K-Nearest Neighbor เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) และเทคนิค C4.5 ผลการทดลองพบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ประสิทธิภาพในการจำแนกที่ดีที่สุด และงานวิจัยของ [10] ได้นำเสนอการจัดกลุ่มคำถามอัตโนมัติบนกระดานสนทนาโดยใช้เทคนิคเหมืองข้อความ ซึ่งได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกข้อความ 3 เทคนิควิธี คือ เทคนิค K-Nearest Neighbor เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ และเทคนิค Naive Bayes ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการทำเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดให้ประสิทธิภาพในการจำแนกที่ดีที่สุด โดยค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.89 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการจำแนกข้อความขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีที่นำมาใช้จำแนก

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว การนำเอากระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะสามารถที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกข้อความ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอากระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้า ซึ่งเทคนิคของการคัดเลือกคุณลักษณะที่นำมาใช้

ได้แก่ Chi-Square, Information Gain และ Gain Ratio และทำการเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้สร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นของลูกค้า คือ เทคนิค Naive Bayes เทคนิค Support Vector Machine เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ และ K-Nearest Neighbor จากนั้นใช้หลักการ 10-fold Cross Validation ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นชุดข้อมูลการเรียนรู้และชุดข้อมูลทดสอบ และวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความระลึก (Recall) โดยแบบจำลองนี้สามารถนำไปจำแนกความคิดเห็นบนเว็บไซต์ของลูกค้าที่มีต่อร้านอาหารได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์ความคิดเห็น ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยได้ 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย การเก็บรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนก่อนการประมวลผล ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะ การสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็น และการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง แสดงขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็น

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลการแสดงความคิดเห็นของลูกค้าที่มีต่อร้านอาหาร จากเว็บไซต์ wongnai.com ซึ่งมีผู้เก็บรวบรวมข้อมูลไว้แล้วโดยสามารถดาวน์โหลดชุดข้อมูลจาก <https://github.com/wongnai/wongnai-corpus> เป็นความคิดเห็นที่มีคะแนนจากผู้แสดงความคิดเห็นในระดับที่ 1 - 5 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เฉพาะความคิดเห็นระดับ 1 2 4 และ 5 ซึ่งเป็นข้อความที่แสดงความคิดเห็นที่มีทั้งด้านบวก ด้านลบ โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม - กันยายน 2561 จำนวน 4,487 ความคิดเห็น จากนั้นกำหนดให้ข้อมูลความคิดเห็นที่มีคะแนนจากผู้แสดงความคิดเห็นในระดับที่ 1 กับ 2 เป็นความคิดเห็นเชิงลบ มีทั้งหมด 2,239 ความคิดเห็น และกำหนดให้ข้อมูลความคิดเห็นที่มีคะแนนจากผู้แสดงความคิดเห็นในระดับที่ 4 กับ 5 เป็นความคิดเห็นเชิงบวก มีทั้งหมด 2,248 ความคิดเห็น แสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2

	review	star	class
0	กลับมาอีกแล้วกับไอ้ชิพไฟเฟ้ วันนี้เรามาที่สาขา...	5	positive
1	เป็นร้านหนึ่งที่ตั้งใจว่าจะไปกินหลายต่อหลายครั...	4	positive
2	มากินช่วงเทศกาล มาวันแรกตอนสามโมงของหมด วันที...	2	negative
3	ร้านนี้ตั้งอยู่ที่ ถนนนิมมานเหมินท์ ซอย5 ร้าน...	4	positive
4	เคยได้ยินว่าร้านนี้เฟดปิ้งย่าง แถวสามย่าน ...	2	negative
5	วันนี้ น่องไปทำธุระแถวกระทรวงมหาดไทยเลยซื้อข้า...	1	negative
6	ไปสยามหิวๆเลยแวะไปทานร้านโปรดร้านนี้ครับ ปกติท...	1	negative
7	ร้านนี้มีชื่อร้านว่า Riverside park tak ตั้งอย...	5	positive
8	ร้านเด็กสอฟ ที่โดนใจที่สุดคือการสังฆารอนและ...	5	positive
9	เข้าแอฟงในเห็นว่าเค้ามีโปรโมชัน พิซซ่า 1 แด...	2	negative

รูปที่ 2 ความคิดเห็นของลูกค้าที่มีต่อร้านอาหาร

2. ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Preprocessing) เป็นการเตรียมข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล ดังนี้

2.1 การตัดคำ (Word Segmentation) เป็นขั้นตอนการแบ่งตัวอักษรจากข้อความ (String) เพื่อหาขอบเขตของแต่ละหน่วยคำ (Morpheme) เพื่อให้การจำแนกข้อความมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ภาษา Python โดยใช้ในการตัดคำภาษาไทย ซึ่งจะใช้วิธีการตัดคำแบบ Maximal Matching ซึ่งเป็นเทคนิควิธีการตัดคำแบบสอดคล้องมากที่สุด แล้วเลือกแบบที่ได้จำนวนน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น เมื่อมีข้อความว่า “ไปหามเหสี” ก็ะตัดคำได้ 2 เส้นทางคือ เส้นทางที่ 1 ไป หาม เ ห สี มีจำนวนคำเท่ากับ 4 คำ เส้นทางที่ 2 ไป หา มเหสี มีจำนวนคำเท่ากับ 3 คำ ซึ่งจะเลือกเส้นทางที่ 2 เนื่องจากมีจำนวนคำน้อยที่สุด การตัดข้อความความคิดเห็นภาษาไทยด้วยโปรแกรมภาษา Python โดยใช้วิธีการตัดคำแบบ Maximal Matching ได้ผลลัพธ์ดังตัวอย่างในรูปที่ 3

In [3]: `from pythainlp.tokenize import word_tokenize`

```
text = "กลับมาอีกแล้ววันนี้เรามาที่สาขาเซ็นทรัลลองสั่งเมนูประจำร้านปรากฏว่าอาหารไม่อร่อยเลย"
proc = word_tokenize(text, engine='newmm')
print(proc)
```

```
['กลับมา', 'อีกแล้ว', 'วันนี้', 'เรา', 'มา', 'ที่', 'สาขา', 'เซ็นทรัล', 'ลอง', 'สั่ง', 'เมนู', 'ประจำ', 'ร้าน', 'ปรากฏ', 'ว่า', 'อาหาร', 'ไม่', 'อร่อย', 'เลย']
```

รูปที่ 3 การตัดข้อความความคิดเห็นภาษาไทยด้วยโปรแกรมภาษา Python

2.2 การเลือกประเภทคำเพื่อใช้เป็นตัวแทนเอกสาร ในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกตัวแทนเอกสาร โดยใช้เฉพาะคำนามกับคำกริยาและคำวิเศษณ์ ซึ่งเป็นประเภทคำที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกความคิดเห็น หลังจากผ่านกระบวนการตัดคำ ผู้วิจัยได้ทำการกำกับประเภทของคำโดยใช้แนวคิดของ ORCHID โดยใช้คลังข้อมูล Orchid corpus ซึ่งเป็นคลังข้อความภาษาไทยที่มีการกำกับขอบเขตของประโยค ขอบเขตของคำ และชนิดของคำ หลังจากที่ทำกำกับชนิดของคำให้แต่ละคำแล้ว จึงได้ทำการคัดเลือกเอาเฉพาะ

ประเภทของคำที่ต้องการที่จะนำมาเป็นตัวแทนเอกสาร หลังจากผ่านกระบวนการตัดคำและการกำกับชนิดของคำ สามารถที่จะสกัดเอาคำจากความคิดเห็นทั้งหมด และทำการตัดคำที่ซ้ำกันออก จะได้คำนามกับคำกริยา และคำวิเศษณ์ 15,462 คำ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้นตอนการกำกับชนิดของคำ โดยใช้คลังข้อมูล Orchid Corpus ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อความภาษาไทยที่มีการกำกับชนิดของคำ หลังจากนั้นใช้ภาษา Python ในการดึงข้อความทั้งหมดเพื่อทำเป็นพจนานุกรมเพื่อนำไปใช้งาน ผลลัพธ์จากการกำกับชนิดของคำโดยใช้ภาษา Python แสดงได้ดังรูปที่ 4

```
In [1]: import re
import os
import codecs,pickle
a={}
path = 'orchid97.crp.utf'
lines=codecs.open(path, 'r',encoding='utf8')
for line in lines:
    if len(re.findall('/', line)) == 1:
        lines1=line.split('/')
        a[lines1[0]]=re.sub('\n', '',lines1[1]) # เอา \n เมื่ออ่านไฟล์ออกนอกอ
    else:
        lines1=0
with open('thaipos.pickle', 'wb+') as handle:
    pickle.dump(a, handle)

In [6]: import nltk.tag, nltk.data
import pickle
with open('thaipos.pickle', 'rb') as handle:
    model = pickle.load(handle)
text= ['กลับมา', 'อีกแล้ว', 'วันนี้', 'อาหาร', 'ไม่', 'อร่อย', 'เลย']
tagger = nltk.tag.UnigramTagger(model=model)
pos = tagger.tag(text)
print(pos)

[('กลับมา', 'VACT'), ('อีกแล้ว', 'ADVN'), ('วันนี้', 'NCMN'), ('อาหาร', 'NCMN'), ('ไม่', 'NEG'), ('อร่อย', None), ('เลย', 'XVAE')]
```

รูปที่ 4 การกำกับชนิดของคำโดยใช้ภาษา Python

3. ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะ

การคัดเลือกคุณลักษณะของเอกสาร [4], [6] คือการนำเอกสารจากระบบต่าง ๆ เช่น เอกสารข่าวจากเว็บไซต์ บทคัดย่อ ความคิดเห็น มาแปลงเพื่อให้เอกสารอยู่ในรูปแบบเดียวกัน มีองค์ประกอบของเอกสารที่เหมือนกัน และแทนคุณลักษณะในเอกสารโดยใช้คำเดียว พยางค์ วลี กลุ่มของคำ ประโยค เพื่อเป็นตัวแทนคุณลักษณะของเอกสาร และทำการคำนวณหาค่าน้ำหนักของคุณลักษณะ อาจใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางภาษาเข้ามาช่วย (Language Analysis) เพื่อตัดคำที่ไม่จำเป็นออกหรือตัดคำตามสถิติของคลังประโยค เพื่อลดมิติของขนาดเอกสาร เนื่องจากชุดของเอกสารเป็นชุดข้อความที่มีเทอมไม่ซ้ำหรือคำที่เกิดขึ้นในเอกสารทั้งหมด โอกาสเกิดของคำสามารถเกิดขึ้นเป็นหลักล้านคำทำให้ข้อมูลมีมิติมาก จึงต้องประยุกต์ใช้การคัดเลือกคุณลักษณะที่ดีเพื่อนำมาหาประสิทธิภาพ ลดเวลาในการประมวลผลและทรัพยากร [11] อัลกอริทึมในการคัดเลือกคุณลักษณะที่ใช้ในการวิจัยนี้ 3 วิธี ได้แก่

3.1 Chi-Square คือ การประเมินค่าของแอมทริบิวต์ โดยคำนวณค่า Chi-Square ทางสถิติ [12] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

3.2 Information Gain [5] คือการประเมินค่าเพื่อใช้ในการแบ่งข้อมูลด้วยการคำนวณค่า Gain สำหรับแต่ละมิติข้อมูลถ้ามิติข้อมูลใดมีค่า Gain สูงสุด จะถูกเลือกให้เป็นกลุ่มย่อยที่มีอำนาจจำแนกดังสมการที่ (2) [6] แสดงการคำนวณค่า Information Gain

$$infoGain(S, A) = Entropy(S) - \left| \frac{S_v}{S} \right| E(S_v) \tag{2}$$

โดยที่

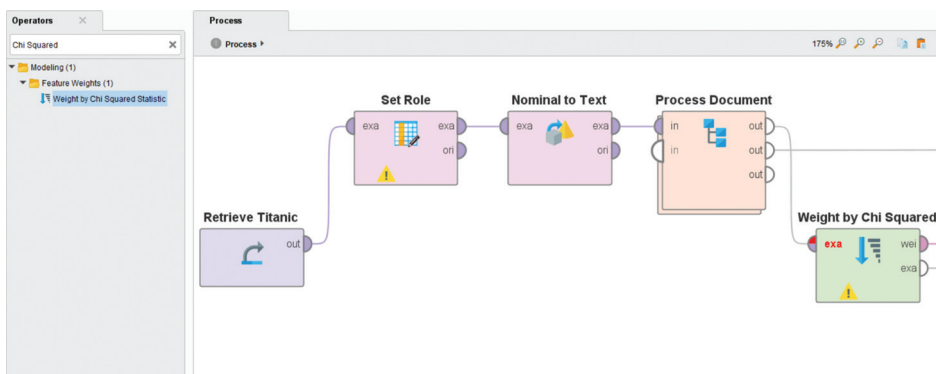
- A คือ Attribute A
- $|S_v|$ คือ สมาชิกของ Attribute A ที่มีค่า V
- $|S|$ คือ จำนวนสมาชิกของกลุ่มตัวอย่าง

3.3 Gain Ratio [13] มีหลักการทำงานในลักษณะเดียวกับการทำงานของต้นไม้ตัดสินใจ โดยทำการหาตัวแปรที่เป็นตัวแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยที่มีสมาชิกภายในกลุ่มเป็นชนิดเดียวกันมากที่สุด ด้วยสิ่งที่เรียกว่า อัตราส่วนเกน (Gain Ration) ซึ่งอัตราส่วนเกนคือ มาตรการได้ประโยชน์จากการแบ่งกลุ่มย่อย โดยค่าของอัตราส่วนเกนมาจากอัตราส่วนระหว่างค่าเกน (Gain) กับค่าสารสนเทศการแบ่งกลุ่ม (Split Info) [6] ซึ่งเป็นการลดปัจจัยของตัวแปรที่มีค่าหลากหลาย โดยสมการหาอัตราส่วนเกนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3) - (4)

$$SplitINFO = - \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n} \log \frac{n_i}{n} \tag{3}$$

$$GainRatio(A) = \frac{InfoGain(A)}{SplitINFO(A)} \tag{4}$$

ในการคัดเลือกคุณลักษณะด้วยเทคนิค Chi-Square, Information Gain, Gain Ratio โดยใช้โปรแกรม RapidMiner Studio 9 โดยทำการเลือกเทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะ ได้จากส่วนของ Operators ซึ่งจะอยู่ในหมวด Modeling/Feature Weights ซึ่งการคัดเลือกคุณลักษณะด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio 9 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio 9

4. การสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็น

ในกระบวนการสร้างแบบจำลองจะนำชุดคุณลักษณะของคำแต่ละประเภทมาทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ (1) ชุดข้อมูลเรียนรู้ (2) ชุดข้อมูลทดสอบ และนำข้อมูลทั้งสองชุดไปสร้างแบบจำลองเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดกลุ่มความคิดเห็นที่ได้ใช้ข้อมูลความคิดเห็นที่เป็นภาษาไทย โดยใช้เทคนิคการจำแนกของการทำเหมืองข้อความมาใช้ในการจำแนกข้อความ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกข้อความ จึงได้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้เลือกเทคนิคในการจำแนกข้อความ เพื่อนำมาสร้างและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าต่อร้านอาหาร ซึ่งมีทั้งหมด 4 เทคนิค ได้แก่

4.1 เทคนิค Naive Bayes [9], [14] คือ เทคนิควิธีการจำแนกประเภทโดยอาศัยหลักการของทฤษฎีความน่าจะเป็นตามกฎของเบย์ เพื่อหาว่าสมมติฐานใดน่าจะเป็นความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งจะสามารถบ่งบอกถึงความน่าจะเป็นของข้อมูลชุดหนึ่งที่จะอยู่ในหมวดหมู่ของข้อมูลนั้น ๆ ซึ่งเป็นวิธีการจำแนกประเภทข้อมูลที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง โดยใช้ในการจำแนกหมวดหมู่เอกสารข้อความ (Text Classification) ได้ดี การทำงานไม่ซับซ้อนเหมาะกับกรณีของเซตตัวอย่างที่มีจำนวนมาก เป็นวิธีที่ใช้งานได้ดีและง่ายต่อการประมวลผล มีการทำงานไม่ซับซ้อนเหมือนวิธีการอื่น ๆ ซึ่งทฤษฎีของเบย์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

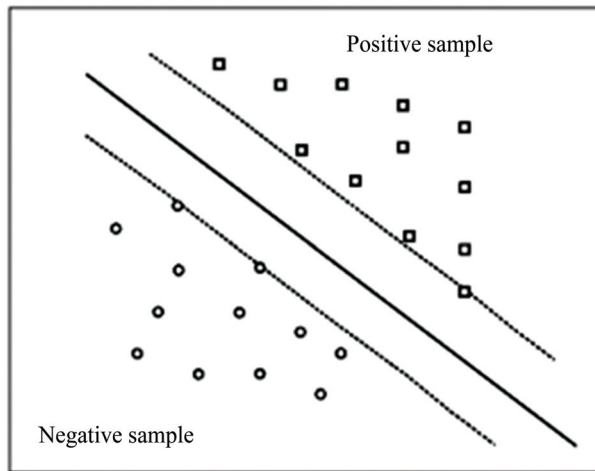
$$P(H|X) = \frac{P(X|H)P(H)}{P(X)} \quad (5)$$

โดย

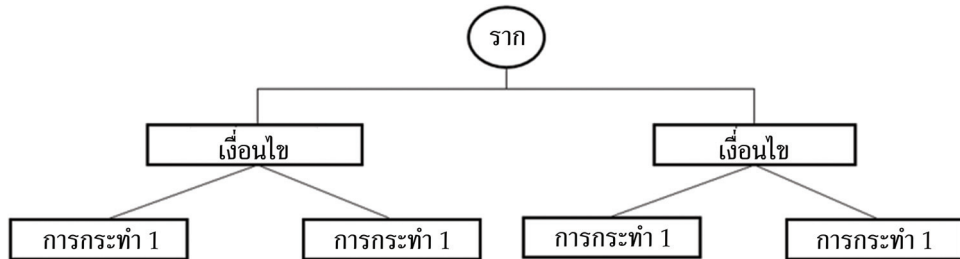
X		แทนข้อมูลการแจกแจงความน่าจะเป็น
H	คือ	คลาสของข้อมูล
$P(H)$	คือ	ความน่าจะเป็นก่อนหน้าของ H
$P(X)$	คือ	ความน่าจะเป็นก่อนหน้าของ X
$P(H X)$	คือ	ความน่าจะเป็นของ H เมื่อรู้ X
$P(X H)$	คือ	ความน่าจะเป็นของ X เมื่อรู้ H

4.2 เทคนิค Support Vector Machine [8], [15] คือ ขั้นตอนวิธีการที่มีความรวดเร็วและเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถนำมาช่วยแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูล โดยอาศัยหลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยกกลุ่มของข้อมูลที่ถูกต้องป้อนเข้าสู่กระบวนการสอนให้ระบบเรียนรู้ โดยเน้นไปที่เส้นแบ่งแยกแยะกลุ่มข้อมูลได้ดีที่สุด แนวความคิดของเทคนิควิธี SVM นั้นเกิดจากการที่นำค่าของกลุ่มข้อมูลมาวางในฟีเจอร์สเปซ (Feature Space) ในลักษณะเชิงเส้นแบ่ง (Hyperplane) ที่เป็นเส้นตรงขึ้นมา เพื่อให้ทราบว่าเส้นตรงที่แบ่งกลุ่มสองกลุ่มออกจากกันนั้นเส้นใดเป็นเส้นที่ดีที่สุดดังตัวอย่างในรูปที่ 6

4.3 เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจแบบ C4.5 [16] - [17] เป็นเทคนิควิธีหนึ่งที่ได้ทำการพัฒนามาจากเทคนิค ID3 ซึ่งได้กลายมาเป็นอัลกอริทึมพื้นฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำงานอัลกอริทึมต่าง ๆ ใช้ในการสร้างต้นไม้ประกอบการตัดสินใจสำหรับใช้ในการจำแนกประเภทข้อมูล โดยในการสร้างต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 จะใช้ค่ามาตรฐานส่วนเกิน (Gain Ratio) เพื่อทำการคัดเลือกคุณลักษณะเพื่อทำการคัดเลือกคุณลักษณะที่จะใช้เป็นรากหรือโหนด ดังตัวอย่างในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ตัวอย่างระนาบการตัดสินใจของ Support Vector Machine



รูปที่ 7 ตัวอย่างต้นไม้ตัดสินใจสำหรับการจำแนกคุณลักษณะ

4.4 เทคนิค K-Nearest Neighbor [10], [18] คือ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดหมวดหมู่ข้อมูลที่เรียงง่ายและมีประสิทธิภาพ แต่เทคนิคนี้มีวิธีการจัดหมวดหมู่ที่แตกต่างจากเทคนิคอื่นตรงที่ไม่ได้ใช้ข้อมูลชุดฝึกในการสร้างแบบจำลอง แต่จะใช้ข้อมูลทั้งชุดมาเป็นตัวแบบจำลองเลย หลักการจัดหมวดหมู่ข้อมูลจะพิจารณาจากค่า k เช่น ค่า $k = 5$ หมายถึง ขั้นตอนวิธีจะพิจารณาข้อมูลจำนวน 5 ชุด มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลชุดตัวอย่าง การคำนวณความใกล้เคียงจะใช้วิธีการวัดระยะทางยูคลิเดียน (Euclidian Distance) จากสมการที่ (6) ภายหลังจากที่รวบรวมจำนวนสมาชิกที่ใกล้เคียงที่สุด k ตัวได้แล้ว โดยการเลือกหมวดหมู่จะเลือกหมวดหมู่ที่สมาชิกส่วนใหญ่ที่อยู่ในกลุ่ม k สังกัดอยู่มากที่สุดให้กับสมาชิกใหม่ที่มาเข้ากลุ่มด้วย ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า k เท่ากับ 1

$$dist(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \tag{6}$$

โดย

$dist(X_i, X_j)$ คือ ระยะห่างระหว่างข้อมูลตัวอย่าง X_i กับข้อมูลตัวอย่าง X_j

n คือ จำนวนคุณลักษณะทั้งหมดของข้อมูลตัวอย่าง

$X_{i,k}$ คือ คุณลักษณะตัวที่ k ของข้อมูลตัวอย่าง X_i

5. การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ในการประเมินผลของแบบจำลองใช้เทคนิคการวัดประสิทธิภาพแบบ 10-fold Cross Validation โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 กลุ่มเท่า ๆ กัน จากนั้นในแต่ละรอบการทดสอบจะใช้ข้อมูล 1 ชุดเป็นชุดข้อมูลทดสอบ และให้อีกชุดที่เหลือเป็นชุดฝึกสอน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองในการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าที่มีต่อร้านอาหาร โดยใช้แบบจำลองที่ละ 1 แบบจำลอง และนำข้อมูลทั้งหมด 4,965 ชุดข้อมูล ทำการแบ่งออกเป็นทั้งหมด 10 กลุ่ม ทั้งนี้จะแบ่งกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลชุดทดสอบ 1 ชุด และที่เหลือจะเป็นข้อมูลเรียนรู้ ซึ่งข้อมูลทดสอบคิดเป็นอัตราร้อยละ 10 และข้อมูลเรียนรู้คิดเป็นอัตราร้อยละ 90 โดยค่าที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง คือได้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความระลึก (Recall) ดังสมการที่ (7) - (9) ตามลำดับ

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (7)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

โดย

<i>TP</i>	คือ	จำนวนข้อมูลความคิดเห็นเชิงบวกที่จำแนกได้ถูกต้อง
<i>TN</i>	คือ	จำนวนข้อมูลความคิดเห็นเชิงลบบวกที่ทำนายได้ถูกต้อง
<i>FP</i>	คือ	จำนวนข้อมูลความคิดเห็นเชิงบวกที่จำแนกผิด
<i>FN</i>	คือ	จำนวนข้อมูลความคิดเห็นเชิงลบที่จำแนกผิด

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าต่อร้านอาหารด้วยเทคนิคการจำแนกของเหมืองข้อความมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 เทคนิค คือ เทคนิค Naive Bayes เทคนิค Support Vector Machine เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจแบบ C4.5 และเทคนิค K-Nearest Neighbor ผ่านการใช้งานภาษาโปรแกรม Python โดยชุดข้อมูลความคิดเห็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้รวบรวมจากเว็บไซต์ wongnai.com จำนวน 4,487 ชุดข้อมูล แบ่งเป็นความคิดเห็นเชิงบวกจำนวน 2,248 ความคิดเห็น และความคิดเห็นเชิงลบ 2,239 ความคิดเห็น จากนั้นทำการคัดเลือกเฉพาะประเภทของคำนามกับคำกริยาและคำวิเศษณ์ เพื่อคัดเลือกเป็นคำคุณลักษณะ จากนั้นทำการคัดเลือกคุณลักษณะโดยใช้เทคนิค Chi-Square, Information Gain และ Gain Ratio ซึ่งจะทำการเลือกโดยใช้ค่าที่มีค่าคะแนนสูงสุดจำนวน 1,000 คำ เพื่อสร้างเป็นตัวแทนเอกสารที่จะเตรียมเข้าสู่แบบจำลอง และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 4 เทคนิค โดยใช้วิธีการ 10-fold Cross Validation ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นชุดข้อมูลการเรียนรู้ และชุดข้อมูลทดสอบ และวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ และค่าความระลึก ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้

1. ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ การวัดประสิทธิภาพความถูกต้องของแบบจำลอง จากการทดลองผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของเทคนิคการจำแนกข้อความร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ

Algorithms	Chi- Square	Information Gain	Gain Ratio
Naive Bayes	87.10	89.08	87.94
SVM	87.61	88.14	86.03
C4.5	70.85	71.03	71.76
K-Nearest Neighbor	66.30	66.70	65.68

จากตารางที่ 1 การจำแนกข้อความโดยใช้คำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์ร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ ผลปรากฏว่า การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Chi- Square โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Support Vector Machine ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดคือ 87.61 % รองลงมาคือเทคนิค Naive Bayes 87.10 % เมื่อใช้เทคนิค Information Gain ในการคัดเลือกคุณลักษณะพบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดที่ 89.08 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 88.14 % และเทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Gain Ratio พบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดที่ 87.94 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 86.03 % จากการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อความพบว่า การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Naive Bayes ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดที่ 89.08 %

2. ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ การวัดความสามารถในการจำแนกเอกสารที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปโดยค่าความแม่นยำเป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลที่ถูกนำมาใช้อย่างถูกต้องกับจำนวนเอกสารที่ถูกดึงออกมาทั้งหมด ผลการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของเทคนิคการจำแนกข้อความร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ

Algorithms	Chi- Square	Information Gain	Gain Ratio
Naive Bayes	87.14	89.12	87.97
SVM	87.64	88.17	86.05
C4.5	71.95	72.14	72.08
K-Nearest Neighbor	66.49	67.36	65.96

จากตารางที่ 2 การจำแนกข้อความโดยใช้คำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์ร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ ผลปรากฏว่า การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Chi- Square โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Support Vector Machine ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุดคือ 87.64 % รองลงมาคือ เทคนิค

Naive Bayes 87.14 % เมื่อใช้เทคนิค Information Gain ในการคัดเลือกคุณลักษณะพบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดที่ 89.12 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 88.17 % และเทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Gain Ratio พบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดที่ 87.97 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 86.05 % จากการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการจำแนกข้อความพบว่า การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Naive Bayes ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดที่ 89.12 %

3. ค่าความระลึก (Recall) คือ การวัดความสามารถของแบบจำลองในการดึงเอกสารที่เกี่ยวข้องออกมา โดยค่าความระลึกเป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลที่ถูกนำมาใช้อย่างถูกต้องกับจำนวนเอกสารที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ผลการเปรียบเทียบค่าความระลึกแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าความระลึกของเทคนิคการจำแนกข้อความร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ

Algorithms	Chi- Square	Information Gain	Gain Ratio
Naive Bayes	87.11	89.10	87.96
SVM	87.62	88.15	86.04
C4.5	70.84	71.02	71.77
K-Nearest Neighbor	66.29	66.66	65.74

จากตารางที่ 3 การจำแนกข้อความโดยใช้คำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์ร่วมกับการคัดเลือกคุณลักษณะ ผลปรากฏว่า การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Chi- Square โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Support Vector Machine ให้ค่าความระลึกมากที่สุดคือ 87.62 % รองลงมาคือเทคนิค Naive Bayes 87.11 % เมื่อใช้เทคนิค Information Gain ในการคัดเลือกคุณลักษณะพบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความระลึกสูงที่สุดที่ 89.10 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 88.15 % และเทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Gain Ratio พบว่าเทคนิค Naive Bayes ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดที่ 87.96 % รองลงมาคือ Support Vector Machine ที่ 86.04 % จากการเปรียบเทียบค่าความระลึกของการจำแนกข้อความพบว่า การคัดเลือกคุณลักษณะด้วย Information Gain และใช้เทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Naive Bayes ให้ค่าความระลึกสูงที่สุดที่ 89.10 %

จากการเปรียบเทียบการคัดเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับนำมาจำแนกข้อความ โดยใช้คำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์มาร่วมกันโดยใช้วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain แล้วเลือกค่าที่มีค่าคะแนนสูงสุดจำนวน 1,000 คำ พบว่าเทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Naive Bayes ให้ผลการวัดประสิทธิภาพดีที่สุด ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 89.08 % ค่าความแม่นยำเท่ากับ 89.12 % และค่าความระลึกเท่ากับ 89.10 %

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการค้นหาเทคนิคการทำเหมืองข้อความที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าที่มีต่อร้านอาหารที่ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษาไทย โดยชุดข้อมูลความคิดเห็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวบรวมจากเว็บไซต์ wongnai.com จำนวน 4,487 ชุดข้อมูล แบ่งเป็นความคิดเห็นเชิงบวกจำนวน 2,248 ความคิดเห็น และความคิดเห็นเชิงลบ 2,239 โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ คำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์ เพื่อนำมาทำการจำแนกความคิดเห็น แล้วทำการคัดเลือกคุณลักษณะโดยใช้เทคนิค Chi-Square, Information Gain และ Gain Ratio ซึ่งจะทำให้การเลือกโดยใช้ค่าที่ค่าคะแนนสูงสุดจำนวน 1,000 ค่า เพื่อสร้างเป็นตัวแทนเอกสาร จากนั้นได้นำเอาเทคนิควิธีการจำแนกข้อความมาทำการจำแนกความคิดเห็นภาษาไทย โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 4 เทคนิค คือ เทคนิค Naive Bayes เทคนิค Support Vector Machine เทคนิค ต้นไม้ตัดสินใจแบบ C4.5 และเทคนิค K-Nearest Neighbor สำหรับขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของทั้ง 5 เทคนิค ได้ใช้หลักการ 10-fold Cross Validation ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นชุดข้อมูลเรียนรู้และชุดข้อมูลทดสอบ วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ และค่าความระลึก ผลจากการวิจัยพบว่าเมื่อใช้การคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain ร่วมกับเทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Naive Bayes ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยให้ค่าความถูกต้อง 89.08 % ค่าความแม่นยำ 89.12 % และค่าความระลึก 89.10 % รองลงมาคือการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Information Gain ร่วมกับเทคนิคการจำแนกข้อความแบบ Support Vector Machine โดยให้ค่าความถูกต้อง 88.14 % ค่าความแม่นยำ 88.17 % และค่าความระลึก 88.15 %

จากผลการวิจัยพบว่า เทคนิค Naive Bayes มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการจำแนกข้อความ โดยพิจารณาจากค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ และค่าความระลึก เหตุผลที่เทคนิค Naive Bayes มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเนื่องจากมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนเหมาะกับกรณีที่มีข้อมูลจำนวนมาก มี Attribute ที่เป็นอิสระต่อกันเหมาะที่จะนำมาใช้ในการจำแนกข้อความ เทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อความรองลงมาคือเทคนิค Support Vector Machine ที่ให้ผลลัพธ์ในการจำแนกใกล้เคียงกับเทคนิค Naive Bayes เนื่องจากเทคนิค Support Vector Machine สามารถใช้กับลักษณะข้อมูลที่เป็นตัวเลขหรือข้อมูลเชิงกลุ่มแบบข้อความ รองรับจำนวนตัวแปรที่หลากหลายได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะแตกต่างจากเทคนิค K-Nearest Neighbor ที่ได้ผลการวัดประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากถ้ามี Attribute หรือตัวแปรจำนวนมากจะเกิดปัญหาในการคำนวณทำให้ประสิทธิภาพลดลง เช่นเดียวกับเทคนิค C4.5 หากมีกิ่งที่มากเกินไปอาจทำให้การจำแนกมีประสิทธิภาพที่ลดลง

จากผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำเอาคำนาม คำกริยา และคำวิเศษณ์รวมกันแล้วทำการคัดเลือกคุณลักษณะเพื่อลดมิติของข้อมูลด้วยเทคนิค Information Gain มาใช้ในการปรับปรุงการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้า โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อความ Naive Bayes มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดเท่ากับ 89.08 % ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการจำแนกความคิดเห็นของลูกค้าได้เป็นอย่างดี และกระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะด้วย Information Gain สามารถลดมิติของข้อมูลได้เป็นอย่างมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการจำแนกข้อความแต่อย่างใด ซึ่งกระบวนการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปปรับใช้กับความเห็นเกี่ยวกับสินค้าหรือบริการอย่างอื่น ๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเว็บไซต์ www.wongnai.com ที่ให้ข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์และดำเนินการวิจัย เพื่อให้งานออกมาได้ดีและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

References

- [1] Laowsungsuk, P., Jinda, A., and Siththisarn, S. (2017). Sentiment Analysis of Restaurant Reviews on Review Web Sites. **Thaksin University Journal**. Vol. 20, No. 1, pp. 39-47
- [2] Srisuan, J. and Hanskunatai, A. (2014). An Application of Hotel Searching Based on Opinion Mining. In **The 10th National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT 2014)**. Faculty of Information Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. pp. 95-100
- [3] Chotnasiaw, P., Songpan, W., Arch-int, S., and Saiyod, S. (2017). Analysis of Affecting Factors to Customer Reviews using Opinion Mining. In **The 13th National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT2017)**. Arnoma Grand Bangkok Hotel, Bangkok. pp. 44-50
- [4] Shah, F. P. and Patel, V. (2016). A Review on Feature Selection and Feature Extraction for Text Classification. In **International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)**. pp. 2264-2268. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566545
- [5] Haruechaiyasak, C., Jitkritum, W., Sangkeetrakarn, C., and Damrongrat, C. (2008). Implementing News Article Category Browsing Based on Text Categorization Technique. In **Proceedings of the 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology**. Vol. 3, pp. 143-146. DOI: 10.1109/WIIAT.2008.61
- [6] Nui pian, V. and Meesad, P. (2013). A Comparison of Filter and Wrapper Approaches with Text Mining for Text Classification. **The Journal of Industrial Technology**. Vol. 9, No. 3, pp. 118-129
- [7] Marknakorn, N. (2013). **Comparison of Feature Selection Methods for Inappropriate Webpage Classification by Data Mining Technique**. Master of Science, Information Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- [8] Thetmueang, R. and Jirawichitchai, N. (2017). Thai Sentiment Analysis of Product Review Online Using Support Vector Machine. **Engineering Journal of Siam University**. Vol. 18, Issue 1, No. 34, pp. 1-12
- [9] Pinmuang, N. and Thongkam, J. (2018). Classifying Thai Opinions on Online Media using Text Mining. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. Vol. 37, No. 3, pp. 372-379
- [10] Tipsena, R., Jareanpon, C., and Somprasertsri, G. (2013). Automatic Question Classification on Webboard Using Text Mining Techniques. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. Vol. 33, No. 5, pp. 493-502

- [11] Phopli, W., Boonmatham, S., and Meesad, P. (2017). Ensemble Feature Selection for Sparse Data. In **The 13th National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT2017)**. Arnoma Grand Bangkok Hotel, Bangkok. pp. 373-378
- [12] Saengsiri, P., Meesad, P., Wichian, S. N., and Herwig, U. (2010). Comparison of Hybrid Feature Selection Models on Gene Expression Data. In **2010 Eighth International Conference on ICT and Knowledge Engineering**. pp. 13-18. DOI: 10.1109/ICTKE.2010.5692905
- [13] Buathong, W. (2014). **Efficiency Improvement of Dimension Reduction by Feature Selection Methods for Data Classification**. Master of Science, Information Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
- [14] Pukkhem, N., Junmanee, C., and Ouisui, S. (2017). Automatic Thai Folk Wisdom Classification using Data Mining Approach. **Thaksin University Journal**. Vol. 20, No. 3, Special Issue 2017, pp. 300-307
- [15] Samal, B., Behera, A. K., and Panda, M. (2017). Performance Analysis of Supervised Machine Learning Techniques for Sentiment Analysis. In **IEEE 3rd International Conference on Sensing, Signal Processing and Security**. pp. 128-133
- [16] Kongthon, A., Haruechaiyasak, C., Pailai, J., and Kongyoung, S. (2012). The Role of Twitter During a Natural Disaster: Case Study of 2011 Thai Flood. In **2012 Proceedings of Technology Management for Emerging Technologies (PICMET)**. Vol. 12, pp. 2227-2232
- [17] Kaewta, C. and Mahawirawat, A. (2010). Diagnosis of Cases by Decision Tree Techniques. In **National Conference on Information Technology (NCIT2010)**. The Grand Ayudhaya Hotel, Bangkok. pp. 308-313
- [18] Hossain, F. M. T., Hossain, M. I., and Nawshin, S. (2017). Machine Learning Based Class Level Prediction of Restaurant Reviews. In **2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)**. pp. 420-423. DOI: 10.1109/R10-HTC.2017.8288989

ผลของสารยึดเกาะต่อคุณภาพของซูปก้อนปรุงรสมะแขว่น Effects of Binders on Ma-khaen (*Zanthoxylum limonella* Alston) Bouillon Cube Qualities

บุษบา มะโนแสน^{1*} และจिरราชต์ กันทะขู้¹
Busaba Manosan^{1*} and Jirarat Kantakhoo¹

Received: June 4, 2019; Revised: October 29, 2019; Accepted: November 5, 2019

บทคัดย่อ

มะแขว่น (*Zanthoxylum limonella* Alston) เป็นพืชพื้นเมืองที่พบทั่วไปโดยเฉพาะในแถบภาคเหนือตอนบน นิยมใช้เป็นเครื่องเทศสำหรับปรุงแต่งรสชาติของอาหารให้เด่นยิ่งขึ้น และเมล็ดมะแขว่นยังมีคุณสมบัติในการกระตุ้นน้ำย่อยทำให้เจริญอาหาร งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะแขว่น โดยเบื้องต้นได้ศึกษาชนิดของสารยึดเกาะ (Binder) ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้เป็นก้อน 3 ชนิด คือ แป้งมัน แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ไม่เติมสารยึดเกาะ) ผลิตภัณฑ์มีก้อน ขนาด 2.5 x 3.0 x 1.0 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 10 กรัม มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เฉลี่ย 0.58 เมื่อทดสอบความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งสาลีเป็นสารยึดเกาะ ละลายได้เร็วที่สุด (8 นาที) รองลงมาคือ สูตรที่ใช้แป้งข้าวโพด สูตรควบคุม และสูตรที่ใช้แป้งมัน ตามลำดับ ผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้าน สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะแขว่นแต่ละสูตรเมื่อทำเป็นน้ำแกง พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบทุกด้านต่อ ผลิตภัณฑ์สูตรควบคุมที่ใช้แป้งมันและแป้งข้าวโพดเป็นสารยึดเกาะในระดับความชอบปานกลาง ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งสาลีเป็นสารยึดเกาะได้รับการยอมรับน้อยกว่าอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อย ดังนั้น ด้วยระดับความชอบและความสามารถในการละลายแป้งข้าวโพดจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ปรุงรสจากมะแขว่นให้เป็นก้อนมากที่สุด

คำสำคัญ : สารยึดเกาะ; ซูปก้อนปรุงรส; มะแขว่น

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Nan

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

Abstract

Ma-Khaen (*Zanthoxylum limonella* Alston) is a local plant that found in Northern Thailand. It is a spice that has been used for enhancing the favor of local food. The aim of this research was optimized binder agent for seasoning development from Ma-Khaen. Three kinds of binders: tapioca starch, corn starch and wheat flour were studied in comparison with control group (No Binder). The product dimension was 2.5 x 3.0 x 1.0 centimeter, each cubes net weight was 10 grams. The average of water activity was 0.58, the solubility test at 80 °C of water temperature, wheat flour products were the fastest dissolving agent (8 minutes) followed by corn starch and tapioca starch. The sensory perceptions on color, scent, taste overall of each seasoning of Ma-khaen with tapioca starch, corn starch and control sample were accepted moderately tolerant binder, whereas, wheat-based products were less acceptance. The corn starch which more accepted moderately and solubility was the most suitable binder for bouillon cube products from Ma-Khaen.

Keywords: Binder; Bouillon Cube; Ma- Khaen (*Zanthoxylum limonella* Alston)

บทนำ

คนไทยให้ความสำคัญกับอาหารซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฒนธรรมไทยมายาวนาน อาหารไทยยังติดอันดับอาหารยอดนิยมจากนักท่องเที่ยวทั่วโลก โดยเสน่ห์ของอาหารไทยคืออาหารที่มีรสชาติเข้มข้น มีหลายรสชาติซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนผสมและเครื่องปรุง [1] เครื่องปรุงแต่งรสของอาหารมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมหรือปรุงแต่งรสชาติของอาหารให้ดียิ่งขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ผลิตภัณฑ์เสริมรส (Food Flavor Enhancer) ซึ่งประกอบด้วย โมโนโซเดียมแอล-กลูตาเมต หรือกัวนิเนต หรืออินซินิกต ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน และผลิตภัณฑ์ปรุงรส (Food Seasoning) ซึ่งมีส่วนประกอบเช่นเดียวกับประเภทแรกแต่มีส่วนผสมอื่นเพิ่มเติม เช่น เกลือ เนื้อสัตว์ หรือสารชนิดอื่นที่ไฮโปตีน ไขมัน น้ำตาล หรือมีส่วนผสมของเครื่องเทศชนิดต่าง ๆ [2] และเครื่องปรุงรสอาหารเป็นหนึ่งในสินค้าอุตสาหกรรมที่ยังสามารถขยายตัวได้อย่างต่อเนื่องสำหรับตลาดในประเทศผู้ผลิตเครื่องปรุงรสอาหาร มีงานวิจัยที่พัฒนาผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเครื่องปรุงรสอาหารในลักษณะต่าง ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการปรุงอาหาร [1] ส่วนในตลาดส่งออกจากการที่อาหารไทยเริ่มเป็นที่นิยมในต่างประเทศมากขึ้นจึงทำให้มีเครื่องปรุงรสอาหารของไทยเข้าไปวางจำหน่ายตามซูเปอร์มาร์เก็ตมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการปรุงอาหารไทยรับประทานเองที่บ้าน รวมทั้งการที่ร้านอาหารไทยในต่างประเทศมีแนวโน้มขยายตัวมากขึ้นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมให้ตลาดผลิตภัณฑ์เครื่องปรุงรสมีแนวโน้มขยายตัวเช่นเดียวกัน

มะแขว่น (*Zanthoxylum limonella* Alston) เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่สูงประมาณ 10 - 20 เมตร ผลมีลักษณะแห้งกลมผิวขรุขระสีน้ำตาล เมื่อผลแก่จัดจะแตกจนเห็นเมล็ดสีดำกลมผิวเรียบเป็นมัน มีกลิ่นหอมฉุนคล้ายผักชี มีรสเผ็ดซ่าเล็กน้อย มะแขว่นเป็นพืชที่พบในแถบจังหวัดภาคเหนือตอนบน ได้แก่

จังหวัดน่าน เชียงใหม่ เชียงราย แพร่ พะเยา ลำปางและลำพูน โดยปกติทางภาคเหนือนิยมใช้มะแขว่นเป็นเครื่องชูรส กลิ่นและรสชาติในอาหารหลายประเภท เช่น ลาบทางเหนือ หลู้ แกงแค ยำเห็ดและน้ำพริกลาบ [3] - [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปรุงรสจากมะแขว่นโดยศึกษาชนิดของสารยึดเกาะ (Binder) ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะแขว่นให้มีรสชาติที่ดี และกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติ คือปริมาณของค่าวอเตอร์แอกติวิตี และระยะเวลาในการกระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 80 °C (ระหว่างการคั้นรูป) ให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ซูปก้อนกึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตในเชิงการค้าในปัจจุบัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ คือ ผลมะแขว่นที่แก่จัด จากแหล่งปลูกตามธรรมชาติตำบลเมืองลี อำเภอนาหมื่น จังหวัดน่าน เก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน ผ่านการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (รูปที่ 1) นำมาเด็ดก้านอบด้วยเครื่องอบลมร้อน (Owner Food, TD 10, Bangkok) อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาปั่นลดขนาดด้วยเครื่องปั่นที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ (Buono, BUO-12K61, USA) นำหอมหัวใหญ่ กระเทียม ปอกเปลือกออกล้างด้วยน้ำสะอาดนำมาปั่นเป็นแฉ่นบาง ๆ นำไปอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 65 °C จนเหลือความชื้น 7 - 8 % หลังจากนั้นนำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสมอาหารไฟฟ้าที่ความเร็วระดับ 1 เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำมาร้อนด้วยตะแกรงละเอียดบรรจุลงสุญญากาศ ปิดผนึกเก็บไว้ ผสมเข้ากับแป้งมันสำปะหลังตราลูกโลก/แป้งสาธิตราบัวแดง/แป้งข้าวโพดตราโปรคอร์นเกลือทิพย์ ผงชูรสตราอะมิโนโมโต้ะ เนยขาวตราโอลิมปิกครีม และน้ำตาลทรายขาวตราสิน (ตารางที่ 1)

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ ตู้อบลมร้อน (WBT binder, IP 20) เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtherm, Sox รุ่น 406 macro) โถวัดความชื้น เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระในอาหาร (Water Activity) เครื่องปั่นและผสมอาหาร ตะแกรงร่อนละเอียด (MICS 300) เครื่องอัดก้อน



รูปที่ 1 ลักษณะของมะแขว่นที่ผ่านการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์

2. ศึกษาชนิดของสารยึดเกาะผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะแขว่น

นำวัตถุดิบ ได้แก่ ผงมะแขว่น ผงหอมหัวใหญ่ ผงกระเทียม เกลือ น้ำตาลทราย เนยขาว ผงชูรส น้ำ และสารยึดเกาะ (แป้งมัน แป้งสาลี แป้งข้าวโพด) ในปริมาณที่แสดงในตารางที่ 1 มาเคี้ยวด้วยไฟอ่อน ๆ นาน 15 นาที แล้วนำมาขึ้นรูปโดยอัดลงเครื่องอัดก้อนให้มีขนาดก้อน $2.5 \times 3.0 \times 1.0$ เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 10 กรัม/ก้อน (รูปที่ 2) นำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C นาน 1 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทดสอบด้วยอูลูมิเนียมฟอยล์ เก็บในถุงพลาสติก Polypropylene (PP) เพื่อทดสอบคุณภาพต่อไป โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและชนิดของสารยึดเกาะ

ส่วนผสม	สูตรควบคุม (%)	แป้งมัน (%)	แป้งข้าวโพด (%)	แป้งสาลี (%)
มะแขว่นผง	10	10	10	10
เกลือ	40	40	40	40
หอมหัวใหญ่ผง	7.5	7.5	7.5	7.5
กระเทียมผง	7.5	7.5	7.5	7.5
น้ำตาลทราย	11	11	11	11
เนยขาว	5	5	5	5
ผงชูรส	1	1	1	1
น้ำมันกระเทียม	2	2	2	2
แป้ง	-	1	1	1
น้ำ	16	15	15	15

ที่มา: [6]



(ก) การบรรจุส่วนผสมลงในเครื่องขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (ข) รูปทรงผลิตภัณฑ์เมื่อออกจากเครื่องขึ้นรูปรูปที่ 2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะแขว่น



(ค) ลักษณะผลิตภัณฑ์ก่อนอบ

รูปที่ 2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่น (ต่อ)

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่น

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์หาเก็บไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ตามวิธี AOAC [7] โดยวิเคราะห์ค่าวอเตอร์ แอคติวิตี (AQUALAB, 4TE, Aqua Lab, USA.) และวิเคราะห์ความชื้นตามวิธีของ AOAC Method 945.32 โดยชั่งตัวอย่าง 2 กรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น นำไปอบในตู้อบลมร้อน (WTB Binder, IP 20, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 103 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ทดลอง 3 ซ้ำ

2. คุณสมบัติทางกายภาพ

ศึกษาความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่น น้ำหนัก 10 กรัม/ก้อน โดยใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำที่อุณหภูมิ 80 °C ปริมาตร 1 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิโดยวางลงบน Hot plate บันทึกระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์ปรุงรสมะเขว่นละลายจนหมดโดยเปรียบเทียบกับซูปก้อนคนอร์

3. ความชอบทางประสาทสัมผัส

ประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยนำผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 สูตรมาต้มเป็นน้ำซูป หาความสามารถในการละลาย ทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบ โดยรวมใช้แบบทดสอบชนิด 9-point hedonic scale (9 = ชอบมากที่สุด 1 = ไม่ชอบมากที่สุด) กำหนดเกณฑ์การยอมรับผลิตภัณฑ์คือต้องได้คะแนนการยอมรับไม่ต่ำกว่า 5 คะแนน ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนโดยเป็นนักศึกษาสาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดน่าน จำนวน 30 คน

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version 11 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติทางเคมี

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นทุกสูตรพบว่ามีความชื้นอยู่ที่ 0.58 มีค่าต่ำกว่าซูปก้อนคนอร์ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เป็นปัจจัยที่จะใช้ตัดสินเสถียรภาพของอาหารต่อการเสื่อมเสียไม่ว่าจากจุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางเคมีหลายชนิดที่เกิดขึ้นในอาหารและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้แสดงถึงปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้มากกว่าปริมาณความชื้น ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นมักจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี้แต่อาหารบางชนิดอาจมีความชื้นสูงแต่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำได้ [8] - [9] ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นทุกสูตรมีความชื้นอยู่ในช่วง 5 - 6 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าซูปก้อนคนอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยซูปก้อนมีความชื้น 4 % อย่างไรก็ตามซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นยังมีความชื้นที่ต่ำกว่ามาตรฐานของอาหารกึ่งสำเร็จรูปชนิดซูปเข้มข้นชนิดก้อน ชนิดผงหรือแห้งซึ่งต้องมีปริมาณความชื้นไม่เกิน 8 % [9] ดังนั้นซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นจึงน่าจะมีโอกาสเสื่อมเสียได้ยากเช่นเดียวกับซูปก้อนเชิงการค้า สำหรับปริมาณเกลือคือปริมาณของสารอนินทรีย์ที่ได้จากการเผาไหม้ตัวอย่างจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง ปริมาณเกลือที่เหลืออยู่มีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากส่วนผสมมีเกลืออยู่ 40 % การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ พบว่าสูตรที่ใช้แป้งสาลีเป็นสารยึดเกาะมีปริมาณโปรตีนมากที่สุด เนื่องจากแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตนินและไกลอะดินเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีซูปก้อนปรุงรสมะเขว่น

ตัวอย่าง	วอเตอร์แอกติวิตี้	ความชื้น (%ฐานเปียก)	เถ้า (%)	ไขมัน (%)	โปรตีน (%)	เส้นใย
สูตรควบคุม	0.55 ^a ±0.01	6.30 ^a ±0.02	47.70 ^a ±0.60	1.70 ^a ±0.10	3.56 ^c ±0.20	2.32 ^c ±0.12
แป้งมัน	0.60 ^a ±0.02	6.00 ^a ±0.10	39.50 ^d ±0.50	2.90 ^a ±0.10	3.62 ^c ±0.02	3.08 ^a ±0.09
แป้งข้าวโพด	0.58 ^a ±0.00	5.30 ^b ±0.20	40.74 ^c ±0.60	3.00 ^a ±0.20	3.80 ^b ±0.06	2.37 ^c ±0.10
แป้งสาลี	0.58 ^a ±0.01	6.00 ^a ±0.10	42.20 ^b ±0.20	2.20 ^b ±0.20	3.88 ^a ±0.08	2.86 ^b ±0.10
ซูปก้อนคนอร์	0.60 ^a ±0.02	3.40 ^c ±0.20	-	-	-	-

a, b, c, d คือ ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับแตกต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

หมายเหตุ: ซูปก้อนคนอร์วิเคราะห์วอเตอร์แอกติวิตี้และความชื้น (%ฐานเปียก) เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบคุณสมบัติที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของซูปก้อน

2. คุณสมบัติทางกายภาพ

ความสามารถในการละลายเป็นคุณภาพหนึ่งที่มีความสำคัญของซูปก้อนเพื่อปรุงรสอาหาร ในการทดลองนี้พิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการละลายซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นในน้ำอุณหภูมิ 80 °C หากใช้เวลาน้อยในการละลายซูปก้อนจนหมดโดยซูปไม่เกาะตัวกันแสดงถึงซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นมีความสามารถ

ในการละลายดี จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าผลิตภัณฑ์ซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นที่ใช้แป้งสาลี เป็นสารยึดเกาะมีอัตราการละลายในน้ำอุณหภูมิ 80 °C ได้เร็วที่สุด รองลงมาคือสูตรที่มีการเติมแป้งข้าวโพด สูตรควบคุม และสูตรที่ใช้แป้งมัน ตามลำดับ อัตราการละลายของผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะเขว่น ใช้เวลาในการละลายมากกว่าซูปก้อนคนอร์ ส่วนสูตรควบคุม (ไม่ใช้สารยึดเกาะ) มีอัตราการละลายเท่ากับการใช้แป้งข้าวโพดเป็นสารยึดเกาะไม่แตกต่างกันทางสถิติอาจจะเนื่องมาจากลักษณะที่ปรากฏของ ผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมากและการยึดเกาะกันไม่ค่อยดี สำหรับสูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะพบว่า ใช้เวลาในการละลายหมดประมาณ 22.00±0.60 นาที เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณ อะไมโลสต่ำ และอะไมโลสสามารถรวมตัวกับสารประกอบเชิงซ้อนกับไซมันที่เติมลงไปในส่วนผสมประกอบกับ ในผสมมะเขว่นมีน้ำมันหอมระเหย [3], [5] จึงไปขัดขวางการพองตัว การละลาย และความหนืดของเม็ดแป้ง นอกจากนั้นแป้งมันสำปะหลังจะสามารถละลายได้ดีที่อุณหภูมิ 95 °C ได้เพียง 35 % [10] การศึกษานี้ พบข้อสังเกตว่าซูปก้อนปรุงรสมะเขว่นที่ผลิตไม่สามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง อาจเนื่องมาจาก มีส่วนผสมของเนยขาว และน้ำมันกระเทียมทำให้จับตัวกันเป็นก้อนต้องละลายในน้ำร้อน

ตารางที่ 3 เวลาในการละลายผลิตภัณฑ์ในน้ำอุณหภูมิ 80 °C

ตัวอย่าง	เวลาในการละลาย (นาที)
สูตรควบคุม	9.00±0.24 ^c
แป้งมัน	22.00±0.60 ^d
แป้งข้าวโพด	9.00±0.21 ^c
แป้งสาลี	8.00±0.23 ^b
ซูปก้อนคนอร์	4.02±0.01 ^a

a, b, c, d คือ ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับแตกต่างกันในแต่ละแถว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3. คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ด้วยการนำผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะเขว่นแต่ละสูตรมาต้มเป็นน้ำแกง แล้วประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้าน สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมพบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านสี ของน้ำแกงไม่แตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะเขว่นทุกสูตรได้รับคะแนนการยอมรับทุกด้าน ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่ามีความเฉลี่ยอยู่ในระดับความชอบทุกด้านในระดับปานกลาง (6.40 - 7.50 คะแนน) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซูปก้อนทุกสูตรมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกัน เพราะมะเขว่นมีสี กลิ่น และรสชาติเฉพาะตัวซึ่งเกิดจากมีส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยเป็นสารสำคัญพวก Limonene [3], [5] อย่างไรก็ตามพบว่าแป้งสาลีได้รับคะแนนการยอมรับค่อนข้างต่ำกว่าสูตรอื่น เนื่องจากแป้งสาลีประกอบด้วยโปรตีนกลูเตนินและไกลอะดลินในสัดส่วนเท่า ๆ กันจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้ได้กลูเตนที่มีลักษณะเหนียว มีผลทำให้การยึดเกาะกับส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [10]

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความชอบทางประสาทสัมผัสต่อสารยัดเกาะ

ตัวอย่าง	คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์				
	สี ^{ns}	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
สูตรควบคุม	7.20±1.20	7.00 ^a ±1.10	7.20 ^a ±1.00	7.50 ^a ±1.10	7.20 ^a ±0.90
แป้งมัน	7.20±1.30	7.20 ^a ±1.00	7.30 ^a ±1.30	7.50 ^a ±1.10	7.50 ^a ±0.90
แป้งข้าวโพด	7.30±1.30	7.10 ^a ±1.30	6.70 ^{ab} ±1.50	7.10 ^{ab} ±1.50	7.20 ^a ±1.40
แป้งสาลี	6.70±1.50	6.50 ^b ±1.30	6.40 ^b ±1.50	6.80 ^b ±1.30	6.50 ^b ±1.90

หมายเหตุ: การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสต่อสารยัดเกาะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สรุปผลการวิจัย

สารยัดเกาะที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ปรุงรสอาหารจากมะแขว่นคือ แป้งข้าวโพด เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีอัตราการละลาย และได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสในระดับความชอบปานกลาง แป้งสาลีแม้จะให้อัตราการละลายใกล้เคียงกับแป้งข้าวโพดแต่ได้รับการยอมรับน้อยกว่า ส่วนแป้งมันทำให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการละลายต่ำที่สุด สูตรควบคุมอัตราการละลายเท่ากับแป้งข้าวโพด แต่ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมาก และการยัดเกาะกันไม่ค่อยดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่สนับสนุนงานวิจัย และสาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ที่อนุเคราะห์สถานที่อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

References

- [1] Rattanapaen, A., Thong-on, K., Kankhunthon, T., and Thephuttee, N. (2010). Development of Dried Red and Green Curry Cube. **Food Journal**. Vol. 40, No. 3, pp. 249-257
- [2] Food Intelligence. (2019). **Market Intelligence**. Access (21 May 2019). Available (<http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=174>)
- [3] Srisamatthakarn, P., Wattanawikkit, P., and Ammawath, S. (2016). Effect of Explant and Extraction Conditions on the Physical-chemical and Antioxidant Properties of Mah-Khwuaen (*Zanthoxylum limonella* Alston) Extract. **Sonklanakarin Journal of Plant Science**. Vol. 3, Suppl. (III). pp. 31-38
- [4] Nitsiri, R. (1999). **Spices**. Chulalongkorn University, Bangkok. p. 260

- [5] Wongsrisom, N., Jinata, J., Manosan, B., Kuntakhoo, J., Wankuan, S., and Sriyam, S. (2012). Anti-Bacterial Activities of Essential Oils from Mah-Khwuaen (*Zanthoxylum limonella* Alston). **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 37, No. 1, pp. 3-15
- [6] Yuenyongputtakal, W. and Limroongreungrat, K. (2013). Effect of Asiatic Pennywort Powder and Ginger Powder on Bouillon Cube Quality. **Agricultural Science Journal**. Vol. 44, No. 2, (Suppl.). pp. 65-68
- [7] AOAC. (1998). **Official Method of Analysis of Association of Official Analytical Chemists**, 16th eds. Washington D.C.
- [8] Rattanapanone, N. (2002). **Food Chemical**. Bangkok: Odeon Store Publishers
- [9] Ministry of Public Health. (2000). **Ministry of Public Health Announcement (No. 210)**. Access (21 May 2019). Available (http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P210.pdf)
- [10] Sirod, K. and Piyachomkwon, K. (2003). **Flour Technology**. Bangkok: Kasetsart University. p. 303

พฤกษเคมีและฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum capsici* ของน้ำส้มควันไม้
จากผลมังคุด

Phytochemicals Screening and Antifungal Activity Against *Colletotrichum capsici* of Wood Vinegar from *Garcinia mangostana* Fruit

สุนิษา สุวรรณเจริญ¹ อีรพิชญ์ เกษมสุข¹ สุวรรณ มิ่งจงเจริญ¹ วันวิภา ทำประโยชน์¹
วิไลวรรณ แจ้งชด์¹ ธิดารัตน์ ชุ่มมาตร¹ และอาภาพร บุญมี*

Sunisa Suwancharoen¹ Teerapich Kasemsuk¹ Suwanna Mingjongjaroen¹

Wanwipa Tamprayort¹ Wilaiwan Jangchud¹ Thidarat Chummat¹ and Apaporn Boonmee¹

Received: June 24, 2019; Revised: October 17, 2019; Accepted: October 24, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาผลมังคุด
ต่อคุณภาพต่อสมบัติทางกายภาพ พฤกษเคมี และฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum capsici* โดยน้ำส้ม
ควันไม้จากผลมังคุดที่ศึกษาแบ่งเป็น 2 ชนิดตามขั้นตอนการผลิต คือ น้ำส้มควันไม้ช่วงไล่ความชื้น (ช่วงที่ 1)
และน้ำส้มควันไม้ช่วงไม่กลายเป็นถ่าน (ช่วงที่ 2) ผลการวิจัยพบว่าน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงมีสมบัติทาง
กายภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า pH จุดเดือดและความหนาแน่นเท่ากับ 4.98 - 5.10 105 - 113 องศาเซลเซียส
และ 0.9738 - 1.0071 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และพฤกษเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำส้มควันไม้
ที่ได้จากน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงมีองค์ประกอบที่เหมือนกันคือ อัลคาลอยด์ สารประกอบฟีนอลิก และ
เทอร์ปีนอยด์ โดยระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำส้มควันไม้จากการผลิตทั้งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา
2 3 4 และ 6 เดือน มีผลต่อสมบัติทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อชนิด
ของพฤกษเคมี เมื่อศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดต่อคุณภาพ
พบว่า น้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 2 ที่เก็บไว้เป็นระยะเวลา 4 เดือน มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ได้ดีที่สุด
โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 7.67 %w/v เมื่อเทียบกับฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราของน้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 1 (IC_{50}
15.19 %w/v) อย่างไรก็ตามฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดทั้งสองช่วงยังคงต่ำกว่า
ยาคาร์เบนดาซิม (IC_{50} 0.64 %w/v)

คำสำคัญ : น้ำส้มควันไม้; มังคุด; พฤกษเคมี; ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี

¹ Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

* Corresponding Author E - mail Address: apaporn.b@rbru.ac.th

Abstract

The objective of this research studied the effect of time storage on the physical properties, phytochemical and antifungal activity againsts *Colletotrichum capsici* of wood vinegar from poor quality mangosteen fruit. Two types of wood vinegar; collected from the dehydration step (part 1) and the carbonization step (part 2) were used for this study. The results showed that the physical properties; pH, boiling point and density of both vinegar were found in ranges of 4.98 - 5.10, 105 - 113 °C and 0.9738 - 1.0071 g/cm³, respectively. The chemical constituents screening of these two vinegar also presented the same class of phytochemicals; alkaloids, phenolic compounds and terpenoids. The storage time of two types of wood vinegar for 2, 3, 4 and 6 months at room temperature did significantly effect on the physical properties ($P \leq 0.05$) but effect neither on the group of phytochemicals. For antifungal activity assay, the 4 months storing wood vinegar obtained from carbonization step exhibited the highest antifungal activity against *C. capsici* respect to the IC₅₀ of 7.67 %w/v when compared to that obtained from the dehydration step (IC₅₀ 15.19 %w/v). However, the antifungal activity of these wood vinegar from mangosteen fruits against *C. capsici* were less than Carbendazim (IC₅₀ 0.64 %w/v).

Keywords: Wood Vinegar; Mangosteen; Phytochemical; Antifungal Activity

บทนำ

“ในน้ำมีปลาในนามีข้าว” สำนวนไทยที่บ่งชี้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรมซึ่งเป็นผู้ข้าวผู้นำของโลกที่พึ่งพร้อมอุดมสมบูรณ์ไปด้วยพืชพันธุ์ธัญญาหาร โดยในแต่ละปีนั้นประเทศไทยมีมูลค่าสินค้าทางการเกษตรส่งออกหลายแสนล้านบาท แต่มูลค่าการส่งออกที่มหาศาลเช่นนี้กลับไม่ได้สะท้อนให้เห็นถึงคุณภาพชีวิตที่ดีของเกษตรกรแต่อย่างใด ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งมาจากการใช้สารเคมีทางการเกษตรที่นอกจากจะเพิ่มต้นทุนการผลิตให้สูงขึ้นแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของเกษตรกรและตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและลดความเสี่ยงต่อการใช้สารเคมีอันตรายทางหนึ่งที่สามารถดำเนินการได้คือ การค้นหาสารจากธรรมชาติเพื่อใช้ในการเกษตรซึ่งหนึ่งในทางเลือกที่กำลังเป็นที่สนใจใหม่ของเกษตรกรในปัจจุบันคือ การใช้น้ำส้มที่เกิดจากการเผาถ่านที่ถูกขนานนามว่า “น้ำส้มควันไม้” (Wood Vinegar หรือ Pyroligneous Acid) ได้ถูกนำมาใช้ในเกษตรอินทรีย์เพื่อควบคุมศัตรูพืช เร่งการเจริญเติบโตของพืช [1] ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ตลอดจนช่วยในการจับตัวกันของยาง [2] โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำส้มควันไม้มีหลายชนิดและแต่ละชนิดมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่แตกต่างกันเช่น น้ำส้มควันไม้จากสับประสมมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *Pycnoporus anguineus* และ *Coriolus versicolor* ได้อย่างมีนัยสำคัญและสามารถยับยั้ง *Aspergillus niger* และ *Botryodiplodia theobromae* ได้ดีมากที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 70 และ 100 โดยปริมาตรในระยะเวลา 7 วัน และ

สามารถฆ่าปลวกสายพันธุ์ *Coptotermes ruginathus* ได้ร้อยละ 100 เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ [3] น้ำส้มควันไม้จากไม้ไฟพบว่าสารประกอบหลักที่มีอยู่คือสารในกลุ่มฟีนอล (Phenol) คีโตน (Ketone) และเฟอร์ฟูแรน (Furfuran) ซึ่งพบว่าเมื่อผสมน้ำส้มควันไม้จากไม้ไฟลงในอาหารหมูและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในอุจจาระของลูกหมูเปรียบเทียบกับอาหารที่ผสมยาปฏิชีวนะพบว่า น้ำส้มควันไม้จากไม้ไฟสามารถยับยั้งแบคทีเรียในอุจจาระของลูกหมูได้ใกล้เคียงกับการใช้ยาปฏิชีวนะ [4] น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาขยะมูลฝอยและไม้ยูคาลิปตัสสามารถใช้ในการทำให้ยางพาราแข็งตัว และสมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ได้จากการใช้น้ำส้มควันไม้ไม่เหมือนกับการใช้กรดอะซิติกแต่ดีกว่าการใช้กรดฟอร์มิก ส่วนการยับยั้งเชื้อราของน้ำส้มควันไม้พบว่า ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราขึ้นอยู่กับสารประกอบฟีนอลิก โดยน้ำส้มควันไม้จากขยะมูลฝอยให้ผลการยับยั้งที่ดีที่สุดและดีกว่ากรดอะซิติกและกรดฟอร์มิก [2] นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยพบว่าน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้อัดซึ่งมีสารยึดติดในกลุ่มของสารประกอบฟีนอล และยูเรีย (Urea) มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา White Rot (*Trametes versicolor*) และเชื้อรา Brown Rot (*Tyromyces palustris*) สูงกว่าไม้ธรรมชาติที่ไม่มีสารยึดติด [5] อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับผลของระยะเวลาต่อการเก็บน้ำส้มควันไม้และประสิทธิภาพของน้ำส้มควันไม้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ยังมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำส้มควันไม้ต่อสมบัติทางกายภาพ พืชทุกชนิดที่เป็นองค์ประกอบ และฤทธิ์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราโรคพิช ในสกุล *Colletotrichum*

เชื้อราในสกุล *Colletotrichum* เป็นเชื้อราที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคน้ำหนวดยืดซึ่งสร้างความสูญเสียให้กับพืชเศรษฐกิจหลายชนิดทั้งพืชตระกูลถั่ว พริก ไม้ผลต่าง ๆ โดยจะทำให้ผลผลิตเน่าเสียอายุหลังการเก็บเกี่ยวสั้น ไม่สามารถขนส่งระยะไกลได้ และเชื้อรานี้สามารถระบาดได้อย่างรวดเร็วและรุนแรงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งในปัจจุบันการควบคุมเชื้อราชนิดนี้มักใช้สารเคมีในการป้องกันโรค โดยเฉพาะสารเคมีประเภทคูดซิม เช่น คาร์เบนดาซิม (Carbendazime) เบนโนมิล (Benomyl) และไทอาเบนดาโซล (Thiabendazole) นอกจากนี้ยังพบว่ากรดอินทรีย์หลายชนิดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสกุลนี้ได้ โดยกรดอะซิติกสามารถยับยั้งได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดอินทรีย์ชนิดอื่น [6] ดังนั้นน้ำส้มควันไม้ซึ่งมีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบจึงอาจมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อราในสกุลนี้ได้เช่นเดียวกัน โดยมีรายงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าน้ำส้มควันไม้จากต้นยูคาลิปตัสและสะเดาสามารถยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum* ในมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ [7] อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการนำน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดมาใช้ในการยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum* แต่มีรายงานวิจัยพบว่า สารสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum* ได้ [8] ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum* โดยใช้น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาผลมังคุดด้วยคุณภาพ ซึ่งได้แก่ มังคุดผลอ่อนและมังคุดที่เปลือกมีรอยแตกมีน้ำยางสีเหลืองไหลซึ่งเป็นของเหลือทิ้งในสวนผลไม้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้ของเสียทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นและจะนำไปสู่การพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์น้ำส้มควันไม้ที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้ในการเกษตรได้อย่างแพร่หลายในลำดับต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเผาและการเก็บน้ำส้มควันไม้

การเผาและการเก็บน้ำส้มควันไม้ได้รับความอนุเคราะห์ที่อุปกรณ์และสถานที่จากศูนย์กสิกรรมโป่งแรด ตำบลพลับพลา อำเภอมือง จังหวัดจันทบุรี โดยมีขั้นตอนการเผาและการเก็บน้ำส้มควันไม้เริ่มต้นจากการบรรจุผลมังคุดด้วยคุณภาพจนเต็มถึงถึงด้านบนเตา น้ำหนัก 50 กิโลกรัม ปิดฝาเตาและเตรียมไม้สำหรับจุดไฟหน้าเตาก่อไฟล่อหน้าเตาประมาณ 30 นาที จึงปิดปากเตาให้ความร้อนผ่านตรงช่องปล่อง เริ่มเก็บน้ำส้มควันไม้โดยแบ่งการเก็บเป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ไล่ความชื้นช่วงนี้ควันที่ออกมาจากปากปล่องจะมีสีเทา - ดำ และช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ไม้กลายเป็นถ่านในช่วงนี้ควันที่ออกมาจากปากปล่องจะพุ่งแรงและมีสีเหลืองปนเทาหนา เริ่มหยุดเก็บน้ำส้มควันไม้เมื่อควันบริเวณปากปล่องมีสีขาวเทาออกน้ำเงินอุณหภูมิปากปล่องประมาณ 80 องศาเซลเซียส และปิดฝาเตาให้สนิทเมื่อน้ำส้มควันไม้หยุดไหล น้ำส้มควันไม้ที่เก็บได้จะถูกบรรจุขวดแก้วและนำไปเก็บไว้ในตู้ทึบแสงที่อุณหภูมิห้องสำหรับการศึกษาต่อไป

เมื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ไว้ครบ 2 3 4 และ 6 เดือน แล้วนำไปทดสอบหาค่า pH โดยใช้ pH meter หากจุดเดือดด้วยวิธีซีมิโคร และหาความหนาแน่นโดยใช้พิคโนมิเตอร์ โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำผลการวิเคราะห์ของแต่ละช่วงเวลามาวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของข้อมูล โดยใช้ One-Way Anova (Single Factor)

2. การตรวจสอบพฤษเคมีเบื้องต้น

การตรวจสอบพฤษเคมีเบื้องต้นในน้ำส้มควันไม้ทำโดยปรับปรุงจากวิธีการของ Farnsworth, N. R. และ Ayoola, G. A. et al. [9] - [10] โดยกลุ่มสารเบื้องต้นที่ทำการตรวจสอบ ได้แก่ อัลคาลอยด์ (Alkaloids) แทนนิน (Tannins) สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ซาโปนิน (Saponins) เทอร์ปีนอยด์ (Terpenoids) และแอนทราควิโนน (Anthraquinones) โดยวิธีการตรวจสอบเป็นดังนี้

อัลคาลอยด์ นำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมนอร์โคโรลิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปอุ่นเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปกรองนำส่วนสารละลายมาทดสอบกับสารละลาย Wagner หากปรากฏตะกอนสีน้ำตาลแสดงว่าพบอัลคาลอยด์

แทนนิน นำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 5 มิลลิลิตร อุ่น 15 นาที ถ้าชุนให้หยดโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร 4 - 5 หยด จากนั้นนำไปกรองนำสารละลายที่ได้จากการกรองมาทดสอบกับเจลาตินเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร หากปรากฏตะกอนสีขาวชุนแสดงว่าพบแทนนิน

สารประกอบฟีนอลิก นำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 5 มิลลิลิตร อุ่น 15 นาที ถ้าชุนให้หยดโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร 4 - 5 หยด จากนั้นนำไปกรองนำสารละลายที่ได้จากการกรองมาทดสอบกับเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร หากปรากฏสีเขียวแกมน้ำตาลชุนแสดงว่าพบสารประกอบฟีนอลิก

ฟลาโวนอยด์ นำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในปิโตรเลียมอีเทอร์ 4 มิลลิลิตร นำไปกรองแล้วนำส่วนที่ไม่ละลายไปละลายในเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร 8 มิลลิลิตร นำมาทดสอบ Cyadinin Test โดยนำหลอดแมกนีเซียมมาใส่ในหลอดทดลอง 3 - 4 ชิ้น แล้วค่อยหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 หยด สังเกตฟองที่เกิดขึ้นให้ละลายจนหมดจากนั้นเติมน้ำ 1 มิลลิลิตร และนอร์มอลบิวทานอล 1 มิลลิลิตร สังเกตสีในชั้นของนอร์มอลบิวทานอลหากปรากฏสีแดงส้มเลือดหมูม่วงหรือสีน้ำเงินแสดงว่าพบฟลาโวนอยด์

ซาโปนิน ใช้การทดสอบฟองโดยนำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปต้มให้เดือดจากนั้นนำไปกรองและนำผลกรองซึ่งเป็นของเหลว (Filtrate) มาเติมน้ำกลั่นปริมาตร 2 - 3 มิลลิลิตร เขย่าอย่างแรงหากมีฟองเกิดขึ้นแสดงว่าพบซาโปนิน

เทอร์พีนอยด์ ใช้การทดสอบซาลโควสกี (Salkowski Test) ซึ่งสารตัวอย่าง 0.5 กรัม สกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ครั้งละ 3 - 5 มิลลิลิตร 2 ครั้ง เติมหอโรฟอร์มปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้น เขย่าและค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกหากเกิดสีน้ำตาลแดงระหว่างรอยต่อของสารละลายแสดงว่าพบเทอร์พีนอยด์

แอนทราควิโนน นำสารตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปอุ่น 5 นาที กรองแล้วปล่อยให้สารละลายเย็นลงที่อุณหภูมิห้องสกัดด้วย คลอโรฟอร์มเติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร 2 - 3 หยด สังเกตสีชมพูแดงที่เกิดขึ้น แสดงว่าพบแอนทราควิโนน

3. การทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum capsici*

ทดสอบการยับยั้งเชื้อ *Colletotrichum capsici* ของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดช่วงที่ 1 และ 2 ที่เก็บเป็นระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับยาคาร์เบนดาซิม (Carbendazim) โดยใช้วิธี Poisoned Food Technique [11] - [12] โดยเชื้อ *C. capsici* ได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักวิจัย พัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Potato Dextrose Agar (PDA) โดยเมื่อเตรียมอาหาร PDA แล้วนำไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนิ่งอัดไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพผสมลงในอาหาร PDA โดยเตรียมให้น้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดช่วงที่ 1 และ 2 ได้รับความเข้มข้นสุดท้ายอยู่ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 6 - 18 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำอาหารที่ได้มาเทใส่จานเลี้ยงเชื้อจานละ 20 มิลลิลิตร สำหรับชุดควบคุมบวก ใช้ยาคาร์เบนดาซิมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.4 - 1.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมลงในอาหาร PDA และ ชุดควบคุมลบมีเฉพาะอาหาร PDA เมื่อผิวหน้าอาหารที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ชุดแห้งสนิทแล้วนำเชื้อ *C. capsici* มาเลี้ยงในอาหาร PDA เพื่อทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อ *C. capsici* โดยนำวุ้นที่มีเส้นใยโคโลนีเชื้อรา ที่มีอายุไม่เกิน 10 วัน วางบนผิวหน้าอาหารที่เตรียมไว้บริเวณกึ่งกลางจานเลี้ยงเชื้อแล้วนำเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิห้องทำการทดลอง 5 ชั่วโมง วัดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีและคำนวณร้อยละการยับยั้งการเจริญ ของเชื้อรา (Percent Inhibition of Radial Growth; PIRG) เปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี ของเชื้อราในจานอาหารที่มีเพียงอาหาร PDA ดังสมการที่ (1)

$$PIRG = \frac{R1 - R2}{R1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

R1 = ความยาวรัศมีของโคโลนีเชื้อในจานควบคุม (PDA)

R2 = ความยาวรัศมีของโคโลนีเชื้อในจานทดสอบ

นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตัวอย่างเทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา กราฟที่สร้างนี้ นำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ร้อยละ 50 (IC₅₀) เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราในแต่ละช่วงเวลาที่เกิดขึ้นน้ำส้มควันไม้ต่อไป

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้เป็นผลผลิตที่ได้จากการควบแน่นควันที่เกิดจากการผลิตถ่านไม้โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาล มีกลิ่นควันไฟ โดยวัสดุที่นำมาผลิตน้ำส้มควันไม้นั้นมีหลากหลายชนิดทำให้น้ำส้มควันไม้มีคุณลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุที่นำมาเผาสำหรับงานวิจัยนี้เมื่อนำผลมังคุดต่อคุณภาพมาเผาจนได้น้ำส้มควันไม้แล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดต่อคุณภาพช่วงที่ 1 คือช่วงไล่ความชื้น และช่วงที่ 2 คือช่วงไม้กลายเป็นถ่านที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน ผลการศึกษาพบว่าน้ำส้มควันไม้ที่เก็บได้มีกลิ่นจุนโดยน้ำส้มควันไม้ที่เก็บในช่วงที่ 1 มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลแดง มีผลผลิตเท่ากับ 112 มิลลิลิตร ต่อผลมังคุด 1 กิโลกรัม ส่วนน้ำส้มควันไม้ที่เก็บในช่วงที่ 2 มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีผลผลิตเท่ากับ 176 มิลลิลิตร ต่อผลมังคุด 1 กิโลกรัม เมื่อนำมาตรวจสอบสมบัติทางเคมีคือค่า pH และสมบัติทางกายภาพคือจุดเดือดและความหนาแน่นพบว่าค่า pH จุดเดือดและความหนาแน่นเป็นดังตารางที่ 1 โดยค่า pH ของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดอยู่ในช่วง 4.98 - 5.10 และจากการหาจุดเดือดด้วยวิธีซีมิไมโครพบว่าจุดเดือดของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากผลมังคุดมีค่าอยู่ในช่วง 105 - 113 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้โดยใช้พิคโนมิเตอร์พบว่าความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.9738 - 1.0071 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าค่า pH จุดเดือดและความหนาแน่น ของน้ำส้มควันไม้ที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบน้ำส้มควันไม้จากผลของมังคุดจากงานวิจัยนี้กับน้ำส้มควันไม้จากเปลือกและผลของมังคุดที่ได้มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าแม้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกันคือ เปลือกมังคุดหรือผลของมังคุดแต่หากเป็นมังคุดในพื้นที่ที่แตกต่างกันหรือกระบวนการในการผลิตต่างกันก็อาจส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า pH และความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Hiranrat, A. et al. [13] พบว่าน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดในงานวิจัยนี้มีค่า pH ที่สูงกว่าแต่ค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH และความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้ดิบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มพช., Thai community product standards 659/2553) [14] พบว่าน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเปลือกและผลของมังคุดจากรายงานวิจัยโดยส่วนใหญ่รวมถึงงานวิจัยนี้มีค่า pH สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนดไว้ (pH 2.0 - 3.0) ทั้งนี้การที่น้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดมีค่า pH ที่สูงกว่ามาตรฐานอาจเนื่องมาจากผลมังคุดมีปริมาณของน้ำในเนื้อมังคุดมากกว่าเนื้อไม้ซึ่งการใช้ผลมังคุดที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่าเนื้อไม้ทั่วไปในการผลิตน้ำส้มควันไม้ อาจส่งผลให้น้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดมีองค์ประกอบของน้ำมากและทำให้ pH มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดโดยคุณภาพที่จัดเก็บไว้เป็นระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน

น้ำส้มควันไม้	ระยะเวลา (เดือน)	pH	จุดเดือด (°C)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
ช่วงที่ 1	2	5.02 ± 0.01 ^a	108 ± 1.73 ^a	0.9747 ± 0.0005 ^a
	3	5.05 ± 0.01 ^b	109 ± 1.15 ^a	1.0052 ± 0.0024 ^b
	4	4.98 ± 0.01 ^c	105 ± 0.58 ^b	0.9738 ± 0.0005 ^a
	6	5.03 ± 0.02 ^{ab}	110 ± 0.58 ^{ac}	1.0051 ± 0.0000 ^b
ช่วงที่ 2	2	5.08 ± 0.01 ^a	108 ± 1.15 ^a	0.9774 ± 0.0004 ^a
	3	5.10 ± 0.01 ^{ab}	113 ± 3.46 ^a	1.0059 ± 0.0005 ^b
	4	5.10 ± 0.01 ^b	107 ± 1.73 ^a	0.9756 ± 0.0006 ^c
	6	5.07 ± 0.01 ^c	109 ± 0.58 ^a	1.0071 ± 0.0000 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละเดือน (P ≤ 0.05) เมื่อเปรียบเทียบน้ำส้มควันไม้ในช่วงเดียวกันในแต่ละคอลัมน์

ตารางที่ 2 ค่า pH และความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเปลือกมังคุดและผลของมังคุด

ชนิดของน้ำส้มควันไม้	pH	ความหนาแน่น (g/cm ³)	References
เปลือกมังคุด	4.56	1.020	[15]
เปลือกมังคุด	3.89	-	[16]
ผลมังคุด	4.08 - 4.40	0.98 - 1.01	[13]
ผลมังคุด	4.98 - 5.10	0.9747 - 1.0059	งานวิจัยนี้
น้ำส้มควันไม้ดิบตามมาตรฐาน มพช.	2.0-3.0	1.010 - 1.025	[14]

2. การตรวจสอบพฤษเคมีเบื้องต้นของน้ำส้มควันไม้ผลมังคุด

ผลมังคุดมีพฤษเคมีหลายชนิดเป็นองค์ประกอบโดยสารที่พบปริมาณมากในมังคุด คือ สารในกลุ่มแซนโทน [17] - [18] และสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ [19] ซึ่งสารทั้งสองกลุ่มนี้จัดเป็นพฤษเคมีในกลุ่มสารประกอบพอลิฟีนอลที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย [20] ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาพฤษเคมีที่อาจตรวจพบในน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤษเคมีของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดทั้งสองช่วงที่ระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน ของการทดลอง โดยนำมาตรวจหากลุ่มสารในเบื้องต้นทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ อัลคาลอยด์ แทนนิน สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน เทอร์ปีนอยด์ และแอนทราควิโนน ด้วยวิธีการเกิดสีหรือตะกอนได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบพฤษเคมีเบื้องต้นของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพ

น้ำส้มควันไม้	ระยะเวลา (เดือน)	อัลคาลอยด์	สารประกอบฟีนอลิก	แทนนิน	ฟลาโวนอยด์	ซุกโบนิน	เทอร์ปีนอยด์	แอนทราควิโนน
ช่วงที่ 1	2	+	+	-	-	-	+	-
	3	+	+	-	-	-	+	-
	4	+	+	-	-	-	+	-
	6	+	+	-	-	-	+	-
ช่วงที่ 2	2	+	+	-	-	-	+	-
	3	+	+	-	-	-	+	-
	4	+	+	-	-	-	+	-
	6	+	+	-	-	-	+	-

หมายเหตุ + = ตรวจพบพฤษเคมี
 - = ตรวจไม่พบพฤษเคมี

ผลการทดสอบพบว่าน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดทั้งสองช่วงที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลา 2 - 6 เดือน มีกลุ่มสารพฤษเคมีชนิดเดียวกันเป็นองค์ประกอบคือ อัลคาลอยด์ สารประกอบฟีนอลิก และเทอร์ปีนอยด์ โดยไม่พบความแตกต่างของชนิดพฤษเคมี คณะผู้วิจัยจึงได้นำน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเพิ่มเติมในเบื้องต้นโดยนำน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงที่เก็บไว้ที่ระยะเวลาด่าง ๆ มาสกัดด้วยตัวทำละลาย ไดคลอโรมีเทนและนำมาตรวจสอบองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ในเบื้องต้นด้วยเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (TLC) โดยใช้ซิลิกาเป็นเฟสคงที่และ Hexane:Ethylacetate (70:3) เป็นเฟสเคลื่อนที่ โดยตรวจสอบจุดสารภายใต้แสงยูวี และสารละลายวานิลินได้ผลดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าสารสกัดไดคลอโรมีเทนของน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงมีรูปแบบขององค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบน้ำส้มควันไม้ที่เก็บไว้ที่ระยะเวลาด่าง ๆ จะเห็นว่า ความเข้มข้นของจุดสารมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับระยะเวลาที่เก็บรักษา น้ำส้มควันไม้ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าแม้ชนิดของพฤษเคมีในน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงและในแต่ละช่วงเวลาเก็บรักษาจะเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันในองค์ประกอบทางเคมีซึ่งอาจส่งผลต่อฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืชได้แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามควรมีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของพฤษเคมีแต่ละชนิดเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพฤษเคมีแต่ละชนิดที่อาจส่งผลต่อฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืชต่อไป



(ก) สารสกัดน้ำส้มคว้นไม้ช่วงที่ 1

(ข) สารสกัดน้ำส้มคว้นไม้ช่วงที่ 2

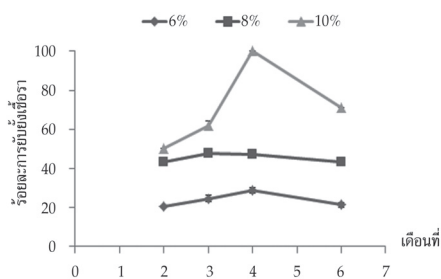
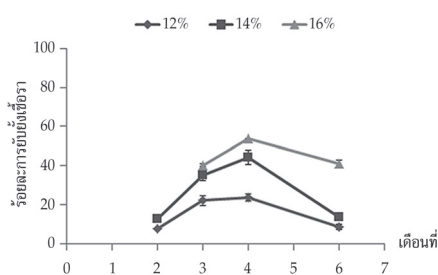
รูปที่ 1 TLC ของสารสกัดหยาบน้ำส้มคว้นไม้ที่สกัดด้วยไดคลอโรมีเทนทดสอบโดยใช้สารละลายวานิลิน และภายใต้แสงยูวี (รอยวงด้วยดินสอ) (1) : เก็บรักษาไว้ 2 เดือน (2) : เก็บรักษาไว้ 3 เดือน (3) : เก็บรักษาไว้ 4 เดือน

ชนิดของฟลักซ์เคมีที่พบในน้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hiranrat, A. et al. [13] ที่พบว่าน้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดมีสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณมากและมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์เคมีของน้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดและฟลักซ์เคมีของผลมังคุดที่ผ่านการสกัดด้วยวิธีสกัดด้วย ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและเฮกเซนจากงานวิจัยของ Manimekalai, I., et al. [19] พบว่าสารสกัดคลอโรฟอร์มและเฮกเซนของผลมังคุดมีสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกฟลาโวนอยด์ และเทอร์พีนอยด์ ในขณะที่น้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดในงานวิจัยนี้ตรวจไม่พบสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เบื้องต้น ซึ่งสารประกอบฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างเฉพาะที่แตกต่างจากสารประกอบฟีนอลิกชนิดอื่นตรงที่มีโครงสร้างหลักเป็นฟลาโวน (วงไพแรนหรือไพโรน) สารนี้ไม่เสถียรต่อความร้อนเนื่องจากวงฟลาโวนสามารถเกิดการแตกสลายทำให้สารประกอบฟลาโวนอียกลายเป็นสารกลุ่มฟีนอลอื่น ๆ ได้ง่าย [21] ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าสารฟลาโวนอยด์ในผลมังคุดได้สลายตัวไปเป็นสารประกอบฟีนอลิกชนิดอื่นที่ไม่มีวงฟลาโวนเป็นองค์ประกอบระหว่างกระบวนการผลิตน้ำส้มคว้นไม้ที่มีการใช้ความร้อนสูง

3. ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *Colletotrichum capsici* ของน้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพ

ในการใช้ประโยชน์จากน้ำส้มคว้นไม้ นั้น น้ำส้มคว้นไม้ที่เก็บได้จากเตาผลิตถ่าน ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในทันทีทั้งนี้เนื่องจากมีน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและสามารถปิดปากใบของพืช และเกาะติดรากพืชได้ ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ช้าลง ดังนั้นจึงต้องมีการทำน้ำส้มคว้นไม้ให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ โดยหนึ่งในวิธีการที่เป็นภูมิปัญญาชาวบ้านคือการต้มน้ำส้มคว้นไม้ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 3 เดือน เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของน้ำมันดินก่อนการนำมาใช้งาน [22] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานวิจัยที่ติดตามประสิทธิภาพของน้ำส้มคว้นไม้ในช่วงเวลาต่าง ๆ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ของน้ำส้มคว้นไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพช่วงที่ 1 และ 2 ที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน โดยใช้วิธี Poisoned Food Technique และใช้ยาคาร์เบนดาซิมเป็นสารควบคุมบวก

(Positive Control) ได้ผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ น้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นเดียวกันที่ระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน ดังรูปที่ 2(ก) พบว่าร้อยละการยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ของน้ำส้มควันไม้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเก็บไว้นานขึ้นและมีร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสูงที่สุดเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลา 4 เดือน แต่หลังจาก 4 เดือนพบว่าฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ลดลงโดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุด ในช่วงที่ 2 ดังรูปที่ 2(ข) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในน้ำส้มควันไม้ ซึ่งสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์สารสกัดโคคลอโรมีเทนของน้ำส้มควันไม้ด้วยเทคนิค TLC ดังรูปที่ 1 โดยพบว่าความเข้มของจุดที่ปรากฏในแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบฤทธิ์การยับยั้ง เชื้อราของน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วงเดือนที่ 4 ซึ่งมีฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราดีที่สุดพบว่าน้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 2 (IC_{50} 7.67 %w/v) มีฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราที่สูงกว่าน้ำส้มควันไม้ในช่วงที่ 1 (IC_{50} 15.19 %w/v) ประมาณ 2 เท่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพ ทั้งสองช่วงกับยาคาร์เบนดาซิมพบว่ายาคาร์เบนดาซิม (IC_{50} 0.64 %w/v) ให้ผลในการยับยั้งเชื้อ *C. capsici* ที่ดีกว่าน้ำส้มควันไม้ทั้งสองช่วง (ตารางที่ 4)



- (ก) ช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 14 และ 16 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
รูปที่ 2 ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *C. capsici* ของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดเมื่อเก็บไว้ที่ระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน
- (ข) ช่วงที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 8 และ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เมื่อเปรียบเทียบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราของน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพกับ น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ชนิดอื่นที่ได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า น้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดด้วยคุณภาพ ต้องใช้ความเข้มข้นสูงกว่าน้ำส้มควันไม้จากสะเดาและยูคาลิปตัสซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* [7] และน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่และยางพาราซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญ ของเส้นใยเชื้อรา *Penicillium* sp. [23] โดยพบว่าเมื่อใช้น้ำส้มควันไม้ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 2 ขึ้นไป สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราทั้งสองชนิดนี้ได้ร้อยละ 100

ตารางที่ 4 ค่า IC_{50} ของน้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 1 และ 2 ที่เก็บเป็นระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือน ในการยับยั้งเชื้อ *Colletotrichum capsici*

น้ำส้มควันไม้	ระยะเวลา (เดือน)	IC_{50} (%w/v)
ช่วงที่ 1	2	> 14
	3	> 16
	4	15.19
	6	16.82
ช่วงที่ 2	2	10.00
	3	8.33
	4	7.67
	6	9.10
ยาคาร์เบนดาซิม	-	0.64

บทสรุป

ผลมังคุดคุดยคุณภาพที่เป็นของเหลือทิ้งในสวนผลไม้ได้ถูกนำมาผลิตเป็นน้ำส้มควันไม้ได้เป็นน้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 1 คือ ช่วงไล่ความชื้นและน้ำส้มควันไม้ ช่วงที่ 2 ช่วงไม้กลายเป็นถ่านซึ่งเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลา 2 3 4 และ 6 เดือนพบว่าค่า pH จุดเดือด ความหนาแน่น มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ชนิดของพฤษเคมีไม่แตกต่างกัน สำหรับฤทธิ์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum capsici* จะเปลี่ยนไปตามระยะเวลาที่เก็บรักษาโดยฤทธิ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีฤทธิ์สูงสุดในเดือนที่ 4 โดยน้ำส้มควันไม้ในช่วงที่ 2 มีฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* ได้สูงกว่าน้ำส้มควันไม้ช่วงที่ 1 แต่ต่ำกว่ายาคาร์เบนดาซิม โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 7.67 15.19 และ 0.64 %w/v ตามลำดับ และฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *C. capsici* จะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 เดือน โดยน้ำส้มควันไม้จากผลมังคุดทั้งสองช่วงนี้มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขต 6 จังหวัดจันทบุรี ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติโป่งแรด สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร ภาควิชาเคมี ภาควิชาสถิติ และภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำ ตลอดจนเนื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์และพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างและดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่สนับสนุนงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2558 เพื่อเป็นทุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Payamara, J. (2011). Usage of Wood Vinegar as New Organic Substance. **International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG**. Vol. 3, No. 3, pp. 1658-1662
- [2] Baimark, Y. and Niamsa, N. (2009). Study on Wood Vinegars for Use as Coagulating and Antifungal Agents on the Production of Natural Rubber Sheets. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 33, No. 6/7, pp. 994-998. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.04.001
- [3] Yahayu, M., Mahmuda, K. N., Mahamada, M. N., Ngadirana, S., Lipehb, S., Ujangb, S. and Zakariaa, Z. A. (2017). Efficacy of Pyrolytic Acid from Pineapple Waste Biomass as Wood Preserving Agent. **Journal Teknologi (Sciences & Engineering)**. Vol. 79, No. 4, pp. 1-8
- [4] Wang, H. F., Wang, J. L., Wang, C., Zhang, W. M., Liu, J. X., and Dai, B. (2012). Effect of Bamboo Vinegar as An Antibiotic Alternative on Growth Performance and Fecal Bacterial Communities of Weaned Piglets. **Livestock Science**. Vol. 144, Issue 1-2, pp. 173-180. DOI: 10.1016/j.livsci.2011.11.015
- [5] Nakai, T., Kartal, N., Hata, T., and Imamura, Y. (2007). Chemical Characterization of Pyrolysis Liquids of Wood-Based Composites and Evaluation of Their Bio-efficiency. **Building and Environment**. Vol. 42, Issue 3, pp. 1236-1241. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.11.022
- [6] Kang, H. C., Park, Y. H., and Go, S. J. (2003). Growth Inhibition of A Phytopathogenic Fungus, *Colletotrichum* Species by Acetic Acid. **Microbiological Research**. Vol. 158, Issue 4, pp. 321-326. DOI: 10.1078/0944-5013-00211
- [7] Sangnak, V. and Nalumpang, S. (2010). Efficiency of Wood Vinegar Extracts from Eucalyptus and Neem Trees for Controlling *Collectotrichum gloeosporioides*. **Journal of Agriculture**. Vol. 26, No. 3, pp. 213-222 (in Thai)
- [8] Prasothong, N., Plainsirichai, M., Bussaman, P., Luckantinvong, V., and Wongsawas, M. (2011). Effect of Mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) Peel Extract on Anthracnose Disease (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) of Mango Fruit cv. In **Proceeding of the 7th Agricultural Systematic National Conference**. Maha Sarakham, Thailand. pp. 520-525 (in Thai)
- [9] Farnsworth, N. R. (1996). Biological and Phytochemical Screening of Plants. **Journal of Pharmaceutical Sciences**. Vol. 55, Issue 3, pp. 225-276. DOI: 10.1002/jps.2600550302
- [10] Ayoola, G. A., Coker, H. A. B., Adesegun, S. A., Adepoju-Bello, A. A., Obaweya, K., Ezennia, E. C., and Atangbayila, T. O. (2008). Phytochemical Screening and Antioxidant Activities of Some Selected Medicinal Plants Used for Malaria Therapy in Southwestern Nigeria. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research**. Vol. 7, No. 3, pp. 1019-1024. DOI: 10.4314/tjpr.v7i3.14686
- [11] Bussaman, P., Namsena, P., Rattanasena, P. and Chandrapatya, A. (2012). Effect of Crude Leaf Extract on *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Sacc. **Psyche: A Journal of Entomology**. Vol. 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1155/2012/309046

- [12] Chaichompoo, W. and Phichai, K. (2010). Effect of Plant Extract on Growth Inhibition of *Colletotrichum* sp. **Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal**. Vol. 3, No. 2, pp. 18-25 (in Thai)
- [13] Hiranrat, A., Wongsawat, P., Hiranrat, W., and Sumanatrakul, P. (2013). Investigation of Antioxidation Properties from the Wood Vinegar of Mangosteen Fruits. **Thaksin University Journal**. Vol. 16, No. 3, pp. 120-130 (in Thai)
- [14] Thai Community Product Standards. (2010). **Wood Charcoal Vinegar 659/2553**. Thai Industrial Standards Institute, Ratchathewi, Bangkok. pp. 1-3 (in Thai)
- [15] Luenam, L. (2013). Research of Charcoal Stove and Wood Vinegar Production from Mangosteen Peel. In **The 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference: TSAE 2013**. Hua Hin, Thailand, pp. 428-431 (in Thai)
- [16] Onthong, U., Thongnueakhaeng, W., and Mekjinda, N. (2015). The Efficiency of Wood Vinegar from The Mangosteen Peel for The Rubber Sheets Production. **Thaksin University Journal**. Vol. 18, No. 3, pp. 154-160 (in Thai)
- [17] Jung, H. A., Su, B. N., Keller, W. J., Mehta, R. G., and Kinghorn, A. D. (2006). Antioxidant Xanthenes from The Pericarp of *Garcinia mangostana* (Mangosteen). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 54, No. 6, pp. 2077-2082. DOI: 10.1021/jf052649z
- [18] Peres, V., Nagem, T. J., and Olivera, F. F. (2000). Tetraoxygenated Naturally Occurring Xanthenes. **Phytochemistry**. Vol. 55, Issue 7, pp. 683-710. DOI: 10.1016/s0031-9422(00)00303-4
- [19] Manimekalai, I., Sivakumari, K., Ashok, K., and Rajesh, S. (2016). Phytochemical Profiling of Mangosteen Fruit, *Garcinia mangostana*. **World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**. Vol. 5, Issue 2, pp. 221-252
- [20] Obolskiy, D., Pischel, I., Siriwatanametanon, N., and Heinrich, M. (2009). *Garcinia mangostana* L.: A Phytochemical and Pharmacological Review. **Phytotherapy Research**. Vol. 23, Issue 8, pp. 1047-1065. DOI: 10.1002/ptr.2730
- [21] Chaaban, H., Ioannou, I., Chebil, L., Slimane, M., Gérardin, C., Paris, C., and Ghoul, M. (2017). Effect of Heat Processing on Thermal Stability and Antioxidant Activity of Six Flavonoids. **Journal of Food Processing and Preservation**. Vol. 41, Issue 5, pp. 1-12. DOI: 10.1111/jfpp.13203
- [22] Theapparatt, Y., Chandumpai, A., and Faroongsarng, D. (2017). Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. **Tropical Forests-New Edition**. Intech Open, pp. 163-183. DOI:10.5772/intechopen.77380
- [23] Wisittawong, N. and Nalumpang, S. (2017). Controlling *Penicillium* Fruit Rot of Citrus Using Wood Vinegar and Some Medicinal Plant Extracts. **Thai Agricultural Research Journal**. Vol. 35, No. 1, pp. 100-109 (in Thai)

การพัฒนาโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ Development of Herbal Mosquito Repellent Lamp from Ginger Lily Oil

อำพล บุญเพียร^{1*} ศิริพร อินธิแสน² ปฐมา จันทรพล¹ และวรัญญา อรุโณทยานันท์¹
Aumpol Bunpean^{1*} Siriporn Inthisan² Patama Chantarapon^{1*} and Warunya Arunotayanun¹

Received: November 19, 2018; Revised: January 18, 2019; Accepted: January 22, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาฤทธิ์ป้องกันยุงของน้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ 2) พัฒนาโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ 3) ศึกษาความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ กลุ่มตัวอย่างเป็นอาสาสมัครสุขภาพดีในการทดสอบฤทธิ์ป้องกันยุงจำนวน 4 คน อาสาสมัครที่ใช้ในการสนทนากลุ่ม จำนวน 8 คน และอาสาสมัครทดลองใช้โคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ จำนวน 30 คน เครื่องมือวิจัย ได้แก่ เครื่องมือในการทดสอบฤทธิ์ป้องกันยุง แนวทางการสนทนากลุ่ม แบบประเมินคุณภาพโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ และแบบประเมินความพึงพอใจ ดำเนินการวิจัยโดยใช้กระบวนการวิจัยและพัฒนา 4 ระยะ ได้แก่ 1) วิเคราะห์สภาพปัญหา 2) พัฒนารูปแบบ 3) ทดลองใช้ 4) ประเมินผลวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์เนื้อหา ความถี่ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า 1) น้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ สามารถป้องกันยุงลายตอนกลางวันได้ 1.5 ชั่วโมง และป้องกันยุงรำคาญตอนกลางคืนได้ 4.5 ชั่วโมง 2) โคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ ที่พัฒนาขึ้นมีตัวโคมและถ้วยสำหรับใส่น้ำมันทำจากดินเผา สายไฟมีสวิตช์เปิด - ปิด หลอดไฟเป็นหลอดทังสเตนแบบเกลียว ความสว่าง 1 ระดับสี Warm White และน้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ 100 % 3) อาสาสมัครมีความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์อยู่ในระดับมาก สรุปได้ว่าการพัฒนาโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์สามารถเป็นทางเลือกสำหรับผู้ที่ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์สมุนไพรในการไล่ยุง และสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพืชสมุนไพรและส่งเสริมภูมิปัญญาไทยและสมุนไพรไทยได้

คำสำคัญ : โคมไฟไล่ยุง; น้ำมันหอมระเหย; ดอกกว่านมหาหงส์

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนาภิเษก จังหวัดนonthaburi

² โรงพยาบาลบรมบิรมหาสารคาม

¹ Kanchanabhishek Institute of Medical and Public Health Technology, Nonthaburi

² Borabue Hospital, Mahasarakham

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

Abstract

This research and development aim to 1) Study mosquito preventing of Ginger lily oil 2) Develop repellent lamp with smell of Ginger lily oil and 3) Study satisfaction of repellent lamp with smell of Ginger lily oil using. The sample were 4 healthy volunteer for mosquito preventing study, 8 volunteer for group discussion and 30 volunteer for repellent lamp with smell of Ginger lily oil using. The research tools were group discussion, repellent lamp with smell of Ginger lily oil quality evaluation form and satisfaction evaluation form. Research method include 4 step as 1) Problem analysis 2) Design 3) Trial and 4) Evaluation. Analyze by content consider and mean and standard deviation. The results of this research show 1) Ginger lily oil can prevent *Aedes aegypti* L. 1.5 hours and *Cutex quinquefasciatus* Say 4.5 hours 2) Ginger lily oil repellent lamp with oil earthenware, power on - off switch, tungsten light with warm white and 100% ginger lily oil. 3) High satisfaction of repellent lamp with smell of Ginger lily oil using. Thus, repellent lamp with smell of Ginger lily oil can be a choice for herbal product user and develop for commercial as Thai herbal value added and encourage herbal and Thai knowledge.

Keywords: Herbal Mosquito Repellent Lamp; Essential Oil; Ginger Lily Oil

บทนำ

ปัจจุบันมีแนวทางป้องกันการระบาดของโรคต่าง ๆ ที่มีุงเป็นพาหะนำโรค ได้แก่ การควบคุมุงพาหะนำโรค สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำลายแหล่งเพาะพันธุ์ุง การป้องกันุงกัดโดยใช้มุ้ง การใช้ยาทากันุง การใช้สารฆ่าแมลงแบบพ่นหมอกควัน หรือใช้สารฆ่าแมลงเคมีฟอส (ทรายอะเบท) ฆ่าลูกน้ำุงลาย [1] โดยการใช้สารฆ่าแมลงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน มีรายงานยอดการสั่งซื้อสารฆ่าแมลงจากต่างประเทศคิดเป็นมูลค่านับพันล้านบาทต่อปี นอกจากนี้ยังพบรายงานการสร้างความต้านทานของลูกน้ำุงลายต่อสารเคมีดังกล่าวทั้งในและต่างประเทศ [2] ในท้องตลาดมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการกำจัดและป้องกันุงหลากหลายชนิด เช่น ครีมและสเปรย์กันุง ยาจุดกันุง น้ำมันไลุง ฯลฯ ซึ่งส่วนใหญ่มีส่วนผสมของสารเคมีสังเคราะห์ และก่อให้เกิดปัญหา เพราะสารดังกล่าวมีอันตรายสูงผู้ใ้บางคนเกิดอาการแพ้ รวมทั้งมีผลกระทบจากการใช้ในระยะเวลาได้อีกด้วย

การใช้สมุนไพรเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประสบปัญหาจากุง โดยมีการศึกษาและวิจัยในเชิงลึกระหว่างนักวิจัยหลายสาขา อาทิ ภูมิวิทยา พฤกษวิทยา เคมีพืชวิทยา การพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการตลาด จนทำให้ทราบถึงคุณสมบัติองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ของสมุนไพรชนิดต่าง ๆ ที่มีศักยภาพนำมาใช้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไลุงและแมลง อาทิ สะเดา แมงลัก ขมิ้นชัน มะกรูด ตะไคร้หอม กานพลู ข่า เปลือกส้ม โหระพา สะระแหน่ กระเทียม และมหาหงส์ [3]

มหาหงส์ (*Hedychium coronarium* J. Koenig) เป็นไม้ล้มลุกแบบมีหัวและเหง้าอยู่ใต้ดิน มีใบและกาบใบโผล่พ้นดิน เป็นสมุนไพรไลยุงชนิดหนึ่ง วิธีการคือนำหัวหรือเหง้าสดมาทุบให้แตกกลิ่นของน้ำมันจะออกมา นำไปวางในจุดที่ต้องการ ก็จะไม่มียุงหรือแมลงมารบกวน น้ำมันที่ได้จากเหง้ามีลักษณะเป็นของเหลวใสมีสีเหลืองอ่อนและมีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว โดยประกอบไปด้วย Beta - Pinene, Borneol, d - Limonene และ Linalool [4] น้ำมันจากเหง้ามหาหงส์เมื่อนำมาเตรียมเป็นสเปรย์ป้องกันยุง พบว่าสามารถป้องกันยุงลาย (*Aedes aegypti* L.) ตอนกลางวันได้ 1 ชั่วโมง และป้องกันยุงรำคาญ (*Culex quinquefasciatus* Say) ตอนกลางคืนได้ 4 ชั่วโมง แต่ปัญหาคือ กลิ่นน้ำมันจากเหง้ามหาหงส์มีกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สเปรย์ไลยุงจากน้ำมันเหง้าว่านมหาหงส์ ในทางกลับกันกลิ่นน้ำมันจากดอกว่านมหาหงส์มีกลิ่นหอม แต่ยังไม่มียางงานการวิจัยว่าน้ำมันจากดอกว่านมหาหงส์สามารถไลยุงได้ [5]

จากความเป็นมาและความสำคัญข้างต้นคณะผู้วิจัยได้เห็นความสำคัญและมีความสนใจที่จะพัฒนานวัตกรรมจากดอกว่านมหาหงส์ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้ผลิตภัณฑ์ไลยุงและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ออกสู่ชุมชนและท้องตลาดได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ ลดอาการแพ้จากสารเคมีสังเคราะห์ สามารถป้องกันยุงได้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น และยังสามารถเสริมสร้างบรรยากาศกลิ่นหอม ๆ สดชื่นผ่อนคลายที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสมุนไพรมหาหงส์ ส่งผลให้สุขภาพจิตดี สุขภาพร่างกายดี ปราศจากโรคต่าง ๆ ที่นำโดยยุง ลดความรำคาญจากยุง ทำให้ทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาฤทธิ์ป้องกันยุงของน้ำมันดอกว่านมหาหงส์
2. เพื่อพัฒนาโคมไฟโลยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์
3. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของอาสาสมัครต่อการใช้โคมไฟโลยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยได้รับการพิจารณาเห็นชอบจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก เลขที่ KMPHT6002007

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบฤทธิ์ไลยุงเป็นอาสาสมัครทดสอบชายและหญิง อายุ 20 - 60 ปี ที่ไม่มีอาการเจ็บป่วยและต้องไม่มีบาดแผลบริเวณแขนจำนวน 4 คน โดยใช้ในการทดสอบคุณภาพของยุงจำนวน 1 คน และทดสอบฤทธิ์ป้องกันยุง จำนวน 3 คน

2. ประชากรที่ใช้ในการสนทนากลุ่มและทดลองใช้นวัตกรรม ได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก จังหวัดนนทบุรี จำนวน 618 คน แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1 อาสาสมัครในขั้นตอนการสนทนากลุ่ม เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์และสภาพปัญหาการใช้ผลิตภัณฑ์ในการไลยุง จำนวน 8 คน โดยคัดเลือกตามคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.1.1 ยินดีให้การสัมภาษณ์เกี่ยวกับสถานการณ์และสภาพปัญหาการใช้ผลิตภัณฑ์ไλύงของนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก

2.1.2 เป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในการใช้ผลิตภัณฑ์ไλύงมาอย่างน้อย 2 ชนิด

2.2 อาสาสมัครในชั้นการทดลองใช้งานโคมไฟไλύงกลั่นดอกว่านมหาทงส์ จำนวน 30 คน โดยผู้วิจัยมีการกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างจากจำนวนชั้นที่มีนักศึกษาพักอาศัยอยู่คือ หอพัก 1 จำนวน 5 ชั้น หอพัก 2 จำนวน 5 ชั้น หอพัก 3 จำนวน 3 ชั้น และหอพัก 4 จำนวน 2 ชั้น รวมทั้งสิ้น 15 ชั้น แต่เพื่อป้องกันการสูญหายของกลุ่มตัวอย่างระหว่างการทดลอง ผู้วิจัยจึงเพิ่มกลุ่มตัวอย่างอีกเป็น 2 ห้องต่อชั้น รวมเป็นจำนวนทั้งสิ้น 30 ห้อง โดยทำการสุ่มเลือกโดยการจับฉลากห้อง และดำเนินการคัดเลือกอาสาสมัครจำนวน 1 คนจากห้องที่จับฉลากได้ เพื่อทดลองใช้โคมไฟไλύง โดยมีการกำหนดคุณสมบัติดังนี้

2.2.1 เกณฑ์การคัดเลือกอาสาสมัครเข้าร่วมการวิจัย (Inclusion Criteria) คือ

- 1) อาสาสมัครเข้าร่วมโครงการด้วยความสมัครใจ และลงนามในเอกสารยินยอมอย่างเต็มใจ
- 2) เป็นผู้ที่สุขภาพแข็งแรง ไม่มีโรคประจำตัว ไม่มีโรคแทรกซ้อนโดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวกับทางเดินหายใจส่วนบน
- 3) ไม่มีความผิดปกติเกี่ยวกับการรับกลิ่น
- 4) อาสาสมัครต้องไม่มีประวัติการแพ้กลิ่นหอม หรือน้ำมันหอมระเหย

2.2.2 เกณฑ์การให้อาสาสมัครออกจากงานวิจัย (Discontinuation Criteria)

- 1) ผู้เข้าร่วมวิจัยขอลงตัว
- 2) ไม่สามารถติดตามผู้เข้าร่วมวิจัยได้

โดยในงานวิจัยนี้ไม่มีอาสาสมัครถูกคัดให้ออกจากงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1. เครื่องมือในการทดสอบฤทธิ์ป้องกันยุง

1.1 ห้องทดสอบขนาด 33 ลูกบาศก์เมตร หรือ $2.76 \times 4.6 \times 2.6$ เมตร

1.2 กรงยุงทดสอบขนาด 27,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ $30 \times 30 \times 30$ เซนติเมตร

1.3 ยุงลายบ้าน (*Aedes aegypti*) หรือยุงรำคาญ (*Culex quinquefasciatus* Say)

เพศเมีย อายุ 4 - 5 วัน จำนวน 250 ตัว ซึ่งเลี้ยงไว้ในห้องปฏิบัติการและยังไม่เคยกินเลือดมาก่อน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่อาจถ่ายทอดไปสู่อาสาสมัคร

1.4 น้ำมันดอกว่านมหาทงส์ 100 %

2. ลักษณะแนวทางการสนทนากลุ่ม มีประเด็นคำถาม 5 คำถาม คือ 1) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการไλύงรูปแบบเดิมเป็นอย่างไร 2) ท่านพบปัญหาในการใช้ผลิตภัณฑ์ไλύงรูปแบบเดิมหรือไม่อย่างไร 3) รูปแบบผลิตภัณฑ์ไλύงที่ท่านต้องการควรมีลักษณะอย่างไร 4) ท่านต้องการผลิตภัณฑ์ไλύงที่ทำจากสมุนไพรหรือไม่ และควรเป็นสมุนไพรชนิดใด 5) ท่านคิดอย่างไรในการนำน้ำมันจากว่านมหาทงส์มาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ไλύง

3. เครื่องมือที่เป็นโคมไฟไλύงกลั่นดอกว่านมหาทงส์รูปแบบใหม่ที่สร้างขึ้นมาประกอบไปด้วย

3.1 โคมไฟไλύงกลั่นดอกว่านมหาทงส์ ประกอบไปด้วย ตัวโคมไฟ ถ้วยใส่น้ำมัน ฐานโคมไฟ ทำจากไม้เนื้อแข็ง และหลอดไฟชนิดทังสเตนแบบเกลียว สวิตซ์เปิด - ปิด

3.2 คู่มือการใช้ประกอบไปด้วย ชื่อนวัตกรรม ส่วนประกอบ วิธีการใช้งานนวัตกรรม
ข้อแนะนำการใช้งาน ข้อควรระวัง และประโยชน์

3.3 น้ำมันดอกว่านมหาทงส์ 100 %

4. แบบประเมินคุณภาพโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ ประกอบไปด้วย การประเมินคุณภาพ
6 ด้าน จำนวน 17 ข้อ โดยคำถามเป็นแบบให้เลือกตอบ เกณฑ์การให้คะแนนมี 2 ระดับ คือ ผ่าน ไม่ผ่าน
และมีช่องว่างให้แสดงความคิดเห็น ในการปรับปรุงโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ คือ ด้านรูปลักษณ์
โคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ ด้านการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ ด้านการใช้งาน
ขจัดบรรจุภัณฑ์น้ำมันกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ ด้านความคงทนของโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์
ด้านความคงตัวของน้ำมันกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ ด้านขจัดบรรจุภัณฑ์น้ำมันกลิ่นดอกว่านมหาทงส์

5. แบบประเมินความพึงพอใจ เพื่อประเมินความพึงพอใจของอาสาสมัครต่อการใช้งานโคมไฟ
โล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 คำถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของกลุ่มอาสาสมัคร เป็นคำถามที่ให้ผู้ตอบเลือกตอบ
เพียงคำตอบเดียว โดยลักษณะของแบบประเมิน เป็นแบบสอบถามปลายปิด (Close - Ended Question)
จำนวน 4 ข้อ

ส่วนที่ 2 คำถามเกี่ยวกับข้อมูลสุขภาพของกลุ่มอาสาสมัคร เป็นแบบมีหลายคำตอบให้เลือก
(Multiple Choice Questions) เป็นแบบสอบถามปลายเปิด (Open - Ended Questions) จำนวน 3 ข้อ

ส่วนที่ 3 แบบประเมินความพึงพอใจ ข้อคำถามมีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า
(Rating Scale) โดยให้เลือกตอบเพียงคำตอบเดียวในช่องที่ตรงกับความรู้สึกของผู้ตอบมากที่สุดจำนวน
15 ข้อ โดยถามในประเด็นเกี่ยวกับ

- ด้านรูปลักษณ์ 5 ข้อ
- ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน 6 ข้อ
- ด้านกลิ่น 2 ข้อ
- ด้านระยะเวลาการปล่อยกลิ่น 2 ข้อ

การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

1. ประเมินศักยภาพของยุงที่ใช้ในการทดสอบ โดยให้อาสาสมัคร 1 คน ยื่นมือเปล่าที่ไม่ได้ทา
สารใด ๆ เลย เข้าไปในกรงยุง แล้วนับจำนวนยุงที่ลงเกาะก้นคบนหลังมือภายใน 10 วินาที ถ้ามียุงเกาะบน
หลังมือของอาสาสมัครอย่างน้อย 2 ตัว ภายในเวลา 10 วินาที ถือว่ายุงในกรงมีศักยภาพในการกัดเพียงพอ
ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ

2. การทดสอบความตรงของเนื้อหา (Content Validity) คำถามที่ใช้ในการสนทนากลุ่ม
(Focus Group Discussion) แบบประเมินคุณภาพโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ และแบบประเมิน
ความพึงใจต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ เสนอผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญ
ด้านการทดสอบทางสุนทรียภาพ 1 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านการสร้างนวัตกรรม 1 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญด้านวิจัย
1 ท่าน โดยผลการตรวจสอบคุณภาพพบว่า คำถามที่ใช้ในการสนทนากลุ่ม แบบประเมินคุณภาพโคมไฟ
โล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์ และแบบประเมินความพึงใจต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาทงส์
ทุกข้อคำถาม มีค่ามากกว่า 0.5 ทุกข้อ จึงไม่มีการปรับปรุงข้อคำถาม

3. การตรวจสอบเครื่องมือโดยการวัดค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ผู้ศึกษานำแบบประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มาทดสอบคุณภาพ โดยใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์อัลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) [6] ในกลุ่ม 30 คน แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ค่าความเชื่อมั่นได้ ค่าความเที่ยงที่ได้เท่ากับ 0.82

4. การทดสอบแบบประเมินคุณภาพโคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 คน ประเมินเกณฑ์ลักษณะแต่ละด้านของผลิตภัณฑ์ทั้ง 6 ด้าน พบว่าผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 คนให้ความเห็นว่าลักษณะทั้ง 6 ด้าน ผ่าน จึงไม่ได้มีการปรับปรุงคุณภาพของโคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์

5. น้ำมันดอกว่านมหาหงส์ 100 % ผ่านการตรวจสอบและยืนยันน้ำมัน โดยบริษัทเคมีภัณฑ์

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ระยะที่ 1 ชั้นเตรียมการวิเคราะห์สภาพปัญหา

1) ศึกษาฤทธิ์ป้องกันยุงของน้ำมันดอกว่านมหาหงส์ด้วยเทคนิค Repellent Testing

1.1) ปรับภาวะทดสอบของห้องทดสอบให้มีอุณหภูมิ 24 - 28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 - 80 และความเข้มของแสง 200 - 300 ลักซ์

1.2) อาสาสมัครล้างมือและแขนให้สะอาดด้วยน้ำประปาและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ไม่มีกลิ่น แล้วเช็ดให้แห้งสนิท และในระหว่างการทดสอบหลีกเลี่ยงการใช้น้ำหอม ผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว เพื่อลดผลกระทบที่อาจมีต่อผลการวิเคราะห์

1.3) ใช้ดินสอสำหรับเขียนผิวหนังขีดกำหนดพื้นที่ทดสอบขนาด 3 x 10 เซนติเมตร บนผิวหนังหน้าแขนทดสอบของอาสาสมัคร จำนวน 3 คน แล้วทาน้ำมันที่มีปริมาตร 100 ไมโครลิตร

1.4) อาสาสมัครยื่นแขนทดสอบเข้าไปในกรงยุงทดสอบที่มียุงลายบ้านหรือยุงลายสวนจำนวน 250 ตัว นับจำนวนยุงที่เกาะและกัดภายในเวลา 3 นาที

1.5) พักเป็นเวลา 30 นาที แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 1.4 ทำซ้ำทุก ๆ 30 นาที จนถึงช่วงเวลาที่มียุงตัวที่ 2 เกาะและกัดผิวหนังบริเวณพื้นที่ทดสอบที่ใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ นับเป็นช่วงเวลาที่ใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดังกล่าวทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันยุงกัด หรือเมื่อระยะเวลาทดสอบครบ 7 ชั่วโมง

2) วิเคราะห์สถานการณ์และสภาพปัญหา

2.1) ประสานกลุ่มตัวแทนนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุขกาญจนาภิเษก จังหวัดนนทบุรี ที่เคยมีประสบการณ์ในการใช้ผลิตภัณฑ์ไต้ยุง

2.2) สร้างแนวคำถามเพื่อสนทนากลุ่มและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือก่อนนำไปใช้

2.3) วิเคราะห์สถานการณ์และสภาพปัญหาการใช้ผลิตภัณฑ์ไต้ยุงรูปแบบเดิมในกลุ่มนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุขกาญจนาภิเษก จังหวัดนนทบุรี จำนวน 8 คน โดยการใช้ Focus Group Discussion (FGD)

ระยะที่ 2 ชั้นพัฒนาโคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์

1) ออกแบบโคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์โดยผู้วิจัย โดยใช้ข้อมูลจากการสนทนากลุ่มและผลศึกษาฤทธิ์ป้องกันยุงของน้ำมันดอกว่านมหาหงส์ด้วยเทคนิค Repellent Testing

2) ตรวจสอบความถูกต้อง และรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบโดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน ก่อนนำไปสร้างและพัฒนาผลิตภัณฑ์

3) สร้างโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์สำหรับนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก จังหวัดนนทบุรี

4) สร้างแบบประเมินคุณภาพของโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

5) ประเมินคุณภาพของโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน และปรับปรุงคุณภาพของโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ตามความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิก่อนนำไปใช้

6) สร้างแบบประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

7) ประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ก่อนนำไปใช้

8) ปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาของแบบประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ ตามข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ ก่อนนำไปใช้

ระยะที่ 3 ขั้นตอนการทดลองใช้

1) ชี้แจงอาสาสมัครถึงขั้นตอน วัตถุประสงค์ ของงานวิจัย

2) ให้อาสาสมัครนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก จังหวัดนนทบุรี ทดลองใช้โคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ โดยการนำโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ไปไว้ในห้องพักของอาสาสมัคร เป็นเวลา 5 วัน เพื่อทดสอบความพึงพอใจของอาสาสมัครต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

ระยะที่ 4 ขั้นตอนประเมินผล

1) เมื่อครบกำหนดการทดลองให้ผู้ทดลองใช้ประเมินความพึงพอใจ ต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

2) ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

3) วิเคราะห์ผลของแบบประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก ต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของอาสาสมัคร และข้อมูลที่ใช้ในสถิติการแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแนวคำถามการสนทนากลุ่ม เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์และสภาพปัญหาของยุง และการใช้ผลิตภัณฑ์โล่ยุง ในนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุขกาญจนภิเษก จังหวัดนนทบุรีในปัจจุบัน โดยการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และสรุปออกมาเป็นประเด็นปัญหาและความต้องการของการพัฒนาโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์

3. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาอาสาสมัครต่อการใช้งานโคมไฟโล่ยุงกลิ้งดอกกว่านมหาหงส์ โดยหาค่าเฉลี่ย (\bar{X}) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

ผลการวิจัย

1. ศึกษาฤทธิ์ไล่ยุงของน้ำมันดอกว่านมหาหงส์
น้ำมันดอกว่านมหาหงส์ สามารถป้องกันยุงลาย (*Aedes aegypti* L.) ตอนกลางวันได้ 1.5 ชั่วโมง และป้องกันยุงรำคาญ (*Cutex quinquefasciatus* Say) ตอนกลางคืนได้ 4.5 ชั่วโมง

2. พัฒนาโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ แบ่งข้อมูลการวิจัยเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลจากการสนทนากลุ่มสำหรับการพัฒนาโคมไฟไล่ยุงจากกลิ่นดอกว่านมหาหงส์
กลุ่มตัวอย่างในการสนทนากลุ่ม มีการใช้ผลิตภัณฑ์ป้องกันยุงหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ในรูปแบบยาจุดกันยุง สเปรย์ป้องกันยุง โลชั่นป้องกันยุง เทียนหอมไล่ยุง ไม้ตุง เป็นต้น การใช้ผลิตภัณฑ์ไล่ยุงในแต่ละรูปแบบต่างมีปัญหาในการใช้ คือ มีส่วนผสมของสารเคมีจึงทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำให้สัิวคล้ำลงและระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดควันทําให้สูดดมสารเคมีเข้าไปในร่างกาย ปัจจัยในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ไล่ยุง คือ พัฒนาจากสารสกัดจากธรรมชาติ ไม่มีส่วนผสมของสารเคมี เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องสัมผัสกับผิวหนังผู้ใช้โดยตรง ไม่มีควัน แต่ส่งกลิ่นที่หอมผ่อนคลาย ไม่ส่งผลกระทบต่อผิวหนัง ระบบหายใจ ไม่ส่งผลให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมบรรยากาศภายในแหล่งที่พักอาศัย ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย มีประสิทธิภาพสามารถไล่ยุงได้นาน ใช้งานได้ง่ายสะดวกสบาย และมีลักษณะสวยงาม นำใช้สามารถใช้ตกแต่งบริเวณที่พักอาศัยได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ข้อสรุปที่จะพัฒนานวัตกรรมไล่ยุงจากว่านมหาหงส์ในรูปแบบโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ มีส่วนผสมของสารจากธรรมชาติ 100 % ไม่มีสารเคมี ง่ายต่อการใช้งาน ลดการสัมผัสกับผิวหนังผู้ใช้โดยตรงเพื่อป้องกันอาการแพ้และการระคายเคืองต่อผู้ใช้ รวมถึงมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงที่ดี และสามารถนำไปใช้ประดับตกแต่งแหล่งที่พักอาศัยได้

2.2 ผลิตภัณฑ์โคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์

นวัตกรรมไล่ยุงจากว่านมหาหงส์ผู้วิจัยได้ออกแบบให้อยู่ในรูปแบบโคมไฟไล่ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ ตัวโคมทำจากดินเผาที่มีความแข็งแรงและทนความร้อนสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ฉลุลายไทยสวยงามรอบตัวโคมทั้งใบ ส่วนบนของโคมไฟเป็นดินเผา รูปแองกกระทะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ไว้สำหรับหยคน้ำมันดอกว่านมหาหงส์ ฐานโคมไฟทำจากไม้เนื้อแข็งเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ปลั๊กเสียบต่อกับสายไฟที่มีสวิตช์เปิด - ปิด ความสว่าง 1 ระดับ สี Warm White สายไฟและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ประกอบได้มาตรฐาน CE Standard ทลอดไฟเป็นทลอดทังสเดนแบบเกลียว ขนาด 40 Watt/220 - 240 Volts ที่สามารถถอดเปลี่ยนทลอดไฟได้ง่าย ซึ่งสามารถซื้อได้ตามร้านค้าทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 1

น้ำมันดอกว่านมหาหงส์ 100 % (Pure Ginger Lily Oil) ที่มีลักษณะสีเหลืองใส เป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกชั้น มีกลิ่นที่หอมพึงประสงค์ มีระยะเวลาปลดปล่อยกลิ่นที่ใช้งานได้นาน บรรจุในขวดสีเขียวชาปริมาณ 15 มิลลิลิตร ที่สามารถเก็บรักษากลิ่นได้นาน ฝาปิดขวดอยู่ในรูปแบบทลอดหยदन้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2

คู่มือการใช้งาน ประกอบด้วย ขั้นตอนนวัตกรรม ส่วนประกอบ วิธีการใช้งานนวัตกรรม ข้อเสนอแนะการใช้งาน ข้อควรระวัง และประโยชน์



รูปที่ 1 โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์



รูปที่ 2 น้ำมันดอกว่านมหาหงส์

3. ศึกษาความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์

3.1 ข้อมูลทั่วไปของอาสาสมัครในการทดลองใช้โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์
อาสาสมัคร เพศหญิง 24 คน (ร้อยละ 80) เพศชาย 6 คน (ร้อยละ 20) ช่วงอายุระหว่าง 18 - 22 ปี จำนวน 25 คน (ร้อยละ 83.3) อายุระหว่าง 23 - 27 ปี จำนวน 5 คน (ร้อยละ 16.7)

3.2 ความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์
ระดับความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ของนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก ในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.08 \pm 0.71$) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่าระดับความพึงพอใจต่อการใช้โคมไฟไต้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ด้านรูปลักษณะอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.21 \pm 0.52$) ด้านระยะเวลาปล่อยกลิ่นอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.17 \pm 0.54$) รองลงมาคือด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.06 \pm 0.48$) และด้านกลิ่นอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.88 \pm 0.71$) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย (\bar{X}) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และระดับความพึงพอใจของอาสาสมัครต่อการใช้โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์จำแนกเป็นรายด้านและรายข้อ

(n = 30)

รายการ	ความพึงพอใจ		
	(\bar{X})	(S.D.)	ระดับ
ด้านรูปลักษณะ			
1. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีรูปทรงที่สวยงามน่าใช้	4.47	0.57	มาก
2. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีสีที่สวยงามน่าใช้	4.13	0.73	มาก
3. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีขนาดที่เหมาะสม	4.20	0.61	มาก
4. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีความทนต่อการใช้งาน	3.97	0.76	มาก
5. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์เหมาะสำหรับติดตั้งในห้องขนาด 9 - 16 ตารางเมตร	4.30	0.70	มาก
รวม	4.21	0.52	มาก
ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน			
6. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์สะดวกต่อการใช้งาน	4.00	0.79	มาก
7. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ไม่ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ	4.17	0.75	มาก
8. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์กระจายกลิ่นได้ดีและทั่วถึง	3.77	0.90	มาก
9. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีแสงที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ไม่ระคายเคืองต่อดวงตา	3.97	0.61	มาก
10. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน	4.10	0.61	มาก
11. ขวดบรรจุกลิ่นน้ำมันกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ สามารถใช้งานได้สะดวก	4.40	0.62	มาก
รวม	4.06	0.48	มาก
ด้านกลิ่น			
12. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์ สามารถไล้ยุงได้	3.93	0.83	มาก
13. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีกลิ่นหอม	3.83	0.75	มาก
รวม	3.88	0.71	มาก
ด้านระยะเวลาปล่อยกลิ่น			
14. โคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์มีระยะเวลาปลดปล่อยกลิ่นใช้งานได้นาน	4.07	0.70	มาก
15. ท่านมีความพึงพอใจต่อโคมไฟไล้ยุงกลิ่นดอกว่านมหาหงส์	4.27	0.70	มาก
รวม	4.17	0.54	มาก
รวมทั้งหมด	4.08	0.71	มาก

การอภิปรายผล

ผลการศึกษาฤทธิ์ป้องกันยุงของน้ำมันดอกว่านมหาหงส์ พบว่าน้ำมันดอกว่านมหาหงส์สามารถป้องกันยุงลาย (*Aedes aegypti* L.) ตอนกลางวันได้ 1.5 ชั่วโมง และป้องกันยุงรำคาญ (*Cutex quinquefasciatus* Say) ตอนกลางคืนได้ 4.5 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำมันจากดอกว่านมหาหงส์มีสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ในการไล้ยุง

ได้แก่ (E) - β - ocimene (28.7%), Linalool (19.3 %) และ 1,8 - cineole (14.5 %) ซึ่งมีคุณสมบัติในการไล่ยุง [7] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tawatsin A และคณะ [8] ที่ได้ศึกษาผลการทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันกำจัดแมลงของโลชั่นในการป้องกันการกัดของยุงของน้ำมันจากเหง้ามหาหงส์พบว่าโลชั่นมหาหงส์สามารถป้องกันการกัดของยุงลายบ้านได้ 0.3 ชั่วโมง แต่โลชั่นมหาหงส์สามารถป้องกันการกัดของยุงรำคาญได้ 5.8 ชั่วโมง และโลชั่นมหาหงส์ป้องกันการกัดของยุงลายสวน (*Aedes albopictus*) ได้ 7.5 ชั่วโมง โลชั่นมหาหงส์ป้องกันการกัดของยุงก้นปล่อง (*Anopheles dirus*) ได้ 7.1 ชั่วโมง

โคมไฟไลยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวโคมทำจากดินเผาที่มีความแข็งแรงและทนความร้อนสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ฉลุลายไทยสวยงามรอบตัวโคมทั้งใบ ส่วนบนของโคมไฟเป็นดินเผารูปแองกระทะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร วัสดุสำหรับหยคน้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ ฐานโคมไฟทำจากไม้เนื้อแข็งเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ปลั๊กเสียบต่อกับสายไฟที่มีสวิตช์เปิด - ปิด ความสว่าง 1 ระดับ สี Warm White สายไฟและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ประกอบได้มาตรฐาน CE Standard หลอดไฟเป็นหลอดทั้งสแตนแบบเกลียว ขนาด 40 Watt/220 - 240 Volts ที่สามารถถอดเปลี่ยนหลอดไฟได้ง่าย ซึ่งสามารถซื้อได้ตามร้านค้าทั่วไป น้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ 100 % (Pure Ginger Lily Oil) ที่มีลักษณะสีเหลืองใส เป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกชั้น มีกลิ่นหอมพึงประสงค์ มีระยะเวลาปลดปล่อยกลิ่นที่ใช้งานได้นาน บรรจุในขวดสีเขียวชาปริมาณ 15 มิลลิลิตร สามารถเก็บรักษากลิ่นได้นาน ผาปิดขวดอยู่ในรูปแบบหลอดหยคน้ำมันไม่มีส่วนผสมสารเคมี ง่ายต่อการใช้งาน ลดการสัมผัสกับผิวผู้ใช้โดยตรงเพื่อป้องกันอาการแพ้และการระคายเคืองต่อผู้ใช้ รวมถึงมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงที่ดี และสามารถนำไปใช้ประดับตกแต่งแหล่งที่พักอาศัยได้ นอกจากนี้ยังมีคู่มือการใช้งาน นวัตกรรมที่มีเนื้อหาประกอบด้วย วิธีการใช้งานนวัตกรรม ข้อเสนอแนะการใช้งาน ข้อควรระวัง และประโยชน์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของ [9] ที่ว่าด้วยลักษณะนวัตกรรมที่ดี ต้องมีความเหมาะสม สอดคล้องกับสภาพปัญหาหรือความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย มีความเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย การใช้งานง่ายสะดวก ไม่ซับซ้อน

ความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟไลยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์สำหรับนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก จังหวัดนนทบุรี พบว่านักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก มีระดับความพึงพอใจต่อการใช้งานโคมไฟไลยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์ในภาพรวมอยู่ในระดับมาก อธิบายได้ว่าเนื่องจากรูปลักษณ์โคมไฟไลยุงกลิ่นดอกกว่านมหาหงส์มีรูปทรง ขนาด สี สีสันที่มีความสวยงามน่าใช้ ไม่ต้องสัมผัสกับผิวผู้ใช้โดยตรง และยังมีความคงทนต่อการใช้งาน เหมาะสำหรับตกแต่งในห้องขนาด 9 - 16 ตารางเมตร ไม่มีควันแต่ส่งกลิ่นที่หอมผ่อนคลาย ใช้งานได้ง่าย สะดวกสบาย และสามารถใช้ตกแต่งบริเวณที่พักอาศัยได้ ทำให้อาสาสมัครมีความพึงพอใจมากที่สุด ด้านกลิ่นของน้ำมันดอกกว่านมหาหงส์ เนื่องจากใช้สารสกัดจากธรรมชาติ ไม่มีส่วนผสมของสารเคมี ไม่ผสมสารแต่งกลิ่นสังเคราะห์ ทำให้มีกลิ่นหอมเฉพาะตัวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชอบของแต่ละบุคคล รวมถึงการกระจายของกลิ่นไม่ค่อยทั่วถึงทำให้ความพึงพอใจด้านกลิ่นน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] ได้ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ป้องกันยุงจากน้ำมันมหาหงส์สำหรับนักศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนภิเษก ในรูปแบบของสเปรย์ที่มีส่วนผสมของสารธรรมชาติ 100 % ไม่มีสารเคมี พบว่าเป็นที่พึงพอใจของนักศึกษาทั้งในด้านรูปลักษณ์ ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ด้านกลิ่น และด้านระยะเวลาปลดปล่อยกลิ่น

การนำผลการวิจัยไปใช้

1. จากการศึกษาครั้งนี้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการป้องกันยุงของน้ำมันดอกมหาหงส์ จึงสามารถนำผลของการวิจัยไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป
2. จากการศึกษาครั้งนี้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความปลอดภัยในการช่วยกระจายกลิ่นน้ำมัน จึงควรนำไปผลิตในทางอุตสาหกรรมต่อไป เพื่อเป็นทางเลือกในการป้องกันยุงแก่ประชาชน

References

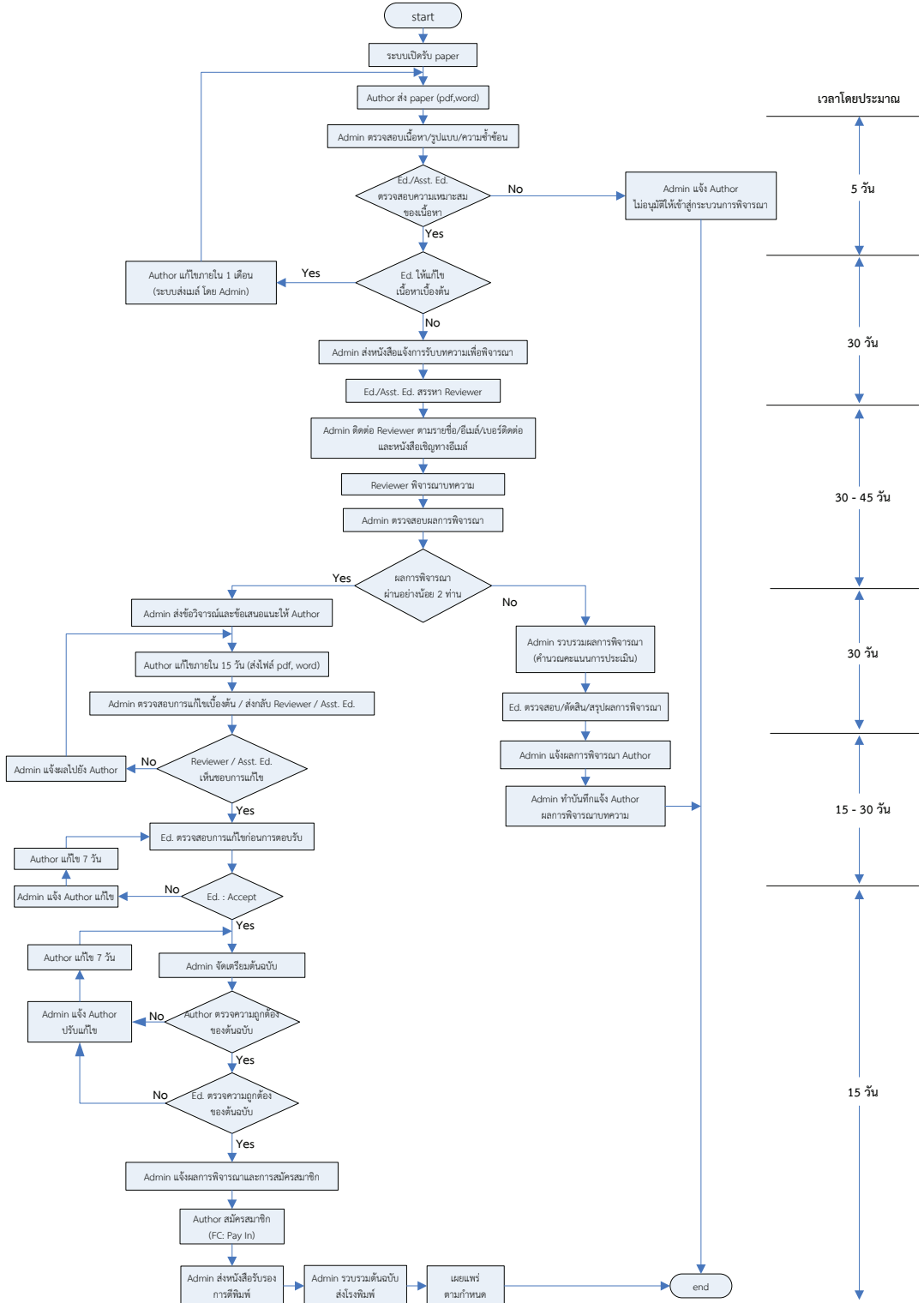
- [1] Bureau of Epidemiology. (2016). Weekly Epidemiological Surveillance Report. **Bureau of Epidemiology Journal**. Vol. 47, No. 46, pp. 177-184
- [2] Saelim, V., Brogdon, W. G., Rojanapremasuk, J., Suvannadaba, S., Pandii, W., Jones, J. W., and Sithiprasasna, R. (2005). Bottle and Biochemical Assays on Temephos Resistance in *Aedes Aegypti* in Thailand. **The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health**. Vol. 36, No. 2, pp. 417-425
- [3] Chareonviriyaphap, T. (2016). **Herbal Vetiver Herbs Innovation**. Bangkok: The Thailand Research Fund
- [4] Faculty of Pharmaceutical Sciences. (2017). **Herbal Database Faculty of Pharmaceutical Sciences Ubon Ratchathani University**. Access (26 February 2017). Available (<http://www.phargarden.com/main.php?action=viewpage&pid=86library/guide.html>)
- [5] Laoruang, N. and Siriyan, P. (2017). **Development of Mosquito Protection Products from Ginger Lily For Students of Kanchanabhishek Institute of Medical and Public Health Technology**. (Thesis). Kanchanabhishek Institute of Medical and Public Health Technology
- [6] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests. **Psychometrika**. Vol. 16, No. 3, pp. 297-334. DOI: 10.1007/BF02310555
- [7] Disnelys, B., Jorge, P., and Diego, M. (2011). Floral Scent Composition in *Hedychium coronarium* J. Koenig Analyzed by SPME. **Journal of Essential Oil Research**. Vol. 23, No. 3, pp. 64-67. DOI: 10.1080/10412905.2011.9700460
- [8] Tawatsin, A., Asavadachanukorn, P., Thavara, U., Wongsinkongman, P., Dansidhl, J., Boonruad, P., Chavalittumrong, P., Soonthornchareonnon, N., Komalamisra, N., and Mulla, M. (2006). Repellency of Essential Oils Extracted from Plants in Thailand Against Four Mosquito Vectors (Diptera: Culicidae) and Oviposition Deterrent Effects Against *aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). **The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health**. Vol. 37, No. 5, pp. 915-931
- [9] Piboon, S. (2008). **Research Methodology for Research Development for Enterprise Development**. Nonthaburi: Chatupon Design



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 รวมถึงไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ

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

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

- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า

- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman

- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8

- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า

- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย

ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย

- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14

- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 13

ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 11

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

“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11

- ชื่อตาราง

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

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

- ชื่อรูปภาพ

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

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

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

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

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

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

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

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

ข. ส่วนเนื้อหา

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

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

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

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

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

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

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

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

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

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

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

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

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

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

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

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference list)

1) หนังสือ

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

ตัวอย่างเช่น

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

2) หนังสือแปล

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

ตัวอย่างเช่น

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

3) บทความหรือบทในหนังสือ

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

ตัวอย่างเช่น

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

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

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

ตัวอย่างเช่น

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

5) วารสาร

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

ตัวอย่างเช่น

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

6) บทความในหนังสือพิมพ์

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

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

7) บทความในสารานุกรม

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

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

8) วิทยานิพนธ์

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

ตัวอย่างเช่น

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

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

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

ตัวอย่างเช่น

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

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

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

ตัวอย่างเช่น

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

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

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

ตัวอย่างเช่น

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

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

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



(ก) รูปภูมุน้อยที่ 1



(ข) รูปภูมุน้อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

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

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

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

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

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

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

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



หมายเลขสมาชิก
.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง บทความวิจัย บทความวิชาการ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

วิศวกรรมศาสตร์ ENG เกษตรศาสตร์ AGR สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

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

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

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

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

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

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

(.....)

บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีसान



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีसान ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่

.....โทรศัพท์.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

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

โดย สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

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

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

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร

(.....)



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

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

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชภัฏนครราชสีมา



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 13 No. 1 January - April 2020



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

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

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